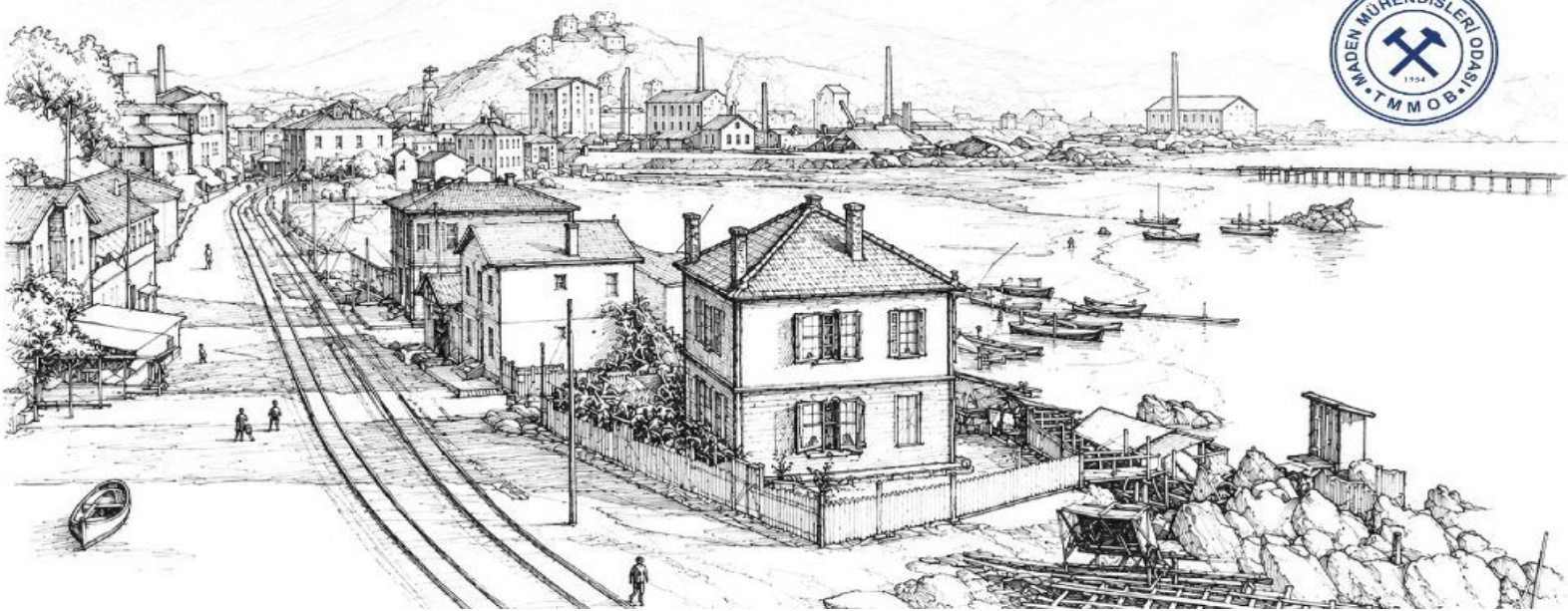
KÖMÜR COAL 2026 TÜRKİYE

Türkiye 24. Uluslararası Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı
Proceedings of the 24th International Coal Congress of Türkiye

Editörler/Editors

Doç. Dr. Utku SAKIZ, Dr. Emre GÜNAY

23-24-25
Eylül/September
Zonguldak



TÜRKİYE 24. ULUSLARARASI KÖMÜR KONGRESİ VE SERGİSİ BİLDİRİLER KİTABI

Proceedings of the
24th International Coal Congress and Exhibition of Türkiye

23-24-25 Eylül / *September* 2026

Zonguldak, Türkiye

Editörler / *Editors*

Doç. Dr. Utku SAKIZ

Dr. Emre GÜNAY

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI ZONGULDAK ŞUBESİ

UCTEA CHAMBER of MINING ENGINEERING ZONGULDAK BRANCH

Türkiye 24. Uluslararası Kömür Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı
Proceedings of the 24th International Coal Congress and Exhibition of Türkiye

23-24-25 Eylül / September 2026
Zonguldak, Türkiye

© 2026 TMMOB Maden Mühendisleri Odası Zonguldak Şubesi
Bu bildiriler kitabının yayım hakkı TMMOB Maden Mühendisleri Odası Zonguldak Şubesine aittir. Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

All right reserved © 2026
No parts of this book may be reproduced or published in any form without written permission of the UCTEA the Zonguldak Branch of Chamber of Mining Engineers of Türkiye.

ISBN : 978-605-01-1778-3
Kapak Tasarımı : Dr. Çağlar UZUN
Editörler : Dr. Utku SAKIZ/Dr. Emre GÜNAY
Dizgi : Dr. Utku SAKIZ/Dr. Emre GÜNAY
Web : https://komurturkiye.org.tr/
Web Editör : Dr. Alaaddin ÇAKIR

İsteme Adresi : TMMOB Maden Mühendisleri Odası Zonguldak Şubesi
Liman Cad. No: 25, 67100 / ZONGULDAK
Tel : +90 (372) 251 13 55 - +90 (372) 259 45 52
Faks : +90 (372) 253 10 80
Maden Müh. Odası Web : http://www.maden.org.tr
Maden Müh. Odası E-Posta : zonguldak@maden.org.tr

ÖNSÖZ

Türkiye 24. Uluslararası Kömür Kongresi ve Sergisi (KÖMÜR TÜRKİYE 2026) Bildiriler Kitabı'nı yazarlarımızın, katılımcılarımızın ve sektörün tüm paydaşlarının kullanımına sunmaktan büyük bir gurur ve memnuniyet duyuyoruz. Bu kitabın, kömür sektöründeki güncel gelişmeleri, yenilikçi yaklaşımları ve bilimsel araştırmaları bir araya getiren önemli bir başvuru kaynağı olacağına inanıyoruz. Hazırlanan bu çalışmanın, hem akademik çevrelere hem de sektörde görev yapan profesyonellere değerli katkılar sunmasını temenni ediyoruz.

1978 yılından bu yana iki yılda bir kesintisiz olarak düzenlenen Kömür Kongreleri, köklü geçmişiyle sektörün ve akademik dünyanın en kapsamlı bilgi paylaşım ve etkileşim platformlarından biri olmayı sürdürmektedir. Bu kapsamda Kongre, yurt içinden ve yurt dışından çok sayıda seçkin bilim insanını, araştırmacıyı, uzmanı ve sektör temsilcisini üç gün boyunca bir araya getirmiştir. Bu yıl gerçekleştirilen etkinlikte kömür sektörünün mevcut durumu, karşı karşıya bulunduğu sorunlar ve geleceğe yönelik çözüm önerileri; bilimsel, teknik, çevresel, sosyal ve hukuki boyutlarıyla ele alınmış ve kapsamlı biçimde tartışılmıştır.

Kongrede, 100 yerli ve 11 yabancı araştırmacının hazırladığı, alanında uzman bilim insanları tarafından titizlikle değerlendirilen 43 bildiri sunulmuş ve bu çalışmaların tamamına Bildiriler Kitabı'nda yer verilmiştir. Ayrıca etkinlik kapsamında uzman akademisyenler tarafından üç özel sunum gerçekleştirilmiş; "Kömürün Akademik Hafızası" başlıklı bir söyleşinin yanı sıra "Kömürün Sonu mu? Küresel İklim Politikaları ve Türkiye'nin Enerji Arz Güvenliği" ile "Maden Facialarının Anatomisi: Nedenler, Sektöre Etkileri ve Sosyal Travmalar" başlıklı iki panel de düzenlenmiştir. Söz konusu etkinlikler, sektörün güncel meselelerinin farklı perspektiflerden değerlendirilmesine önemli katkılar sağlamıştır.

Günümüzün gelişmiş ekonomileri, sanayileşme süreçlerinde başta kömür olmak üzere fosil yakıtlardan büyük ölçüde yararlanmışlardır. Son yıllarda küresel ısınma ve iklim değişikliği kaynaklı kaygılar nedeniyle birçok ülke kömür tüketimini azaltmaya yönelik politikalar geliştirmekte ve bu doğrultuda çeşitli strateji belgeleri ile uluslararası girişimler hayata geçirilmektedir. Avrupa Birliği başta olmak üzere pek çok ülkede bu dönüşüm sürecine yönelik kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir. Ancak enerji arz güvenliğini etkileyen jeopolitik gelişmeler, enerji politikalarında zaman zaman önemli değişiklikleri de beraberinde getirmektedir. Rusya-Ukrayna savaşı ile ABD ve İsrail'in İran'a yönelik saldırılarının enerji piyasalarında yarattığı etkiler, fosil yakıtların kısa ve orta vadede küresel enerji sisteminden tamamen çıkarılmasının kolay olmayacağını göstermiştir. Bu gelişmeler, ülkelerin yerli ve güvenilir enerji kaynaklarına sahip olmasının stratejik önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Dünya genelindeki yaygın rezerv dağılımı dikkate alındığında kömür, enerji arz güvenliği açısından fosil yakıtlar arasında önemli bir seçenek olarak değerlendirilmeye devam etmektedir. Bu nedenle birçok ülkede kömür üretiminin artırılması ve daha önce kapatılmış bazı kömür ocakları ile termik santrallerin yeniden devreye alınması yönündeki tartışmalar gündemdeki yerini korumaktadır.

Özellikle son yirmi yılda artan çevresel kaygılar ve iklim değişikliği tartışmaları, kömür başta olmak üzere fosil yakıtların geleceğine yönelik değerlendirmeleri yoğunlaştırmıştır. Her ne kadar kömürün enerji sistemleri içerisindeki öneminin azalacağı yönünde görüşler sıklıkla dile getirilse de mevcut istatistikler, kömür tüketiminin mutlak değerler açısından artış eğilimini sürdürdüğünü göstermektedir. Kömürün birincil enerji kaynakları içindeki payı göreceli olarak azalmakla birlikte, toplam tüketim miktarı artmaya devam etmektedir. Özellikle ülkemizde kömür üretiminin tüketimi karşılayamadığı ve ısıl değer bazında taşkömüründe yaklaşık %98, termik santral yakıtı dâhil

edildiğinde ise %60 oranında ithalata bağımlı olduğumuz dikkate alındığında, kömür üretiminden bütünüyle vazgeçilmesinin; ekonomik, sosyal ve istihdam boyutlarında ciddi sonuçlar doğurabileceği açıktır.

Bununla birlikte, bazı kömür işletmelerinin doğaya karşı hoyratça müdahalelerini ve termik santrallerden kaynaklanan emisyonların yol açtığı çevresel sorunları göz ardı etmek mümkün değildir. Bu nedenle, yöre halkının yaşam alanlarını ve doğal kaynaklarımızı koruyan üretim anlayışının benimsenmesi; çevre dostu teknolojilerin en ileri düzeyde uygulanması ve etkin biçimde denetlenmesi, geleceğimiz için vazgeçilmez bir gerekliliktir.

Sektörün en önemli sorunlarından biri de iş sağlığı ve güvenliği alanında yaşanan eksikliklerdir. Akıl almaz nedenlerle ölümlü iş kazaları yaşanmaya devam etmektedir. Bu durum sektörün tüm paydaşlarının "sıfır ölümlü kaza" hedefi doğrultusunda ortak bir sorumluluk anlayışıyla hareket etmesini gerekli kılmaktadır. Mevzuat tartışmalarının ötesine geçilerek somut çözümlere odaklanılması büyük önem taşımaktadır. Başta işverenler olmak üzere; kamu kurumları, üniversiteler, sendikalar, meslek örgütleri ve tüm bileşenler eksikliklerin giderilmesi için bir seferberlik içinde olmalıdır. Kamu otoritesi, tüm paydaşların katkılarıyla mevzuatı güncellemelidir. Denetim sistemi mevzuatta yer alan sorunlu ifadelerden yapay sorunlar yaratmak yerine gerçek riskleri ve yapısal sorunları hedef alan etkin bir yaklaşım benimsemelidir. Aksi halde sektör, küresel yaptırımlardan daha çok kendi iç sorunları nedeniyle üretemez bir noktaya gelecektir.

Kongreye değerli araştırmaları ve bilimsel katkılarıyla destek veren tüm yazarlarımıza; bildirilerin değerlendirilmesinde görev alan hakemlerimize, oturum başkanlarımıza, panel konuşmacılarımıza ve moderatörlerimize içten teşekkürlerimizi sunuyoruz. Ayrıca etkinliğin gerçekleştirilmesine katkı sağlayan sponsor kuruluşlara ve maden makineleri sergisine katılan tüm firmalara desteklerinden dolayı şükranlarımızı ifade ediyoruz.

Son olarak, Kongrenin başarıyla gerçekleştirilmesi için büyük özveri ve emek gösteren Yürütme Kurulu ve Danışma Kurulu üyelerine; organizasyon sürecinde gönüllü olarak görev alan öğrencilerimize ve meslektaşlarımıza teşekkür etmeyi bir görev biliyoruz. Türkiye 24. Uluslararası Kömür Kongresi ve Sergisi'nin sektör, akademi ve kamuoyu açısından verimli sonuçlar doğurmasını; burada paylaşılan bilgi ve deneyimlerin gelecekteki bilimsel çalışmalara, teknolojik gelişmelere ve sektörel uygulamalara ışık tutmasını diliyoruz.

Levent YAĞCIOĞLU

TMMOB Maden Mühendisleri Odası
Zonguldak Şubesi Başkanı

Nevzat ÜNLÜ

Türkiye 24. Uluslararası Kömür Kongresi ve Sergisi
Yürütme Kurulu Başkanı

PREFACE

It is with great pride and satisfaction that we present the Proceedings of the **24th International Coal Congress and Exhibition of Türkiye (COAL TÜRKİYE 2026)** to our authors, participants, and all stakeholders of the coal industry. We believe that this volume will serve as an important reference source by bringing together current developments, innovative approaches, and scientific research in the coal sector. We hope that this work will provide valuable contributions to both the academic community and professionals working within the industry.

Since 1978, the Coal Congresses, organized biennially without interruption, have continued to serve as one of the most comprehensive platforms for knowledge sharing and interaction within both the industry and academia. In this context, the Congress has brought together numerous distinguished scientists, researchers, experts, and industry representatives from Türkiye and abroad over a three-day period. During this year's event, the current state of the coal sector, the challenges it faces, and potential solutions for the future were examined and discussed comprehensively from scientific, technical, environmental, social, and legal perspectives.

At the Congress, 43 papers prepared by 100 domestic and 11 international researchers were presented following a rigorous peer-review process conducted by experts in the field. All of these contributions have been included in this Proceedings Book. In addition, three special presentations were delivered by distinguished academics. Furthermore, a panel discussion entitled *"Is This the End of Coal? Global Climate Policies and Türkiye's Energy Supply Security"* and another entitled *"The Anatomy of Mining Disasters: Causes, Sectoral Impacts, and Social Traumas"* were organized, alongside a special session entitled *"The Academic Memory of Coal."* These events provided valuable opportunities for evaluating the sector's contemporary challenges from diverse perspectives.

Today’s advanced economies have relied heavily on fossil fuels, particularly coal, throughout their industrialization processes. In recent years, concerns related to global warming and climate change have led many countries to develop policies aimed at reducing coal consumption, supported by various strategic documents and international initiatives. Extensive efforts toward this energy transition are being undertaken, particularly within the European Union. However, geopolitical developments affecting energy supply security have at times prompted significant shifts in energy policies. The impacts of the Russia-Ukraine war, together with military actions by the United States and Israel against Iran, on global energy markets have demonstrated that the complete removal of fossil fuels from the global energy system in the short and medium term is unlikely to be achieved easily. These developments have once again highlighted the strategic importance of possessing secure and domestic energy resources. Considering its widespread global reserve distribution, coal continues to be regarded as an important option among fossil fuels for ensuring energy supply security. Consequently, discussions concerning the expansion of coal production and the recommissioning of previously closed coal mines and coal-fired power plants remain on the agenda in many countries.

Particularly over the past two decades, growing environmental concerns and debates surrounding climate change have intensified discussions regarding the future of fossil fuels, especially coal. Although it is frequently argued that coal's significance within global energy systems will gradually decline, current statistics indicate that coal consumption continues to increase in absolute terms. While coal's relative share among primary energy resources may be decreasing, total consumption volumes continue to rise. In Türkiye, where domestic coal production is insufficient to meet demand and import dependency reaches approximately 98% for hard coal on a calorific value basis and around 60% when thermal power plant fuels are included, it is evident that abandoning coal production entirely could result in serious economic, social, and employment-related consequences.

Nevertheless, it is impossible to overlook the environmental problems caused by certain coal-mining operations through unsustainable interventions in natural ecosystems, as well as the emissions generated by coal-fired power plants. For this reason, adopting production approaches that protect local communities' living environments and natural resources, implementing environmentally friendly technologies at the highest possible standards, and ensuring their effective monitoring and enforcement are indispensable requirements for a sustainable future.

One of the most significant challenges facing the sector remains the shortcomings in occupational health and safety. Fatal workplace accidents continue to occur for reasons that are difficult to justify. This reality necessitates a shared commitment among all stakeholders toward the objective of achieving *zero fatal accidents*. Moving beyond debates focused solely on regulatory issues and concentrating on practical solutions is of critical importance. Employers, public institutions, universities, labor unions, professional organizations, and all other stakeholders must work collectively to eliminate existing deficiencies. Public authorities should update legislation through inclusive collaboration with all relevant parties. Likewise, inspection systems should adopt an effective approach that targets genuine risks and structural problems, rather than generating artificial issues arising from problematic interpretations of regulatory provisions. Otherwise, the sector may find itself unable to sustain production due to its own internal challenges rather than external pressures or global constraints.

We would like to express our sincere gratitude to all authors who contributed to the Congress through their valuable research and scientific contributions; to the reviewers who evaluated the papers; to the session chairs, panelists, and moderators who participated in the scientific program. We also extend our appreciation to the sponsoring organizations and to all companies that participated in the mining machinery exhibition for their valuable support.

Finally, we consider it a duty to thank the members of the Executive Committee and the Advisory Committee, whose dedication and hard work were instrumental in the successful organization of the Congress, as well as the students and colleagues who volunteered throughout the organizational process. We sincerely hope that the **24th International Coal Congress and Exhibition of Türkiye** will yield productive outcomes for the industry, academia, and the public, and that the knowledge and experience shared during the event will serve as a source of inspiration for future scientific research, technological advancements, and industrial applications.

Levent YAĞCIOĞLU

President of UCTEA the Zonguldak Branch of Chamber of Mining Engineering

Nevzat ÜNLÜ

Chairman of the Executive Committee of the 24th International Coal Congress and Exhibition of Türkiye

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI YÖNETİM KURULU

UCTEA DIRECTORIAL BOARD OF CHAMBER OF MINING ENGINEERS

Başkan / Chairman	: Ayhan YÜKSEL
II. Başkan / II. Chairman	: Deniz Şahin ÇELİK
Yazman / Secretary	: Necmi ERGİN
Sayman / Treasurer	: Mehmet ZAMAN
Üyeler / Members	: Dilan OLAĞAN TUNA
	Fatih TÜTÜNCÜ
	Baran GEÇMEZ

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI

ZONGULDAK ŞUBESİ YÖNETİM KURULU

UCTEA DIRECTORIAL BOARD OF ZONGULDAK BRANCH

OF CHAMBER OF MINING ENGINEERS

Başkan / Chairman	: Levent YAĞCIOĞLU
II. Başkan / II. Chairman	: Hanefi ORUÇ
Yazman / Secretary	: Doç. Dr. Serdar YILMAZ
Sayman / Treasurer	: Dinçer ACUN
Üyeler / Members	: Erhan BAKAN
	Sadık SARIMEHMET
	Ferdi YILDIRIM

KONGRE YÜRÜTME KURULU

EXECUTIVE COMMITTEE OF THE CONGRESS

Başkan / President : Nevzat ÜNLÜ

Bşk. Yrd. / Vice President : Hanefi ORUÇ

Bşk. Yrd. / Vice President : Dinçer ACUN

Yazman / Secretary : Ceyhun BARUTCUOĞLU

Sayman / Treasurer : Pınar NURCANLI

Üyeler / Members : Doç. Dr. Utku SAKIZ

Dr. Alaaddin ÇAKIR

Dr. Emre GÜNAY

Serhat KALMA

Yeşim Didem CANBULAT

Aygün EKİCİ

İlhan ÇOLAK

Kubilay YILDIRIM

Muammer YILMAZ

KONGRE DANIŞMA KURULU

ADVISORY COMMITTEE OF THE CONGRESS

Prof. Dr. Abdullah Ekrem YÜCE
Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Prof. Dr. Ayşe Dilek CUHADAROĞLU
Prof. Dr. Hasan GERÇEK
Prof. Dr. İhsan TOROĞLU
Prof. Dr. Kemal BARIŞ
Prof. Dr. Melih GENİŞ
Prof. Dr. Nuri Ali AKÇIN
Prof. Dr. Okan SU
Prof. Dr. Sait KIZGUT
Prof. Dr. Tuğrul ÜNLÜ
Prof. Dr. Ümit ÖZER
Prof. Dr. Vedat DİDARİ
Prof. Dr. Yadigâr Vasfi MÜFTÜOĞLU
Prof. Dr. Yadigâr Vasfi MÜFTÜOĞLU
Doç. Dr. Özgür YILMAZ
Doç. Dr. Serdar YILMAZ
Dr. Erdoğan KAYMAKÇI
Ayhan YÜKSEL
Aykut AKDEMİR
Bülent ZERENGÖK
Çağlar ÖZTÜRK
Enver KARAÇAM
Hüsnü MEYDAN
Kemal Reşit KUTLU
Levent YAĞCIOĞLU
Melih BAŞÖREN
Nuri ALPASLAN

BİLİMSEL KURUL

SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Prof. Dr. Ali Ayhan SİRKECİ
Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ
Prof. Dr. Ayşe Dilek CUHADAROĞLU
Prof. Dr. Bekir GENÇ
Prof. Dr. Cengiz KARAGÜZEL
Prof. Dr. Cevat Özgen KARACA
Prof. Dr. Fatih BAYRAM
Prof. Dr. Fatma ARSLAN
Prof. Dr. HamidReza NASSERY
Prof. Dr. Hasan HACIFAZLIOĞLU
Prof. Dr. İhsan TOROĞLU
Prof. Dr. İsmail Sedat BÜYÜKSAĞIŞ
Prof. Dr. Kemal BARIŞ
Prof. Dr. Kemajl ZEQIRI
Prof. Dr. Marwan AL HEIB
Prof. Dr. Melih GENİŞ
Prof. Dr. Mustafa Eyyüp EYYÜBOĞLU
Prof. Dr. Mustafa ÖNDER
Prof. Dr. Nuri Ali AKÇIN
Prof. Dr. Okan SU
Prof. Dr. Olgay YARALI
Prof. Dr. Raşit ALTINDAĞ
Prof. Dr. Sait KIZGUT
Prof. Dr. Suphi ÜNAL
Prof. Dr. Tuğrul ÜNLÜ
Prof. Dr. Vedat DİDARİ
Doç. Dr. Esma KAHRAMAN
Doç. Dr. Fırat ATALAY
Doç. Dr. İlknur EROL
Doç. Dr. Mehmet BİLEN
Doç. Dr. Mustafa ÖZER
Doç. Dr. Öykü BİLGİN
Doç. Dr. Özgür YILMAZ
Doç. Dr. Serdar YILMAZ
Doç. Dr. Utku SAKIZ
Dr. Alaaddin ÇAKIR
Dr. Barış AKKAYA
Dr. Behzat Gökçen DEMİR
Dr. Emre GÜNAY
Dr. Emrullah KIPÇAK
Dr. Erdoğan KAYMAKÇI
Dr. Gzim IBISHI
Dr. Mahmut Suat DELİBALTA
Dr. Nejat TAMZOK
Dr. Seda AKDUMAN
Dr. Sibel TERZİ KAHRAMAN
Dr. Uğur DEMİR
Aygün EKİCİ
Çağatay YILMAZ
Dinçer ACUN
Juray SVORC
Levent YAĞCIOĞLU
Muharrem TORALIOĞLU
Nevzat ÜNLÜ
Ömer GÜNAY
Pelin SAKIZ
Selami LELOĞLU
Štefan ZELENÁK

Bildiriler en az iki hakem değerlendirmesinden geçmiştir.
Papers has been sent to at least two referees.

MADEN MAKİNALARI VE DONANIMI SERGİSİNE KATILAN KURUM VE KURULUŞLAR

ESTABLISHMENTS AND COMPANIES PARTICIPATING IN THE EXHIBITION OF MINING MACHINERY

AKSA JENERATÖR
ALAGRUP MİMARLIK MÜHENDİSLİK LTD. ŞTİ.
ALBACORE MADENCİLİK SANAYİ VE TİCARET LTD. ŞTİ.
ARKOÇ MADEN MAKİNALARI LTD. ŞTİ.
DOU CONTROL MADEN VE MAKİNE SAN.TİC.LTD.ŞTİ
ENG MİNERAL
ERA GROUP HAVALANDIRMA EKİPMANLARI VE DIŞ TİCARET A.Ş.
GEOTRA MAKİNE LTD. ŞTİ.
İNMAR ULUSLARARASI PAZARLAMA MADENCİLİK LTD. ŞTİ.
KAPEKS ÜRETİM PATLAYICI MADDELER TİCARET LTD. ŞTİ.
KIRLIOĞLU KİMYA SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
LABRİS MADEN VE MAKİNA SANAYİ A.Ş.
MEPA İŞ GÜVENLİĞİ TEKNİK MALZEME PAZARLAMA TİCARET LTD. ŞTİ.
MTM MAKİNA TİCARET MÜMESSİLLİK MÜŞAVİRLİK PETROL LOJİSTİK LTD. ŞTİ.
NORTHİC İNŞAAT MADENCİLİK TAAHHÜT A.Ş.
RPM SONDAJ EKİPMANLARI TİCARET LTD. ŞTİ.
SET-A MAKİNA A.Ş.
ŞEN PLASTİK PATLAYICI MADDE YARDIMCI MALZEMELERİ
TÜRKİYE TAŞKÖMÜRÜ KURUMU
ULUDAĞ RULMAN SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ.
YÖN PROSES-FİLTRASYON
ZONGULDAK ESNAF VE SANATKAR ODALARI BİRLİĞİ (ZESOB)

SPONSOR OLAN KURUM VE KURULUŞLAR

SPONSORING ESTABLISHMENTS AND COMPANIES

ERA GROUP HAVALANDIRMA EKİPMANLARI VE DIŞ TİCARET A.Ş.

LABRİS MADEN VE MAKİNA SANAYİ A.Ş.

ALBACORE MADENCİLİK SANAYİ VE TİCARET LTD. ŞTİ.

MTM MAKİNA TİCARET MÜMESSİLLİK MÜŞAVİRLİK PETROL LOJİSTİK LTD. ŞTİ.

CWP KÖMÜR ZENGİNLEŞTİRME TESİSLERİ MAKİNE SANAYİ TİCARET LTD. ŞTİ

KAPEKS ÜRETİM PATLAYICI MADDELER TİCARET LTD. ŞTİ.

GEOTRA MAKİNE LTD. ŞTİ.

RPM SONDAJ EKİPMANLARI TİCARET LTD. ŞTİ.

ZONGULDAK TİCARET VE SANAYİ ODASI (ZTSO)

İÇİNDEKİLER
CONTENTS

MADEN İŞLETME
MINING OPERATIONS

HARBUL ASFALTİT OCAĞINDA PATLATMA KAYNAKLI YANGINLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ
ASSESSMENT OF BLAST-INDUCED FIRES IN THE HARBUL ASPHALTITE OPEN PIT MINE
Fatma Yaşar, Mustafa Ayhan, **Deniz Aydın** 1

NUMERICAL ANALYSIS OF SHAFT CONCRETE SUPPORT DESIGN IN CONJUNCTION WITH CONVERGENCE-CONFINEMENT METHOD
KONVERJANS SINIRLAMA YÖNTEMİ İLE BİRLİKTE KUYU BETON TAHKİMATI TASARIMININ SAYISAL ANALİZİ
Gzim Ibishi, Dinçer Acun, Melih Geniş 11

TAŞKÖMÜRLERİNDE UÇUCU MADDE İÇERİĞİ İLE KENDİLİĞİNDEN YANMA EĞİLİMİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN DENEYSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ
EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN VOLATILE MATTER CONTENT AND SPONTANEOUS COMBUSTION TENDENCY IN BITUMINOUS COALS
Banu Büyükdeğirmenci, Emre Günay, Mehmet Bilen 20

ULTRA-DÜŞÜK PERMEABİLİTELİ BİR KÖMÜR DAMARINDA METAN KONTROLÜ: PARAMETRİK ANALİZLER VE DRENAJ STRATEJİSİ
METHANE CONTROL IN ULTRA-LOW PERMAEABILITY COAL SEAM: PARAMETRİC ANALYSES AND DRAINAGE STRATEGY
Emel Yılmaz, Kemal Barış 38

YERALTI TAŞKÖMÜRÜ MADENCİLİĞİNDE METAN ORANININ ÜRETİM VE HAVALANDIRMA PARAMETRELERİNDEN KESTİRİMİ
THE ESTIMATION OF METHANE CONCENTRATION IN UNDERGROUND COAL MINING USING PRODUCTION AND VENTILATION PARAMETERS
Ebubekir Ahi, **Fatih Bayram** 52

MADEN MAKİNALARI VE MEKANİZASYON
MINING MACHINERY AND MECHANIZATION

GROUND PRESSURE EXERTED BY MINING SHOVELS AND BEARING CAPACITY OF BENCH-FLOOR.
KÜREĞİMSİ MADEN YERKAZARLARININ YERE UYGULADIĞI BASINÇ VE BASAMAK TABANININ DAYANIM KAPASİTESİ
Metin Özdoğan, Hakkı Özdoğan 65

IS SKEW ANGLE REQUIRED FOR ROTATION OF POINT ATTACK PICKS EMPLOYED IN EXCAVATION OF ROCKS AND COAL?
KAYAÇ VE KÖMÜR KAZISINDA KULLANILAN KONİK UÇLU KESKİLERİN DÖNMESİ İÇİN VEREVLİK AÇISI GEREKLİ Mİ?
Osman Zeki Hekimoğlu 88

PREDICTING THE MECHANICAL PROPERTIES OF COAL-BEARING ROCKS FROM SIMPLE TEST RESULTS USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS
MAKİNE ÖĞRENME ALGORİTMALARI KULLANARAK BASİT TEST SONUÇLARINDAN KÖMÜR İÇEREN KAYALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİ TAHMİN ETME
Yunus İskender, Kadir Karaman, **Davood Fereidooni**, Ercan Sahinoğlu, Ferdi Cihangir 97

TÜRKİYE YERALTI KÖMÜR MADENCİLİNDE KOLLU GALERİ AÇMA MAKİNESİ KULLANIMI
USE OF ROADHEADER UNDERGROUND COAL MINING IN TÜRKİYE
Hakan Kıran, Olgay Yaralı 114

ÜZÜLMEZ BÖLGESİ BAZI KÖMÜR DAMARLARININ MEKANİZE KAZI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ
EVALUATION OF SOME COAL SEAMS IN THE ÜZÜLMEZ REGION FROM THE PERSPECTIVE OF MECHANIZED EXCAVATION
Göktuğ Tosun, Olgay Yaralı 129

ZONGULDAK TAŞKÖMÜRÜ HAVZASI'NDA GÜNÜMÜZE DEK KULLANILAN GALERİ AÇMA MAKİNELERİ VE EDİNİLEN TECRÜBELER
ROADHEADERS USED TO DATE AND LESSONS LEARNED IN ZONGULDAK HARDCOAL BASIN
Okan Su 145

KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ
OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN COAL MINING

MADEN KAZALARINDA BİLİRKİŞİ HEYETİNİN OLUŞTURULMASI: HUKUKİ ÇERÇEVE, UYGULAMA SORUNLARI VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ
COMPOSITION OF EXPERT PANELS IN MINING ACCIDENTS: LEGAL FRAMEWORK, PROBLEMS ENCOUNTERED IN PRACTICE, AND PROPOSALS FOR ADDRESSING THESE PROBLEMS
Sibel Terzi Kahraman, Levent Yağcıoğlu 160

ÜLKEMİZ YERALTI KÖMÜR MADENLERİNDE YAŞANAN BÜYÜK KAZALARIN ANA NEDENLERİ VE SOMA MADEN KAZASININ TEKNİK ANALİZİ
THE MAIN CAUSES OF MAJOR ACCIDENTS IN TURKEY'S UNDERGROUND COAL MINES AND A TECHNICAL ANALYSIS OF THE SOMA MINE DISASTER
Tuğrul Ünlü 175

ÜRETİM ÖNCELİKLİ İŞLETME KARARLARININ HAVALANDIRMA SİSTEMİNE ETKİSİ: SOMA VE AMASRA ÖRNEKLERİ
THE IMPACT OF PRODUCTION-DRIVEN OPERATIONAL DECISIONS ON MINE VENTILATION SYSTEMS: THE SOMA AND AMASRA CASES
Derviş Emre Aydın 194

YERALTI MADEN İŞYERLERİNDE MESLEKİ EĞİTİM SORUNLARI
VOCATIONAL TRAINING ISSUES IN UNDERGROUND MINING OPERATIONS
Aygün Ekici, Mehmet Şükrü Dağ 207

YERALTI TAŞKÖMÜRÜ MADENCİLİĞİNDE 6331 SAYILI İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ KANUNUNUN ETKİLERİ
THE EFFECTS OF THE OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY LAW NO. 6331 ON UNDERGROUND HARD COAL MINING
Osman Bahadır, Fatih Bayram 217

YERALTI KÖMÜR İŞLETMELERİNDE ARAMA KURTARMA FAALİYETLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ
EVALUATION OF SEARCH AND RESCUE OPERATIONS IN UNDERGROUND COAL MINES AND RECOMMENDATIONS FOR IMPROVEMENT
Rahmi Kocaman, Birsen Kocaman, Serdar Yılmaz, Alaaddin Çakır 231

CEVHER HAZIRLAMA
MINERAL PROCESSING

BETON TEKNOLOJİSİNDE KÖMÜR YIKAMA ATIK SUYUNUN KULLANIMI: MEVCUT DURUM, YAPISAL UYGULAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ
COAL WASHING WASTEWATER IN SUSTAINABLE CONCRETE PRODUCTION LITERATURE REVIEW AND FUTURE PERSPECTIVES
Gülden Çağın Ulubeyli, Murat Çavuşlu, Tuna Ülger, Hüseyin Zekeriya Doğan 246

DENİZLİ-MUĞLA LİNYİTLERİNDE ÇEVRECİ ÇÖZÜM: YERALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMASI
A GREEN SOLUTION FOR DENİZLİ-MUĞLA LIGNITES: UNDERGROUND COAL GASIFICATION
Ertuğrul Karakaplan 256

ÖĞÜTMEDE DOĞAL TANE BOYUT DAĞILIMINI TEMSİL EDEN BİR ORTAMDA NÜFUS DENGE MODELİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR DENEYSEL YAKLAŞIM
A NEW EXPERIMENTAL APPROACH FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A POPULATION BALANCE MODEL IN A MEDIUM REPRESENTING THE NATURAL PARTICLE SIZE DISTRIBUTION DURING GRINDING
Barış Akkaya 264

EXTRACTION OF CARBON FIBER PITCH PRECURSORS FROM KISRAKDERE COAL USING SOLVENT-ASSISTED SUPERCRITICAL CO_2 LIQUEFACTION
ÇÖZÜCÜ DESTEKLİ SÜPERKRİTİK CO_2 SIVILAŞTIRMA YÖNTEMİ KULLANILARAK KİSRAKDERE KÖMÜRÜNDEN KARBON FİBER ZİFT ÖNCÜLLERİNİN ELDE EDİLMESİ
Berkan Sözen, Ahmet Efe Aygün, Ensar Eray Mete, Kerim Çelik, Yunus Emre Çavdar, M. Fatih Can, Feridun Boylu, Emel Muşdu, Suat Çağan Uğur, Nesli Küçüktepe, **Mehmet Sabri Çelik** 278

FARKLI KÖMÜR HAVZALARINA AİT KÖMÜRLERİN MİKROYAPISAL VE ELEMENTEL HETEROJENLİĞİNİN KARŞILAŞTIRMALI FE-SEM/EDS ANALİZİ
COMPARATİVE FE-SEM/EDS ANALYSİS OF THE MİCROSTRUCTURAL AND ELEMENTAL HETEROGENEİTY OF COALS FROM DİFFERENT BASİNS
Ercan Şahinoğlu, **Yunus İskender**, Kadir Karaman, Davood Fereidooni, Ferdi Cihangir, Mert Bektaş 290

HYDROGEOCHEMICAL AND ELEMENTAL SIGNATURES OF PABDANA COAL AREA, IRAN
İRAN'IN PABDANA KÖMÜR BÖLGESİNİN HİDROJEKİMYASAL VE ELEMENTAL ÖZELLİKLERİ
Hamid Reza Nassery, Ali Saeidi Rashk Olya, Farshad Alijani 305

KÖMÜR ATIK SAHALARINDAN YANABİLİR MADDE GERİ KAZANIM POTANSİYELİ
RECOVERY POTENTIAL OF COMBUSTIBLE MATTER FROM COAL WASTE DUMPS
Gökhan Sarıhan, Sait Kızgut, Ayhan Ali Sirkeci 318

KÖMÜR HAZIRLAMA TESİSLERİNDE KÜRESEL SORUNLAR VE OPTİMİZASYON
GLOBAL CHALLENGES AND OPTIMIZATION OF COAL PREPARATION PLANTS
Gökhan Sarıhan, Ayhan Ali Sirkeci, Mehmet Bilen, Sait Kızgut 329

KÖMÜR KÖKENLİ ATIKLARDAN KRİTİK HAMMADDELERİN GERİ KAZANIMI: POTANSİYEL, TEKNOLOJİLER VE GELECEK PERSPEKTİFİ
RECOVERY OF CRITICAL RAW MATERIALS FROM COAL-DERIVED WASTES: POTENTIAL, TECHNOLOGIES, AND FUTURE PERSPECTIVES
Fırat Burat 345

SÜPER TEMİZ KÖMÜR ÜRETİMİNDE ORGANİK REAKTİFLERİN ETKİNLİĞİ
THE EFFECTIVENESS OF ORGANIC REAGENTS IN THE PRODUCTION OF SUPER CLEAN COAL
Ayda Akın, Hasan Hacıfazlıoğlu 360

TÜRKİYE'DE TERMİK SANTRALLERDE KULLANILAN KÖMÜR YAKMA TEKNOLOJİLERİ VE AKTÜEL GELİŞMELER
COAL COMBUSTION TECHNOLOGIES AND CURRENT DEVELOPMENTS USED IN THERMAL POWER PLANTS IN TURKEY
M. Suat Delibalta 371

YUMUŞAK LİNYİTLERİNİN AÇIK ATMOSFER KOŞULLARINDA NEM ALMA/ATMA DAVRANIŞI
MOISTURE ABSORPTION/REMOVAL BEHAVIOR OF SOFT LIGNITES UNDER OPEN ATMOSPHERE CONDITIONS
Taki Güler, Ercan Polat, Rıdvan Edip Akdeniz, İlker Özer, Selda Ceylan 381

ZONGULDAK TAŞKÖMÜRLERİNİN KATMA DEĞERLİ DÖNÜŞÜMÜ: ENJEKSİYON KÖMÜRÜ, AKTİF KARBON VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN BÜTÜNLEŞİK YAKLAŞIMLAR
VALUE-ADDED CONVERSION of ZONGULDAK HARD COALS: INTEGRATED APPROACHES FOR INJECTION COAL, ACTIVATED CARBON, and INDUSTRIAL APPLICATIONS
Faik Alp, Serdar Yılmaz, Mehmet Bilen, Sait Kızgut, İhsan Toroğlu 391

ZONGULDAK VE SOMA HAVZASI KÖMÜR ATIKLARININ RGB TABANLI NTE ANALİZİ
RGB IMAGE-BASED DETERMINATION OF RARE EARTH ELEMENTS IN COAL WASTES FROM THE ZONGULDAK AND SOMA COAL BASINS
Banu Büyükdeğirmenci, Mehmet Bilen 406

KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE EKONOMİ, HUKUK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
ECONOMICS, LAW, AND SUSTAINABILITY IN COAL MINING

2014-2024 YILLARI ARASINDA MEYDANA GELEN KÖMÜR MADENCİLİĞİ İŞ KAZALARININ ÖRGÜTSEL SOSYOLOJİ AÇISINDAN ANALİZİ
AN ANALYSIS OF COAL MINING OCCUPATIONAL ACCIDENTS BETWEEN 2014 AND 2024 FROM THE PERSPECTIVE OF ORGANIZATIONAL SOCIOLOGY
Fatih Zere 416

ENERJİ ARZ GÜVENLİĞİNDE KÖMÜRÜN STRATEJİK ÖNEMİ VE YENİLENEBİLİR KAYNAKLAR KARŞISINDAKİ GÜCÜ: UNUTULAN ENERJİ HAVZASI ERGENE (TRAKYA)
THE STRATEGIC IMPORTANCE OF COAL IN ENERGY SUPPLY SECURITY AND ITS STRENGTH AGAINST RENEWABLE RESOURCES: THE FORGOTTEN ENERGY BASIN OF ERGENE (THRACE)
İlker Şengüler, Özcan Koç, Erkan Yaşar ve Eyüp Akgün 428

KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE YEŞİL DÖNÜŞÜM; DENİZLİ KALE LİNYİT İŞLETMESİ ÖRNEĞİ
GREEN TRANSITION IN COAL MINING: THE CASE OF KALE LIGNITE MINE, DENİZLİ
Ali Koray Özdoğan, Orçun Durak, Hakan Akıncı, Hakan Kıran 439

MADENCİLİKTE KAMU YARARININ ÖLÇÜLMESİ
ASSESSING PUBLIC INTEREST IN MINING
Ömer Günay, **Mehmet Torun** 449

TÜRK MADEN HUKUKUNDA RÖDÖVANS SÖZLEŞMELERİNİN YAPISAL ÇÖKÜŞÜ: ANAYASAL, İDARİ VE DOKTRİNER BÜTÜNCÜL BİR ELEŞTİRİ
THE STRUCTURAL COLLAPSE OF ROYALTY AGREEMENTS IN TURKISH MINING LAW: A COMPREHENSIVE CONSTITUTIONAL, ADMINISTRATIVE, AND DOCTRINAL CRITIQUE
Ömer Günay 466

TÜRKİYE LİNYİT MADENCİLİĞİ SEKTÖRÜNÜN YAPISAL VE FİNANSAL DÖNÜŞÜMÜ (2009-2023): BİR SEKTÖREL ANALİZ
STRUCTURAL AND FINANCIAL TRANSFORMATION OF THE TURKISH LIGNITE MINING SECTOR (2009-2023): A SECTORAL ANALYSIS
Ömer Günay 475

TÜRKİYE'DE MADENCİLİK SEKTÖRÜNÜN EKONOMİDEKİ ETKİSİNİN ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ İLE İNCELENMESİ
AN EXAMINATION OF THE IMPACT OF THE MINING SECTOR ON THE TURKISH ECONOMY USING TIME SERIES ANALYSIS
Gülnaz Daloğlu, Fatih Çemrek 481

ZONGULDAK'TA KAÇAK KÖMÜR MADENCİLİĞİ: OLGULAR, DİNAMİKLER VE ÇÖZÜM ARAYIŞLARI
ILLEGAL COAL MINING IN ZONGULDAK: FACTS, DYNAMICS AND SEARCH FOR SOLUTIONS
Caner Özdemir, Sadık Kılıç 496

ZONGULDAK TAŞKÖMÜRÜ HAVZASINDA RÖDÖVANS UYGULAMASI
ROYALTY AGREEMENTS IN THE ZONGULDAK HARD COAL BASIN
Meral ÇOLAK 504

ÇAĞRILI BİLDİRİLER
INVITED PAPER

FEEDBACK AND LESSONS LEARNED FROM FRENCH COALMINE
FRANSIZ KÖMÜR MADENİNDEN GERİ BİLDİRİM VE ÇIKARILAN DERSLER
Marwan Al Heib 516

COMBATING THE IMPACT OF SPONTANEOUS COMBUSTION IN AN OPENCAST COAL MINE
AÇIK OCAK KÖMÜR MADENİNDE KENDİLİĞİNDEN TUTUŞMANIN ETKİSİYLE MÜCADELE
Kgomotso Mokone, **Bekir Genc** 530

CHALLENGES AND PERSPECTIVES OF LIGNITE UTILIZATION IN KOSOVO: BALANCING ENERGY SECURITY, ADVANCED CONVERSION TECHNOLOGIES AND SUSTAINABLE TRANSITION
KOSOVA'DA LİNYİT KULLANIMININ ZORLUKLARI VE PERSPEKTİFLERİ: ENERJİ GÜVENLİĞİ, GELİŞMİŞ DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR GEÇİŞ ARASINDA DENGELEME
Kemajl Zeqiri 542

HARBUL ASFALTİT OCAĞINDA PATLATMA KAYNAKLI YANGINLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

ASSESSMENT OF BLAST-INDUCED FIRES IN THE HARBUL ASPHALTITE OPEN PIT MINE

Fatma Yaşar
Devlet Su İşleri 202 Şube Müdürlüğü, Gaziantep, Türkiye

Mustafa Ayhan
Dicle Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

Deniz Aydın
Dicle Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

ÖZET Asfaltit açık işletmelerinde delme-patlatma faaliyetleri sonrasında meydana gelen yangın olayları, iş sağlığı ve güvenliği ile üretim sürekliliği açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Şırnak ili Silopi ilçesinde bulunan Harbul asfaltit açık işletmesinde 2016–2019 yılları arasında meydana gelen ve kayıt altına alınan dokuz yangın olayı değerlendirilmiştir. Çalışmada işletme kayıtları, saha gözlemleri, fotoğraf ve video görüntüleri birlikte kullanılarak yangınların mekânsal dağılımı, gelişim süreçleri ve işletmeye etkileri olarak incelenmiştir. Bulgular, yangın olaylarının benzer saha koşulları altında belirli üretim bölgelerinde yoğunlaştığını ve tüm olaylarda üretim faaliyetlerinin geçici olarak durdurulduğunu göstermektedir. Ayrıca yangınlara hızlı müdahalenin olayların kontrol altına alınmasında ve güvenli üretimin sürdürülmesinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların asfaltit açık işletmelerinde risk değerlendirmesi, operasyonel planlama ve iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarına katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Asfaltit, açık ocak işletmeciliği, delme-patlatma, yangın, iş sağlığı ve güvenliği

ABSTRACT Post-blast fire incidents in asphaltite surface mines pose significant challenges to occupational safety and production continuity. This study investigates nine documented fire incidents that occurred between 2016 and 2019 at the Harbul asphaltite open-pit mine located in Silopi, Şırnak, Türkiye. Mine records, field observations, photographs, and video recordings were evaluated to assess the spatial distribution, development stages, and operational impacts of the fire events. The findings indicate that the incidents occurred under similar mining conditions and were concentrated within specific production zones. Although no fatalities or injuries were recorded, all incidents resulted in temporary production interruptions and required immediate operational response. Rapid intervention using available mine equipment proved effective in controlling the fires and maintaining safe working conditions. The findings provide field-based evidence that can support risk assessment, operational planning, and occupational health and safety practices in asphaltite surface mining operations.

Keywords: Asphaltite, surface mining, drilling and blasting, fire, occupational health and safety

1. GİRİŞ

Asfaltitler, petrol kökenli doğal katı bitümler olup hidrokarbonların jeolojik süreçler boyunca çatlak ve kırık sistemlerine göç ederek katılaşması sonucu oluşan hidrokarbon birikimleridir (Kural, 1991; Gordadze et al., 2018; Kerimov et al., 2018). Yüksek karbon ve asfalten içerikleri ile yüksek kalorifik değerlere sahip olmaları nedeniyle enerji üretiminde önemli bir yer tutmakta, bunun yanında asfalt, karbon esaslı malzemeler ve çeşitli kimyasal ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır (Nciri et al., 2014). Türkiye'deki ekonomik asfaltit rezervlerinin büyük bölümü Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer almakta olup, bu sahalarda üretim faaliyetleri ağırlıklı olarak açık işletme yöntemiyle gerçekleştirilmektedir (MTA, 1982).

Asfaltitlerin önemli özelliklerinden biri de hidrokarbon gazlarını bünyelerinde barındırabilmeleridir. Son yıllarda Güneydoğu Anadolu asfaltitleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, asfaltit damarlarının metan başta olmak üzere etan, propan ve diğer hidrokarbon gazlarını içerdiğini ortaya koymuştur. Soylu ve Fişne (2025), Üçkardeşler asfaltit damarında gerçekleştirdikleri çalışmada ortalama gaz içeriğini 1,66 m^3/t olarak belirlemiş; desorbe olan gazın hacimsel bileşiminin büyük oranda metan (%61,6), etan (%24,5) ve propandan (%10,7) oluştuğunu bildirmiştir. Bu bulgular, asfaltit madenciliğinde gaz varlığının yalnızca rezerv karakterizasyonu açısından değil, aynı zamanda üretim güvenliği bakımından da dikkate alınması gereken önemli bir unsur olduğunu göstermektedir.

Açık işletmelerde üretimin temel aşamalarından birini oluşturan delme-patlatma uygulamaları, kayaçların ekonomik olarak parçalanmasını sağlayarak üretim verimliliğini artıran en önemli operasyonlardan biridir. Bununla birlikte patlatma sırasında kaya kütlesinde yeni çatlak sistemlerinin oluşması ve mevcut süreksizliklerin genişlemesi, gaz içeren formasyonlarda gaz salınımını artırabilmektedir (Yang et al., 2020; Banasiewicz et al., 2025). Ayrıca açık ocak madenciliğinde patlatma faaliyetleri; uçan kaya, erken patlama, hatalı ateşleme ve çalışma alanı güvenliği gibi birçok riski de beraberinde getirmektedir (Kecojevic & Radomsky, 2005). Bu nedenle gaz içeren kayaçlarda yürütülen delme-patlatma faaliyetlerinde güvenlik risklerinin doğru değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

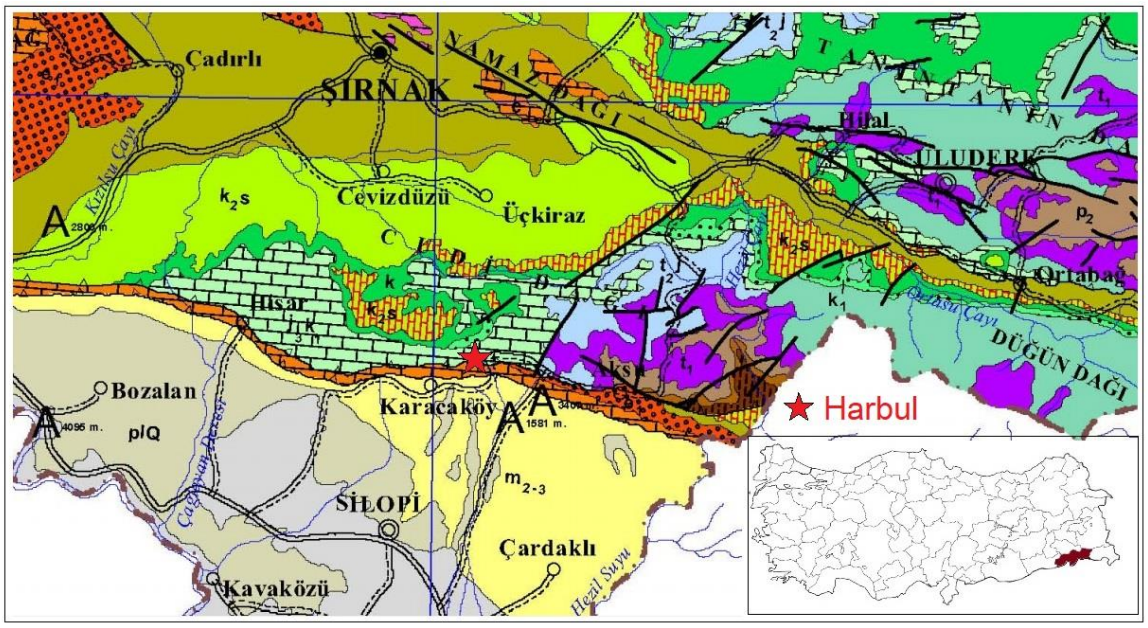
Literatürde kömür madenciliğinde gaz patlamaları, kömür yangınları ve bu olayların oluşum nedenleri üzerine çok sayıda çalışma bulunmakta; gaz birikimi, ateşleme kaynakları, havalandırma yetersizlikleri ve operasyonel hatalar başlıca risk faktörleri olarak gösterilmektedir (Zhang et al., 2018; Zhu et al., 2019; Li & Fang, 2022; Lin et al., 2024). Buna karşın mevcut çalışmaların büyük bölümü yeraltı kömür madenciliğine odaklanmış olup, asfaltit açık işletmelerinde delme-patlatma sonrasında meydana gelen yangın olaylarını inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yazarların bilgisi dahilinde, asfaltit açık işletmelerinde delme-patlatma faaliyetlerini takiben meydana gelen çok sayıda yangın olayını aynı saha özelinde sistematik olarak değerlendiren bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, Şırnak ili Silopi ilçesinde faaliyet gösteren Harbul asfaltit açık işletmesinde farklı yıllarda delme-patlatma faaliyetlerini takiben meydana gelen dokuz yangın olayı; saha gözlemleri, işletme kayıtları, fotoğraflar ve video görüntüleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Yangın olaylarının ortak özellikleri ortaya konulmuş, olaylar iş sağlığı ve güvenliği ile işletme uygulamaları açısından değerlendirilmiş ve benzer olayların önlenmesine yönelik operasyonel öneriler sunulmuştur.

2. ÇALIŞMA SAHASI

2.1. Çalışma Sahası Jeolojisi

Harbul asfaltit sahası, Şırnak ili Silopi ilçesi sınırları içerisinde, Türkiye'nin en önemli asfaltit yataklarının bulunduğu Güneydoğu Anadolu asfaltit havzasında yer almaktadır. Bölgedeki asfaltit filonları, hidrokarbonların derin çatlak ve kırık sistemlerine göç ederek katılaşması sonucu oluşmuş olup, çoğunlukla tabaka ve filon şeklinde gözlenmektedir (Lebküchener, 1969; MTA, 1982). Çalışma alanı, kuzeyde Cudi Dağı, güneyde ise Silopi–Cizre ovası arasında yer almakta olup, bölgenin jeolojik yapısı Arap Levhası ile Anadolu Levhası'nın çarpışmasına bağlı olarak gelişen kıvrım ve bindirme tektoniğinin etkisi altında şekillenmiştir. Bu tektonik yapı, asfaltit damarlarının gelişimi ve dağılımında belirleyici rol oynamaktadır (Lebküchener, 1969). Çalışma alanının bölgesel konumu ile Harbul asfaltit filonunun jeolojik yerleşimi Şekil 1'de gösterilmiştir (Gönenç, 1990).



Şekil 1. Harbul asfaltit sahasının konumu ve bölgesel jeolojik haritası

Harbul sahasında asfaltit oluşumları başlıca Cudi, Gercüş ve Midyat formasyonları içerisinde yer almaktadır. Cudi Formasyonu ağırlıklı olarak kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşlarından oluşmakta olup, üst seviyelerinde bitümlü şeyl ve bitümlü kumtaşı ardalanmaları bulunmaktadır. Gercüş Formasyonu ise kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kil seviyelerinden oluşan heterojen bir litolojiye sahipken, Midyat Formasyonu

çoğunlukla yüksek dayanımlı kireçtaşlarından oluşmaktadır. Açık işletme faaliyetleri sırasında farklı dayanım özelliklerine sahip bu formasyonlar birlikte kazılmakta ve asfaltit damarları bu birimler içerisinde izlenmektedir (Karpuz, 1985).

2.2. İşletme Yöntemi

Harbul asfaltit sahasında üretim açık ocak yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. İşletme, Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) ruhsat sahasında rödövans modeli kapsamında Silopi Elektrik Üretim A.Ş. tarafından işletilmekte olup, üretilen asfaltit 405 MW kurulu güce sahip Silopi Termik Santrali'nin yakıt ihtiyacını karşılamaktadır. İşletmede asfaltit üretimi delme-patlatma yöntemi ile yapılmakta, ardından yükleme ve nakliye işlemleri gerçekleştirilmektedir. Yıllar içerisinde ocak derinliğinin artmasına bağlı olarak dekapaj miktarları yükselmiş, buna karşın üretim koşulları daha karmaşık hale gelmiştir.

İncelenen yangın olaylarının tamamı bu açık işletmede delme-patlatma faaliyetlerini takiben meydana gelmiştir. Özellikle asfaltitin bünyesinde bulunan hidrokarbon gazları nedeniyle bazı patlatmalar sonrasında ani parlama ve yangın olayları gözlenmiş, bu durum hem iş sağlığı ve güvenliği hem de üretim sürekliliği açısından önemli operasyonel sorunlara neden olmuştur. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen tüm olaylar aynı işletme sahasında benzer üretim yöntemi ve çalışma koşulları altında gerçekleştiğinden, olayların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine uygun bir veri seti oluşturulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Veri Kaynakları

Bu çalışmada Harbul asfaltit açık işletmesinde farklı yıllarda delme-patlatma faaliyetlerini takiben meydana gelen yangın olaylarına ait saha verileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın veri setini işletme kayıtları, patlatma sonrası çekilen video görüntüleri, fotoğraf arşivi, topografik haritalar ve saha gözlemleri oluşturmaktadır. Ayrıca yangın olaylarının meydana geldiği lokasyonlar, olay tarihleri ve kot bilgileri işletme kayıtlarından derlenmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.2. Değerlendirme Yöntemi

Yangın olayları; meydana geliş zamanı, konumu, gözlenen alevlenme şekli, müdahale süreci ve işletmeye etkileri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda fotoğraf ve video kayıtları ile işletme kayıtları birlikte incelenmiş, elde edilen bulgular saha gözlemleri ile desteklenerek olayların ortak özellikleri ve operasyonel etkileri ortaya konulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, 2016–2019 yılları arasında Harbul asfaltit açık işletmesinde delme-patlatma faaliyetlerini takiben meydana gelen ve kayıt altına alınan toplam dokuz yangın olayı değerlendirilmiştir. Her bir olay için tarih, konum, kot bilgisi, görsel kayıtlar ve müdahale süreci birlikte ele alınarak karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan veri kaynakları ve bu verilerin değerlendirme kapsamı Çizelge 1'de sunulmuştur. Ayrıca olayların ocak içerisindeki konumsal dağılımı değerlendirilmiş ve yangınların meydana geldiği bölgeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Böylece olayların yalnızca zamansal değil, mekânsal dağılımları da saha gözlemleri ile birlikte değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan veri kaynakları ve değerlendirme kapsamı

Veri Kaynağı	**Elde Edilen Bilgiler**	**Kullanım Amacı**
İşletme kayıtları	Olay tarihi, olay yeri, kot bilgisi	Yangın olaylarının kronolojik ve mekânsal değerlendirilmesi
Topografik haritalar	Yangın lokasyonları	Olayların ocak içerisindeki dağılımının belirlenmesi
Fotoğraf arşivi	Yangının gelişimi	Görsel değerlendirme
Video kayıtları	Patlatma sonrası süreç	Olayların gözlemsel analizi
Saha gözlemleri	Müdahale ve operasyonel etkiler	İşletme açısından değerlendirme

Elde edilen bulgular, yangın olaylarının ortak özelliklerini ortaya koymak ve işletme güvenliği açısından uygulanabilir öneriler geliştirmek amacıyla değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

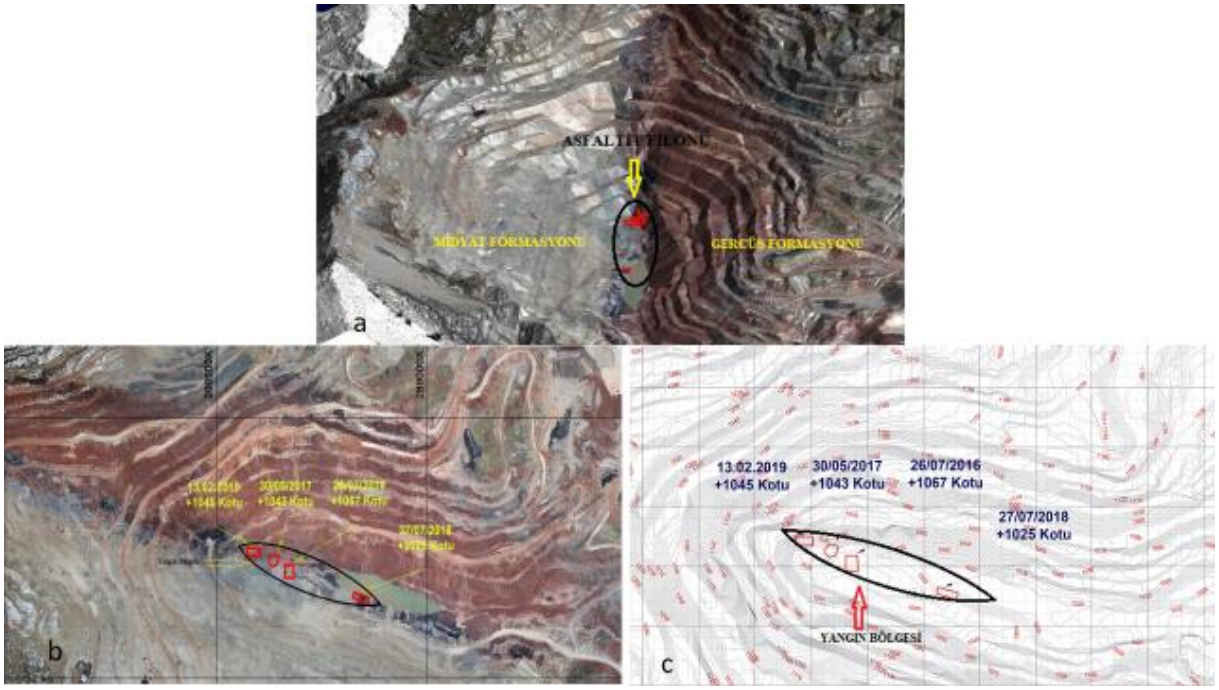
4.1. Yangın Olaylarının Genel Özellikleri

İncelenen dokuz yangın olayının tamamı delme-patlatma faaliyetlerini takiben meydana gelmiştir. Olaylar farklı yıllarda gerçekleşmiş olmasına rağmen benzer saha koşulları altında oluşmuş ve ortak karakteristik özellikler göstermiştir. Yangınların tamamı asfaltit damarının üretildiği açık ocak içerisinde gözlenmiş olup, olayların meydana geldiği lokasyonlar Şekil 2'de gösterilmiştir.

Yangın olaylarının ocak içerisindeki dağılımı incelendiğinde, kayıt altına alınan olayların büyük bölümünün Midyat Formasyonu tarafındaki asfaltit filonu boyunca belirli bölgelerde yoğunlaştığı gözlenmiştir. Ayrıca olayların benzer kot seviyelerinde tekrar ettiği belirlenmiş olup, bu durum yangınların işletme içerisinde rastgele oluşmadığını ve belirli üretim bölgelerinde yoğunlaşma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Yangın olaylarında herhangi bir can kaybı veya yaralanma meydana gelmemiştir. Ancak olaylar üretim faaliyetlerinin geçici olarak durdurulmasına, çalışma alanında güvenlik önlemlerinin artırılmasına ve yangına müdahale amacıyla ilave iş makinesi ile ekipman kullanılmasına neden olmuştur. Bu durum işletme sürekliliğini olumsuz etkileyerek ek iş yükü ve zaman kaybı oluşturmuştur.

Yangınların tamamında ilk olarak patlatmayı takiben asfaltit yüzeyinde alevlenme gözlenmiş, bazı olaylarda ise yangının belirli bölgelerde bir süre devam ettiği belirlenmiştir. Yangınların ortak özellikleri dikkate alındığında olayların tamamının delme-patlatma faaliyetleri ile ilişkili olduğu ve benzer operasyonel koşullar altında meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 2. Harbul asfaltit açık işletmesinde meydana gelen yangın olaylarının çalışma alanı içerisindeki konumları; (a) asfaltit filonunun genel görünümü, (b) açık ocak planı üzerindeki dağılımı ve (c) topografik harita üzerindeki konumları.

4.2. Yangın Olaylarına İlişkin Saha Gözlemleri

İncelenen yangın olaylarında, patlatma sonrasında asfaltit filonu üzerinde farklı şiddet ve yayılım alanlarına sahip alevlenmeler gözlenmiştir. Bazı olaylarda yangın yalnızca belirli noktalarda kısa süreli olarak meydana gelirken, bazı olaylarda ise asfaltit filonu boyunca daha geniş alanlara yayıldığı belirlenmiştir. Yangınların gelişim süreci, olay anında çekilen fotoğraf ve video kayıtları kullanılarak değerlendirilmiştir.

Saha gözlemleri, yangınların patlatma sonrasında asfaltit damarının açığa çıktığı bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Olayların tamamında yangınların üretim alanı içerisinde meydana geldiği, bu nedenle üretim faaliyetlerinin geçici olarak durdurulduğu ve çalışma alanında güvenlik önlemlerinin artırıldığı belirlenmiştir.

Yangınların söndürülmesi amacıyla dozer, ekskavatör ve arazöz gibi iş makineleri ile müdahale edilmiş ve olaylar kontrol altına alınmıştır.

Patlatma sonrasında meydana gelen yangın olaylarının gelişim süreci fotoğraf ve video kayıtları kullanılarak değerlendirilmiştir. Tipik bir yangın olayına ait farklı aşamalar Şekil 3'te sunulmaktadır.

Patlatmayı takiben ilk olarak sınırlı bir alevlenme gözlenmiş (Şekil 3a), bunu kısa süre içerisinde daha şiddetli bir parlama izlemiştir (Şekil 3b). Ardından yangının asfaltit filonu boyunca belirli bir alana yayıldığı görülmüş (Şekil 3c), uygulanan müdahaleler sonrasında ise yangın kontrol altına alınarak üretim alanı güvenli hale getirilmiştir (Şekil 3d).

Saha gözlemleri ve görsel kayıtların birlikte değerlendirilmesi sonucunda, incelenen yangın olaylarının benzer saha koşulları altında geliştiği ve olayların tamamında üretim faaliyetlerinin geçici olarak durdurulduğu belirlenmiştir. Yangınların kontrol altına alınabilmesi amacıyla çalışma alanında dozer, ekskavatör ve arazöz gibi iş makineleri hazır bulundurulmuş, gerekli güvenlik önlemleri alınarak müdahale gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemler, delme-patlatma sonrasında oluşabilecek yangınlara karşı hızlı müdahalenin üretim güvenliği açısından önemli olduğunu göstermektedir

Şekil 3. Harbul asfaltit açık işletmesinde patlatma sonrası tipik yangın gelişim aşamaları; (a) ilk alevlenme, (b) ani parlama, (c) yangının filon boyunca yayılımı ve (d) müdahale sonrasında yangın bölgesinin görünümü.

Saha çalışmaları sırasında asfaltit karotlarında ve ocak tabanındaki su birikintilerinde sürekli gaz çıkışını gösteren kabarcık oluşumları gözlenmiştir. Bu gözlemler, asfaltit bünyesinde gaz varlığının üretim öncesinde de saha koşullarında izlenebildiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4. Rezerv geliştirme sondajından alınan asfaltit karotunda (a) ve ocak tabanında (b) gözlenen gaz kabarcıkları.

4.3 Yangın Olaylarının Operasyonel Açıdan Değerlendirilmesi

İncelenen yangın olaylarında herhangi bir can kaybı veya yaralanma meydana gelmemiş olmakla birlikte, tüm olaylar üretim faaliyetlerinin geçici olarak durdurulmasına neden olmuştur. Yangınların kontrol altına alınabilmesi amacıyla üretim alanı güvenli hale getirilmiş, çalışma bölgesine girişler sınırlandırılmış ve gerekli müdahaleler tamamlanıncaya kadar üretim faaliyetlerine ara verilmiştir.

İşletmede uygulanan mevcut güvenlik prosedürleri kapsamında, patlatma öncesinde delik ağızlarında taşınabilir gaz ölçüm cihazları ile kontrol ölçümleri gerçekleştirilmiş, patlatma sonrası saha güvenliği sağlandıktan sonra üretim faaliyetlerine devam edilmiştir. Bu uygulamalar, olası risklerin azaltılmasına yönelik işletme prosedürlerinin önemli bir parçasını oluşturmuştur.

Yangınlara müdahale sürecinde dozer, ekskavatör ve arazöz gibi iş makineleri aktif olarak kullanılmıştır. Müdahale süresince üretim ekiplerinin koordineli çalışması sayesinde yangınların çevre basamaklara veya işletmenin diğer bölümlerine yayılması önlenmiştir. Ancak bu süreçte oluşan üretim kayıpları, ekipmanların farklı amaçlarla kullanılması ve iş programında meydana gelen gecikmeler işletme verimliliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Saha gözlemleri, asfaltit üretimi yapılan açık ocaklarda delme-patlatma sonrasında meydana gelebilecek olası yangınlara karşı önceden hazırlıklı olunmasının önemini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Şırnak ili Silopi ilçesinde faaliyet gösteren Harbul asfaltit açık işletmesinde delme-patlatma faaliyetlerini takiben meydana gelen ve kayıt altına alınan dokuz yangın olayı; işletme kayıtları, saha gözlemleri, fotoğraf ve video görüntüleri kullanılarak değerlendirilmiştir. İncelenen tüm olayların aynı asfaltit filonu üzerinde ve benzer üretim koşulları altında meydana geldiği belirlenmiş, farklı yıllarda gerçekleşmelerine rağmen ortak operasyonel özellikler sergiledikleri görülmüştür.

Yangın olaylarında herhangi bir can kaybı veya yaralanma meydana gelmemiştir. Bununla birlikte, olayların tamamında üretim faaliyetleri geçici olarak durdurulmuş, yangınların kontrol altına alınabilmesi amacıyla dozer, ekskavatör ve arazöz gibi iş makineleri ile müdahale gerçekleştirilmiştir. Bu süreç, üretim programında gecikmelere ve ilave iş gücü ihtiyacına neden olarak işletme verimliliğini olumsuz yönde etkilemiştir.

Fotoğraf ve video kayıtlarının birlikte değerlendirilmesi, yangınların gelişim sürecinin ve uygulanan müdahale yöntemlerinin ayrıntılı olarak incelenmesine olanak sağlamıştır. Saha gözlemleri, delme-patlatma sonrasında meydana gelen yangın olaylarının ortak özelliklerini ortaya koymuş ve gerçek işletme koşullarında elde edilen verilerin operasyonel açıdan önemli bilgiler sunduğunu göstermiştir.

Elde edilen bulgular, asfaltit açık işletmelerinde delme-patlatma sonrasında gelişebilecek yangınlara karşı hazırlıklı olunmasının, patlatma sonrası saha kontrollerinin sistematik olarak yürütülmesinin ve yangına müdahale ekipmanlarının hazır bulundurulmasının güvenli üretim açısından önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında yangın olaylarının kayıt altına alınmasına yönelik sistematik bir değerlendirme yaklaşımı oluşturulmuş olup, benzer olayların gelecekte karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine katkı sağlayacak bir veri altyapısı hazırlanmıştır. Bu çalışma, asfaltit açık işletmelerinde delme-patlatma kaynaklı yangın olaylarının saha koşullarında sistematik olarak değerlendirilmesine yönelik ilk çalışmalardan biri olması bakımından literatüre katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Banasiewicz, A., Kotyla, M. ve Gola, S., 2025. Assessment of the Impact of Blasting Operations on the Intensity of Gas Emission from Rock Masses: A Case Study of Hydrogen Sulfide Occurrence in a Polish Copper Ore Mine. Applied Sciences, 15, 12781.

Gordadze, G., Kerimov, V., Giruts, M., Poshibaeva, A. ve Koshelev, V., 2018. Genesis of the Asphaltite of the Ivanovskoe Field in the Orenburg Region, Russia. Fuel, 216, 835–842.

Gönenç, O. 1990.Asphaltite and Asphaltite Reserves in Turkey, MTA Report.

Karpuz, C. 1985. Silopi Bölgesi Asfaltitlerinin Kaya Mekaniği Parametrelerinin, Kesilebilirliğinin, Hidrolik Çatlatılabilirliğinin ve Kesilebilirliğininden Yanma Riskinin Araştırılması, Ankara, 85-03-05-01-010.

Kecojevic, V. ve Radomsky, M., 2005. Flyrock Phenomena and Area Security in Blasting-Related Accidents. Safety Science, 43, 739–750.

Kerimov, V.Y., Gordadze, G.N., Lapidus, A.L., Giruts, M.V., Mustaev, R.N., Movsumzade, E.M., Zhagfarov, F.G. ve Zakharchenko, M.V., 2018. Physicochemical Properties and Genesis of the Asphaltites of Orenburg Oblast. Solid Fuel Chemistry, 52(2), 128–137.

Kural, O. 1991. Diğer Önemli Karbonlu Maddelerin Tanıtılması, Kömür, İ.T.Ü. Maden Müh. Böl., İstanbul.

Lebkuchner, R. F. (1969). GÜNEYDOĞU TÜRKİYE'DEKİ ASFALTİK MADDELERİN ZUHUR VE TEŞEKKÜLLERİ. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 72(72), 124-145.

Li, L. ve Fang, Z., 2022. Cause Analysis of Coal Mine Gas Explosion Based on Bayesian Network. Shock and Vibration, 2022, Article ID 1923734.

Lin, Z., Li, M., He, S., Wang, D., Shi, S. ve Wang, D., 2024. Analysis on Typical Characteristics and Causes of Coal Mine Gas Explosion Accidents in China. Environmental Science and Pollution Research, 31, 55475–55489.

Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü (MTA), 1982. Siirt-Mardin (Şırnak-Silopi) Asfaltit Yatakları. Ankara.

Nciri, N., Song, S., Kim, N. ve Choi, N., 2014. Chemical Characterization of Gilsonite Bitumen. Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology, 5(5).

Soylu, A. ve Fişne, A., 2025. Time-Dependent Variations in Desorbed Gas Composition: Methodological Analysis of Asphaltite Vein Investigation Results. Fuel, 381, 133276.

Yang, W., Lin, M., Walton, G., Lin, B., Sinha, S., Lu, C. ve Li, G., 2020. Blasting-Enhanced Water Injection for Coal and Gas Out-Burst Control. Process Safety and Environmental Protection, 140, 233–243.

Zhang, J., Cliff, D., Xu, K. ve You, G., 2018. Focusing on the Patterns and Characteristics of Extraordinarily Severe Gas Explosion Accidents in Chinese Coal Mines. Process Safety and Environmental Protection, 117, 390–398.

Zhu, Y., Wang, D., Shao, Z., Xu, C., Zhu, X., Qi, X. ve Liu, F., 2019. A Statistical Analysis of Coalmine Fires and Explosions in China. Process Safety and Environmental Protection, 121, 357–366.

NUMERICAL ANALYSIS OF SHAFT CONCRETE SUPPORT DESIGN IN CONJUNCTION WITH CONVERGENCE-CONFINEMENT METHOD

KONVERJANS SINIRLAMA YÖNTEMİ İLE BİRLİKTE KUYU BETON TAHKİMATI TASARIMININ SAYISAL ANALİZİ

Gzim Ibishi[*1]
University of Mitrovica Isa Boletini, Mining Eng. Dept., Mitrovica, Kosovo

Dinçer Acun[2]
Chamber of Mining Engineers, Zonguldak Branch, Zonguldak, Türkiye

Melih Geniş[3]
Zonguldak Bülent Ecevit University, Mining Eng. Dept., Zonguldak, Türkiye

ABSTRACT In this paper, the shaft support design was analyzed using numerical and analytical methods. The case study for this analysis is an Amasra-Tarlaağzı shaft, Bartın, Turkiye. The rock mass properties were obtained using an empirical approach, with field and laboratory studies as input parameters for the numerical and analytical analyses. The analytical and numerical results for support design were evaluated. It was observed that the numerical analysis results supported by analytical results were meaningful and reliable.

ÖZET Bu çalışmada, kuyu tahkimat tasarımı sayısal ve analitik yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz için vaka çalışması olarak Türkiye'nin Bartın ilindeki Amasra-Tarlaağzı kuyusu ele alınmıştır. Sayısal ve analitik analizlerde girdi parametresi olarak kullanılmak üzere, arazi ve laboratuvar çalışmalarıyla elde edilen veriler ışığında ampirik bir yaklaşımla kaya kütlesi özellikleri belirlenmiştir. Tahkimat tasarımına ilişkin analitik ve sayısal sonuçlar değerlendirilmiştir. Analitik sonuçlarla desteklenen sayısal analiz sonuçlarının anlamlı ve güvenilir olduğu görülmüştür.

1. INTRODUCTION

In the preliminary excavation stages of the shaft-sinking design, a small misinterpretation of early or late support installation can lead to costly and time-consuming results in both the construction and the lifetime of the shaft (Geniş and Acun, 2015). The basic parameters that influence the stability of shaft construction are the strength parameters of the rock material and/or rock mass and the “face effect” or unsupported span. Such problems require active involvement of analytical and numerical approaches to ensure reliable engineering intuition. In this paper, the Amasra-Tarlaagzi shaft sinking design case study is investigated using interactive analytical and numerical approaches. The Amasra-Tarlaağzı shaft mining is being excavated with an opening diameter of 9 m and a usable opening diameter of 8 m. Excavation started at +87 m and will end at -680 m. The shaft is currently being

[*] *Corresponding author’s e-mail.gzim.ibishi@umib.net*

excavated at -490 m, with a total excavation length of 767 m. The insets of the shaft are designed to be at -250, -325, -420, and -510 m.

The shaft cross-section and vertical section are given in Figure 1. Like other underground excavations, the shaft has been sunk using drilling and blasting techniques. A typical representation of a shaft is shown in Figure 2, where the process involves drilling, blasting, mucking, and support operations in sequence.

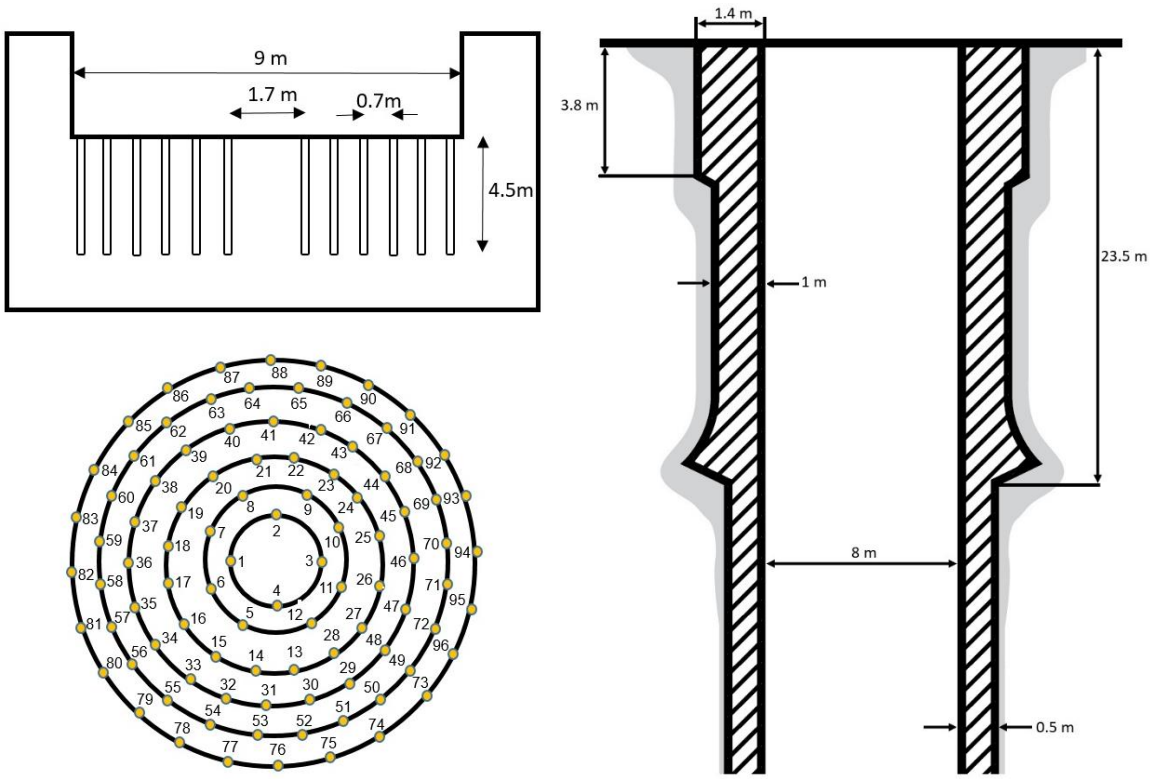


Figure 1. Amasra-Tarlaagzi typical shaft cross-section and shaft collar construction (not to scale) (Acun, 2009).

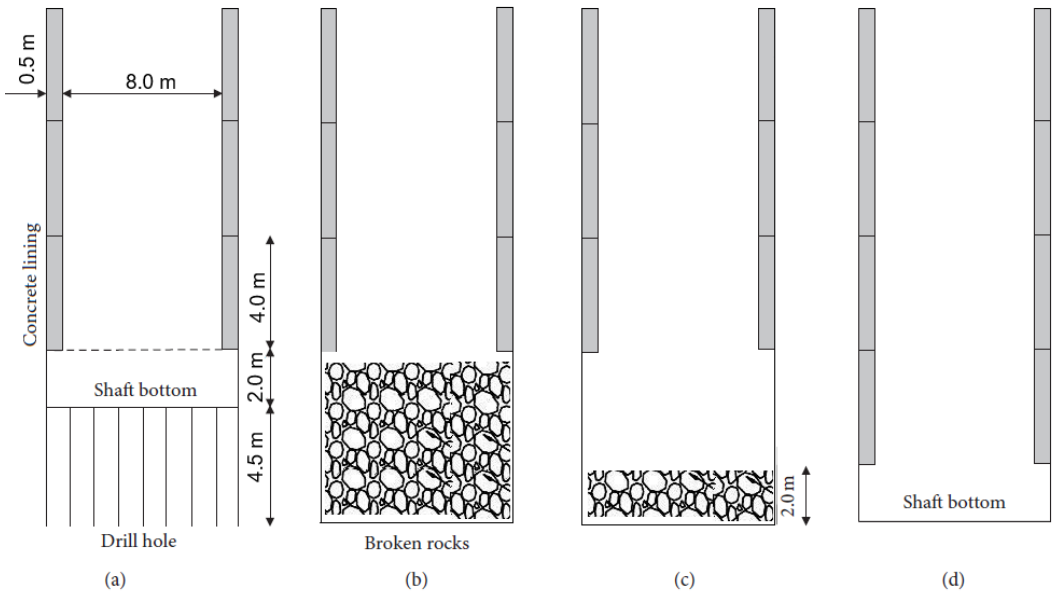


Figure 2. Shaft sinking process (modified from Unrug, 1992)

The depth of advancement achieved by blasting is one of the most important factors in rock excavation. It is quite important to achieve the maximum advancement in shaft drilling. Sometimes, the low strength of the rock is a significant factor in this process. Excavation depth depends on the good organization of drilling, loading, lining, and support operations. The drilling process begins with lowering the jumbo drill bit into the base. Then, compressed air and water connections are made, and the holes are marked with a plumb bob. The holes are 45 mm in diameter and are drilled with 5 m augers. The hole lengths are 4.5 m. Depending on the strength of the rock unit in the excavation, between 90 and 120 holes are drilled. The characteristics of the explosives and detonators used in the excavation are as follows: Emulite is used as the explosive. An emulite-type explosive has a diameter of 38 mm and a length of 40 cm. Depending on the hardness of the rock, a total of 360-420 kg of dynamite is used to advance one formwork length. Additionally, 1.3 kg of dynamite is used for every 1 m^3 of excavation. The non-electric detonators used for detonation are 100 ms delayed detonators, and the middle pull holes are detonated first, followed by the scanning holes with a delay. Detonators numbered 1, 2, 3, 4, and 5 are used for the delays. The numbering of these detonators determines the delay. The arrangement of holes generally applied in the Amasra-Tarlaağzı shaft is given in Figure 1. After blasting, an advance of approximately 4 m is achieved, and about 400 m^3 of waste rock is removed. For the transportation of the waste rock, the platform and loading team descend to the bottom of the well as quickly as possible. Then, the platform is fixed approximately 10-12 m above the tailings and brought to the working position (Figure 2). The tailings are collected using a wall-mounted scraper. After this process, the bucket is lowered to the bottom of the well. Then, the removed tailings are loaded into the bucket with a cactus scoop. The bucket holds approximately 4 m^3 of tailings. While the first bucket is being filled, the second bucket is lowered, and the filled bucket is pulled up. In this way, the tailings are brought to the surface, and the waste is cleaned (Acun, 2009).

2. METHODOLOGY

2.1. Convergence-Confinement Method

The Convergence-Confinement Method (CCM) is a procedure that allows the load imposed on a support installed behind the face of the underground excavation. The support system is not recommended for installation at an early or very late stage, as early installation does not help the rock mass achieve a sufficiently controlled reaction curve, whereas late installation may not maintain excavation stability. In Table 1, the CCM solution provided by Carranza-Torres and Fairhurst (2000), considering the Hoek-Brown failure criterion, was used.

Table 1. Analytical modeling based on the convergence-confinement method formulas (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000)

Description	Formula(s)	Eq.
Critical support pressure	$p_i^{cr} = \left[P_i^{cr} - \frac{s}{m_b^2}\right] \times m_b \sigma_{ci}$	(1)
Scaled critical pressure	$P_i^{cr} = \frac{1}{16}\left[1 - \sqrt{1 + 16\,S_o}\right]^2$	(2)
Scaled far-field stress	$S_o = \frac{P_o}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2}$	(3)
Inward elastic displacement of the excavation wall (if $p_i \geq p_i^{cr}$)	$u_r^{el} = \frac{P_o - p_i}{2G_{rm}} R$	(4)
Total inward plastic deformation (if $p_i < p_i^{cr}$ and dilation angle=0°)	$u_r^{pl} = \frac{R(P_o - p_i^{cr})}{2G_{rm}} \left\{ \left[\frac{1-2\nu}{2} \frac{\sqrt{P_i^{cr}}}{S_o - P_i^{cr}} + 1\right] \left(\frac{R_{pl}}{R}\right)^2 + \frac{1-2\nu}{4(S_o - P_i^{cr})} \left[ln\left(\frac{R_{pl}}{R}\right)\right]^2 - \frac{1-2\nu}{2} \frac{\sqrt{P_i^{cr}}}{S_o - P_i^{cr}} \left[2\,ln\left(\frac{R_{pl}}{R}\right) + 1\right] \right\}$	(5)
Radius of plastic zone (if $p_i < p_i^{cr}$)	$R_{pl} = R \cdot exp\left[2\left(\sqrt{P_i^{cr} - \sqrt{P_i}}\right)\right]$	(6)
Concrete/shotcrete capacity	$P_{sc,max} = \frac{\sigma_{cc}}{2}\left[1 - \frac{(R - t_c)^2}{R^2}\right]$ $K_{sc} = \frac{E_c(R^2 - (R - t_c)^2)}{2(1 - \nu_c^2)(R - t_c)R^2}$	(7)

Note:
σ_{ci} is the unconfined compressive strength of intact rock, m_b, s, & a are the Hoek-Brown parameters, p_i^{cr} is the critical support pressure, P_i^{cr} is the scaled critical support pressure, P_o is the uniform far-field stress, S_o is the scaled far-field stress, u_r^{el} is the elastic displacement of the opening wall, G_{rm} is rock mass shear modulus, R_{pl} is the radius of plastic zone, u_r^{pl} is the plastic displacement of opening wall, u_r is the opening sidewall deformation, R is the original opening radius, p_i is internal support pressure, σ_{cm} is rock mass strength, E_m is rock mass deformation modulus, v is Poisson's ratio of rock mass, $P_{sc,max}$ is maximum support pressure by concrete or shotcrete lining, σ_{cc} is the uniaxial compressive strength of the concrete or shotcrete, t_c is the thickness of the concrete or shotcrete lining, r_o is the radius of the opening, ν_c is the Poisson's ratio of the concrete or shotcrete, E_c is the Young's modulus of the concrete or shotcrete, K_{sc} concrete stiffness.

2.2. Numerical method

The RS2, a finite element analysis program developed by Rocscience (2025), was used to evaluate the plastic zone around the underground opening (i.e., shaft) and the resulting deformations. RS2 permits a 2D study of the nonlinear deformation of rocks

using the Hoek-Brown failure criterion (Hoek et al. 2000). The input parameters are presented in Table 2.

Table 2. Geotechnical properties used in the analytical and numerical modeling (modified from Acun, 2009).

Rock type	P_o (MPa)	σ_{ci} (MPa)	E_i (GPa)	E_m (GPa)	GSI	m_i	s	m_b
Siltstone[1]	9.4	18.3	6.9	2.1	50	5.7	3.87×10^{-3}	0.95
Siltstone[2]	13.7	35	13.1	8.3	65	11.2	2.05×10^{-2}	3.21
Coarse-grained sandstone	15.9	62.1	17.1	12.5	70	10.6	3.57×10^{-2}	3.63

Note: Siltstone[1] is at depth 377m, Siltstone[2] is at depth 547m.

The excavation diameter of the opening is 9 m, and the useful diameter is 8 m. The finite element mesh used in the analyses is given in Figure 3. Since the shaft geometry is circular, a finite element mesh was created that expands radially toward the model boundary to match the opening geometry. The distance of the model boundary from the opening was taken as 10 times the opening width. In addition, all points on the outer boundary of the model were fixed in such a way as not to allow displacement in the horizontal and vertical directions. A graded mesh with four-node quadrilateral elements was used for mesh discretization, with finer mesh density in the vicinity of the shaft mining to improve the accuracy of the results. Hence, the proposed numerical model, comprising 12800 four-nodded quadrilateral elements and 12640 elements, is shown in Figure 3. Additionally, in this analysis, the rock mass is assumed to behave as an elastic-perfectly-plastic material. Accordingly, during deformation analysis, it is suggested that there is no plastic volume change; for this purpose, the dilation angle is set to be zero. To simulate the excavation and support stage, load-split ratios were defined in the numerical simulation. It was determined that load-split ratios should not be used without any detailed study employed for unsupported and supported stage openings.

2.3. Load split factor

To simulate delayed support installation, a load split factor was used between stage 1 (i.e., unsupported) and stage 2 (i.e., supported). To estimate the load-split factor for a particular rock mass condition and excavation depth, it has to be realized that these factors do not automatically match each case due to specific site conditions, and the need arises to propose a mathematical relationship to check the compatibility of the factors in terms of "unsupported span (i.e., face effect)" and other geometrical and geotechnical data. Thus, for corresponding excavation depth, uniaxial compressive strength, given GSI, and unsupported span, the load-split factor can be predicted using the load split graph proposed by the authors, see Figure 4.

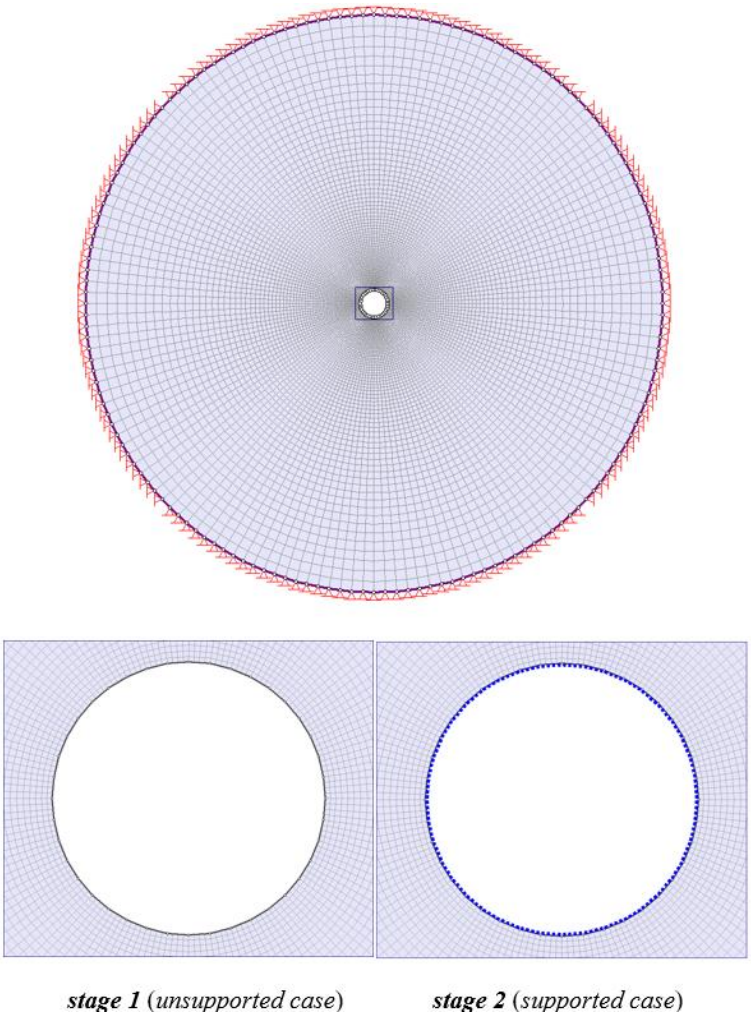


Figure 3. Presentation of numerical model, geometry, mesh, and excavation stages.

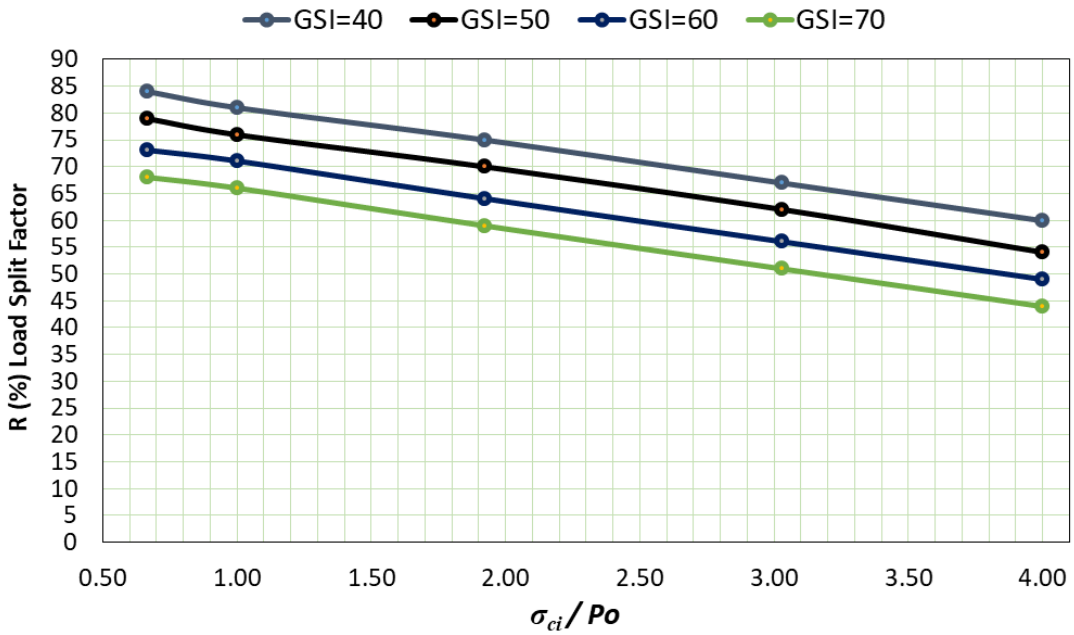


Figure 4. Proposed load split graph for excavation stages.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

To demonstrate the proposed graph, in this case study, a siltstone rock mass located at a depth of 377 m, and having properties as follows: GSI = 50; σ_{ci}/P_o = 1.95; E_m = 2.1 GPa; m_i = 5.67; s = 3.87×10^{-3}; and m_b = 0.95. Numerical simulation results obtained for unsupported and supported cases are presented in Figure 5.

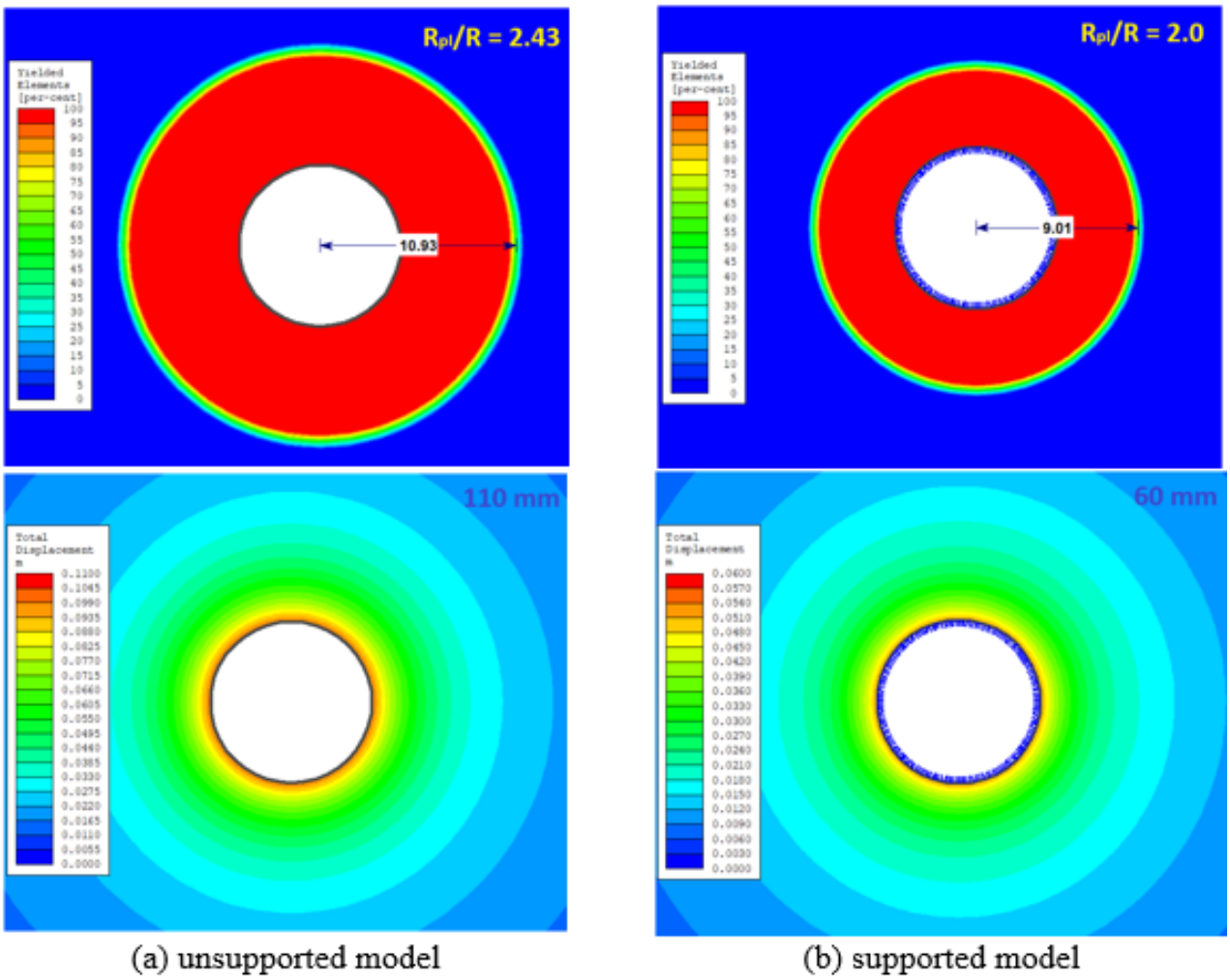
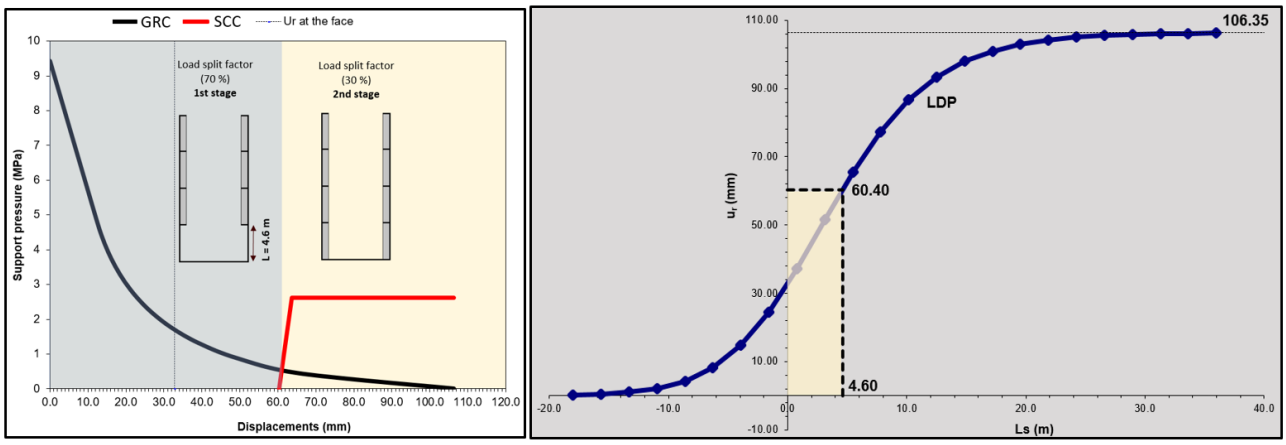


Figure 5. Numerical modelling results and analysis.

The maximum total displacement for the siltstone rock mass with an average GSI value of 50 decreased from 110 mm to 60 mm (55% reduced), and the radius of the plastic (failed) zone reduced from 2.43 to 2.0 (18% reduced). Nevertheless, the Load Split Factor has been investigated for 2, 3, and 4.6 m unsupported spans. It was found that the critical boundary between having a durable or yielding/failed rock support system was the ratio of (59:41) in % (i.e., 0.59:0.41), referring to a 3-meter unsupported span. To avoid any possible violent failure of the opening under construction (or after too early/late support installation), it is recommended to use the optimized load split graph for design purposes. Thus, for the siltstone rock mass, the load split factor was optimized as (70:30), referring to the face effect or the maximum unsupported span of 4.6 m, see Figure 6.



(a) GRC-SCC interaction (b) face effect and LDP profile

Figure 6. Analytical modelling results and analysis.

From Figure 6, it is clearly observed that deformations are equilibrated as 60.4 mm. However, some plastic (failed) zone around the shaft in mining still exists and will almost always exist in a particular rock mass, even with support installed. This happens because support does not reinstate the rock mass to its original state. In other words, it simply controls and confines the deformation that has already been triggered by the excavation process. Numerical modeling results together with analytical modeling results are summarized in Table 3 for different rock masses and excavation depths. The results show the presence of instability and a need for a support system due to the extent of the plastic zone and total maximum displacement values.

Table 3. Comparison of the analytical and numerical modeling results.

Rock unit(s)	**Normalised plastic zone thickness, R_{pl}/R**		**Maximum total displacement, $U_{r,\,max}$ (mm)**		**Load split factors in two stages**	
	Numerical modelling results					
	Unsupported	Supported	Unsupported	Supported	Stage 1	Stage 2
Siltstone[1]	2.43	2.00	110	60	70	30
Siltstone[2]	1.31	1.17	14	9	55	45
	Analytical modelling results				Unsupported span, L_s (m)	
Siltstone[1]	2.53	1.98	106.4	61	4.6	
Siltstone[2]	1.31	1.12	13.3	9.0	4.2	

Note: Siltstone[1] is at depth 377m, Siltstone[2] is at depth 547m.

4. CONCLUSION

The results obtained by the proposed load split graph and applied in the RS2 software confirm that the pre-defined percentage load in the first stage and installation of the rock support system under pre-defined load in the second stage are feasible. Nevertheless, the limitations of the suggested formula are as follows: $40 \leq \boldsymbol{GSI} \leq 70$; $0.5 \leq \boldsymbol{\sigma_{ci}/P_o} \leq 4.0$; L = 1, 2… 10 meters. This graph helps geotechnical engineers control the load between stages, accounting for how much stress is released in stage 1 and how much deformation is allowed before installing the final support in stage 2. From this study, a simple practical design guidance must be as follows: for stage 1, the Load Split Factor should be considered from 40 to 80 % of the total in situ stress state, and for stage 2, the remaining 20 to 60 % plus a safety margin. Additionally, more than 80% of the total in situ stress state release is possible only under specific rock mass conditions, considering massive granite and strong basalt, a very small excavation span (e.g., underground production drifts or pilot tunnels), a very low in situ stress state, self-supporting rock, and temporary openings. Otherwise, such load distribution in stage 2 is unrealistic because the failure zone develops too quickly, the rock collapses or squeezes earlier, and, finally, stability is lost before natural full relaxation.

REFERENCES

Acun, D. 2009. Investigation of the Properties of Surrounding Rocks and Stability for Amasra-Tarlaagzi Shaft, M.Sc. Thesis (in Turkish), Dept. of Mining Eng., Zonguldak Karaelmas University, Zonguldak, 157 p.

Carranza-Torres, C., Fairhurst, C. 2000. Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion, Tunnelling and Underground Space Technology, 15, 2, pp. 187-213.

Geniş, M., Acun, D. 2015. A Comparative Study of Shaft Stability by Analytical and Numerical Methods. (in Turkish) Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, 30, 2, pp. 201-215.

Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F. 2000. Support of Underground Excavations in Hard Rock, CRC Press, 228 p.

Unrug, K.F. 1992. Construction of Development Openings. SME Mining Engineering Handbook on CD-ROM. Ed. L.H. Hartman, Chapter 17.4. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, Littleton, Colorado. pp.1580-1612.

RS2 2025. 2D Finite Element Analysis Software, Rocscience Inc., www.rocscience.com

TAŞKÖMÜRLERİNDE UÇUCU MADDE İÇERİĞİ İLE KENDİLİĞİNDEN YANMA EĞİLİMİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN DENEYSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN VOLATILE MATTER CONTENT AND SPONTANEOUS COMBUSTION TENDENCY IN BITUMINOUS COALS

Banu BÜYÜKDEĞİRMENCİ*
Türkiye Taşkömürü Kurumu, 67100, Zonguldak, TÜRKİYE

Emre GÜNAY
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Kilimli, 67500, Zonguldak, Turkiye

Mehmet BİLEN
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İncivez, 67100, Zonguldak, Turkiye

ÖZET Kömürün kendiliğinden yanması, yeraltı madenciliğinde ciddi iş sağlığı, operasyonel ve ekonomik riskler oluşturan kritik bir endojen olaydır. Düşük sıcaklık oksidasyonuyla başlayan bu kendiliğinden ısınma eğilimi; kömür özelliklerine, özellikle de erken oksidasyon reaktivitesini belirleyen uçucu madde içeriğine büyük ölçüde bağlıdır. Bu çalışmada, Zonguldak ve Bartın havzalarından alınan 23 taşkömürü örneğinde bu ilişkiyi değerlendirmek amacıyla kısa analiz deneyleri ve Crossing Point Temperature (CPT) testleri gerçekleştirilmiştir. Korelasyon analizi, uçucu madde miktarı ile CPT değerleri arasında anlamlı negatif bir ilişki olduğunu ve uçucu madde arttıkça kendiliğinden yanma yatkınlığının yükseldiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, Zonguldak ve Bartın taşkömürlerinin düşük sıcaklık oksidasyon kinetiğinin anlaşılmasını sağlayarak yeraltı işletmelerinde risk değerlendirmesi için değerli bir bilimsel temel sunmaktadır.

ABSTRACT Spontaneous combustion of coal is a critical endogenous phenomenon posing severe occupational, operational, and economic risks in underground mining. Initiated by low-temperature oxidation, this self-heating propensity depends heavily on coal properties, particularly volatile matter content, which governs early oxidation reactivity. In this study, 23 hard coal samples from the Zonguldak and Bartın basins were experimentally analyzed using proximate analysis and Crossing Point Temperature (CPT) testing to evaluate this relationship. Correlation analysis revealed a significant negative relationship between volatile matter content and CPT values, demonstrating that higher volatile matter increases spontaneous combustion susceptibility. These findings enhance the understanding of low-temperature oxidation kinetics in Zonguldak and Bartın coals, offering a valuable scientific basis for risk assessment in underground operations.

* *banu.buyukdegirmenci@taskomuru.gov.tr*

1. GİRİŞ

Kömür, dünya genelinde elektrik üretimi, demir-çelik sanayi, çimento üretimi ve çeşitli endüstriyel proseslerde temel enerji kaynaklarından biri olmayı sürdürmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki hızlı gelişmelere ve karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik uluslararası politikalara rağmen, özellikle gelişmekte olan ülkelerde kömürün enerji arz güvenliği açısından stratejik önemi devam etmektedir. Dünya enerji tüketimindeki önemli payı nedeniyle kömür madenciliği ve kömürün güvenli şekilde üretilmesi, depolanması ve taşınması, günümüzde de madencilik sektörünün temel araştırma konuları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte kömürün üretimi ve kullanımı sırasında karşılaşılan en önemli problemlerden biri, herhangi bir dış ateşleme kaynağı olmaksızın meydana gelen kendiliğinden yanma olayıdır. Bu olay yalnızca üretim kayıplarına neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda can güvenliğini tehdit eden yeraltı yangınlarına, zararlı gaz oluşumuna, rezerv kayıplarına ve ciddi ekonomik zararların ortaya çıkmasına yol açmaktadır (Clemens vd., 1991; Kaymakçı ve Didari, 2002; Arısoy, 2007).

Kömürün kendiliğinden yanması, düşük sıcaklıklarda atmosferik oksijen ile kömür yüzeyinde başlayan karmaşık fiziksel ve kimyasal reaksiyonların sonucunda gelişen ekzotermik bir süreçtir. Bu süreç başlangıçta oldukça yavaş ilerlemekte, ancak oksijen adsorpsiyonunun devam etmesiyle birlikte açığa çıkan reaksiyon ısısının ortamdan uzaklaştırılamaması durumunda kömür sıcaklığı giderek artmaktadır. Sıcaklığın yükselmesi reaksiyon kinetiğini hızlandırmakta, oksijen tüketimini artırmakta ve belirli bir kritik sıcaklıktan sonra sistem kendi kendini besleyen bir yapıya dönüşmektedir. Literatürde "thermal runaway" olarak tanımlanan bu aşamadan sonra sıcaklık kontrol edilemez biçimde yükselmekte ve sonuçta kömürün tutuşması gerçekleşmektedir. Günümüzde kömürün kendiliğinden yanması; oksijen adsorpsiyonu, serbest radikal oluşumu, fonksiyonel grupların parçalanması, düşük sıcaklık oksidasyonu ve ısı transfer mekanizmalarının birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok aşamalı bir reaksiyon sistemi olarak kabul edilmektedir (Clemens vd., 1991; Singh, 2013; Beamish ve Arısoy, 2008).

Yeraltı kömür işletmelerinde meydana gelen endojen yangınlar, dünya madencilik sektöründe uzun yıllardır önemli güvenlik problemlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Kendiliğinden yanma sonucu oluşan karbon monoksit, karbon dioksit, hidrojen ve çeşitli hidrokarbon gazları hem patlama riskini artırmakta hem de çalışanların sağlığını doğrudan tehdit etmektedir. Ayrıca yangınların söndürülmesi amacıyla galerilerin kapatılması, üretimin durdurulması veya rezervlerin terk edilmesi gibi uygulamalar, işletmeler açısından büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle kömürlerin düşük sıcaklık oksidasyon davranışlarının anlaşılması ve kendiliğinden yanma eğilimlerinin güvenilir laboratuvar yöntemleri ile belirlenmesi, güvenli madencilik uygulamalarının temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Kaymakçı ve Didari, 2002; Arısoy, 2007).

Kömürün kendiliğinden yanma eğilimi tek bir parametreye bağlı olmayıp, kömürün jeolojik oluşumu, kömürleşme derecesi, petrografik bileşimi, mineral madde miktarı, nem içeriği, tane boyutu, gözenek yapısı, oksijen konsantrasyonu, hava akım hızı ve ortam sıcaklığı gibi çok sayıda değişkenin ortak etkisi altında gelişmektedir. Kömürleşme derecesi arttıkça aromatik yapı güçlenmekte, aktif fonksiyonel grupların miktarı azalmakta ve kömürün kimyasal reaktivitesi düşmektedir. Buna karşılık düşük ranklı veya orta ranklı kömürlerde bulunan alifatik zincirler, hidroksil, karbonil ve karboksil grupları oksijenle daha kolay reaksiyona girebildiğinden düşük sıcaklıklarda oksidasyon daha hızlı başlamaktadır. Bu nedenle kömürün kimyasal yapısını temsil eden temel analiz parametreleri, kendiliğinden yanma davranışının değerlendirilmesinde önemli göstergeler olarak kullanılmaktadır (Speight, 2013; Thomas, 2013).

Bu parametreler içerisinde özellikle uçucu madde miktarı (volatile matter, VM), kömürün düşük sıcaklık oksidasyon reaktivitesini belirleyen en önemli özelliklerden biri olarak kabul edilmektedir. Uçucu madde, kömürün inert atmosfer altında belirli sıcaklıklarda ısıtılması sırasında gaz ve buhar fazında ayrışan organik bileşiklerin toplamını ifade etmekte olup; hidrokarbonlar, oksijenli organikler, karbon monoksit, karbon dioksit ve hidrojen gibi çok sayıda bileşeni içermektedir. Uçucu madde miktarı yalnızca kömürün yanma karakteristiğini değil, aynı zamanda kimyasal kararlılığını, oksijen adsorpsiyon kapasitesini ve düşük sıcaklıklardaki oksidasyon davranışını da önemli ölçüde etkilemektedir. Literatürde, yüksek uçucu madde içeren kömürlerin daha fazla aktif fonksiyonel grup içermesi nedeniyle oksijen ile daha hızlı reaksiyona girdiği ve daha düşük sıcaklıklarda ekzotermik reaksiyonların başladığı bildirilmektedir (Beamish ve Arısoy, 2008; Onifade ve Genç, 2019; Li vd., 2020).

Düşük sıcaklık oksidasyonu sırasında kömür yüzeyinde ilk olarak fiziksel oksijen adsorpsiyonu gerçekleşmekte, bunu kimyasal adsorpsiyon ve oksijenli yüzey komplekslerinin oluşumu izlemektedir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte peroksit, hidroperoksit ve serbest radikal oluşumu hızlanmakta, bu bileşiklerin parçalanması sonucu ilave ısı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu ısı ortamdan uzaklaştırılamadığı takdirde oksidasyon reaksiyonları Arrhenius kinetiğine uygun olarak hızlanmakta ve sistem kendiliğinden tutuşmaya doğru ilerlemektedir. Son yıllarda gerçekleştirilen spektroskopik ve termal analiz çalışmaları, özellikle yüksek uçucu madde içeren bitümlü kömürlerde oksijen tüketim hızının daha yüksek olduğunu ve fonksiyonel grup dönüşümlerinin daha erken sıcaklıklarda başladığını göstermektedir. Bu nedenle uçucu madde miktarı ile kendiliğinden yanma eğilimi arasında doğrudan bir ilişkinin bulunduğu genel olarak kabul edilmektedir.

Kömürlerin kendiliğinden yanma eğiliminin belirlenmesinde farklı laboratuvar yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında Kesişme Noktası Sıcaklığı (Crossing Point Temperature-CPT), R70 kendi kendine ısınma testi, termogravimetrik analiz (TG), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), diferansiyel termal analiz (DTA), oksijen tüketim hızı ve oksidasyon sırasında oluşan gazların analizi en yaygın kullanılan yöntemlerdir. CPT yöntemi, kömür örneği sıcaklığının programlanmış fırın

sıcaklığını geçtiği sıcaklığın belirlenmesine dayanmakta olup, uygulanmasının kolay olması, deney sonuçlarının tekrarlanabilirliği ve farklı kömürlerin karşılaştırılmasına olanak sağlaması nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Literatürde CPT değerinin düşmesi, kömürün kendiliğinden yanma eğiliminin arttığını göstermektedir. Benzer şekilde R70 yöntemi de kömürün 40–70 °C sıcaklık aralığındaki kendi kendine ısınma hızını belirleyerek oksidasyon reaktivitesini değerlendirmektedir (Beamish ve Theiler, 2019; Wang vd., 2014).

Uluslararası literatürde son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, uçucu madde miktarı ile kendiliğinden yanma eğilimi arasında önemli ilişkiler bulunduğunu ortaya koymakla birlikte, bu ilişkinin kömürleşme derecesi, makeral bileşimi ve jeolojik oluşum koşullarına bağlı olarak değişebildiğini göstermektedir. Özellikle farklı kömür havzalarından elde edilen bitümlü kömürlerde aynı uçucu madde içeriğine sahip örneklerin farklı oksidasyon davranışları sergileyebildiği bildirilmektedir. Bu durum, her kömür havzasının kendine özgü jeolojik ve petrografik özellikleri nedeniyle yerel çalışmaların önemini artırmaktadır. Dolayısıyla belirli bir kömür havzası için elde edilen deneysel sonuçların doğrudan diğer havzalara genellenmesi her zaman mümkün olmamaktadır.

Türkiye'nin tek taşkömürü üretim bölgesi olan Zonguldak Taşkömürü Havzası, farklı kömürleşme derecelerine ve değişken uçucu madde içeriklerine sahip çok sayıda damarı bünyesinde barındırmaktadır. Havzada faaliyet gösteren işletmelerde üretimi yapılan taşkömürleri koklaşabilirlik, petrografik yapı, kül, nem ve uçucu madde içerikleri bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Bartın-Amasra sahaları ise özellikle daha yüksek uçucu madde içeren bitümlü kömürleri ile dikkat çekmektedir. Bu farklılıklar, söz konusu kömürlerin kendiliğinden yanma davranışlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesini bilimsel açıdan önemli hale getirmektedir.

Türkiye'de kömürlerin kendiliğinden yanması konusunda çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, Zonguldak ve Bartın bölgelerinden alınan geniş örnek gruplarında uçucu madde miktarı ile Crossing Point Temperature (CPT) arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak değerlendirilmesine yönelik çalışmalar sınırlı sayıdadır. Özellikle aynı deney sistemi kullanılarak farklı ocaklardan temin edilen çok sayıda taşkömürü örneğinin birlikte değerlendirilmesi, havzanın genel oksidasyon karakterinin ortaya konulması açısından önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Zonguldak ve Bartın bölgelerinden temin edilen toplam 23 farklı taşkömürü örneğinin kısa analiz deneyleri gerçekleştirilmiş, uçucu madde içerikleri belirlenmiş ve kömürlerin kendiliğinden yanma eğilimleri Kesişme Noktası Sıcaklığı (CPT) yöntemi kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Daha sonra uçucu madde miktarı ile CPT değerleri arasındaki ilişki istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiş ve korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulguların, Zonguldak Havzası taşkömürlerinin düşük sıcaklık oksidasyon davranışının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlaması, kendiliğinden yanma riskinin önceden tahmin edilmesine yönelik güvenilir

değerlendirme kriterlerinin geliştirilmesine destek olması ve güvenli kömür madenciliği uygulamalarına bilimsel altyapı oluşturması amaçlanmaktadır.

2. KENDİLİĞİNDEN YANMA KAVRAMI

Kömürün kendiliğinden yanması (spontaneous combustion), herhangi bir dış ateşleme kaynağı olmaksızın atmosferik oksijen ile düşük sıcaklıklarda başlayan oksidasyon reaksiyonlarının ilerlemesi sonucunda kömür bünyesinde ekzotermik ısı üretimi, sıcaklık birikimi ve nihayetinde tutuşma ile sonuçlanan karmaşık bir fizikokimyasal süreçtir. Yeraltı kömür işletmelerinde meydana gelen endojen yangınların temel nedenlerinden biri olan bu olay; üretim kayıpları, rezerv kayıpları, ekipman hasarları, çevresel etkiler ve iş sağlığı ile güvenliği açısından ciddi riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle kömürlerin kendiliğinden yanma davranışının anlaşılması ve bu davranışı etkileyen parametrelerin belirlenmesi, güvenli madencilik uygulamalarının en önemli araştırma konularından biri olarak kabul edilmektedir (Clemens ve ark., 1991; Kaymakçı ve Didari, 2002; Arısoy, 2007).

Günümüzde kömürün kendiliğinden yanma mekanizması, kömür–oksijen kompleks teorisi (coal–oxygen complex theory) temelinde açıklanmaktadır. Bu teoriye göre oksijen molekülleri ilk olarak kömürün gözenekli yapısına difüze olmakta ve yüzeyde fiziksel adsorpsiyona uğramaktadır. Daha sonra aktif karbon merkezleri ile hidroksil (-OH), karbonil (>C=O), karboksil (-COOH) ve alifatik hidrokarbon zincirleri gibi oksijenle reaksiyona girmeye yatkın fonksiyonel gruplar üzerinde kimyasal adsorpsiyon gerçekleşmektedir. Kimyasal adsorpsiyon sonucunda oluşan kararsız oksijen kompleksleri zamanla parçalanarak peroksit ve hidroperoksit ara ürünlerini oluşturmakta, bu ara ürünlerin bozunması sırasında ise karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2), su buharı (H_2O), hidrojen (H_2) ve çeşitli düşük molekül ağırlıklı hidrokarbonlar açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonların tamamı ekzotermik karakter taşıdığından kömür bünyesinde sürekli bir ısı üretimi meydana gelmektedir (Clemens ve ark., 1991; İnal ve Aydıner, 2019).

Kendiliğinden yanma süreci genel olarak yavaş oksidasyon, hızlanan oksidasyon ve hızlı oksidasyon–tutuşma olmak üzere üç temel evrede gerçekleşmektedir (İnal ve Aydıner, 2019). İlk evrede kömür ile oksijen arasındaki reaksiyonlar oldukça düşük hızlarda ilerlemekte ve açığa çıkan ısı büyük ölçüde çevreye aktarılabilmektedir. Bu nedenle kömür sıcaklığında belirgin bir artış gözlenmemektedir. İkinci evrede ise sıcaklığın artmasına bağlı olarak oksijen adsorpsiyon hızı, serbest radikal oluşumu ve oksidasyon reaksiyonlarının kinetiği belirgin şekilde hızlanmaktadır. Son evrede ise reaksiyonlardan açığa çıkan ısı, ortamdan uzaklaştırılabilen ısı miktarını aşmakta ve sistem termal kaçak (thermal runaway) olarak tanımlanan kritik bölgeye ulaşmaktadır. Bu aşamadan sonra kömür sıcaklığı kontrol edilemeyecek şekilde yükselmekte ve herhangi bir dış ateşleme kaynağı olmaksızın kendiliğinden tutuşma meydana gelmektedir (Kaymakçı ve Didari, 2002).

Kendiliğinden yanma olayının temelini oluşturan düşük sıcaklık oksidasyonu (Low-Temperature Oxidation, LTO), genellikle 30–90 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmekte olup kömürün atmosferik oksijen ile ilk kimyasal etkileşimlerinin başladığı aşamayı ifade etmektedir (Clemens ve ark., 1991; Arısoy, 2007). Bu sıcaklık aralığında oksijen molekülleri kömür yüzeyine adsorbe edilerek aktif fonksiyonel gruplarla reaksiyona girmekte ve ekzotermik oksidasyon reaksiyonları başlamaktadır. İlk aşamada açığa çıkan ısı miktarı sınırlı olmakla birlikte, üretilen ısının ortamdan yeterince uzaklaştırılamaması durumunda kömür sıcaklığı yavaş yavaş yükselmektedir. Sıcaklık artışı, Arrhenius bağıntısına uygun olarak reaksiyon hız sabitini artırmakta ve oksidasyon süreci pozitif geri beslemeli, oto-katalitik bir mekanizmaya dönüşmektedir (Singh, 2013). Böylece her sıcaklık artışı yeni oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırmakta, oksijen tüketimini artırmakta ve daha fazla ekzotermik ısı açığa çıkmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak sistem, kritik sıcaklığa ulaştığında kendi kendini hızlandıran bir reaksiyon döngüsüne girerek tutuşma ile sonuçlanmaktadır (Beamish ve Theiler, 2019).

Kömürlerin düşük sıcaklık oksidasyon davranışı yalnızca sıcaklık değişimine bağlı olmayıp; kömürleşme derecesi, petrografik yapı, gözeneklilik, tane boyutu, mineral madde ve nem içeriği, oksijen konsantrasyonu, hava akım hızı ve depolama koşulları gibi çok sayıda fiziksel ve kimyasal parametreden etkilenmektedir. Bununla birlikte literatürde, kömürün içsel özellikleri arasında uçucu madde (Volatile Matter, VM) miktarının düşük sıcaklık oksidasyon reaktivitesini belirleyen en önemli parametrelerden biri olduğu konusunda genel bir görüş birliği bulunmaktadır (Speight, 2013).

Uçucu madde, kömürün inert atmosfer altında standart koşullarda ısıtılması sırasında gaz ve buhar fazına geçen organik bileşiklerin toplamını ifade etmekte olup; hidrokarbonlar, oksijenli organik bileşikler, karbon monoksit, karbon dioksit, hidrojen ve diğer düşük molekül ağırlıklı uçucu bileşenleri kapsamaktadır (Speight, 2013). Uçucu madde miktarı, kömürleşme derecesi ile yakından ilişkili olup genel olarak kömür rankı arttıkça azalmakta, düşük ve orta ranklı kömürlerde ise daha yüksek değerlere ulaşmaktadır (Thomas, 2013). Bu durum, düşük ranklı kömürlerde bulunan alifatik zincirler ile hidroksil, karbonil ve karboksil gibi oksijenle kolay reaksiyona girebilen fonksiyonel grupların daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla uçucu madde miktarı arttıkça kömürün kimyasal reaktivitesi yükselmekte ve oksijen adsorpsiyonu daha düşük sıcaklıklarda başlayabilmektedir.

Yüksek uçucu madde içeren kömürlerde bulunan organik bileşiklerin önemli bir bölümü düşük aktivasyon enerjisine sahip olduğundan oksidasyon reaksiyonları daha erken sıcaklıklarda başlayabilmektedir. Bu kömürlerde peroksit ve hidroperoksit oluşumu daha hızlı gerçekleşmekte, bunların parçalanması sonucu meydana gelen serbest radikaller yeni zincir reaksiyonlarını tetikleyerek ekzotermik ısı üretimini artırmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda açığa çıkan uçucu hidrokarbonlar ve oksijenli organik bileşikler gaz fazında da oksidasyona uğrayarak ilave ısı üretmekte ve kömür kütlesi içerisindeki sıcaklık artışını hızlandırmaktadır. Böylece uçucu madde, yalnızca

oksidasyon reaksiyonlarının başlamasında değil, aynı zamanda reaksiyonların devamlılığının sağlanmasında ve kendi kendine ısınma hızının artmasında da önemli rol oynamaktadır. Onifade ve Genç (2019), uçucu madde miktarındaki artışın kömürlerin düşük sıcaklık oksidasyon reaktivitesini belirgin şekilde artırdığını ve buna bağlı olarak kendiliğinden yanma eğilimini önemli ölçüde yükselttiğini bildirmiştir.

Uluslararası literatürde gerçekleştirilen çok sayıda deneysel çalışma, uçucu madde içeriği yüksek taşkömürlerinin daha fazla oksijen adsorbe ettiğini, daha yüksek oksijen tüketim hızına sahip olduğunu ve düşük sıcaklıklarda daha yoğun ekzotermik reaksiyonlar gerçekleştirdiğini göstermektedir. Buna bağlı olarak bu kömürlerin Crossing Point Temperature (CPT) değerlerinin daha düşük olduğu, kendi kendine ısınma hızlarının arttığı ve termal kararlılıklarının azaldığı bildirilmektedir (Beamish ve Arısoy, 2008; Wang ve ark., 2014; Li ve ark., 2020). Özellikle uzun süreli depolama alanları, stok sahaları, göçük bölgeleri ve yetersiz havalandırılan yeraltı açıklıklarında yüksek uçucu madde içeren kömürlerin kendiliğinden yanma açısından daha yüksek risk taşıdığı çeşitli araştırmalarla ortaya konulmuştur. Bu nedenle uçucu madde miktarı, kömürlerin düşük sıcaklık oksidasyon davranışının ve kendiliğinden yanma eğiliminin değerlendirilmesinde en güvenilir kalite göstergelerinden biri olarak kabul edilmekte ve günümüzde gerçekleştirilen birçok deneysel çalışmada temel değerlendirme parametresi olarak kullanılmaktadır (Clemens ve ark., 1991; Beamish ve Arısoy, 2008; Wang ve ark., 2014; Li ve ark., 2020).

3. TAŞKÖMÜRLERİNDE KENDİLİĞİNDEN YANMA EĞİLİMİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Kömürlerin kendiliğinden yanma eğiliminin güvenilir biçimde belirlenebilmesi amacıyla laboratuvar ve saha çalışmalarında çok sayıda deneysel yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin temel amacı, kömürün düşük sıcaklık oksidasyon davranışını nicel olarak belirlemek ve farklı kömürlerin kendiliğinden yanma potansiyellerini karşılaştırılabilir parametreler yardımıyla değerlendirmektir. Günümüzde en yaygın kullanılan yöntemler arasında Crossing Point Temperature (CPT) testi, R70 kendi kendine ısınma testi, Termogravimetrik Analiz (TG), Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) yer almaktadır.

3.1 Crossing Point Temperature (CPT)

Crossing Point Temperature (CPT) yöntemi, kömürlerin kendiliğinden yanma eğiliminin belirlenmesinde en yaygın kullanılan laboratuvar yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde kontrollü bir sıcaklık programı altında ısıtılan kömür numunesinin sıcaklığı ile fırın sıcaklığı sürekli olarak izlenmektedir. Oksidasyon reaksiyonları sonucunda kömürün kendi sıcaklığının fırın sıcaklığını geçtiği nokta Crossing Point Temperature olarak tanımlanmaktadır (Kaymakçı ve Didari, 2002). CPT değerinin düşük olması, kömürün daha düşük sıcaklıklarda yoğun ekzotermik reaksiyonlar gerçekleştirdiğini ve dolayısıyla kendiliğinden yanma eğiliminin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Uygulama kolaylığı, kısa deney süresi ve farklı kömürlerin karşılaştırılmasına olanak sağlaması nedeniyle CPT yöntemi günümüzde en güvenilir laboratuvar yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Literatürde yüksek uçucu madde içeren taşkömürlerinin daha düşük CPT değerlerine sahip olduğu ve bunun oksidasyon reaktivitesinin arttığını gösterdiği bildirilmektedir (Beamish ve Arısoy, 2008; Wang ve ark., 2014).

3.2 R70 Kendi Kendine Isınma Testi

Kömürlerin kendiliğinden yanma potansiyelinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan diğer yöntemlerden biri R70 kendi kendine ısınma testidir. Bu yöntemde kömür numunesinin 40–70 °C sıcaklık aralığında kendi kendine ısınma hızı belirlenmekte ve elde edilen sıcaklık artış oranı kullanılarak kömürün oksidasyon reaktivitesi değerlendirilmektedir (Beamish ve Theiler, 2019). R70 değeri arttıkça kömürün oksijene karşı reaktivitesi ve buna bağlı olarak kendiliğinden yanma eğilimi de artmaktadır. Özellikle orta ve yüksek uçucu madde içeren bitümlü kömürlerde daha yüksek R70 değerleri elde edildiği ve bu kömürlerin düşük sıcaklık oksidasyonuna daha duyarlı olduğu çeşitli araştırmalarda ortaya konulmuştur (Li ve ark., 2020). R70 yöntemi, CPT yöntemi ile birlikte uluslararası madencilik sektöründe en yaygın kullanılan standart deneylerden biri olarak kabul edilmektedir.

3.3 Termal Analiz Yöntemleri

Son yıllarda kömürlerin düşük sıcaklık oksidasyon davranışının daha ayrıntılı olarak incelenebilmesi amacıyla Termogravimetrik Analiz (TG), Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) gibi ileri termal analiz teknikleri yaygın biçimde kullanılmaktadır (Speight, 2013). TG analizleri, sıcaklık artışı sırasında kömürün kütle değişimini belirleyerek oksidasyon ve bozunma süreçlerinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. DTA yöntemi, kömür ile referans madde arasındaki sıcaklık farkını ölçerek endotermik ve ekzotermik reaksiyonların gerçekleştiği sıcaklık aralıklarını ortaya koyarken, DSC yöntemi reaksiyonlar sırasında açığa çıkan veya soğurulan ısı miktarını doğrudan ölçmektedir. Bu teknikler sayesinde düşük sıcaklık oksidasyonunun başlangıç sıcaklığı, reaksiyon kinetiği, aktivasyon enerjisi ve ekzotermik pik sıcaklıkları yüksek doğrulukla belirlenebilmektedir.

Literatürde gerçekleştirilen çok sayıda TG–DSC çalışması, yüksek uçucu madde içeren taşkömürlerinde ekzotermik reaksiyonların daha düşük sıcaklıklarda başladığını ve daha yüksek ısı açığa çıktığını göstermektedir (Wang ve ark., 2014). Bu bulgular, uçucu madde miktarının kömürün oksidasyon davranışı üzerindeki belirleyici etkisini desteklemekte ve termal analiz yöntemlerinin kendiliğinden yanma riskinin değerlendirilmesinde güçlü araçlar olduğunu ortaya koymaktadır.

4. MALZEME ve YÖNTEM

4.1. Kömür Numuneleri

Bu çalışmada deneysel analizlerde, Zonguldak Taşkömürü Havzası ile Bartın ili Amasra bölgesinden temin edilen toplam 23 farklı taşkömürü numunesi kullanılmıştır. Numuneler, havzanın farklı üretim bölgelerini temsil edecek şekilde Zonguldak iline bağlı Kilimli, Kozlu, Merkez ve Ereğli ilçeleri ile Bartın ilinin Amasra ilçesindeki işletmelerden alınmıştır. Numune seçiminde farklı kömürleşme derecelerine ve farklı uçucu madde içeriklerine sahip taşkömürlerinin çalışmaya dâhil edilmesine özen gösterilmiş, böylece uçucu madde içeriğinin kendiliğinden yanma eğilimi üzerindeki etkisinin geniş bir değişim aralığında değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada kullanılan kömür numunelerinin uçucu madde içerikleri %17,78–39,02, Crossing Point Temperature (CPT) değerleri 135–201 °C ve FCC indeks değerleri 3,06–9,75 arasında değişmektedir. Numunelerin alındığı lokasyonlar ile temel özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Ayrıca kömür örneklerinin temin edildiği üretim sahalarının coğrafi dağılımı Türkiye haritası üzerinde gösterilmiş olup numune alım noktaları Şekil 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Kömür örneklerinin alındığı yerlere ait bilgiler.

Örnek No	İli	İlçesi	Uçucu Madde Miktarı (%)	CPT	FCC
1	Zonguldak	Kilimli	17,78	199	3,16
2	Zonguldak	Kilimli	23,61	178	4,94
3	Zonguldak	Kilimli	23,61	200	3,16
4	Zonguldak	Kilimli	24,86	201	3,06
5	Zonguldak	Kozlu	27,26	176	4,46
6	Zonguldak	Merkez	27,94	180	4,30
7	Zonguldak	Merkez	29,47	178	4,45
8	Zonguldak	Kozlu	29,55	167	4,92
9	Zonguldak	Kilimli	29,56	141	9,75
10	Zonguldak	Kozlu	29,92	150	5,87
11	Zonguldak	Kilimli	29,94	152	6,29
12	Zonguldak	Kozlu	30,02	145	8,07
13	Zonguldak	Kilimli	30,61	152	6,29
14	Bartın	Amasra	32,14	145	5,79
15	Zonguldak	Kilimli	32,32	148	6,73
16	Bartın	Amasra	32,87	145	5,50
17	Bartın	Amasra	33,42	135	8,08
18	Zonguldak	Kilimli	33,90	144	6,98
19	Zonguldak	Ereğli	34,87	151	5,97
20	Zonguldak	Ereğli	34,94	155	5,82
21	Zonguldak	Kilimli	37,46	142	7,90
22	Zonguldak	Kilimli	38,74	152	6,35
23	Zonguldak	Kilimli	39,02	162	6,50

Şekil 1. Kömür örneklerinin alındığı yerler.

Deneylere başlanmadan önce tüm kömür numuneleri laboratuvar ortamında homojen hale getirilmiş, uygun tane boyutuna indirgenmiş ve analiz süresince nem değişimini önlemek amacıyla hava geçirmeyen kaplarda muhafaza edilmiştir. Böylece deneysel sonuçların yalnızca kömürlerin doğal fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanması sağlanmıştır.

4.2. Kısa Analiz Deneyleri

Kömür örneklerinin temel yakıt karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla tüm numuneler üzerinde kısa analiz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Analizler kapsamında kömürlerin nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon içerikleri belirlenmiştir. Özellikle uçucu madde miktarı, bu çalışmanın temel bağımsız değişkenini oluşturmuş ve kömürlerin düşük sıcaklık oksidasyon davranışı ile kendiliğinden yanma eğilimi arasındaki ilişkinin değerlendirilmesinde esas parametre olarak kullanılmıştır.

4.3. Kendiliğinden Yanma Eğiliminin Belirlenmesi

Kömür örneklerinin kendiliğinden yanma eğilimleri Crossing Point Temperature (CPT) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. CPT yöntemi, düşük sıcaklık oksidasyon davranışının değerlendirilmesinde uluslararası literatürde en yaygın kullanılan deneysel yöntemlerden biri olup farklı kömürlerin oksidasyon reaktivitesinin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır (Chen ve Chong, 1998; Sensöğüt ve Çınar, 2000; Wang ve ark., 2009; Xu ve ark., 2012; Qi ve ark., 2013; Xu ve ark., 2017).

Bu yöntemde kömür numunesi, sıcaklığı kontrollü olarak artırılan programlanabilir elektrikli fırın içerisine yerleştirilen cam reaktörde oksijen atmosferinde sürekli olarak oksitlenmektedir. Deney süresince kömür sıcaklığı ile fırın sıcaklığı eş zamanlı olarak izlenmekte ve numune sıcaklığının fırın sıcaklığına eşit olduğu kritik sıcaklık Crossing Point Temperature (CPT) olarak tanımlanmaktadır. CPT değerinin düşük olması, kömürün daha düşük sıcaklıklarda ekzotermik oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırdığını ve dolayısıyla kendiliğinden yanma eğiliminin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

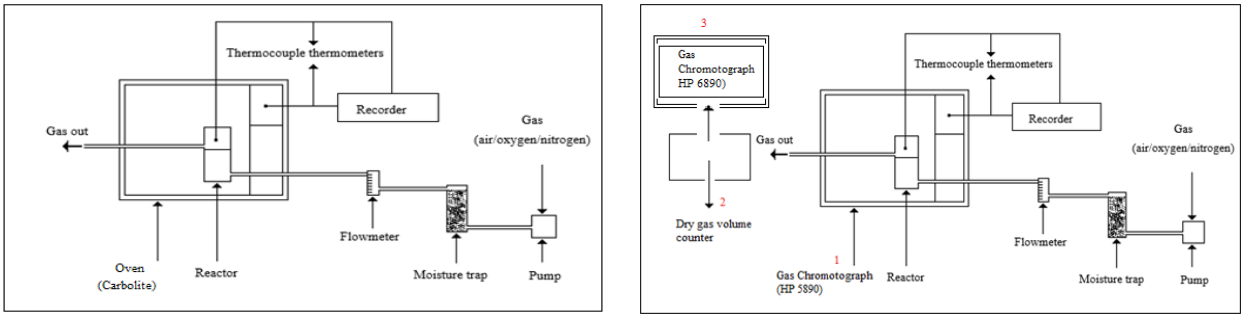
Deneyler, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Kendiliğinden Yanma ve Gaz İçeriği Ölçüm Laboratuvarı bünyesinde bulunan ve CPT yöntemine göre tasarlanmış deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.

4.4. Deney Düzeneği

Kendiliğinden yanma deneyleri, birbirine paralel çalışan iki ayrı deney sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk sistem yalnızca kömürlerin kendiliğinden yanma davranışının belirlenmesine yönelik olarak tasarlanmış olup Şekil 2'de gösterilmektedir. İkinci sistem ise kendiliğinden yanma deneyleri sırasında oluşan gazların eş zamanlı olarak analiz edilmesine olanak sağlayan deney düzeneği olup Şekil 3'te verilmiştir. Her iki deney sisteminin çalışma prensibini gösteren şematik diyagramlar ise Şekil 4a ve Şekil 4b'de sunulmuştur.

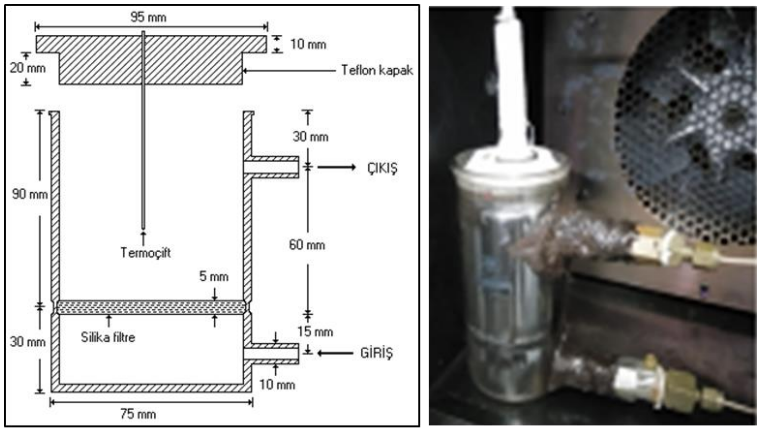
Şekil 2. Kendiliğinden yanma deney seti.

Şekil 3. Kendiliğinden yanma yatkınlığı ve çıkan gazların belirlenmesinde kullanılan deney seti.



(a) (b)

Şekil 4. Kendiliğinden Yanma deney setinin şematik gösterimi, (a) Kendiğinden yanma deney setinin şematik gösterimi, (b) Kendiliğinden yanma yatkınlığı ve çıkan gazların belirlenmesinde kullanılan deney setinin şematik gösterimi (Bilen vd. 2019).



a) b)

Şekil 5. Deneylerde kullanılan reaktör. a) Şematik gösterim, b) Reaktöre ait bir resim.

Deneylerde kullanılan reaktör, yüksek sıcaklıklara dayanıklı borosilikat camdan özel olarak tasarlanmıştır. Reaktör içerisinde kömür numunesinin yerleştirildiği silika filtre bulunmakta olup, kontrollü hava akışı filtre altından verilerek kömür yatağı boyunca homojen biçimde geçmesi sağlanmıştır. Böylece tüm kömür hacminde oksijen dağılımının eşit olması ve oksidasyon reaksiyonlarının kontrollü koşullarda gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Reaktörün üst kısmı hava sızıntılarını önlemek amacıyla teflon kapak ile kapatılmış, numune sıcaklığı ise reaktör merkezine yerleştirilen Pt100 termoçift yardımıyla sürekli olarak ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan reaktörün şematik gösterimi ve laboratuvar görüntüsü sırasıyla Şekil 5a ve Şekil 5b'de verilmiştir.

Sıcaklık ölçümleri dijital veri toplama sistemi kullanılarak çevrim içi olarak gerçekleştirilmiş ve hem fırın sıcaklığı hem de kömür sıcaklığı deney boyunca sürekli kaydedilmiştir. Böylece oksidasyon reaksiyonları sırasında meydana gelen sıcaklık değişimleri yüksek hassasiyetle izlenmiş ve CPT değerleri doğru şekilde belirlenmiştir.

4.5 Deney Koşulları

Tüm deneyler aynı laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiş ve deney parametreleri sabit tutulmuştur. Her deneyde 35 ± 0,1 g kömür numunesi kullanılmıştır. Numuneler üzerinden 100 ± 0,5 mL/dak debide kuru hava geçirilmiş ve elektrikli fırının sıcaklığı 0,5 °C/dak sabit ısıtma hızı ile artırılmıştır. Numune sıcaklığı Pt100 sıcaklık sensörü yardımıyla sürekli ölçülmüş ve Modbus tabanlı veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deneylerin tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla her kömür numunesi paralel olarak analiz edilmiş ve sonuçların uyumlu olduğu doğrulanmıştır.

4.6 FCC İndeksinin Hesaplanması ve İstatistiksel Analiz

Deneyler sonunda her kömür numunesi için Crossing Point Temperature (CPT), göreceli tutuşma sıcaklığı, 110–220 °C sıcaklık aralığındaki ortalama sıcaklık artış hızı ve Feng–Chakravorty–Cochrane (FCC) indeksi hesaplanmıştır. FCC indeksi, Feng ve ark. (1973) tarafından geliştirilmiş olup kömürün göreceli tutuşma sıcaklığı ile belirli sıcaklık aralığındaki ısınma hızını birlikte değerlendiren ampirik bir kendiliğinden yanma göstergesidir. Hesaplanan FCC değerleri kullanılarak kömür örnekleri 0–5 (düşük), 5–10 (orta) ve >10 (yüksek) kendiliğinden yanma eğilimine sahip olacak şekilde sınıflandırılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. FCC indeksine göre kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkınlık değerleri.

FCC Değeri (dak^{-1})	Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlık
0 - 5	Düşük
5 -10	Orta
> 10	Yüksek

Son aşamada elde edilen deneysel veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve uçucu madde içeriği ile CPT ve FCC değerleri arasındaki ilişkiler korelasyon analizleri kullanılarak incelenmiştir. Böylece uçucu madde miktarının kömürlerin düşük sıcaklık oksidasyon davranışı ve kendiliğinden yanma eğilimi üzerindeki etkisi nicel olarak ortaya konulmuştur.

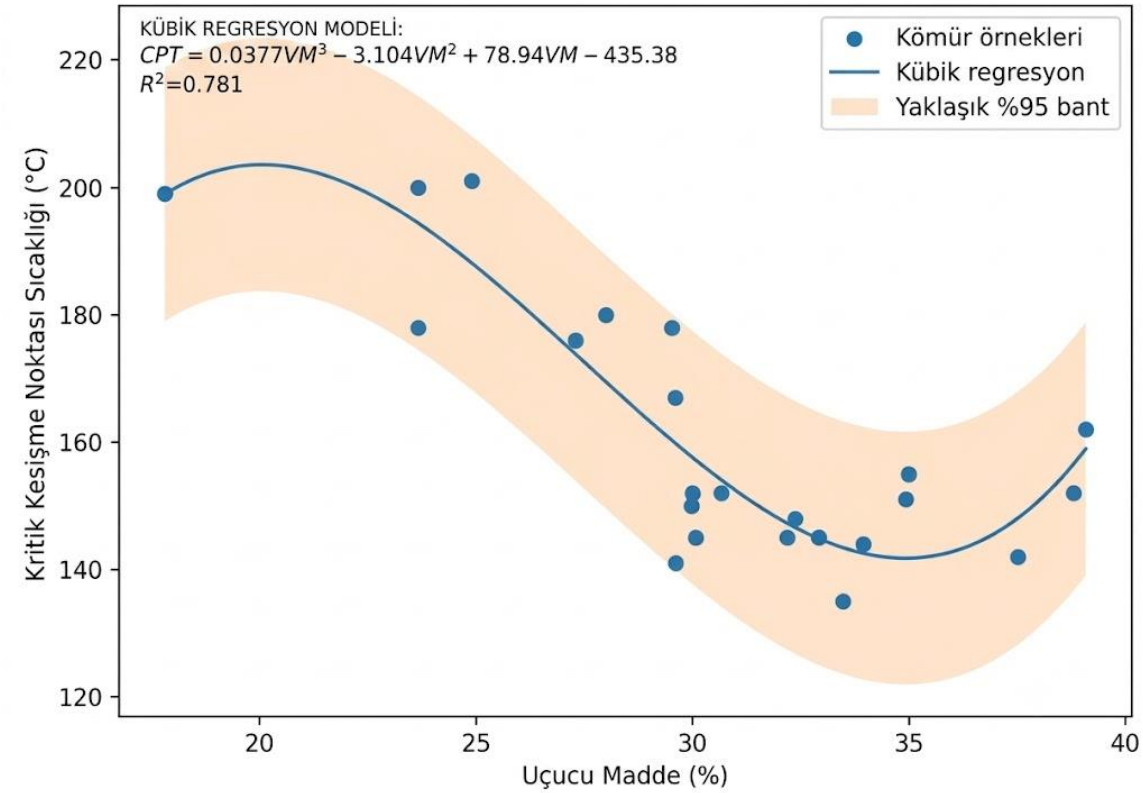
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, Zonguldak Taşkömürü Havzası ile Bartın bölgesinden temin edilen toplam 23 farklı taşkömürü örneğinde uçucu madde (VM) içeriği ile kendiliğinden yanma eğilimi arasındaki ilişki deneysel olarak araştırılmıştır. Kömür örneklerinin uçucu madde içerikleri kısa analiz deneyleri ile belirlenmiş, kendiliğinden yanma eğilimleri ise Crossing Point Temperature (CPT) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneysel veriler arasındaki ilişkinin daha doğru ortaya

konulabilmesi amacıyla farklı regresyon modelleri değerlendirilmiş ve en yüksek açıklama gücünü sağlayan üçüncü dereceden (kübik) regresyon modeli seçilmiştir.

Şekil 6'da, uçucu madde miktarı ile CPT değerleri arasındaki kübik regresyon ilişkisi gösterilmektedir. Analiz sonucunda elde edilen regresyon modeli aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

Model için hesaplanan belirleme katsayısı R^2 = 0,781 olup, CPT değerlerindeki değişimin yaklaşık %78,1'inin yalnızca uçucu madde içeriği ile açıklanabildiğini göstermektedir. Bu sonuç, doğrusal modele göre önemli ölçüde daha yüksek bir uyum sağlamakta ve uçucu madde miktarının kendiliğinden yanma eğiliminin belirlenmesinde temel parametrelerden biri olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Uçucu madde içeriği ile kesişim noktası sıcaklığı (CPT) arasındaki kübik regresyon ilişkisi (R^2 = 0,781).

İncelenen kömür numunelerinde uçucu madde miktarı yaklaşık %18–24 aralığında olduğunda CPT değerlerinin genel olarak 190–200 °C seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Bu durum, düşük uçucu madde içeren taşkömürlerinin düşük sıcaklık oksidasyonuna karşı daha kararlı davrandığını ve kendiliğinden yanma açısından nispeten düşük risk taşıdığını göstermektedir. Uçucu madde içeriğinin yaklaşık %28–35 aralığına yükselmesiyle birlikte CPT değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmiş ve birçok numunede 135–150 °C aralığına kadar düştüğü gözlenmiştir. CPT değerlerindeki bu düşüş, kömürün oksijenle daha düşük sıcaklıklarda reaksiyona girdiğini ve düşük sıcaklık oksidasyon kinetiğinin hızlandığını göstermektedir.

Kübik regresyon eğrisi incelendiğinde ilişkinin tamamen doğrusal olmadığı açıkça görülmektedir. Özellikle orta uçucu madde aralığında CPT değerlerinde hızlı bir azalma meydana gelirken, yüksek uçucu madde içeriklerinde eğrinin yataylaşmaya başladığı ve bazı örneklerde CPT değerlerinin tekrar sınırlı ölçüde yükseldiği gözlenmektedir. Bu davranış, kendiliğinden yanma eğiliminin yalnızca uçucu madde miktarı tarafından belirlenmediğini; kömürleşme derecesi, petrografik yapı, gözeneklilik, mineral madde içeriği, nem ve oksijen difüzyonu gibi diğer fiziksel ve kimyasal özelliklerin de sürece önemli katkılar sağladığını göstermektedir. Dolayısıyla yüksek uçucu madde içeriği, kendiliğinden yanma açısından önemli bir gösterge olmakla birlikte, tek başına tüm davranışı açıklayan bir parametre değildir.

Elde edilen sonuçlar, kömürün düşük sıcaklık oksidasyon mekanizmasını açıklayan literatür ile önemli ölçüde uyumludur. Clemens ve ark. (1991), kömür yüzeyindeki oksijen adsorpsiyonunun düşük sıcaklıklarda ekzotermik reaksiyonları başlattığını ve sıcaklığın artmasıyla birlikte reaksiyon hızının belirgin biçimde yükseldiğini bildirmiştir. Benzer şekilde Beamish ve Arısoy (2008), yüksek uçucu madde içeren kömürlerde oksijen adsorpsiyon kapasitesinin arttığını ve buna bağlı olarak CPT değerlerinin düştüğünü rapor etmiştir. Li ve ark. (2020) ise uçucu maddece zengin kömürlerin düşük sıcaklıklarda daha yüksek oksijen tüketim hızına sahip olduğunu ve bunun kendi kendine ısınma sürecini hızlandırdığını göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen deneysel bulgular da söz konusu araştırmaları desteklemekte ve uçucu madde miktarındaki artışın CPT değerlerini düşürerek kendiliğinden yanma eğilimini artırdığını doğrulamaktadır.

Kömür bünyesinde bulunan uçucu bileşiklerin düşük bağ enerjisine sahip organik yapılar içermesi nedeniyle oksijen ile daha düşük sıcaklıklarda reaksiyona girebildiği bilinmektedir (Speight, 2013; Thomas, 2013). Düşük sıcaklık oksidasyonu sırasında oluşan peroksit ve hidroperoksit ara ürünlerinin parçalanması sonucunda yeni serbest radikaller oluşmakta ve bu durum zincirleme ekzotermik reaksiyonları hızlandırmaktadır (Onifade ve Genç, 2019). Böylece sıcaklık arttıkça Arrhenius kinetiğine uygun olarak reaksiyon hızı yükselmekte, üretilen ısı ortamdan uzaklaştırılamadığı takdirde sistem termal kaçak bölgesine ulaşarak kendiliğinden yanma meydana gelmektedir. Bu mekanizma, özellikle yüksek uçucu madde içeren taşkömürlerinde daha belirgin olarak gözlenmektedir.

Şekil 6'da verilen yaklaşık %95 güven bandı, regresyon modelinin tahmin belirsizliğini göstermektedir. Orta uçucu madde aralığında güven bandının daralması, modelin bu bölgede daha yüksek doğrulukla tahmin yaptığını ortaya koyarken, düşük ve yüksek uçucu madde seviyelerinde güven aralığının genişlemesi örnekler arasındaki doğal değişkenliğin arttığını göstermektedir. Bu durum, kömürlerin heterojen yapısından kaynaklanmakta olup literatürde farklı kömür damarlarında gözlenen doğal varyasyonlarla uyumludur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, elde edilen R^2 = 0,781 değeri, uçucu madde içeriğinin kendiliğinden yanma eğiliminin belirlenmesinde güçlü bir açıklayıcı

değişken olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte modelde açıklanamayan yaklaşık %21,9'luk varyasyonun; nem, kül, sabit karbon, petrografik bileşim, makeral dağılımı, mineral madde içeriği, tane boyutu ve gözenek yapısı gibi diğer parametrelerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu nedenle gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda çok değişkenli regresyon veya makine öğrenmesi tabanlı modellerin kullanılmasıyla kendiliğinden yanma eğiliminin daha yüksek doğrulukla tahmin edilmesi mümkün olabilecektir.

Sonuç olarak bu çalışma, Zonguldak ve Bartın taşkömürlerinde uçucu madde içeriği ile kendiliğinden yanma eğilimi arasında güçlü, doğrusal olmayan ve istatistiksel olarak anlamlı bir ilişkinin bulunduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen kübik regresyon modeli, doğrusal yaklaşımlara kıyasla deneysel verileri daha başarılı şekilde temsil etmiş ve uçucu madde miktarının düşük sıcaklık oksidasyon davranışını açıklayan temel parametrelerden biri olduğunu göstermiştir. Bu bulguların, yeraltı kömür işletmelerinde kendiliğinden yanma riskinin önceden belirlenmesi, yüksek riskli damarların sınıflandırılması ve yangın önleme stratejilerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalara önemli bilimsel katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

6. DEĞERLENDİRME

Elde edilen bulgular, uçucu madde içeriği ile Crossing Point Temperature (CPT) arasındaki ilişkinin doğrusal olmaktan ziyade doğrusal olmayan (nonlineer) bir karakter sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle çalışmada oluşturulan kübik regresyon modeli, deneysel verileri doğrusal modele kıyasla daha başarılı bir şekilde temsil etmiş ve $R^2 = 0,781$ belirleme katsayısı ile değişkenler arasındaki ilişkinin önemli bir bölümünü açıklamıştır (Şekil 6). Regresyon eğrisi incelendiğinde, uçucu madde miktarının yaklaşık %18–35 aralığında artmasıyla CPT değerlerinde belirgin bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, uçucu maddece zengin taşkömürlerinin düşük sıcaklıklarda oksijenle daha kolay reaksiyona girdiğini, oksijen adsorpsiyon kapasitesinin arttığını ve ekzotermik oksidasyon reaksiyonlarının daha düşük sıcaklıklarda hızlandığını göstermektedir. Dolayısıyla, uçucu madde miktarındaki artış kömürün düşük sıcaklık oksidasyon reaktivitesini artırarak kendiliğinden yanma riskini yükseltmektedir.

Kübik regresyon eğrisi ayrıca yüksek uçucu madde içeriklerinde (yaklaşık %37–39) CPT değerlerinde sınırlı bir yükselme eğiliminin bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, kendiliğinden yanma eğiliminin yalnızca uçucu madde miktarına bağlı olmadığını; kömürleşme derecesi, petrografik bileşim, mineral madde içeriği, gözeneklilik, nem oranı ve oksijen difüzyonu gibi diğer fiziksel ve kimyasal özelliklerin de süreç üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek uçucu madde içeren bazı numunelerde gözlenen bu sapmalar, kömürün makeral bileşimi ve mikroyapısındaki farklılıkların düşük sıcaklık oksidasyon kinetiğini değiştirebildiğini göstermektedir. Bu nedenle uçucu madde içeriği, kendiliğinden yanma eğiliminin değerlendirilmesinde güçlü bir gösterge olmakla birlikte, tek başına tüm davranışı açıklayabilecek bir parametre değildir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, geliştirilen kübik regresyon modeli deneysel veriler ile teorik yaklaşım arasında güçlü bir uyum sağlamış ve uçucu madde içeriğinin taşkömürlerinin kendiliğinden yanma eğiliminin tahmin edilmesinde güvenilir bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen $R^2 = 0,781$ değeri, CPT değişiminin yaklaşık %78'inin uçucu madde içeriği ile açıklanabildiğini göstermekte olup, modelin mühendislik uygulamalarında ön değerlendirme amacıyla kullanılabilecek yeterli doğruluk düzeyine sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda nem, kül, sabit karbon, vitrinite yansıması, petrografik bileşim ve gözeneklilik gibi ilave parametrelerin çok değişkenli istatistiksel veya makine öğrenmesi tabanlı modellere dahil edilmesiyle tahmin performansının daha da artırılabileceği değerlendirilmektedir. Böylece yeraltı kömür işletmelerinde kendiliğinden yanma riskinin daha hassas biçimde öngörülmesi ve uygun önleyici tedbirlerin geliştirilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

Arisoy, A. (2007). Low temperature oxidation of coals. Fuel, 86, 1152–1161.

Clemens, A. H., Matheson, T. W., & Rogers, D. E. (1991). Low temperature oxidation of coal. Fuel, 70, 215–221.

Xie, Q. (2022). Research Progress on Spontaneous Combustion Characteristics of Coal. Academic Journal of Science and Technology

Kaymakçı, E., & Didari, V. (2002). Relations between spontaneous combustion and coal properties. Fuel, 81, 1921–1927.

Singh, R. V. K. (2013). Mine Fires and Spontaneous Combustion. Springer.

Beamish, B. B., & Arisoy, A. (2008). Effect of volatile matter on coal self-heating. International Journal of Coal Geology, 76, 85–92.

Kural, O. (1998). Kömür. İTÜ Vakfı Yayınları.

Wang, H., Dlugogorski, B. Z., & Kennedy, E. M. (2014). Coal oxidation behaviour at low temperatures. Fuel, 134, 315–323.

Serkan İnal & Kerim Aydıner (2019). Kömürün kendiliğinden yanması ve etki eden faktörler.

Onifade, M. & Genc, B. (2019). Spontaneous combustion liability of coal and coal-shale: a review of prediction methods.

Speight, J. G. (2013). The Chemistry and Technology of Coal. CRC Press.

Li, Z., Deng, J., Xiao, Y. (2020). Influence of volatile matter on coal oxidation. Energy, 202, 117–128.

Thomas, L. (2013). Coal Geology. Wiley.

Bilen M., Kaymakçı E., Yılmaz S., Çakır A. (2019) An Alternative Spontaneous Combustion Experiment Set-up by Employing an Old Version Gas Chromatograph, 7 Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi Bildiriler Kitabı, sf:92

C. Sensogut, I. Cinar A research on the Spontaneous Combustion Tendency of Turkish Coals-Ilgin Lignite's Case Mineral. Resour. Eng., 09 (04) (2000), pp. 9-14, 10.1142/S0950609800000342

Chen X.D., Chong L.V. Several Important Issues Related to the Crossing-Point Temperature (CPT) Method for Measuring Self-Ignition Kinetics of Combustible Solids Process Saf. Environ. Prot., 76 (2) (1998), pp. 90-93, 10.1205/095758298529380

Qi X., H. Xin, D. Wang, G. Qi A rapid method for determining the R70 self-heating rate of coal Thermochim. Acta, 571 (2013), pp. 21-27, 10.1016/j.tca.2013.08.008

Xu Y.L., D.M. Wang, L.Y. Wang, X.X. Zhong, T.X. Chu Experimental research on inhibition performances of the sand-suspended colloid for coal spontaneous combustion Saf. Sci., 50 (4) (2012), pp. 822-827, 10.1016/j.ssci.2011.08.026

Wang D.M., X.Y. Qi, X.X. Zhong, J.J. Gu Test method for the propensity of coal to spontaneous combustion Procedia Earth Planet. Sci., 1 (1) (2009), pp. 20-26, 10.1016/j.proeps.2009.09.006

ULTRA-DÜŞÜK PERMEABİLİTELİ BİR KÖMÜR DAMARINDA METAN KONTROLÜ: PARAMETRİK ANALİZLER VE DRENAJ STRATEJİSİ

METHANE CONTROL IN ULTRA-LOW PERMAEABILITY COAL SEAM: PARAMETRİC ANALYSES AND DRAINAGE STRATEGY

Emel Yılmaz*

A Sınıfı İş Güvenliği Uzmanı, Maden Mühendisi, Zonguldak

Erdemir Madencilik San. ve Tic. A.Ş., Zonguldak

Kemal Barış

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, ZMYO, Zonguldak

ÖZET Bu çalışmada, yeraltı taşkömürü madenciliğinde can güvenliği ve üretim sürekliliği açısından kritik öneme sahip olan metan gazının kontrolü ve drenajı incelenmiştir. Büyük Damar'da teşkil edilen panodan alınan kömür örnekleri üzerinde gaz içeriği, gaz bileşimi, permeabilite ve kendiliğinden yanmaya yatkınlık testleri yürütülmüştür. Ayrıca Venturi tüpü ve boru hattı sistemi kullanılarak eski imalat sahalarından yayılan gaz emisyonları ölçülmüştür. Analiz sonuçları, kömürün gaz içeriğinin 4,14-9,67 m^3/t arasında değiştiğini ve desorbe gazın ortalama %94,74'ünün metandan oluştuğunu göstermiştir. Permeabilite ölçümleri, damarın 0,001-0,003 mD ile ultra-düşük geçirgenlik sınıfında olduğunu, kendiliğinden yanma riskinin ise orta düzeyde bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu veriler ışığında, hazırlık aşamasında pano içi deliklerle drenajın verimsiz olacağı belirlenmiş; üretim sırasında göçük tavanına yapılacak eğimli sondajlar ve göçük içi borularla metan emilmesini içeren bir drenaj sistemi tasarımı önerilmiştir.

ABSTRACT In this study, the control and drainage of methane gas, which is critical for occupational safety and production continuity in underground coal mining, were investigated. Methane content, gas composition, permeability, and spontaneous combustion susceptibility tests were conducted on coal samples collected from the panel developed in the Buyuk seam. Additionally, gas emissions from old workings were measured using a Venturi tube and pipeline system. Analysis results indicated that the gas content of the coal varies between 4.14 and 9.67 m^3/t, with methane constituting an average of 94.74% of the desorbed gas. Permeability measurements revealed that the seam is in the ultra-low permeability class with 0.001–0.003 mD, while the risk of spontaneous combustion was determined to be at a moderate level. In light of these data, it was concluded that drainage via in-seam boreholes during the development stage would be inefficient; thus, a drainage system design involving inclined boreholes drilled into the goaf roof and pipes left within the goaf during production has been proposed.

* *emel.yilmaz@erdemirmaden.com.tr*

1. GİRİŞ

Yeraltı kömür madenciliğinde karşılaşılan en önemli iş sağlığı ve güvenliği sorunlarından biri kömürleşme sürecinde oluşan ve kömür matrisinde sıkışıp kalan metan gazının (CH_4), üretim faaliyetleri sırasında serbest kalarak ocak atmosferine karışmasıdır. Metan; renksiz, kokusuz ve yüksek yanıcılık özelliğine sahip bir gaz olup, belirli konsantrasyon aralıklarında (hacimce yaklaşık %5-15 arasında) hava ile karıştığında patlayıcı bir ortam oluşturabilmektedir. Bu nedenle yeraltı kömür ocaklarında metan kontrolü, yalnızca üretimin sürekliliği açısından değil, aynı zamanda çalışanların can güvenliği ve işletmenin emniyetli şekilde faaliyet göstermesi açısından da kritik bir öneme sahiptir. Temel olarak metan gazının kontrolü havalandırma sistemleri ile sağlanmaya çalışılmakta, ancak yüksek metan içerikli veya yüksek üretim kapasiteli ocaklarda yalnızca havalandırma yöntemleri yeterli olmamaktadır.

Havalandırma sistemlerinin tek başına yeterli olmadığı yüksek gaz içeren kömür ocaklarında, metanın kontrolsüz bir şekilde ocağa yayılmasını önlemek amacıyla metan drenajı yöntemlerine başvurulur. Metan drenajı; kömürün üretilmesi öncesinde, üretim esnasında veya üretim sonrasında gazın ocak atmosferine deşarj olmasına izin vermeden, özel sondaj kuyuları ve boru hatları vasıtasıyla doğrudan kaynağından (kömür damarı veya çevre kayaçlardan) emilerek yüzeye veya güvenli bir bölgeye taşınması işlemidir (UNECE 2010).

Metan drenajı yapılması kömürün jeolojik yapısına ve kömürde ihtiva eden gazın miktarına ve özelliklerine bağlıdır. Kömürün gaz içeriği, gaz basıncı, geçirgenliği, porozitesi, damar kalınlığı, derinliği, tektonik yapısı, gerilme rejimi ve uygulanacak üretim yöntemi drenaj verimini belirleyen temel parametrelerdir. Özellikle yüksek gaz içerikli (>8–10 m^3/t), düşük doğal geçirgenliğe sahip, derin ve yüksek üretim kapasiteli kömür damarlarında metan drenajı çoğu zaman güvenli üretim için zorunlu hale gelmektedir (Diamond and Schatzel 1998).

Metan drenajının gerekli olup olmayacağı yönünde karar verilme aşamasında tek bir kriter kullanılmamakta; gaz emisyon hızı, kömürün gaz içeriği, bağıl gaz yayılımı, havalandırma kapasitesi ve üretim planı birlikte değerlendirilmektedir.

Çalışmanın gerçekleştirildiği yeraltı ocağı Büyük Damar içerisinde teşkil edilecek panolarda üretim faaliyeti gösterecektir. Panolarda ortalama kömür kalınlığı 6-8m olup bu kalınlığın 3-4'er metrelik kısımlarının tavan ve taban ayak olarak ayrı ayrı üretilmesi planlanmıştır. Çalışmanın gerçekleştirildiği panonun boyu yaklaşık 500 m olup ayak boyu yaklaşık 140m'dir. Panolarda üretim tam mekanize kazı yöntemiyle dönümlü olarak yapılacak olup günlük üretim yaklaşık 3000 ton (tüvenan) olacaktır.

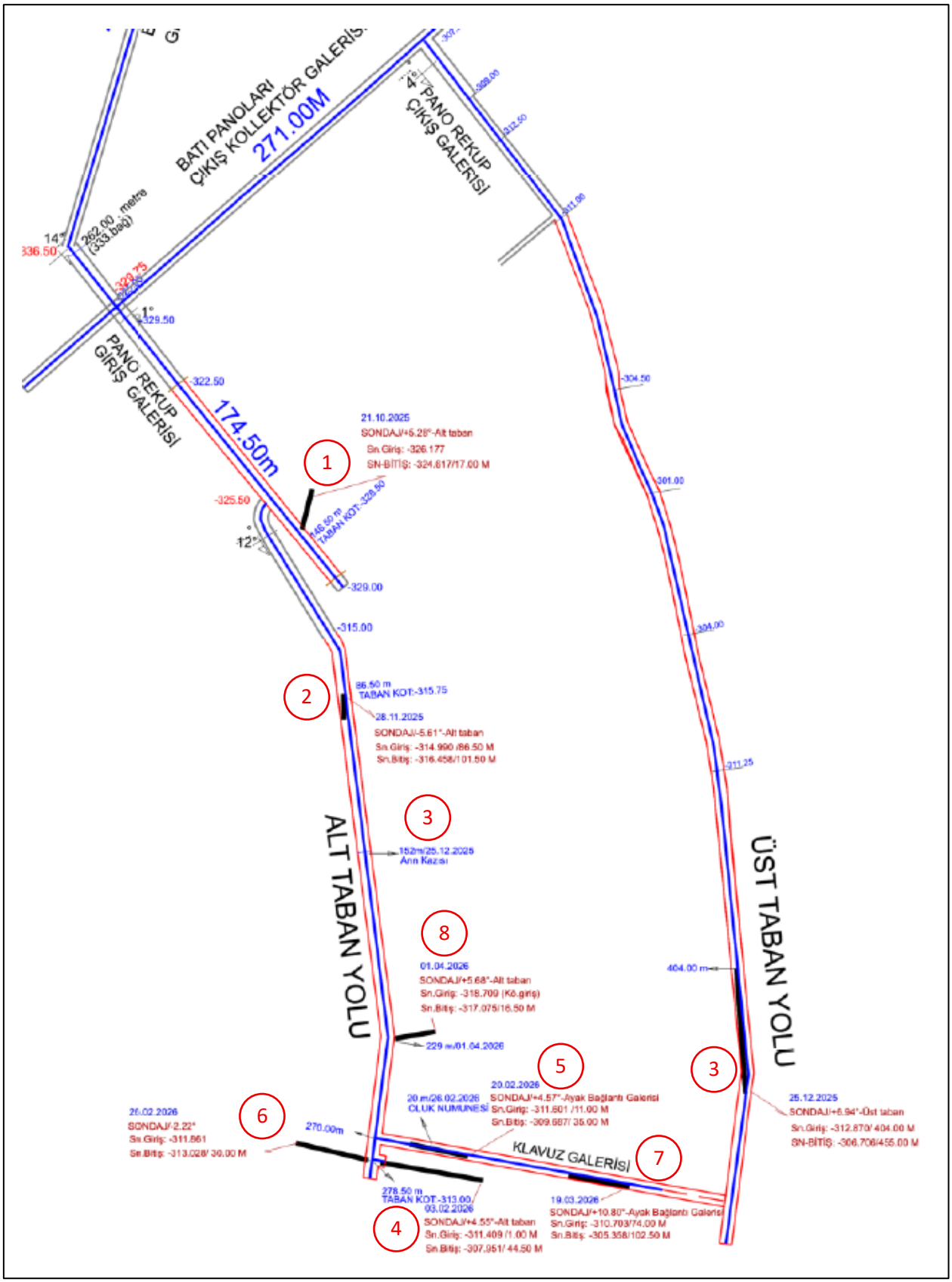
Bu çalışma, esas itibariyle ocakta yapılması planlanan metan drenajı sisteminin tasarımına temel teşkil etmek amacıyla yürütülmüştür. Bu amaçla bir Venturi tüpü ve boru hattı yardımıyla eski imalat sahalarından emilen gazın debisi ve gaz bileşimi

ölçülmüştür. Bu çalışma ile eş zamanlı olarak gaz içeriği ve gaz bileşimini belirlemek üzere 21.10.2025 – 26.02.2026 tarihleri arasında hazırlık aşamasındaki panoda yapılan karotlu-kırıntılı sondajlardan toplam 19 adet örnek temin edilmiş ve analiz edilmiştir (Şekil 1). Bu sondajlara ait bilgiler ve alınan örneklerin kodları Çizelge 1'de sunulmuştur.

Bunun yanında kömür damarının permeabilitesini belirlemek amacıyla örnekler alınarak Fransız VINCI firmasında ölçtürülmüştür. Ayrıca, ocaktan temin edilen örnekler üzerinde kendiliğinden yanmaya yatkınlık testleri de gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Batı 1 panosundan yapılan sondajlara ve alınan kömür örneklerine ait bilgiler.

Sondaj					Örnek
Tarihi	Yeri	Türü	Eğimi (°)	Boyu (m)	Kodu
21.10.2025	Alt Taban Yolu (175. m)	Karotlu	+5.28	17	ZMYO-1 ZMYO-2 ZMYO-3
28.11.2025	Alt Taban Yolu (250. m)	Kırıntılı	-5,61	15	ZMYO-4
25.12.2025	Üst Taban Yolu (405. m)	Kırıntılı	+6,94	51	ZMYO-5 ZMYO-6
25.12.2025 25.12.2025	Alt Taban Yolu Arın (152. m)	Arından parça kömür			ZMYO-7 ZMYO-8
03.02.2026	Alt Taban Yolu (278,5. m)	Kırıntılı	+4,55	43,5	ZMYO-9 ZMYO-10 ZMYO-11 ZMYO-12
20.02.2026	Arın Bağlantı Galerisi	Kırıntılı	+4,57	24,0	ZMYO-13 ZMYO-14 ZMYO-15 ZMYO-16
26.02.2026	Alt Taban Yolu (Pano 2) (278,5. m)	Kırıntılı	-2,22	30,0	ZMYO-17 ZMYO-18
19.03.2026	Arın Bağlantı Galerisi	Kırıntılı	+10,80	28,5	ZMYO-19



Şekil 1. Gaz içeriği ve gaz bileşimi ölçümleri için yapılan sondajların lokasyonları.

2. YÖNTEM

Çalışma kapsamında metan drenajı sistemine yönelik tasarımına çalışmalar esasen iki ana aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada ocakta barajlanmış eski imalatlardan emilecek ocak havasındaki gaz bileşiminin sistematik ölçülmesi hedeflenmiş ve bu amaçla 27.05.2025 – 11.01.2026 tarihleri arasında bir Venturi borusu ve boru hattı yardımıyla eski imalat sahalarından emilen gazın debisi ve gaz bileşimi sürekli olarak ölçülmüştür.

Çalışmanın ikinci aşamasında metan drenaj sistemi tasarımında kullanılmak üzere, sondajlarla alınan örneklerin gaz içerikleri ve gaz bileşimleri belirlenmiştir. Ayrıca, kömür damarının permeabilitesinin belirlenmesi için örnekler alınmış ve permeabilite ölçümleri yaptırılmıştır. Son olarak ise seçilen örnekler üzerinde kendiliğinden yanmaya yatkınlık testleri gerçekleştirilmiştir.

2.1. Eski İmalatlardan Yayılan Gaz Emisyonlarının Belirlenmesi

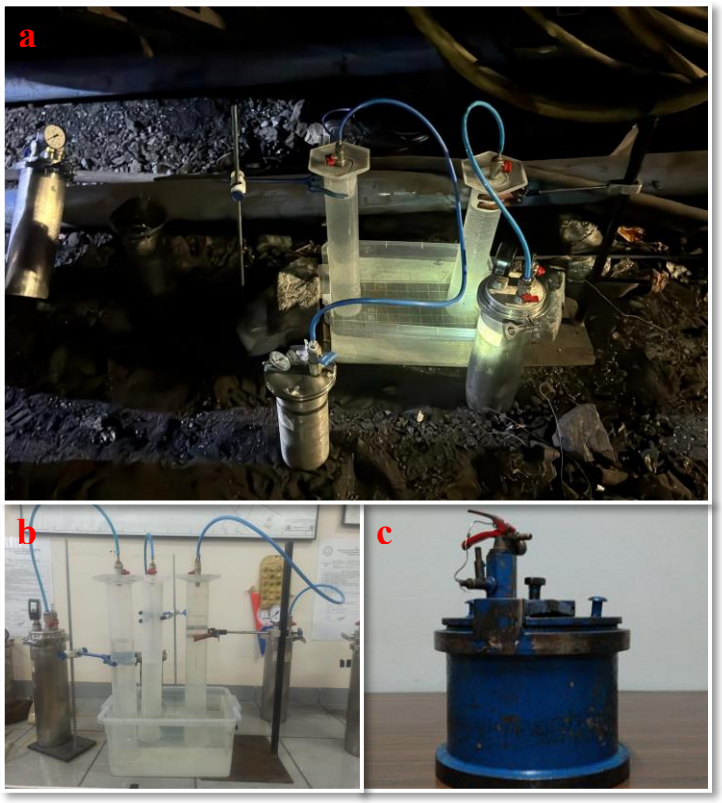
Yeraltı kömür ocaklarında kurulacak metan drenajı tesislerinde sadece kömür damarından ya da ayak göçüğünden değil aynı zamanda eski imalat sahalarından elde edilecek metan emisyonlarının da sistemde kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında yeryüzüne kurulu bir Venturi tüpü ve boru hattı yardımıyla emilen eski imalat sahası havasındaki metan konsantrasyonu ve hacimsel miktarlar 27.05.2025 – 11.01.2026 tarihleri arasında ölçülmüştür (Şekil 2).

Şekil 2. Yerüstünde kurulu Venturi tüpü-boru hattı sistemi.

2.2. Gaz İçeriği ve Bileşiminin Ölçülmesi

Yapılan çalışma kapsamında sondaj çalışmalarından alınan örneklerin gaz içeriklerine yönelik ölçümler AS3980-2016 standardında tanımlanan şekilde "*doğrudan yavaş desorpsiyon*" yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Standards Australia, 2016). Bu yöntemde gaz içeriği ölçülecek damardan sondaj ile elde edilen karot (ya da kırıntılı) örnekleri, hava-sızdırmaz kapalı kanisterlere aktarılmakta ve ölçümler su ölçeğinden yararlanılarak gerçekleştirilmektedir. Ölçümlerde kullanılan düzenekler Şekil 3'te gösterilmektedir.

AS3980-2016'ya göre bir kömür örneğinin toplam gaz içeriği (Q_t); kayıp gaz (Q_1), desorbe gaz (Q_2) ve kalıntı gazın (Q_3) ölçülmesi ve bu üç bileşenin toplanması ile saptanmaktadır. Bu bileşenlerden; Q_1 numunenin sondajın hemen sonrasında sırasında ve sızdırmaz kaba aktarılmasına kadar geçen sürede desorbe olan ancak ölçülemeyen gaz yayılımını, Q_2 sızdırmaz kapta laboratuvar ortamında ölçülen desorbe olan gaz miktarını ve Q_3 ise kömür bünyesinde desorbe olabilecek gazın tamamen bitmesiyle kömür matrisinde hapsolan gazın ölçülmesi için örneğin sızdırmaz bir kap içerisinde (önceden yerleştirilmiş olan bilyalar yardımıyla) -200 meş boyutuna öğütülmesiyle ölçülen gaz miktarını temsil etmektedir. Bu kapsamda, kayıp gaz miktarı (Q_1) sondaj sırasında yapılan ölçümlerden yararlanılarak ekstrapolasyon ile hesaplanmakta, desorbe gaz (Q_2) ve kalıntı gaz (Q_3) ise laboratuvarda ölçülmektedir.



Şekil 3. a) Kayıp gaz (Q_1) için sahada, b) desorbe gaz (Q_2) için laboratuvarda ve c) kalıntı gaz (Q_3) için laboratuvarda kullanılan alet ve düzenekler.

Sondajlarda alınan kömür örnekleri AS3980-2016'ya (Standards Australia 2016) uygun şekilde mümkün olan en hızlı sürede sızdırmaz kaplara aktarılmış ve yeraltında 30-60 dakika boyunca kayıp gaz (Q1) ölçümleri yapılmıştır. Örneklerin oksidasyondan korunabilmesi için kanisterler örnekler su altında kalacak şekilde su ile doldurulmuştur. Kayıp gaz (Q_1) ölçümleri yapılan kanisterler daha sonra laboratuvar ortamına taşınmış ve alınan kömür örnekleri için desorbe gaz (Q_2) miktarları ölçülmeye devam edilmiştir. Taşkömürü örneklerinin bünyesinde bulunan gazın desorbe olması kömür örneğinin gaz içeriğine bağlı olarak uzun zaman almakta ve ölçümlerin sonlandırılması için beş gün arka arkaya ölçülen gaz miktarının o zamana kadar ölçülen toplam gaz miktarının %1'inden az olduğu durumda desorbe gaz ölçümü sonlandırılmakta ve kalıntı gaz (Q_3) ölçümlerine geçilmektedir. Çalışmaya konu olan kömür örneklerinde desorbe gaz ölçümleri ortalama bir aylık bir süre almıştır. Desorbe gaz ölçümleri tamamlanmasını takiben örneklerin kalıntı gaz (Q_3) miktarları da belirlenmiş ve gaz içeriği ölçüm çalışmaları sonlandırılmıştır.

Desorbe gaz ölçümleri sırasında dereceli silindirin içinde biriken gazlar sızdırmaz bir pompa yardımıyla balonlara alınarak, Agilent 7890B model bir gaz kromatografında analiz edilmiştir. Daha sonra elde edilen konsantrasyon değerleri kullanılarak desorbe gazdaki gaz bileşimleri AS3980-2016'ya uygun şekilde hesaplanmıştır.

2.3. Permeabilite Ölçümleri

Gaz permeabilitesinin belirlenmesi amacıyla ocaktan alınan blok kömürlerden iki adet karot hazırlanmıştır. Bunlardan bir tanesi tabakalanma yönünde diğeri ise tabakalanmaya dik yönde alınmıştır. Ölçümler için Fransız VINCI firmasına ait eğitim amaçlı bir permeametre kullanılmıştır (Şekil 4). Tüm sonuçlar, test numunesine uygulanan 100 psi (0,689 MPa) yanal basınç altında belirlenmiştir. Filtrasyon ortamı olarak N_2 kullanılmıştır.

Şekil 4. Ölçümlerde kullanılan test seti.

2.4 Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlığın Belirlenmesi

Çalışma kapsamında gaz içeriği ölçümleri için ocaktan alınan örneklerden seçilen 12 örnek ve arından alınan 3 oluk örneği kullanılarak örneklerinin kendiliğinden yanmaya yatkınlıkların belirlenmesi amacıyla FCC indeksi (Feng, Chacravorty, Cochrane) kullanılmıştır (Feng vd 1973).

Bu yöntemde; -200 meş boyutta 35'er g.'lık örnekler hazırlanmaktadır. Kendiliğinden yanma deneyleri, kesişme noktası yöntemi esaslarına uygun olarak, sıcaklığı doğrusal bir hızla arttırılan bir fırın içerisine yerleştirilmiş olan bir reaktör içindeki kömür yatağından hava geçirilmekte ve böylece kömürün oksidasyonu sağlanmaktadır. Deney sırasında hem fırın hem de örnek sıcaklıkları (bir termoçift ve dijital termometre yardımıyla) düzenli aralıklarla kaydedilmektedir. Daha sonra veriler kullanılarak FCC indeksi ise Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$FCC = \frac{Ortlama\ Sıcaklık\ Artışı\ (OSA)_{(110-220°C)}}{Kesişme\ Noktası\ Sıcaklığı} x100 \qquad (1)$$

Burada; OSA 110-220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışını (°C/dak) göstermektedir. FCC indeksine göre bir kömür örneğinin kendiliğinden yanmaya yatkınlığı ise Çizelge 2'ye göre değerlendirilmektedir.

Çizelge 2. FCC indeksine göre kendiliğinden yanmaya yatkınlık.

FCC Değeri (dak^{-1})	Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlık
0 - 5	Düşük
5 -10	Orta
> 10	Yüksek

3. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm ölçüm ve analizlere ait sonuçlar verilerek elde edilen bulgular değerlendirilecektir.

3.1 Eski İmalatlardan Yayılan Gaz Emisyonları

27.05.2025 – 11.01.2026 tarihleri arasında Ventüri tüpü ve boru hattı sistemi üzerinde toplam 62 adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde ortam sıcaklığı, atmosferik basınç, gaz konsantrasyonlarının yanı sıra sistem üzerinde hacimsel debinin ölçülmesi için yerleştirilen orifis plakası üzerinde basınç farkı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları özet halinde Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Eski imalattan yapılan ölçümlere ait sonuçlar.

Tarih	Ölçüm No	CH_4 (%)	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (%)	N_2 (%)	Q	
							m^3/s	m^3/h
27.05.2025	1	33,00	12,80	1,00	0,03	53,37	0,0490	177
28.05.2025	2	27,00	14,55	1,20	0,02	57,23	0,0682	246
28.05.2025	3	25,50	14,60	1,12	0,02	58,76	0,0681	245
28.05.2025	4	25,50	14,65	1,80	0,04	58,01	0,0697	251
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
14.07.2025	30	30,50	12,50	2,80	2,00	52,20	0,0937	337
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17.09.2025	46	41,50	10,74	1,90	2,00	43,86	0,0666	238
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20.12.2025	60	19,40	16,30	0,90	5,00	58,40	0,0361	130
29.12.2025	61	34,00	11,04	2,65	1,00	51,31	0,0638	230
11.01.2026	62	29,00	13,00	1,94	1,00	55,06	0,0563	203
	Ortalama	26,07	14,15	1,46	1,25	56,83	0,0648	233

Bu sonuçlara göre;

- Gaz karışımındaki metan konsantrasyonunun %41,50 seviyesine kadar ulaştığı,
- Gaz karışımının yüksek oksijen içerdiği ve bunun gazın emildiği bölgede sızdırmazlığın sağlanamadığının göstergesi olduğu,
- Gaz karışımının hacimsel debisinin 130-337 m^3/h arasında değerlere ulaştığı.

Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, kazısı tamamlanmış alanlardan elde edilecek gazın hacimsel debisi ve bileşiminin, bu gazın kojenerasyon kapsamında elektrik enerjisi ve ısı üretiminde kullanılabilmesi için iyi bir potansiyel oluşturduğu söylenebilir.

3.2 Gaz İçeriği ve Bileşimleri

Çalışma kapsamında ocaktan ölçümler için alınan örneklere ait gaz içeriği sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelgeden görülebileceği üzere bu örneklerin gaz içerikleri esas itibariyle 4,14 ile 9,67 m^3/t arasında değişmektedir. Bu örneklerden ZMYO-7 ve ZMYO-8 kodlu örnekler arından sondaj yapılmadan alınmış olduklarından hem kayıp gaz hem de toplam gaz içeriklerinin diğer örneklere kıyasla düşük olduğu gözden kaçırılmamalıdır.

Gaz içeriği için alınan örneklerden seçilen 11 adet kanisterden alınan gaz örnekleri gaz kromatografı yardımıyla analiz edilmiş ve hesaplamalar sonucunda desorbe gazdaki temel bileşenin metan olduğu ve metan konsantrasyonunun %90'ın üzerinde olduğu (ortalama %94,74); ve ayrıca gaz bileşiminde eser miktarda etan (C_2H_4)ve karbondioksit (CO_2) bulunduğu tespit edilmiştir. Bu hesaplamalara bir örnek olarak ZMYO-1 kodlu örneğin sonuçları Çizelge 5'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Sondajlardan alınan kömür örneklerine ait sonuçlar (20°C, 1 atm).

Örnek	Örnek Miktarı (g)	Kayıp Gaz **(Q_1)** (m^3/t)	Desorbe Gaz **(Q_2)** (m^3/t)	Kalıntı Gaz **(Q_3)** (m^3/t)	**Toplam Gaz İçeriği (Q_t)*** (m^3/t)
ZMYO-1	541,8	0,63	4,08	0,62	**5,33**
ZMYO-2	1050,6	0,39	2,74	1,01	**4,14**
ZMYO-3	517,6	0,72	3,70	0,99	**5,36**
ZMYO-4	730	0,34	5,75	0,93	**7,09**
ZMYO-5	308	0,74	3,87	1,13	**5,75**
ZMYO-6	272	0,93	4,91	1,19	**7,03**
ZMYO-7	817	0,03	3,35	1,05	**4,47**
ZMYO-8	856	0,03	3,25	0,97	**4,25**
ZMYO-9	838	0,30	4,68	0,63	**5,61**
ZMYO-10	882	0,11	4,24	0,78	**5,13**
ZMYO-11	822	0,43	4,35	0,66	**5,44**
ZMYO-12	958	0,30	4,50	0,83	**5,33**
ZMYO-13	423,1	0,73	5,77	0,80	**7,30**
ZMYO-14	512,4	0,76	8,39	0,38	**9,53**
ZMYO-15	341,5	0,84	8,18	0,65	**9,67**
ZMYO-16	405,6	1,01	7,89	0,71	**9,61**
ZMYO-17	732,0	0,63	5,94	0,57	**7,14**
ZMYO-18	906,0	0,29	5,48	0,58	**6,35**
ZMYO-19	795,0	0,63	7,97	0,76	**9,36**

*Sonuçlar yuvarlandığı için toplamlarda farklılık olabilir.

Çizelge 5. ZMYO-1 kodlu sondajlarda kesilen kömür örneklerine ait desorbe gaz (Q2) bileşimleri*(hacimce %).

Gaz	Ham* Bileşim (%)	Havadaki Bileşenler (%)	Gaz Örneğindeki Bileşenler (%)	Havasız Bileşim (Normalize edilmiş) (%)
Oksijen+Argon	1,920	1,920	0,0	0,000
Azot	18,900	11,413	7,487	8,797
Karbondioksit	1,060	1,057	0,003	
Metan	***77,550***	**-**	***77,550***	***91,128***
Etan	0,060	-	0,060	0,071
Toplam	99,490	-	85,100	99,997

* Gaz kromatografı ile belirlenmiştir.

3.3 Permeabilite Ölçüm Sonuçları

Yapılan deneyler sonucunda tabakalanma yönünde alınan örneğin (No 1) permeabilitesi 0,003 mD, tabakalanmaya dik şekilde alınan örneğin (No 2) permeabilitesi ise 0,001 mD bulunmuştur. Permeabilite ölçümlerine ait tüm parametreler Çizelge 6'da verilmiştir.

Elde edilen bu sonuçlara göre söz konusu kömür örneğinin geçirgenliğinin oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bu veri, kömürün *ultra-düşük permeabilite* sınıfına (Seidle 2011) girdiğini, gözenek ve çatlak bağlantılarının zayıf olduğunu ve bu sebeple desorpsiyon hızının çok düşük olacağını göstermektedir.

Çizelge 6. Permeabilite deneyi koşullar ve elde edilen sonuçlar.

Örnek No	Ortam Sıcaklığı (°C)	Örnek Çapı (mm)	Örnek Boyu (mm)	Giriş Basıncı (kPa)	Çıkış Basıncı (kPa)	N_2 Debisi (cm^3/dak)	Permeabilite (mD)	Filtrasyon Katsayısı (m/s)	Permeabilite Katsayısı (m^2)
No 1	20	38	68	161,48	102,04	0,011	0,003	$2,99x10^{-11}$	$2,6509x10^{-16}$
No 2	20	38	57	184,43	102,04	0,009	0,001	$9,98x10^{-12}$	$1,0620x10^{-14}$

3.4 Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlık

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kendiliğinden yanmaya yatkınlık testlerine ait sonuçlar topluca Çizelge 7'de verilmiştir. Buna göre; örneklerin FCC indekslerinin 4,19 ile 10,80 dak^{-1} arasında değiştiği ancak genel itibariyle kömür damarının kendiliğinden yanmaya yatkınlığının "*ORTA*" düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7. Kendiliğinden yanma deneylerinden elde edilen sonuçlar.

Örnek Kodu	Kesişme Noktası Sıcaklığı (°C)	OSA (°C/dak)	FCC (dak^{-1})	Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlık
ZMYO-1	131	0,884	6,74	**Orta**
ZMYO-2	143	0,677	4,73	**Düşük**
ZMYO-3	147	1,583	10,80	**Yüksek**
ZMYO-4	164	0,794	4,84	**Düşük**
ZMYO-5	118	1,009	8,55	**Orta**
ZMYO-6	150	0,638	4,27	**Düşük**
ZMYO-7	148	0,618	4,19	**Düşük**
ZMYO-8	167	1,25	7,51	**Orta**
ZMYO-9	153	1,146	7,49	**Orta**
ZMYO-10	135	1,091	8,08	**Orta**
ZMYO-11	141	0,887	6,29	**Orta**
ZMYO-12	158	1,325	8,39	**Orta**
Oluk Örneği (Üst)	160	1,100	6,88	**Orta**
Oluk Örneği (Orta)	176	1,260	7,18	**Orta**
Oluk Örneği (Alt)	168	1,222	7,28	**Orta**

4. METAN DRENAJINA YÖNELİK DEĞERLENDİRMELER VE TASARIM

Yeraltı kömür ocaklarında drenaj yöntemleri oldukça çeşitlilik gösterebilmektedir. Esas itibariyle, yeraltı ocaklarında drenaj faaliyetleri madencilik faaliyetleri öncesi ve sırasında olmak üzere gruplandırılmaktadır.

Hazırlık çalışmaları sırasında drenaj faaliyetleri genel itibariyle panonun taban yolları sürülürken tavana, tabana ya da pano oryantasyonuna paralel şekilde yapılan sondaj deliklerinden gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında alt ve üst taban yollarından kömür damarına yapılan dik ve eğimli sondajlarla drenaj faaliyetleri de bu kapsamdadır. Bu uygulamalar bitişik panodan da yapılabilmektedir.

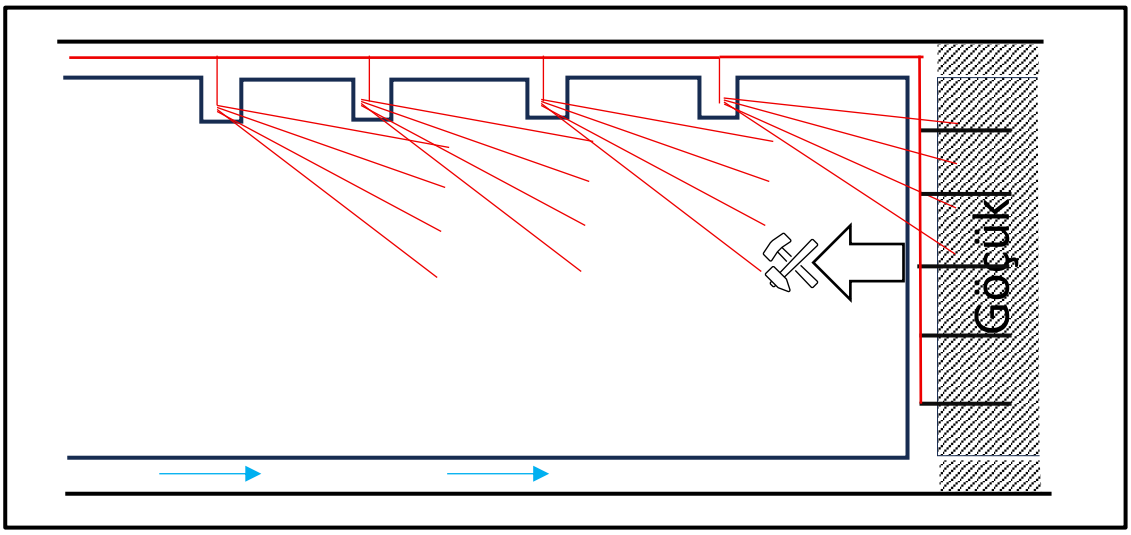
Madencilik faaliyetleri sırasında yapılan drenaj uygulamaları ise genellikle kırılmış tabakalarda biriken metan gazının drenajına yönelik olarak uygulanmaktadır. Bu amaçla eğimli sondaj delikleri, uzun ve yönlü sondaj delikleri ya da yüzeyden ayak arkasına (göçüğe) yapılan sondajlar yapılmaktadır.

Çalışma kapsamında elde edilen verilere göre özellikle çalışılan damarın oldukça düşük permeabiliteye sahip olması nedeniyle panoların hazırlık aşamasında kömür damarına yapılacak sondajlarla metan drenajı yapılması mümkün görünmemektedir. Bu şekilde bir metan drenajı yapılabilmesi için kömür damarının çatlak ağının genişletilebilmesi için hidrolik çatlatma uygulamalarına ihtiyaç duyulacaktır. Bu ise hem ekstra maliyet hem de teknik külfet getireceğinden uygun bir çözüm olarak değerlendirilmemiştir.

Anılan nedenlerle çalışmanın yapıldığı yeraltı ocağında madencilik faaliyetleri sırasında metan drenaj yöntemlerinin daha iyi sonuç vereceği değerlendirilmiştir. Bu amaçla, metan gazının göçükte bırakılacak delikli borularla (en az 5 metre boyunda) emilmesi ve bunun yanında göçük tavanına yapılacak 25-30° eğimli ve 80-100 m arasında boylarda olacak sondaj deliklerinden emilmesinin uygun olabileceği değerlendirilmiştir (Şekil 5).

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada aktif bir kömür ocağında teşkil edilen panolarda metan drenajı uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Buna yönelik olarak panoda yapılan sondajlardan alınan örnekler üzerinde gaz içeriği ve bileşimi, permeabilite ve kendiliğinden yanmaya yatkınlığın belirlenmesi için ölçümler yapılmıştır. Ayrıca, ocakta eski imalat bölgelerinden yayılan gazın da analizi yapılarak hem gaz debisi hem de gaz bileşimi belirlenmiştir.



Şekil 5. Göçük tavanına yapılan sondajlarla ve göçükte bırakılacak borularla drenaj.

Toplam 20 örnek üzerinde gerçekleştirilen gaz içeriği ve bileşimi ölçümleri sonucunda ocakta üretimi gerçekleştirilecek Büyük Damar'a ait gaz içeriklerinin esas itibariyle 4,14 ile 9,67 m^3/t arasında değiştiği belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında 11 örnek üzerinde gerçekleştirilen gaz bileşimi analizleri ve hesaplamaları sonucunda desorbe gazdaki temel bileşenin ***metan*** olduğu ve metan konsantrasyonunun %90'ın üzerinde olduğu (ortalama %94,74) belirlenmiştir. Gaz bileşiminde eser miktarda etan (C_2H_4) ve karbondioksit (CO_2) varlığı da tespit edilmiştir.

Ocaktan alınan iki örnek üzerinde gerçekleştirilen permeabilite deneyleri sonucunda tabakalanma yönünde alınan örneğin permeabilitesi 0,003 mD, tabakalanmaya dik şekilde alınan örneğin permeabilitesi ise 0,001 mD bulunmuştur. Bu değerler kömürün permeabilitesinin ultra-düşük sınıfta olduğunu göstermektedir.

Çalışma kapsamında 15 örnek üzerinde gerçekleştirilen kendiliğinden yanmaya yatkınlık testlerinde elde edilen değerlere göre; örneklerin FCC indekslerinin 4,19 ile 10,80 dak^{-1} arasında değiştiği ancak genel itibariyle kömür damarının kendiliğinden yanmaya yatkınlığının genel itibariyle "*Orta*" düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan ölçümlerde belirlenen gaz içeriği ve bileşimi değerleri ile eski imalat sahalarından yayılan gaz miktarı ve bileşiminin metan drenajı için oldukça uygun olduğu değerlendirilmiştir. Ancak, eski imalat sahalarından yayılan gazın oksijen içeriğinin yüksek olduğu dolayısıyla sahalardaki barajların sızdırmazlıklarının iyi olmadığı kanaatine varıldığından bu kaynağın metan drenaj sisteminde güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için barajların sızdırmazlıklarının sağlanması gerektiği düşünülmektedir.

Gaz içeriği ve bileşimi ile eski imalat sahalarından elde edilen olumlu sonuçların aksine ölçülen permeabilite değerlerinin oldukça düşük olması metan drenajının uygulanabilirliği açısından oldukça olumsuzdur. Bu düşük permeabilite değerleri ile özellikle kömür içinde açılacak sondaj deliklerinden gaz emilmesi oldukça zordur. Kömürün permeabilitesinin hidrolik çatlatma gibi yöntemlerle arttırılması mümkün olabilse de mevcut durumda hem ek maliyet getireceği hem de uygulamadaki zorluklar nedeniyle bu değerlere sahip bir kömür damarında uygulanacak metan drenaj sisteminin özellikle madencilik faaliyetleri sonrasında kırılan-rahatlayan bölgelerdeki metanın emilmesiyle başarıya ulaşabileceği değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine sağladığı kurumsal destek ve katkılardan dolayı ERDEMİR MADENCİLİK SAN. VE TİC. A.Ş.'ye; çalışmanın yürütülmesi sürecindeki değerli destek ve teşviklerinden dolayı Alacaağzı Kömür İşletme ve Kontrol Müdürü Sayın Nuh BAŞ'a; akademik katkıları ve bilimsel yönlendirmeleri için yüksek lisans tez danışmanım Prof. Dr. Kemal BARIŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

Diamond, W. P., & Schatzel, S. J. 1998. Coalbed methane: From hazard to resource. International Journal of Coal Geology, 35(1–4), 3–26. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00032-2

Feng K K, Chakravorty R N, Cochrane T S (1973) Spontaneous Combustion - A Coal Mining Hazard, *CIM Bulletin*, 66:75-84.

Seidle, John. 2011. Fundamentals of Coalbed Methane Reservoir Engineering. Tulsa, OK: PennWell Corporation.

Standards Australia (2016) Determination of gas content of coal and carbonaceous material – Direct desorption method, AS 3980-2016.

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) 2010. Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines. Methane to Markets Partnership.

YERALTI TAŞKÖMÜRÜ MADENCİLİĞİNDE METAN ORANININ ÜRETİM VE HAVALANDIRMA PARAMETRELERİNDEN KESTİRİMİ

THE ESTIMATION OF METHANE CONCENTRATION IN UNDERGROUND COAL MINING USING PRODUCTION AND VENTILATION PARAMETERS

Ebubekir Ahi, Fatih Bayram*

Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

ÖZET Ülkemiz enerji ihtiyacına bakıldığında, kömür madenciliği son derece önemli bir yer tutmaktadır. Kömür yataklarımızda en yüksek kalorifik değere sahip kömür, Zonguldak Havzasında çıkarılan taşkömürüdür. Bu sebeple Zonguldak Havzası ülkemiz kömür üretimi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu kömür ocaklarının işletilmesinde de en önemli parametrelerden biri de içerdiği metan miktarıdır. Çalışmada, ülkemiz açısından stratejik olarak son derece önemli ve işletilmesi de bir o kadar güç olan bu havzadaki taşkömürünün üretim miktarları ve havalandırma parametreleri kullanılarak ayaklarda oluşan metan oranlarının farklı analiz yöntemleriyle kestirimi ve bu yöntemlerin etkinliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, Zonguldak Havzasında kömür üretimi yapan Türkiye Taşkömürü Kurumuna ait beş müesseseden biri olan Karadon Taşkömürü İşletmesinde faaliyette olan üretim ayaklarından havalandırma parametreleri ve tüvenan üretim verileri toplanmıştır. Üretim miktarları ve bazı havalandırma parametreleri ile üretim sırasında oluşan metan oranları arasındaki ilişkiler, klasik istatistiksel yöntemler ve veri madenciliği algoritmaları kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen bulgular karşılaştırılmış, yöntemlerin karmaşık veri yapılarındaki tahmin performansları değerlendirilmiş ve etkinlikleri tartışılmıştır.

ABSTRACT Coal mining plays an extremely important role in the energy supply of our country. Hard coal mined in the Zonguldak Basin has the highest calorific value among our coal deposits. For this reason, the Zonguldak Basin is of strategic importance for our country's coal production. One of the most important parameters in the operation of these coal mines is the methane content. This study aimed to estimate methane concentrations at mine faces in this basin—which is of extreme strategic importance to our country and equally challenging to operate—using various analytical methods based on production quantities and ventilation parameters, and to determine the effectiveness of these methods. To this end, ventilation parameters and raw production data were collected from active production faces at the Karadon Hard Coal Mine, one of five enterprises of the Turkish Hard Coal Enterprise that produce coal in the Zonguldak Basin. The relationships between methane concentrations arising during production—based on production rates and some ventilation parameters—were analyzed using classical statistical methods and data mining algorithms. The results obtained from these analyses were compared, the predictive performance of the methods in complex data structures was evaluated, and their effectiveness was discussed.

* *bayramfatih@aku.edu.tr*

1. GİRİŞ

Madencilik, ülkelerin teknolojilerini geliştirip refah düzeylerini arttırmaları için ilk çağlardan beri önemli etkiye sahip olan bir sektördür (Aydın ve Karakurt 2021). Hayatımızın her alanında var olan madenler, insanoğlu için vazgeçilmez olmuştur. Teknoloji gelişirken madenlere olan ihtiyaç her geçen gün artarken, aynı oranda madencilik sektörü de teknolojiye bağlı olarak gelişmiştir. Enerjinin politik bir güç olarak ortaya çıktığı dünya üzerinde doğal gaz, kömür ve petrol gibi doğal kaynaklar ve bu kaynakların kullanıma sunulması oldukça önemlidir (Dartıcı 2020).

Madenler, açık ocak ve yeraltı ocak işletmeciliği olarak iki yöntemle üretilmektedir. İş sağlığı ve güvenliği açısından her iki yöntem de benzer özelliklere sahip olmasına rağmen yeraltı maden işletmeciliğinde ortaya çıkan tehlikelerin, iş sağlığı ve güvenliği açısından ayrı bir önem arz eder (Aydın ve Karakurt 2021). Yeraltı ocakları gün geçtikçe daha da derinleşmekte, geniş alanlara yayılmakta, kullanılan makine sayısı artmakta ve havalandırmanın kontrolü zorlaşmaktadır. Bunların sonucu olarak çalışma şartları da her geçen gün zorlaşmaktadır. Ocak içinde emniyetli ve rahat bir çalışma ortamı sağlayabilmek için uyulması zorunlu olan yasal standartlar ve zorunluluklar getirilmiştir. Böylece, ocak atmosferinin daha sağlıklı ve emniyetli hale gelmesi amaçlanmaktadır. Ancak, ocak içindeki tehlikeler hala devam etmekte, büyük can ve mal kayıplarına neden olan kazalar tam olarak önlenememektedir. Bu nedenle ocakta çalışanların sağlığı ve emniyeti için ocak planlaması, ocak sevk ve idaresi, elde edilen tecrübe ve bilgilerin dünya çapında paylaşılmasının önemi her geçen gün artmaktadır (Olgun vd. 2016).

Yeraltında havalandırma, madenlerin kan dolaşım sistemi olarak tanımlanabilir. Ana hava giriş yolu ile ocağa giren temiz hava, havayolları yardımıyla çalışma yerlerine ulaştırılmakta ve giren havanın kalitesini bozan kirleticiler, hava dönüş yollarını takip ederek yeryüzüne çıkmaktadır. Etkili bir havalandırma sağlanmadığı sürece, yeraltında personel gerektiren hiçbir faaliyetin gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Madenlerde havalandırma, yeraltına gönderilen havanın hareket yönünün, miktarının, kalitesinin, sıcaklık ve nem içeriğinin kanunlarda belirtilen sınır değerlerde olmasının kontrol edilmesini kapsar. Madenlerin derinlikleri arttıkça, havalandırma için gerekli teçhizat ve malzeme artmaktadır; buna bağlı olarak ise maliyet artmaktadır (Yalçın 2017).

Yeraltı taşkömürü işletmeciliğinde ve özellikle Zonguldak Havzasında kömür üretimi oldukça zor ve tehlikeli koşullar altında yapılmaktadır. Kömür damarlarının dağılımı, eğimi, damar kalınlıkları kömür madenciliği açısından sıkıntılı durumlar oluştururken, kömürün metan ve zararlı gaz içerikleri de çalışma koşullarını ve üretimi etkileyen başlıca faktörlerdir. Yapılan üretim çalışmalarında, özellikle CH_4 (metan) ve CO (karbonmonoksit) miktarlarının bu gibi kömür damarlarında sürekli kontrolü önem arz etmektedir. Yeraltı kömür madenciliğinde olduğu gibi, Zonguldak havzasında da CH_4 oranının %0,5 ve CO miktarlarının ise çalışma alanında 0 olması istenmekte, 1-2 ppm şeklinde yapılan ölçümlerde hemen nedenlerinin araştırılıp önlemlerin alınması gerekmektedir. Yapılan üretim çalışmalarına bağlı olarak bu parametreler sürekli

değişmektedir. Dolayısıyla, ayaklardaki CH_4 ve CO ölçüm değerleriyle yapılan üretim miktarları ve diğer havalandırma parametreleri arasındaki ilişkiler kömür madenciliği açısından önemlidir.

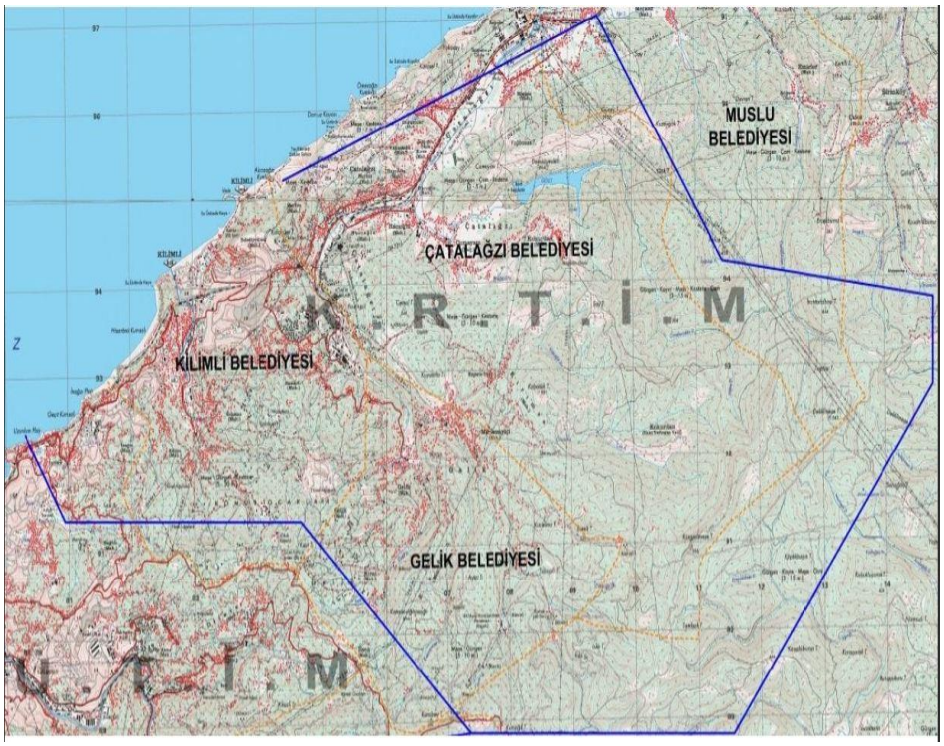
Yeraltı maden işletmelerinde ve kazı işlemlerinde havalandırma ile ilgili oldukça geniş bir literatür bulunmaktadır. Çalışma konusuyla ilintili sayılabilecek bazı çalışmalar aşağıda derlenmiştir. Ayvazoğlu vd. (1994) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tünel havasının bileşimi ile kazı faaliyetleri sırasında oluşan oksijen yetersizliği, zehirli ve patlayıcı gazlar ile tozun çalışan sağlığı üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Çalışmada özellikle karbonmonoksit, karbondioksit, metan ve azot oksitlerinin kaynakları ve tehlike sınırları açıklanmış; pnömokonyoz başta olmak üzere toz kaynaklı meslek hastalıklarına dikkat çekilmiştir. Ergün (2007)'e göre yeraltı maden işletmelerinde meydana gelen gaz ve toz patlamaları, madencilik faaliyetlerinin karşılaştığı en ciddi iş sağlığı ve güvenliği riskleri arasında yer almaktadır. Karacan (2008) kömür ocaklarında yapay sinir ağları kullanarak bazı yatak yapısı ve çalışma koşulları parametrelerinden metan emisyonunu tahmin etmeye çalışmıştır ve yapay sinir ağlarının yüksek doğrulukta bu parametrelerden tahmine yönelik kullanılabileceğini belirtmiştir. Olgun vd. (2016), yeraltı maden işletmelerinde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanmasında teknik, organizasyonel ve çevresel faktörleri ele almışlardır. Ayrıca çalışmada, üretim faaliyetleri sırasında ortaya çıkan fiziksel, kimyasal ve mekanik tehlikelerin çalışanlar üzerindeki etkileri değerlendirilmiş; özellikle havalandırma yetersizliği, gaz birikimi ve toz oluşumunun riskleri vurgulanmıştır. Yıldız ve Haner (2017), yeraltı maden ocaklarında havalandırmaya ilişkin Türk mevzuatını ILO 176 sayılı sözleşme ile karşılaştırmalı olarak incelemiş ve mevcut düzenlemelerin bazı teknik ayrıntılar açısından yetersiz ve yoruma açık olduğunu belirtmiştir. Tutak ve Brodny (2019) madencilik sektöründe doğrudan ölçüm alan metan sensör verilerinden metan konsantrasyonunu tahmin etmek için yapay sinir ağlarını kullanarak bir yöntem geliştirmişlerdir. Aydın ve Karakurt (2021), yeraltı maden işletmelerinde karşılaşılan başlıca iş sağlığı ve güvenliği sorunlarını sistematik olarak incelemiştir. Çalışmada, göçükler, gaz patlamaları, yangınlar, toz oluşumu ve yetersiz havalandırma gibi risk faktörlerinin çalışan sağlığı ve işletme güvenliği üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Kılıçarslan ve Tunç (2023) tarafından yapılan çalışmada, yeraltı maden işletmelerinde havalandırmanın, çalışan sağlığı ve iş güvenliği açısından vazgeçilmez bir unsur olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, yeraltı ortamlarında yüksek sıcaklık, aşırı nem, oksijen yetersizliği ve metan, karbonmonoksit, karbondioksit gibi tehlikeli gazların birikiminin hem iş verimini olumsuz etkilediği hem de ölümcül riskler oluşturduğu ortaya konulmuştur. Karakuş (2024) yaptığı çalışmada, yeraltı kazılarında havalandırmanın planlanması ve uygulanmasında dikkate alınması gereken temel mühendislik ilkelerini ele almıştır. Doğan (2024), yeraltı kömür madenciliğinde proaktif bir yaklaşımla metan konsantrasyonunu bir dakika önceden tahmin edebilen derin öğrenme modeli geliştirmeye çalışmış, geliştirdiği hibrit modelle düşük hata payıyla metan konsantrasyonunun tahmin edilebildiğini belirtmiştir. Tutak (2024) yeraltı kömür madenciliğinde üretim ve göçük alanlarında metan ve oksijen konsantrasyon dağılımlarının belirlenmesine yönelik modelleme çalışmaları yapmış ve bu modelleme

çalışmalarının kullanılmasının potansiyel tehlike bölgelerinin belirlenmesi, tehlikeli olayların meydana gelme olasılığının azaltılması için önemli olduğunu belirtmiştir.

Endüstrinin birçok alanında olduğu gibi, madencilik sektöründe de yapılan çalışmalara yönelik elde edilen veriler karmaşık yapıda olup değerlendirilmesi güç olabilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, havalandırma koşulları ile üretim verilerinin yeterince ilişkilendirilmediği görülmektedir. Yeraltı kömür madenciliğinde, çalışma koşullarını doğrudan etkileyen metan oranının diğer havalandırma koşulları ve üretim verileriyle ilişkilendirilmesi önemli bir araştırma konusudur. Yapılan çalışmada temel amaç, yeraltı taşkömürü üretim miktarları ve bazı havalandırma parametreleri kullanılarak ayaklarda oluşan metan oranlarının farklı analiz yöntemleriyle kestirimi ve kullanılan klasik istatistiksel yöntemler ve veri madenciliği algoritmalarının karşılaştırılmasıdır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, madencilik faaliyetlerinde çok sayıda faktörün etkisi altında değişkenlik gösteren metan oranlarının güvenilir şekilde tahmin edilmesini sağlayabilecek modeller araştırılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANININ TANITILMASI

Bu çalışma, Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) Genel Müdürlüğüne bağlı 5 üretim Müessesesinden biri olan Karadon Taşkömürü İşletme Müessesesinde yapılmıştır. (Şekil 1). Karadon Taşkömürü İşletme Müessesesi Zonguldak ilinin 12 km doğusunda ve 32 km²'lik bir alanda üretim faaliyetlerini sürdürmektedir. Yeraltında galeri, kuyu ve ayak olarak toplam ocak açıklığı 2015 yıl sonu itibariyle 128 km'dir. Üretilen kömür müessesece zenginleştirilmek üzere Çatalağzı Lavvarına gönderilmekte ve lavvar çıkışlı kömür sanayi kuruluşlarına ve yakınlık olarak piyasaya verilmektedir.



Şekil 1. TTK Karadon Müessesesi imtiyaz alanı (TTK 2026)

Karadon Müessesesi Kilimli İşletmesi ve Gelik İşletmesi olarak ikiye ayrılmıştır. Ocak içeriden bağlantılıdır. Ocak açıklığı 108 km'dir. Ocakta hava, insan, malzeme nakliyatı için 4 adet giriş bulunmaktadır. Bunlar galeri girişi, Karadon yeni servis kuyusu, Karodon 1 nolu kuyu, Gelik 100. yıl kuyusudur. Karadon yeni servis kuyusu ve Gelik 100. yıl kuyusu kafes sistemiyle çalışır ve genellikle insan ve malzeme nakliyatı için kullanılır. Karadon 1 nolu kuyu ise skip sistemiyle çalışır ve genellikle üretilen kömürün dışarı çıkarılması için kullanılır. Ancak diğer kuyularda oluşabilecek olası arıza durumlarında, Karadon 1 nolu kuyudan insan nakliyatı da yapılabilmektedir. Aynı zamanda, ocakta dolaşan kirli havanın çıkması için yüzeyle bağlantılı nefeslikler de bulunmaktadır. Ana galerilerde çelik tahkimat rijit ve geçme bağ kullanılırken ayak içerisinde ahşap tahkimat tercih edilmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

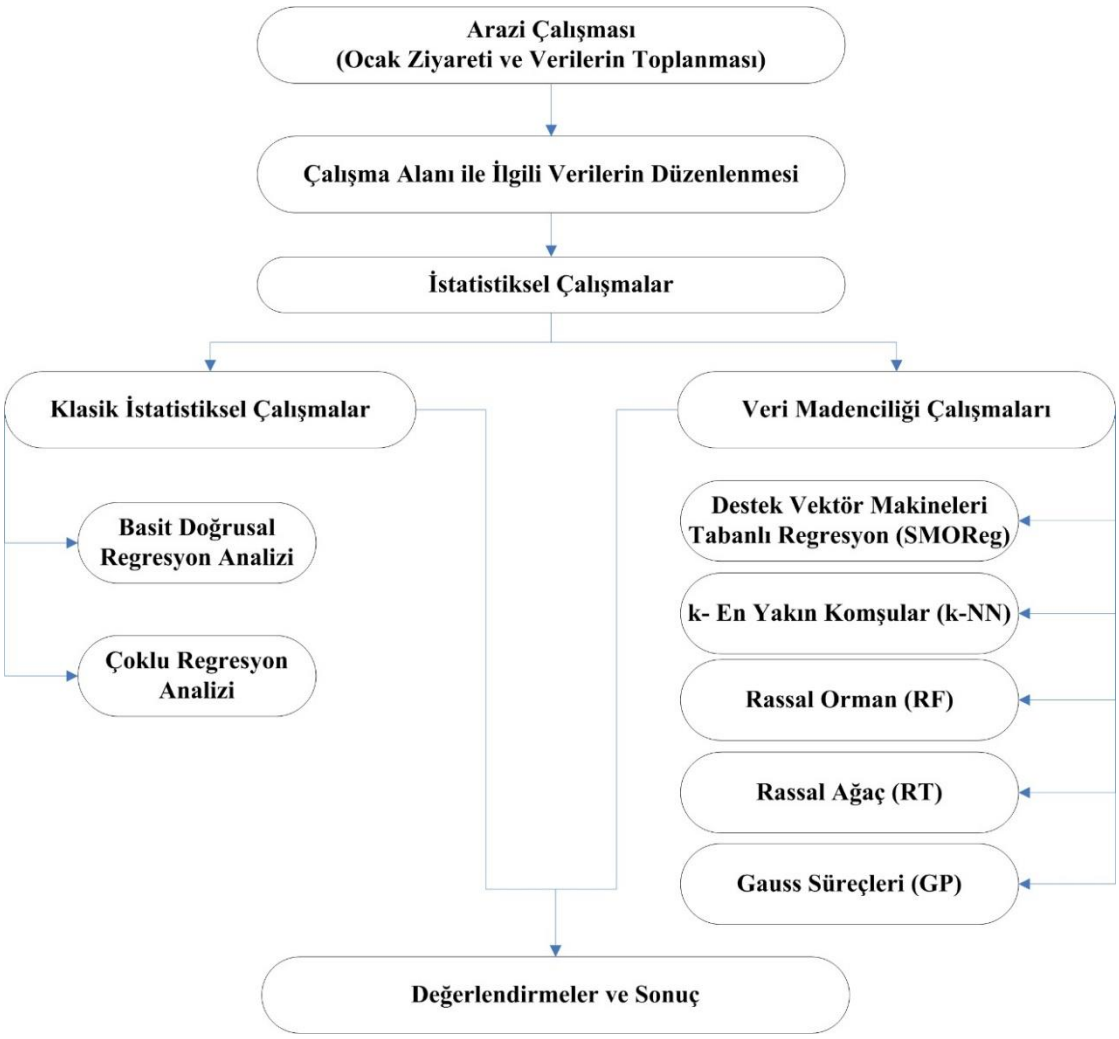
Yapılan çalışmada temel amaç, yeraltı taşkömürü madenciliğinde metan oranının yapılan üretim miktarları ve ölçümü basit havalandırma parametreleriyle ilişkilerinin incelenmesidir. Bu kapsamda TTK Karadon Taşkömürü İşletme Müessesesinde son iki yılda (2024-2025) toplam 10 ayakta yapılan üretim verileri ve çalışma yapılan ayaklardaki havalandırma koşulları gerekli izinler alınarak toplanmıştır. Çalışma kapsamında veri seti toplanan ayaklarla ilgili genel bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir. Çalışma kapsamında izlenen yöntem Şekil 2'de belirtilmiştir.

Çizelge 1. Veri seti hazırlanan ayaklar ve teknik bilgiler

Ayak Adı	Ayak Kotu (m)	Ayak Eğimi (°)	Gerçek Ayak Boyu (m)	Çalışılabilecek Ayak Boyu (m)	Damar Kalınlığı (m)	Üretim Yöntemi
Kilimli 1	-260 -360	48	124	112	1,7	İlerletimli Uzun Ayak
Kilimli 2	-360 -460	38	164	152	2,5	
Kilimli 3	-360 -460	25	220	160	3	Dönümlü Uzun Ayak
Kilimli 4	-360 -460	25	84	72	3	
Kilimli 5	-360 -330	25	88	72	2	İlerletimli Uzun Ayak
Gelik 1	-250 -350	28	200	164	2,8	
Gelik 2	-253 -351	40	156	132	3	Dönümlü Uzun Ayak
Gelik 3	-255 -352	44	152	128	2,8	
Gelik 4	-351 -452	42	156	132	3	
Gelik 5	-354 -452	35	168	120	3	

3.1. Arazi Çalışması ve Verilerin Toplanması

TTK Karadon Müessesesine yapılan ziyaret sonucu aktif olarak üretimin devam ettiği 5'i Kilimli, 5'i Gelik İşletmesinde olmak üzere toplam 10 ayakta çalışma yapılmıştır. Ocak içindeki hava ölçüm istasyonlarında düzenli olarak gerçekleştirilen; ancak her 10 günlük periyotlarla kayıt altına alınan veriler kullanılmıştır. Bu ölçümlerde istasyon kesiti, hava hızı, geçen hava miktarı, metan oranı, sıcaklık, nem ve ortalama vardiya işçi sayısı gibi veriler kayıt altına alınmaktadır. Bu kapsamda, 2024 ve 2025 yıllarına ait veriler kurum izni dahilinde alınmıştır. Ayrıca, aylık ve günlük üretim miktarlarına ilişkin iki yıllık ortalama veriler de çalışmada kullanılmıştır.



Şekil 2. Çalışma metodolojisi

3.2. Çalışma Alanı ile İlgili Verilerin Düzenlenmesi

Kilimli ve Gelik İşletmelerinde ayak içlerinde ve galerilerde bulunan ölçüm istasyonlarında düzenli hava ölçümü gerçekleştirilmektedir. Bu ölçümlerden sadece ayaklarda bulunan istasyonlara ait veriler alınarak dosyalar halinde düzenlenmiştir.

İşletmelerde tutulan üretim verileri aylık periyotlarla tutulduğundan, havalandırma ölçümlerine ait veriler de aylık ortalamalar alınarak düzenlenmiş ve her ayak için ayrı ayrı veri seti hazırlanmıştır. Bu aşamada, ayaklarda yapılan üretim miktarının, çalışan işçi sayısıyla doğrudan ilişkili olması sebebiyle, üretim verileri çalışan işçi sayısına oranlanmıştır. Bu amaçla, aylık üretim miktarları ayakta çalışan ortalama işçi sayısına bölünerek işçi başına düşen aylık üretim miktarları hesaplanmıştır.

3.3. İstatistiksel Çalışmalar

Verilerin ön işleme ve temizleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bazı ayaklarda hazırlık çalışmaları nedeniyle üretim faaliyetleri gerçekleştirilemediğinden, bu dönemlere ait veriler veri seti kapsamı dışında bırakılmıştır. Bununla birlikte işletmeden alınan

veriler içerisinde Kilimli 5 isimli ayak için Şubat 2025-Ağustos 2025 arası toplam hava miktarı verilerine, Kilimli 4 isimli ayak için ise Ocak2024-Kasım2024 arası metan ölçüm değerlerine ulaşılamamıştır. Bu veriler uygun veri madenciliği yöntemleriyle diğer tam şekilde ulaşılan verilerden tahmin edilmiş ve veri tamamlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

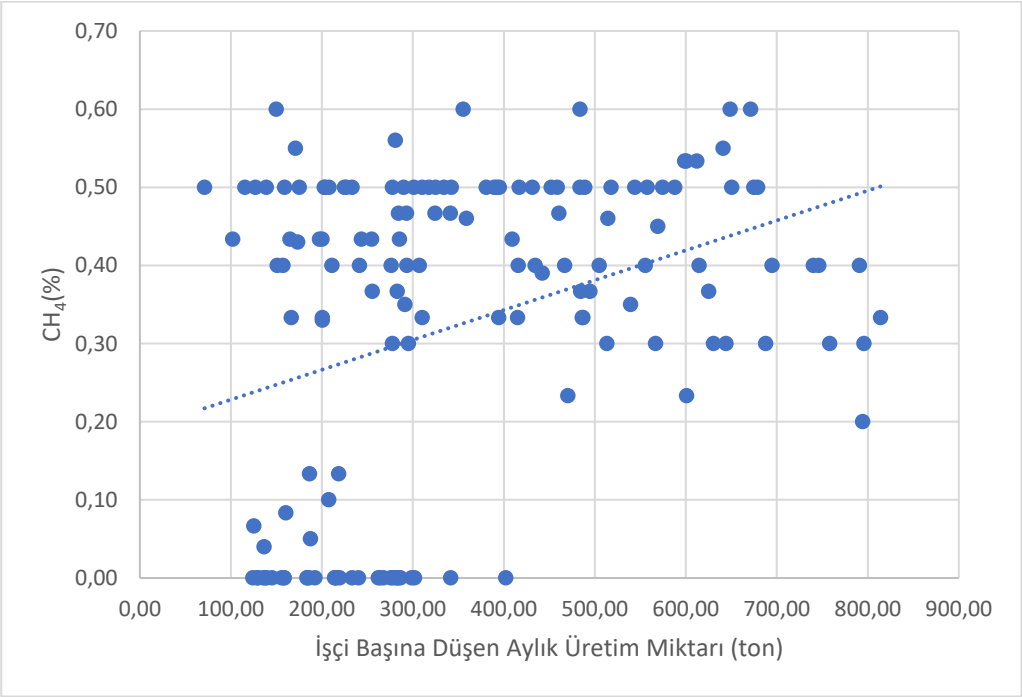
Bu işlemler neticesinde, toplam 10 ayak için 193 ölçüm içeren veri seti istatistiksel analiz için hazır hale getirilmiştir. İlk etapta klasik istatistiksel analiz yöntemleriyle, daha sonra aynı veri setinde veri madenciliği algoritmalarıyla analizler gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Klasik İstatistiksel Çalışmalar

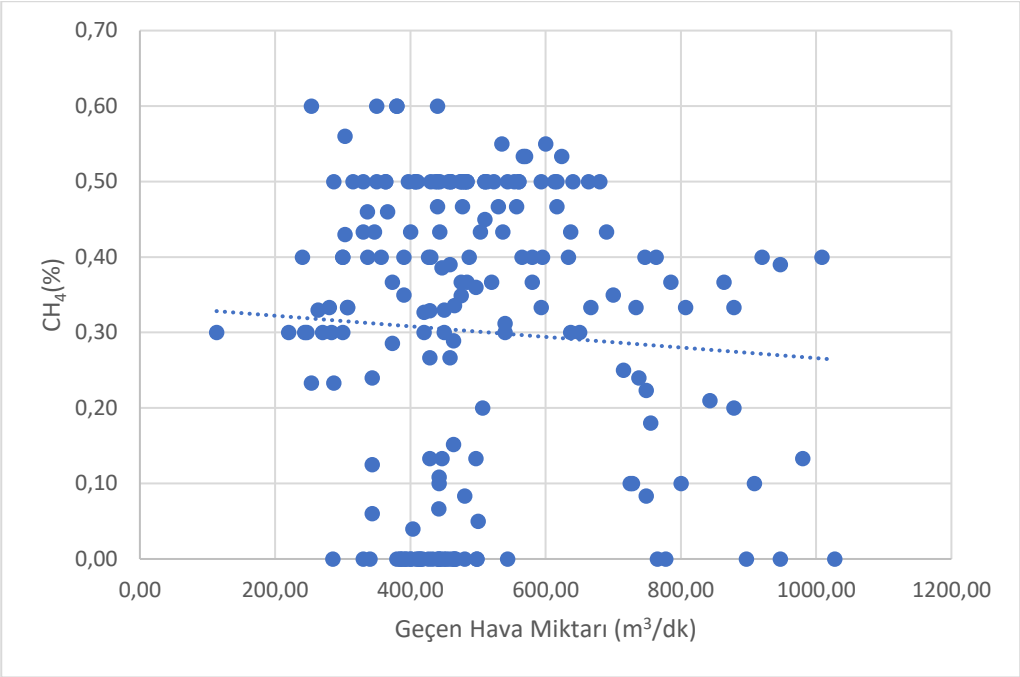
Klasik istatistiksel analiz çalışmalarında oluşturulan veri seti üzerinde basit doğrusal ve çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Üretim sırasında oluşan metan oranı ile üretim miktarı ve diğer havalandırma parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiş ve tahmin modelleri geliştirilmeye çalışılmıştır.

3.3.1.1. Basit doğrusal regresyon analizi

Ön hazırlık işlemleri uygulanarak hazırlanan 193 veriden oluşan veri seti üzerinde Excel programı kullanılarak değişkenler arasındaki grafiksel ilişkiler incelenmiştir. İncelenen grafiksel ilişkilere ait örnekler Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Metan oranları ile sırasıyla işçi başına düşen aylık üretim miktarları ve hava miktarı arasındaki ilişkiler değerlendirildiğinde, değişkenler arasında doğrudan ve anlamlı bir ilişkinin basit doğrusal regresyonla belirlenemediği görülmüştür.



Şekil 4. CH_4 ve işçi başına düşen üretim miktarı ilişkisi



Şekil 5. CH_4 ve geçen hava miktarı arasındaki ilişki

3.3.1.2. Çoklu regresyon analizi

Çoklu regresyon analiz çalışmalarında, üretim sonucunda ayaklarda oluşan metan oranı (CH_4), işçi başına düşen üretim miktarı (PPW) ve bazı havalandırma parametreleri [hava akım hızı (AV), hava miktarı (AQ), sıcaklık (T), nem (RH)] kullanılmıştır. Bu çalışmalarda MINITAB istatistiksel analiz programı kullanılmıştır. İlk etapta parametrelerin tanımlayıcı istatistiklerine bakılmış ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. İstatistiksel modelde kullanılan parametrelerin tanımlayıcı istatistikleri

Değişken	Veri Sayısı	Ortalama	Standart Sapma	Maksimum	Minimum	Çarpıklık (Skewness)	Basıklık (Kurtosis)
Hava Akım Hızı	193	1,610	0,514	0,666	3,246	0,52	-0,20
Hava Miktarı	193	498,100	170,600	113,300	1027,500	0,98	0,80
CH_4 Oranı	193	0,301	0,193	0,000	0,600	-0,44	-1,21
Sıcaklık	193	23,697	2,171	17,667	30,000	0,02	0,24
Nem	193	80,757	4,381	69,667	92,500	0,06	0,19
İşçi Başına Düşen Üretim Miktarı	193	325,400	180,900	64,800	813,800	0,85	-0,13

Çizelge 2'de verilen çarpıklık (Skewness) ve basıklık (Kurtosis) katsayılarına göre, veriler normal dağılım için kabul edilen değerler (±2) arasındadır.

Yapılan çoklu regresyon analizinde, üretim sonucunda ayaklarda oluşan metan oranı (CH_4), işçi başına düşen üretim miktarı (PPW) ve havalandırma parametreleriyle [hava akım hızı (AV), hava miktarı (AQ), sıcaklık (T), nem (RH)] ilişkilendirilmiş ve regresyon modeli oluşturulmuştur. Metan oranının kestirimi için yapılan çoklu regresyon analiz sonucu Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Metan oranının kestirimi için yapılan çoklu regresyon analiz sonucu

Terimler	Katsayı	Katsayının Standart Hatası	T-Değeri	P-Değeri	Varyans Şişme Faktörü (VIF)
Sabit	0,522	0,267	1,96	0,052	
Hava Akım Hızı (AV)	-0,0542	0,0301	-1,80	0,073	1,49
Hava Miktarı (AQ)	0,000030	0,000090	0,33	0,739	1,45
Sıcaklık (T)	-0,01228	0,00616	-1,99	0,048	1,11
Nem (RH)	0,00012	0,00305	0,04	0,967	1,11
İşçi Başına Düşen Üretim Miktarı (PPW)	0,000408	0,000073	5,61	0,000	1,08

Bu sonuçlarla oluşturulan regresyon modeli aşağıda verilmiştir. Bu regresyon denkleminin belirtme katsayısı (R^2) 0,196, korelasyon katsayısı (R) 0,442 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişkendeki değişiklikleri açıklama oranı oldukça düşüktür. Ayrıca, P-değerlerine bakıldığında PPW dışındaki model parametreleri sınır düzeyde anlamlı veya istatistiksel olarak anlamsız görünmektedir.

$$CH_4 = 0{,}522 - 0{,}0542\,AV + 0{,}000030\,AQ - 0{,}01228\,T + 0{,}00012\,RH + 0{,}000408\,PPW \qquad (1)$$

Bu regresyon modeli, havalandırma mekaniği düşünüldüğünde metan kestirimi ve havalandırma planlaması için yetersizdir. Bu durum, madencilik gibi karmaşık çalışma parametrelerine sahip sektörler için elde edilen verilerden değerli bilgilerin çıkarılmasında, farklı ve etkili analiz yöntemlerinin kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

3.3.2. Veri Madenciliği Çalışmaları

Veri madenciliği (verilerden bilgi keşfi) büyük miktarda veriden ilginç (önemli olan, örtülü, bilinmeyen ve potansiyel olarak faydalı) sonuçların, örüntülerin ve bilginin çıkarılmasıdır. Klasik istatistiksel analiz çalışmaları sonrasında, daha anlamlı ilişkilerin ortaya konulabilmesi için veri madenciliği algoritmaları kullanılmıştır. Çoklu regresyon analizinde kullanılan veri seti, WEKA açık kaynak kodlu veri madenciliği programında kullanılan algoritmalarla analiz edilmiştir.

WEKA programı, son teknoloji makine öğrenimi algoritmaları ve veri ön işleme araçlarından oluşan açık kaynak kodlu bir programdır. Mevcut yöntemlerin, yeni veri kümeleri üzerinde denenebilmesi için tasarlanmıştır. Girdi verilerinin hazırlanması, öğrenme tablolarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve girdi verilerinin ve öğrenme sonuçlarının görselleştirilmesi de dahil olmak üzere tüm deneysel veri

madenciliği süreci için kapsamlı destek sağlar. Çeşitli öğrenme algoritmalarının yanı sıra, çok çeşitli ön işleme araçlarından oluşur. Bu çeşitli ve kapsamlı araç setine ortak bir arayüz aracılığıyla erişilir, böylece kullanıcılar farklı yöntemleri karşılaştırarak eldeki sorun için en uygun olanları belirleyebilir. WEKA programında birden fazla algoritma bulunmaktadır. Bu çalışmada ise aşağıda sıralanan algoritmalar kullanılmıştır.

- Destek Vektör Makineleri Tabanlı Regresyon (SMOReg)
- k-En Yakın Komşular (k-NN)
- Rassal Orman (RF)
- Rassal Ağaç (RT)
- Gauss Süreçleri (GP)

Yapılan veri madenciliği çalışmalarında test yöntemi olarak yüzde bölme (percentage split) yöntemi kullanılmıştır. WEKA'da yüzde bölme, veri setini veri madenciliği modellerini eğitmek ve test etmek amacıyla belirli bir oranda iki ayrı parçaya ayırır. Çalışmada %90 eğitim, %10 test verisi olacak şekilde bir ayırım yapılmıştır. Tüm algoritmalar aynı yöntemle WEKA'daki varsayılan ayarlarıyla (sadece k-NN algoritmasında k komşu sayısı 15 ve Rassal Orman algoritmasında iterasyon sayısı 500 olarak alınmıştır) çalıştırılmıştır. Metan oranı tahminine yönelik uygulanan veri madenciliği modelleri için genel istatistiksel ölçütler Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Metan oranı tahminine yönelik uygulanan veri madenciliği modelleri için genel istatistiksel ölçütler

İstatistiksel Ölçütler	Veri Madenciliği Teknikleri				
	SMOReg	k-NN	RF	RT	GP
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	0,068	0,074	0,068	0,054	0,053
Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE)	0,052	0,088	0,081	0,074	0,062
Korelasyon Katsayısı (R)	0,934	0,906	0,950	0,915	0,952

Çizelge 4'teki genel istatistiksel ölçütlerine göre, uygulanan tüm veri madenciliği modelleri kabul edilebilir bir güvenilirlik sağlamıştır. Bununla birlikte, GP tekniği, diğer tekniklere kıyasla metan oranını daha doğru bir şekilde tahmin etmiştir. GP modeliyle daha yüksek korelasyon katsayısı (R) ve daha düşük hata değerlerine (MAE ve RMSE) ulaşılmıştır. Oluşturulan eğitim verisi kullanılarak eğitilen GP algoritmasıyla test verilerinin tahmini yapılmıştır. Ölçülen ve tahmin edilen metan oranları Çizelge 4'te ve aralarındaki ilişki ise Şekil 6'da verilmiştir. GP modeli için R=0,952 korelasyon katsayısıyla tahmin edilen değerlerin ölçülen değerleri çok iyi yansıttığı görülmektedir.

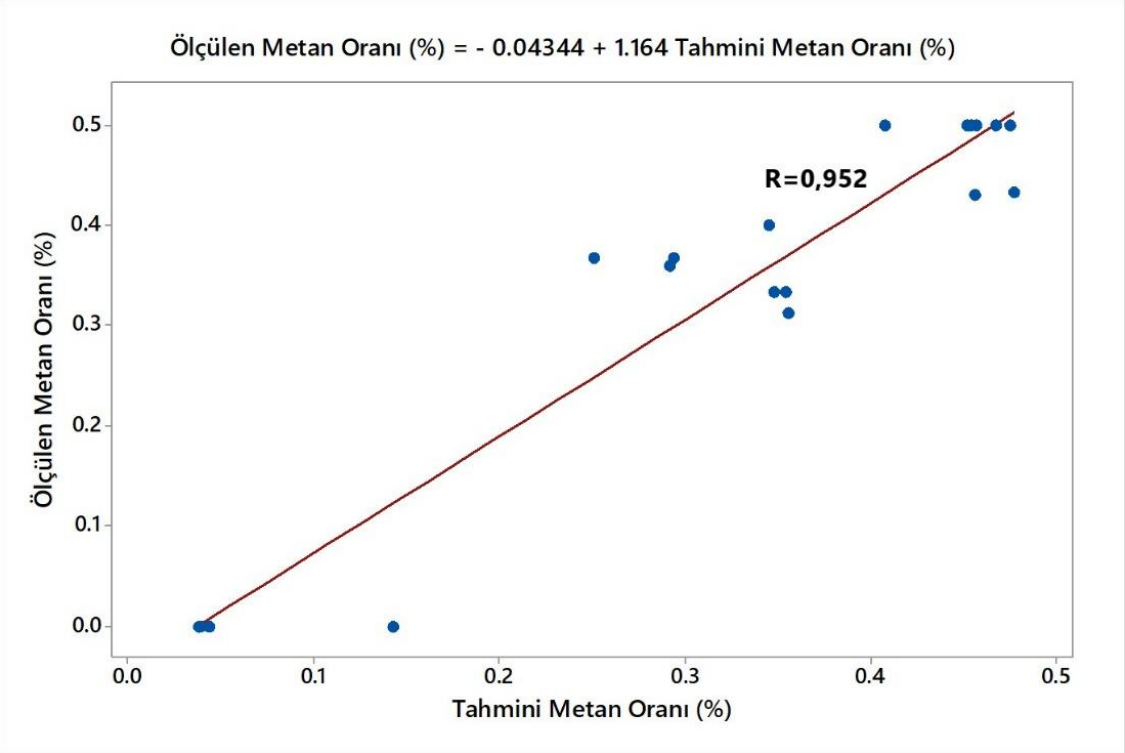
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada yeraltı taşkömürü madenciliği için önemli parametrelerden biri olan ayaklardaki metan oranının, kömür üretim değerleri ve ocaklarda ölçümü yapılan toz,

gaz ölçümleri dışındaki havalandırma parametrelerinden tahmini çeşitli analiz yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Çizelge 5. GP modelinde test verisi olarak kullanılan ölçülen metan oranları ve tahmini metan oranları

Ölçülen Metan Oranı (%)	Tahmini Metan Oranı (%)
0,430	0,456
0,367	0,251
0	0,143
0	0,044
0,500	0,454
0,400	0,345
0,500	0,467
0,433	0,477
0,500	0,452
0,500	0,408
0	0,039
0	0,038
0,333	0,348
0,500	0,475
0,367	0,294
0,312	0,356
0,333	0,354
0,360	0,292
0,500	0,457



Şekil 6. GP modeli için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişki

Yapılan grafiksel incelemelerde metan oranıyla diğer havalandırma parametreleri ve üretim miktarları arasında belirgin bir şekilde ilişki bulunamamıştır. Bu durum madencilikte elde edilen karmaşık verilerin açıklanmasında klasik regresyon analizlerinin etkili olamadığını göstermiştir.

Yapılan çoklu regresyon analizinde regresyon denklemi;

$$CH_4 = 0{,}522 - 0{,}0542\,AV + 0{,}000030\,AQ - 0{,}01228\,T + 0{,}00012\,RH + 0{,}000408\,PPW$$

şeklinde bulunmuştur. Korelasyon katsayısı ve güvenilirliği nispeten düşük bir tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu regresyon denkleminin belirtme katsayısı (R^2) 0,196, korelasyon katsayısı (R) 0,442 olarak bulunmuştur. Havalandırma ve üretim verileri gibi hem birbiri üzerinde etkili hem de karmaşık verilerde çoklu regresyon analizleri de etkili olamamaktadır.

Uygulanan veri madenciliği yöntemleriyle daha güvenilir ve açıklayıcı tahmin modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerden GP modeli hem yüksek korelasyon katsayısı (R=0,952) hem de düşük hata oranlarıyla (MAE= 0,053 ve RMSE= 0,062) en uygun tahmin modeli olmuştur.

Madencilik sektöründe bu tip karmaşık verilerin analizinde veri madenciliği veya makine öğrenmesi tekniklerinin daha açıklayıcı ve kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur. İşletmelerin bu tür kestirim işlemlerinde klasik yöntemler yerine veri madenciliği veya makine öğrenmesi tekniklerini kullanmaları önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Aydın, G., Karakurt, İ. 2021. Yeraltı Maden İşletmeciliğinde Sağlık ve Güvenlik Sorunları, Teknik Bilimleri Dergisi, 11, 1, s. 1-12.

Ayvazoğlu, E., Ötken, G., Tuncel, Z. 1994. Yeraltı Kazılarında Havalandırma Uygulamaları, Ulaşımda Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu, İstanbul, s. 283-307.

Dartıcı, A. 2020. Yeraltı Maden İşletmelerinde Havalandırma ve Bilgisayar Destekli Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 93 s.

Doğan H. E. 2024. Forecasting Methane Concentration In Underground Coal Mines Using Deep Learning. MSc. Thesis, METU, Ankara, 162 p.

Ergün, A. R. 2007. Yeraltı Maden İşletmelerinde Gaz ve Toz Patlamaları ve Önlemler, Uzmanlık Tezi, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Müdürlüğü, Ankara, 79 s.

Karacan, C. Ö. 2008. Modeling and Prediction of Ventilation Methane Emissions of U.S. Longwall Mines Using Supervised Artificial Neural Networks. International Journal of Coal Geology, 73, pp. 371–387.

Karakuş, H. 2024. Yeraltı Madenciliği İçin Planlanan Havalandırma Sistemlerinin Çalışma Ortamlarına Etkisi. Tezsiz Yüksek Lisans Dönem Pojesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir, 52 s.

Kılıçarslan, A. O., Tunç, A. M. 2023. Yeraltı Maden İşletmeciliğinde Havalandırma Sistemi. Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, s. 1-7.

Olgun, B., Gültek, S., Bulgurcu, H. 2016. Yeraltı Maden Ocaklarında Havalandırma Kriterleri, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 154, 7, s. 70-78.

TTK, 2026. Türkiye Taşkömürü Kurumu, https://www.taskomuru.gov.tr/ttk/ (Temmuz 2026).
Tutak, M. 2024. Formation of Methane Hazards During Underground Coal Production in the Longwall Area Ventilated by System Y. Production Engineering Archives, 30, 3, pp. 394-405.
Tutak, M., Brodny, J. 2019. Predicting Methane Concentration in Longwall Regions Using Artificial Neural Networks. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16, 1406.
Yalçın, E. 2017. Yeraltı Havalandırması, Birleşik Matbaacılık, İzmir, 402 s.
Yıldız, T. D., Haner, B. 2017. Yeraltı Madenciliğinde Ocağa Verilmesi Gereken Hava Miktarı Konusunda Türk Mevzuatı Hükümlerinin Değerlendirilmesi. Uluslararası Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, Adana.

GROUND PRESSURE EXERTED BY MINING SHOVELS AND BEARING CAPACITY OF BENCH-FLOOR.

KÜREĞİMSİ MADEN YERKAZARLARININ YERE UYGULADIĞI BASINÇ VE BASAMAK TABANININ DAYANIM KAPASİTESİ

Dr. Metin Özdoğan*,
İdeal Makina Danışmanlık Ltd. Şti., OSTİM, ANKARA

Hakkı Özdoğan,
İdeal Makina Danışmanlık Ltd. Şti., OSTİM, ANKARA

Abstract Ground pressure is calculated as the ratio of the shovel's operating weight to the total ground contact area of its crawler shoes. Ground pressure exerted by equipment depends not only on machine design but also on site-specific geotechnical and operational factors. Influencing factors include mine planning, geology, floor material properties, and operating practices.

In order to estimate whether a rock bench floor in an open-pit mine can withstand the ground pressure from mining equipment, the exerted ground pressure should be compared to the bearing strength of the bench floor. To avoid excessive sinking or structural failure, the exerted pressure must remain within the bearing strength of the bench floor. Large electric mining shovels are built with rugged components to maximize bucket performance, while their crawler shoes distribute weight effectively, reducing wear and enhancing durability.

Key Words: Ground pressure, Mining shovels, Bearing capacity of bench floor, Equipment parameters of ground pressure, Site parameters impacting of ground pressure.

Özet Zemin basıncı, kepçenin işletme ağırlığının palet pabuçlarının toplam yere bası alanına oranı olarak hesaplanır. Ekipmanın uyguladığı zemin basıncı yalnızca makine tasarımına değil, aynı zamanda saha-özgü jeoteknik ve operasyonel faktörlere de bağlıdır. Etkileyen unsurlar arasında maden planlaması, jeoloji, taban malzemesinin özellikleri ve işletme uygulamaları yer alır.

Bir açık ocak madeninde kaya tabanının, madencilik ekipmanının zemin basıncına dayanıp dayanamayacağını tahmin edebilmek için, uygulanan zemin basıncının tabanın taşıma mukavemetiyle karşılaştırılması gerekir. Aşırı batma veya yapısal hasarı önlemek için, uygulanan basınç tabanın taşıma mukavemeti sınırları içinde kalmalıdır. Büyük elektrikli madencilik kepçeleri, kovaların performansını en üst düzeye çıkarmak için sağlam bileşenlerle üretilir; palet ayakkabıları ise ağırlığı etkili biçimde dağıtarak aşınmayı azaltır ve dayanıklılığı artırır.

Anahtar Sözcükler: Yere düşen basınç**,** Küreğimsi maden yerkazarları**,** Yerin düşen basıncı taşıma yeteneği**,** Yere düşen basıncı etkileyen makina değişkenleri**,** Yere basıncını etkileyen ocak değişkenleri**.**

1. INTRODUCTION

The ground pressure exerted by a mining shovel's crawler belt shoes depend on factors like the shovel's operating weight including bucket payload, the contact area of the crawler shoes, and the geology of the mine site. In order to prevent excessive sinking or structural failure the pressure exerted by the digging-loading equipment must be within the rock bearing strength limits of the bench floor**.**

Large electric mining shovel**s** have rugged components in order to optimize ground engagement of the bucket. Crawler shoes of the mining shovel distribute the equipment weight effectively, thus reduce wear and improve durability of the loading equipment.
Ground pressure exerted to bench floor by crawler shoes of a mining shovel is calculated by the ratio of operating weight of the mining shovel to total ground contact area of the crawler shoes:

2. GROUND PRESSURE EXERTED BY ELECTRIC ROPE SHOVELS

2.1. General

Electric rope shovels are massive machines, but their crawler tracks are proportionally larger. This spreads the load more evenly, reducing ground pressure. Lower ground pressure from electric rope shovels (ERS) reduces the risk of track sinking in soft ground, which is critical for bench stability. In practice open-pit bench floors are subject to non-uniform stresses due to load transfer, dynamic effects, and local bearing capacity variations, so site parameters matter as much as machine specifications. Please note that electric rope shovels are ideal equipment for hard rock mines with stable ground floors.

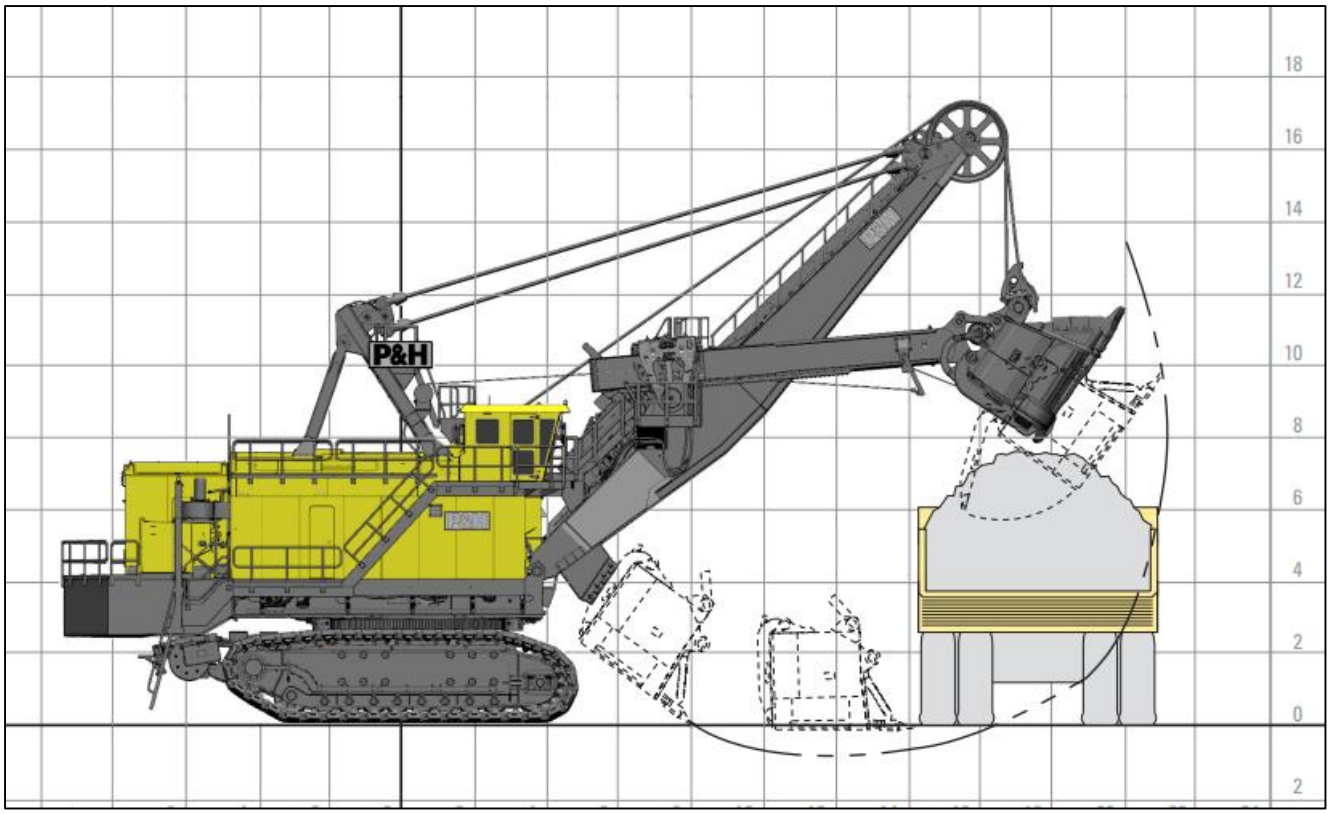


Figure 1. A 35 m^3 range electric rope shovel for an open-pit mine (Anon a, 2025).

Table 1. P&H 2800 XPC AC Drive Operating weight and ground pressure (Anon a, 2025).

ERS Model 2800XPC, 35 m^3 @1.8 mt/m^3	**Operating Weight, m.t.**	**Crawler Shoe Width, mm**	**Crawler Shoe Bearing Area, m^2**	**Ground Pressure, MPa (psi)**
Standard Shoes (55”)	749,00	139 cm	21,30	0,345 (50psi) (3,52 kg/cm^2)
Wide Shoes (70”)	751,00	178 cm	27,11	0,272 (39.4 psi) (2,77 kg/cm^2)

2.2. Calculating Ground Pressure of the Equipment.

Ground pressure is the contact stress transmitted from the shovel’s undercarriage to the pit floor. At its simplest, average ground pressure is the total vertical load divided by the effective contact area of tracks or shoes:

$$G.P_{avg}=(W_{equipment}+W_{payload}+W_{dynamic})/C.A._{effective} \quad (1)$$

Where:

$G.P._{avg}$ = Average ground pressure (kPa or MPa)
W_{eq}. = Equipment weight (kN)
W_{pyld} = Payload weight (kN)
Wdyn= Dynamic weigt (kN)
CA = Contact area of the crawler shoes (m^2)

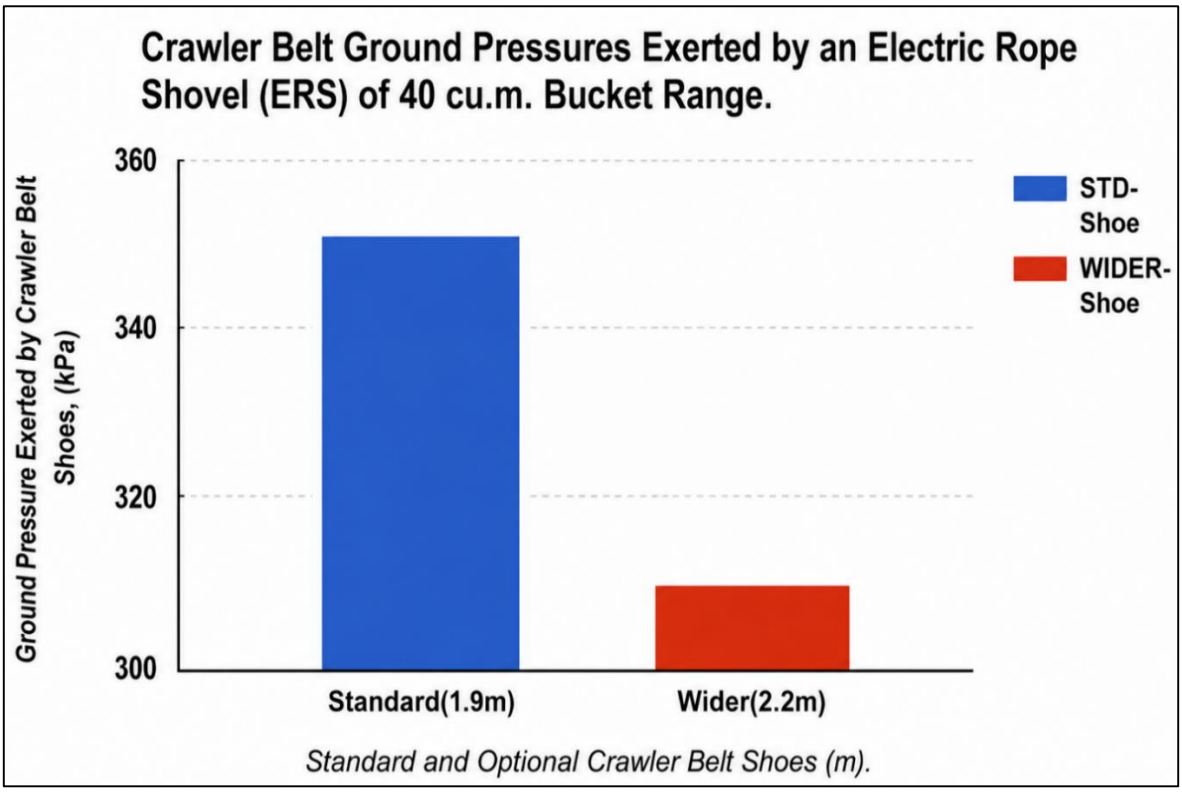


Figure 2. Impact of crawler shoe width on the ground pressure exerted by 40 m^3 range electric rope shovel (Anon a, 2025).

2.3. Ground Pressure Exerted by Equipment to Benchfloors Consisting of Sedimentary (Layered) Rocks

Coal-measure, borax-measure, and phosphate-measure rocks are typical sedimentary formations characterized by layered structures. In most cases, these layers lie parallel to the digging and loading benches. However, tectonic deformation may distort the bedding, producing angular or even vertical orientations relative to the bench face.

The component of ground pressure parallel to the bedding plane, $GP \cdot \sin \phi$ tends to induce slipping along the bench floor's bedding plane when mining shovel is operating near the boundary of the open-pit bench. The higher the bedding plane angle with respect to the bench floor plane, the higher the angular pressure applied to the bedding planes of the sedimentary rock formation underneath of the

equipment or vice versa, See Figure 4 (b). below. This is especially important when mining shovel operates near bench edge.

Figure 3., below illustrates how svere the tectonic movements affect a sedimentay limetone formation. Figure 4 a, b and c depicts how the ground pressure and its components can impact the stability of the mining shovels operating closer to open-pit bench edges.

Sedimentary rocks forming the bench floor in open-pit mining can be tectonically distorted, jointed, and weathered, as seen in Figure 3.

Figure.3. A tectonically deformed and jointed Jurassic limestone formation in Çayyolu, Ankara, Türkiye (Unpublished photograph, Özdoğan and Özdoğan, 2026).

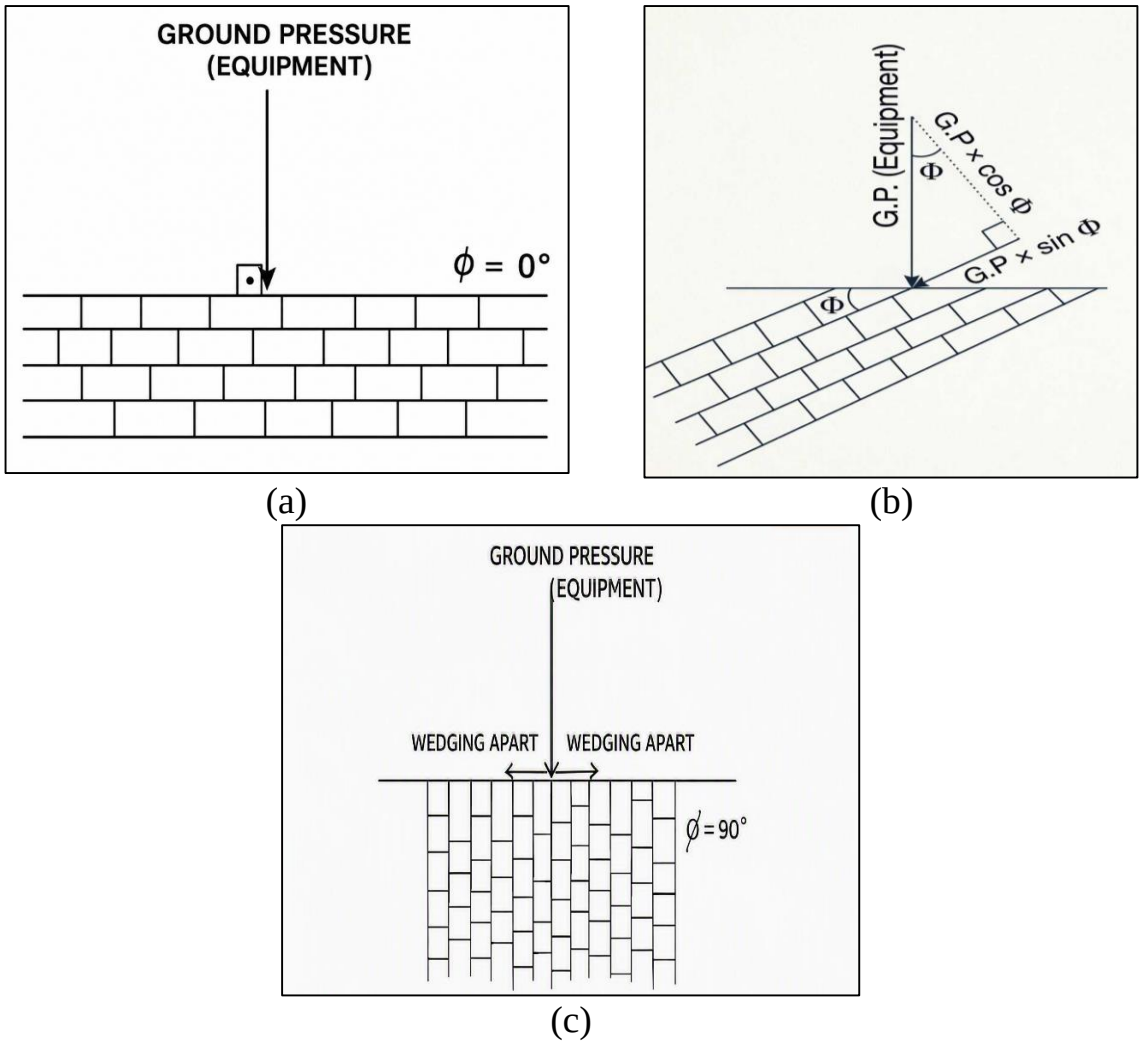


Figure 4. Bedding plane angle ϕ of the formation affects the ground pressure exerted to bench floor by the mining shovel (Unpublished drawing, Özdoğan and Özdoğan, 2026).

Ground pressure exerted on the ground reaches its maximum in this position, see Figure 4 (a). When ϕ=0∘, the equipment's entire weight is transferred directly to the bench floor. If the geological layers are parallel to the bench floor, the ground pressure generated by digging and loading equipment acts perpendicular to the floor. As seen in Figure 4 (b), when the layers are inclined, the exerted pressure develops an angular component parallel to the bedding plane inclination. If the angle between the equipment's ground pressure (GP) and the bedding plane is ϕ, the parallel (GP_{ϕ}) and vertical component (GP_v) of the ground pressure along the bedding plane can be expressed as:

$$GP_{\phi}=GPxSin\phi \quad (2)$$

$$GP_v=GPxCos\phi \quad (3)$$

Where:

GP_{ϕ} = Component of ground pressure acting along the inclined bedding plane of rock formation beneath, kPa.
GP_v = Component of ground pressure acting perpendicular to the inclined bedding plane of the formation beneath.
GP = Ground Pressure exerted to the ground, kPa.
ϕ = Bedding plane inclination angle of rock formation beneath, degrees w.r.to the bench floor (°).

The component of ground pressure acting along the inclined bedding plane of sedimentary rock formations, denoted as GP_{ϕ}, tends to induce sliding along the bedding planes when the shovel operates near the bench edges. On benches where equipment is deployed on sedimentary formations with tectonically deformed, vertically oriented bedding planes, the applied ground pressure acts to wedge the bedding planes apart at the bench edges, transmitting the full vertical load (GPv) directly into the rock mass, see Figure 4 (b) and Figure 3.

The steepness of the bedding plane angle (ϕ) beneath the bench floor directly influences the shear force acting along it: a steeper angle produces a larger ground pressure component parallel to the incline (GP_{ϕ} = GP x Sinϕ), reaching its maximum when ϕ= 90° see Figures 4 (b) and 4 (c). Consequently, when a heavy mining shovel operates near the edge of an open-pit bench with steep bedding planes, this exerted pressure can force the rock layers to shear outward in a wedge-like failure.

Ground pressure from a mining shovel is the contact stress transmitted from its undercarriage to the pit floor. In its simplest form, average ground pressure is calculated by dividing the total vertical load by the effective contact area of the tracks or shoes. Please note that, the wider the crawler belt shoe width, the lower the ground pressure exerted to the bench floor by the loading equipment. In other words, the higher the contact area of shoe belt the lower the ground pressure exerted by the equipment.

Table 2. Ground pressure exerted by 20 m^3-35 m^3 range electric rope shovel (ERS) and hydraulic mining shovel (HMS) crawler shoes ((data Anon a, 2025, Anon b, 2025, Anon g, 2026, Anon h, 2026).

Shovel Model (ERS & HMS)	**Bucket &Payload, tonnes (m.t.)**	**Shoe Width (cm) &inch**	**Total Operating Weight, mt&Total Crawler Contact Area, m^2.**	**Ground Pressure Exerted by the Loading Equipment, kPa (psi)(kg/cm^2)**
ERS Cat 7295 Standard Shoes (55”)	21 m^3 & 45 m.t.	139,70 cm (55”)	789 m.t. & 20,81 m^2	0,372 MPa (53,91 psi) (3,79 kg/cm^2)
ERS Cat 7295 Wide Shoes Shoes (72”)	21 m^3 & 45 m.t.	182,88 cm (72”)	793 m.t. & 27,20 m^2	0,372 MPa (41,20 psi) (2,90 kg/cm^2)
ERS Cat 7395 Standard Shoes (84”)	32 m^3& 63,5 m.t.	213,40 cm (84“)	1179 m.t.& 32 m^2)	0,362 MPa (52,5 psi) (3.69 kg/cm^2)
ERS Cat 7395 Wide Shoes Shoes (108”)	32 m^3 & 63,5 m.t.	274,32 cm (108”)	1203 m.t.	0,311 MPa (45,50psi) (3.17 kg/cm^2)
ERS P&H 2800XPC AC, Standard Shoes	35 m^3 (SAE Struck) &122.5 (m.t.)	142 cm (56”)	1079 m.t. & 23,94 m^2	442 kPa (64,10 psi) (4,1kg/cm^2)
ERS P&H2800XPC AC, Wide Shoes Option	35 m^3 &122.5 (m.t.)	183 cm (72”)	1084 m.t. & 30,78 m^2	345 kPa (50,09psi) (4,51kg/cm^2)
Komatsu HMS PC7000-11 Standard Shoes	37 m^3 (SAE 2:1 Heaped) & 68.4 m.t.	150 cm (59”)	682 m.t.	253 kPa (25,30)N/cm^2) (37,73 psi) (2,65 kg/cm^2)
Komatsu HMS PC7000-11 Wide Shoes Option	37 m^3 (SAE 2:1 Heaped) & 68.4 m.t.	190 cm (75”)	692 m.t.	203 kPa (20,30 N/cm^2) (30,23 psi) (2,13 kg/cm^2)
Komatsu HMS PC4000-11, Standard Shoe	22 m^3 &39,6 m.t.	120 cm, (47,24”)	398 m.t.	0.222 MPa (32.2 psi) (2,26 kg/cm^2)
Komatsu HMS PC4000-11, Wide Shoe	22 m^3 &39,6 m.t.	150 cm, (59,01”)	409 m.t.	0,179 MPa (26.0 psi) (1,83 kg/cm^2)

3. GROUND PRESSURE EXERTED BY HYDRAULIC MINING SHOVELS

Design philosophy of hydraulic mining shovels (HMS) is prioritizing mobility and flexibility. Hydraulic mining shovels with standard crawler shoe belts may exert higher ground pressure. However, these shovels have wider shoe track options if it is necessary to reduce the ground pressure exerted to the bench floor. Higher ground pressure exerted can accelerate track wear and cause more ground disturbance. Nevertheless, their operating weights are lighter compared to that of electric rope shovels of comparable bucket capacities, therefore comparatively the ground pressures exerted are smaller with respect to electric rope shovels.

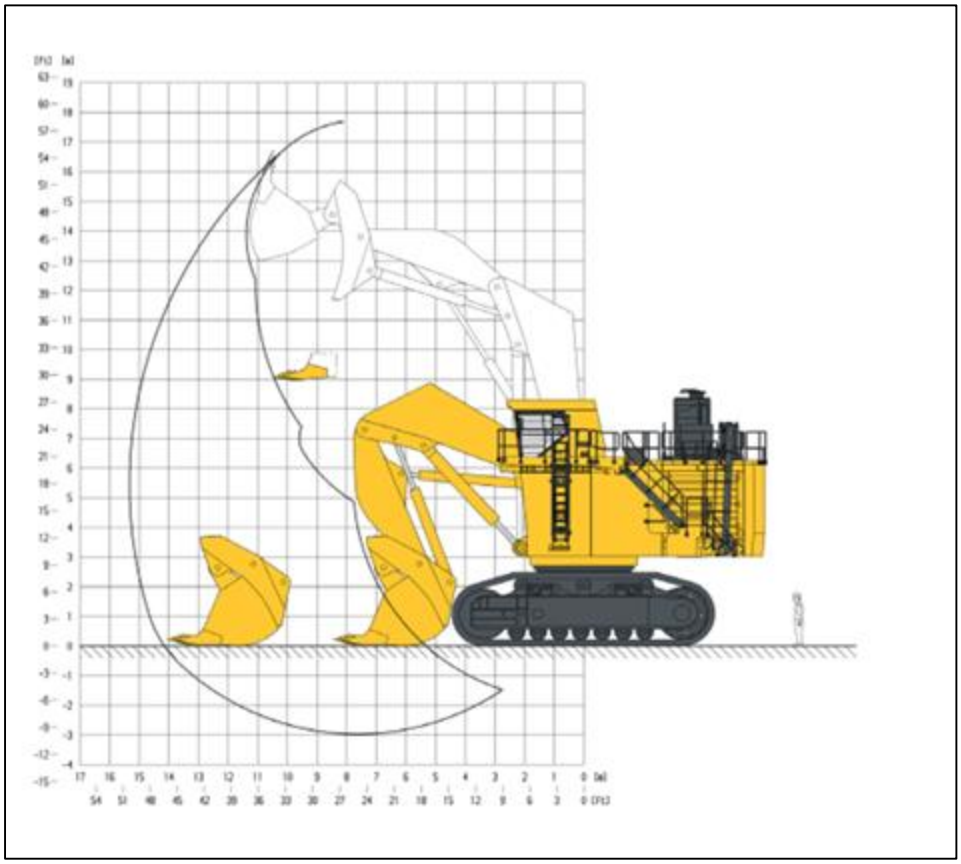


Figure 5. A 22 m^3 bucket range hydraulic mining shovel for an open-pit mine (Anon b, 2025).

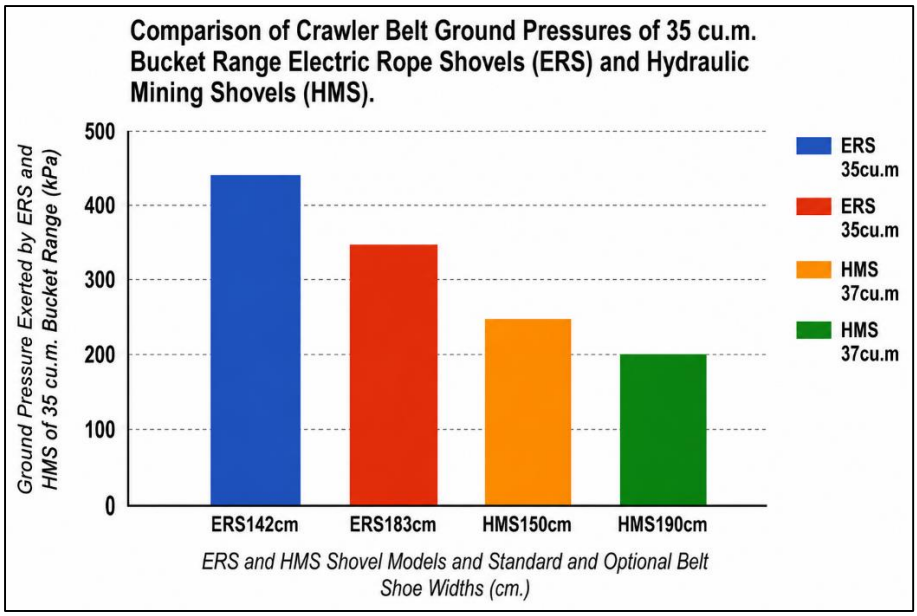


Figure 6. Comparison of Ground pressures of ERS and HMS with standard and wide crawler shoes (data, Anon a, 2025 and Anon b, 2025).

Figure 6., depicts crawler belt ground pressures of 35 m^3 bucket range electric rope shovels and hydraulic mining shovels (data, Anon a, 2025 and Anon b, 2025).

4. COMPARISON OF GROUND PRESSURE EXERTED BY ELECTRIC ROPE SHOVELS AND HYDRAULIC MINING SHOVELS

Table 3. Ground pressure exerted by 35 m^3-45 m^3 range electric rope shovel (ERS) and hydraulic mining shovel (HMS) crawler shoes, (data, Anon a, 2025 and Anon b, 2025)

Shovel Model (ERS & HMS)	Bucket &Payload, tonnes (m.t.)	Shoe Width (cm) &inch	Operating Weight, mt&Crawler Contact Area, m^2.	Ground Pressure Exerted by the Loading Equipment, MPa (psi)(kg/cm^2)
ERS P&H 4100C AC, Standard Shoes, 76”	45m^3 (SAE Struck) & 81.70 m.t.	193 cm (76”)	1243m.t. & 34.69 m^2	0,351 MPa (50,98 psi)(3,58 kg/cm^2)
ERS 4100C AC, Wide Shoes Option, 87”	45 m^3 & 81.70 (m.t.)	221 cm (87”)	1248 m.t. & 39.71 m^2	0,308 MPa (44,70 psi) (3,14 kg/cm^2)
ERS P&H 2800XPC AC, Standard Shoes, 56”	35 m^3 (SAE Struck) &122.5 (m.t.)	142 cm (56”)	1079 m.t. & 23.94 m^2	0,442 MPa (64.10 psi)(4.1kg/cm^2)
ERS P&H 2800XPC AC, Wide Shoes Option, 72”	35 m^3 &122.5 (m.t.)	183 cm (72”)	1084 m.t. & 30,78 m^2	0,345 MPa (50,09psi) (4,51kg/cm^2)
Komatsu HMS PC7000-11 Standard Shoes, 59”	37 m^3 (SAE 2:1 Heaped) & 68.4 m.t.	150 cm (59”)	682 m.t.	0,253 MPa (25,30)N/cm^2) (37.73 psi) (2,65 kg/cm^2)
Komatsu HMS PC7000-11 Wide Shoes Option, 75”	37 m^3 (SAE 2:1 Heaped) & 68,4 m.t.	190 cm (75”)	692 m.t.	0,203 MPa (20,30 N/cm^2) (30,23 psi) (2,13 kg/cm^2)
Komatsu PC8000-11, Bucket 42 m3 @1.8 mt/m^3, Standard Shoes, (59”)	42 m^3 (SAE 2:1 Heaped) & 75,6 m.t.	150 cm (59”)	769 m.t.	0,279 MPa (40,46 psi) (2,84 kg/cm^2)
Komatsu PC8000-11, Bucket 42 m3 @1.8 mt/m^3, Wide Shoes Option, (75”)	42 m^3 (SAE 2:1 Heaped) & 75,6 m.t.	190 cm (75”)	782 m.t.	0,224 MPa (32.50 psi) (2,29 kg/cm^2)

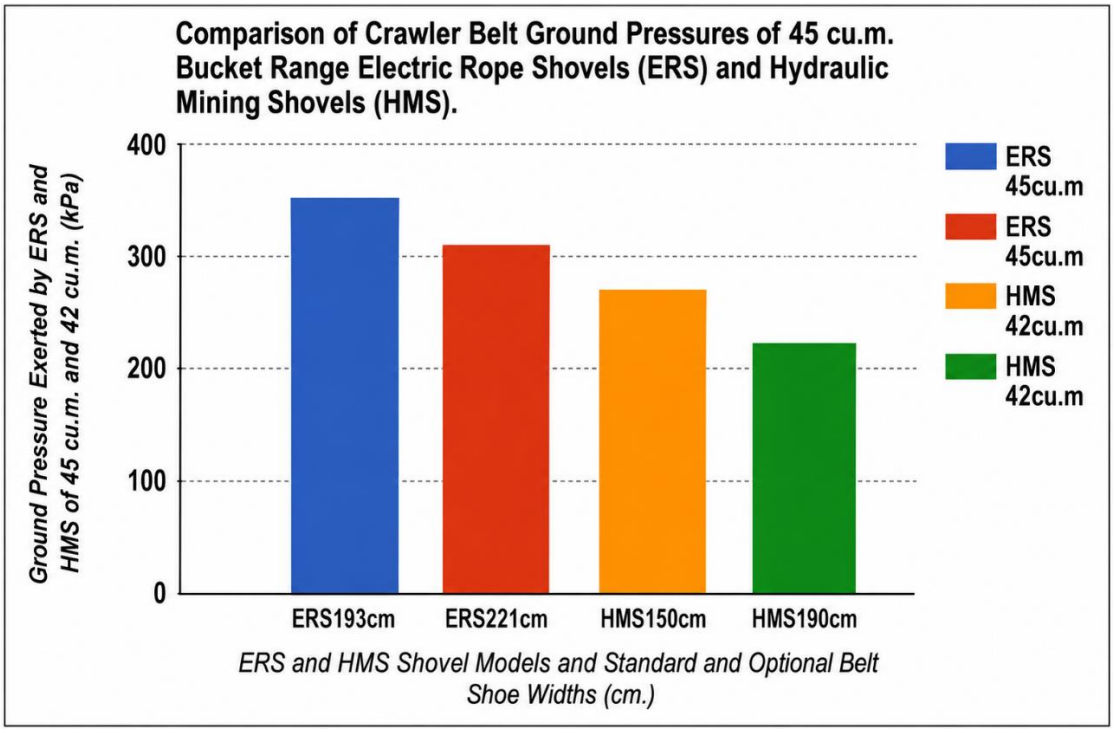


Figure 7. Ground pressures exerted by 45 m^3 range electric rope shovels and hydraulic mining shovels with standard and wider track shoes (data, Anon a, 2025 and Anon b, 2025).

5. IMPACT OF MACHINE PARAMETERS ON GROUND PRESSURE EXERTED.

The integration of ground pressure of machines within mining operations is a critical factor influencing operational efficiency, safety, and equipment longevity. Ground-machine integration encompasses the interaction between mining equipment and the geological environment, focusing on how machine design, operational parameters, and ground conditions collectively affect performance and ground pressure distribution.

5.1. Machine-Ground Interaction Dynamics

Mining machines, particularly shovels and loaders, exert complex forces on bench floors and haul roads. These forces are not static; they vary dynamically with machine movements such as digging, slewing, and traveling. The distribution of ground pressure is influenced by machine mass, undercarriage design, and the position of the center of gravity, which shifts during operation.

5.2. Equipment Design Considerations

Effective ground-machine integration requires careful consideration of equipment parameters that influence ground pressure. The operating weight of the machine,

including attachments and payload, directly affects the pressure exerted on the ground. Undercarriage types, such as crawler tracks versus tires, determine the contact area and thus the pressure distribution.
Crawler shoe design plays a pivotal role in managing ground pressure. Variations in shoe width, length, tread pattern, and material composition are tailored to specific ground conditions to optimize traction and minimize soil disturbance. For example, wider shoes reduce pressure on soft ground but may compromise maneuverability on hard surfaces.

5.3. Dynamic Operational Factors

Dynamic forces generated during acceleration, braking, and digging introduce transient loads that can significantly increase ground pressure beyond static calculations. These dynamic effects must be accounted for in machine design and operational planning to prevent excessive ground deformation and equipment wear.

5.3.1. Dynamic Loading During Digging

Actual floor pressures exceed static pressures. Sources: Crowd force, hoist force, swing acceleration, bucket impact, sudden braking. Dynamic loads may increase effective ground pressure by the ratios cited in the below table as a rule of thumb. As a rule of thumb in geotechnical bench design, static equipment pressures must be adjusted to account for operational dynamics. During active digging, transient forces—namely crowd resistance, hoist pull, swing torque, muckpile impact, and tram braking—generate shifting moments that elevate effective ground pressures well beyond static values (Joseph, 2002; Frimpong et al., 2007; Read and Stacey, 2009).

Joseph, T.G. (2002) explored cable shovel-track and bench floor formation interaction and studied how hoist and crowd forces of ERS alter actual ground pressures exerted to the bench floors. Frimpong et al (2007) studied spatial nonlinear cable shovel Dynamics and ground interaction and explained how swing and bucket impact create dynamic pressure spikes. Read & Stacey (2009) verify the use of rule of thumb dynamic increase ratios to prevent bench and pit floor shear failures under heavy machinery loading in their book on “Guidelines for Open-pit Slope design”.

Rule of thumb estimation of impact of dynamic loads of loading equipment on static ground pressures exerted to the bench floor in open-pit mining are as follows: Field estimation of groud pressure impact ratio by dynamic factors induced by shovel’s digging and loading phases can be 10 % to 30 percent in electric rope shovels. Hydraulic shovel’s ground pressure may jack up the static

ground pressure up to even higher like 20% to 30 % (Read & Stacey, 2009, Binns, 2020, Wood, 2023).
Ground-machine integration also involves adapting equipment to varying ground conditions. Soft-ground crawler shoes with increased width and specialized tread patterns help distribute weight and prevent excessive sinkage in unstable terrain. Conversely, hard-ground shoes are designed for durability and maneuverability on firm or rocky surfaces, even though shoes have higher localized pressure.

Table 4. The five specific forces of that impact the static ground pressures exerted by digging and loading equipment (Wood, A., 2025 and Norris, J., 2025).

Force / Action	Mechanical Source	Geotechnical Impact
Crowd & Hoist Forces	Hydraulic rams or rope machinery pushing/pulling against a rigid muckpile.	Creates a powerful tipping moment (M = F x d) that shifts the machine's Center of Gravity (CoG) forward, crushing the soil under the front shoes.
Swing Acceleration	High-torque electric or hydraulic swing motors accelerating the upper revolving frame.	Causes centrifugal load transfer and lateral track loading, twisting the ground footprint diagonally.
Bucket Impact	Striking a poorly fragmented muckpile or toe rock.	Creates high-frequency transient shockwaves that can cause localized soil shear failure or floor punch-through.
Sudden Braking	Decelerating massive moving weights (tramming or swinging).	Translates kinetic energy into a forward or lateral dynamic force vector, causing an instantaneous spike in effective pressure.

6. IMPACT OF MINE SITE PARAMETERS ON GROUND PRESSURE EXERTED

Ground pressure exerted by a mining shovel is not determined solely by the machine itself. Several mine-site parameters significantly influence the actual pressure transmitted to the bench floor and the floor's response to that pressure. Ground pressure exerted by mining shovels depends not only on mining shovel type and specifications but also on site-specific geotechnical and operational factors. Key influencers include mine planning, geology, floor material properties, and operating practices. Effective management requires systematic monitoring and proactive floor preparation.

Table 5. Mine site parameters affecting ground pressure of mining shovels (Achelpohl, 2026).

Parameter Group	Specific Factor	Mechanism	Impact on Ground Pressure
Bench Floor Quality	Compaction, Bearing Capacity	Reduced stiffness increases settlement	Higher local peak stresses
Geometry and Roads	Grades, turning radii	Load shifts and repeated passes	Assymetric and concentrated stressess
Drainage and Water	Surface / Groundwater saturation	Lower shear stress, higher compressibility	Increased rutting and contact stress
Geology and Structure	Weak layers, Discontinuties	Anisotropic stiffness, punching	Uneven settlement, stress spikes
Material Properties	UCS, Modulus, Gradation	Stiffness and load distribution	Lower stiffness Higher spikes
Seasonal Effects	Freeze-thaw, thaw weakening	Temporary loss of capacity	Transient high ptressures
Operation and Dynamics	Cycle agressiveness, Spotting	Transient loads, dwell	Elevated hotspots, $W_{dynamic}$

For a shovel exerting 0, 220–0,350 MPa average ground pressure, the most critical mine-site factors are: Floor bearing capacity; Moisture and groundwater conditions; Presence of weak clay or weathered layers beneath the loading pad; Bench preparation and compaction quality. In practice, a well-drained, compacted floor often supports a 1,200–1,500 m.t. electric rope shovel successfully, while the same shovel may experience excessive settlement or instability on a wet clay floor despite having identical nominal ground pressure.

7. BEARING CAPACITY OF THE BENCH FLOOR

7.1. Introduction

The bearing strength of an open-pit mine bench floor is a critical geotechnical parameter governing the safe and efficient operation of large loading equipment such as Electric Rope Shovels (ERS) and Hydraulic Mining Shovels (HMS). These machines impose substantial static and dynamic loads on the working bench through crawler tracks, and inadequate floor strength may result in excessive settlement, rutting, instability, and productivity losses.

Ground pressure exerted by a mining shovel is primarily a function of machine operating weight and crawler contact area. Typical large electric rope shovels operating in the 40–45 m³ bucket class exert average ground pressures ranging from approximately 300 to 350 kPa, (0.30MPa-0.35MPa) while hydraulic mining

shovels of similar production capacity generally exert pressures between 220 and 280 kPa (0.22MPa-0.28MPa) when equipped with standard crawler shoes. Wider crawler shoes can reduce average ground pressure by 10–20% through increased contact area (Anon a, 2025).

The ability of the bench floor to support these loads depends on its bearing strength, which is controlled by lithology, degree of weathering, moisture content, groundwater conditions, and compaction. Competent sandstone, limestone, and fresh igneous rock floors typically possess bearing capacities well in excess of 1,500 kPa (1.5 MPa) and rarely experience performance issues under shovel loading. In contrast, weak claystone, mudstone, weathered shale, and saturated overburden materials may exhibit allowable bearing capacities below 300 kPa (0,30 MPa), creating a risk of localized floor failure.

From a geotechnical perspective, the allowable bearing capacity of the bench floor should exceed the maximum operational ground pressure exerted by the shovel, including dynamic loading effects. Dynamic forces generated during crowding, hoisting, swinging, and bucket impact can increase effective ground pressures by 10–30% for electric rope shovels and 20–60% for hydraulic shovels. Consequently, the design bearing capacity of shovel loading pads should incorporate an adequate factor of safety, typically between 2.0 to 3.0.

Bench floor deterioration is commonly associated with elevated moisture levels and inadequate drainage. Water infiltration reduces shear strength, increases compressibility, and may cause rapid degradation of floor performance. For this reason, effective drainage systems, routine floor maintenance, and geotechnical monitoring are essential components of shovel operating areas.

In practice, successful shovel deployment requires matching equipment ground pressures to the bearing characteristics of the bench floor. Where weak foundation conditions are encountered, operators may improve floor performance through compaction, placement of crushed-rock working pads, drainage enhancement, or the use of wider crawler shoes to reduce contact pressure. Such measures improve equipment stability, reduce maintenance costs, and enhance overall mine productivity.

7.2. UCS and Rock Mass Properties of SomeTurkish Sedimentary Rock Formations Published by Turkish Researchers.

Table 6. Bench rock properties of some ore and coal measure rocks form Turkish mines.

Rock Type	UCS, MPa	RMR	GSI	Unit Weight, mt/m^3	Researcher
Limestone	62,3	48	43	2,66	Başarır et al. (2005)
Sandstone	64,7	38	33	2,70	Başarır et al. (2005)
Limestone	107	63	59	2,65	Geniş&Çolak (2015)
Limestone	76,6	58,8	60,4	2,72	Gökçeoğlu et al. (2003)
Marl	18,6	27,7	22,6	2,69	Gökçeoğlu et al. (2003)
Marl Seyitömer	8,76	----	----	----	Koncagül (1990)
Marl Seyitömer	13,39	----	----	1,98	Özdoğan (2002)
Marl Sivas-Kangal	13,25	----	----	3,05	Başarır (2004)

7.3. Estimated Allowable (Safe) Bearing Capacity of Milas Yeniköy Mine Sites

Table 7. Ultimate and allowable bench floor bearing capacities of Yeniköy lignite open pits based on UCS (data of mine site, 2025).

Formation & Site	Typical UCS, MPa (Ultimate Bearing Capacity)	Bench Bearing Capacity, MPa (Allowable Bearing Capacity)	Hydraulic Mining Shovel, GP, MPa. KMTS/PC7000-11, (37m^3), 682 mt.	Electric Rope Shovel, GP, MPa. P&H2800XPC. (35m^3), 1084 mt.	Comment, GP<BC, Ground Pressure <Bearing Capacity
Marl (Yeniköy)	21,76 MPa	8,70 MPa	0,253 MPa	0,442 MPa	Safe
Lignite (Yeniköy)	13,70 MPa	5,48 MPa	0,253 MPa	0,442 MPa	Safe
Limestone (Yeniköy)	39,08 MPa	15,63 MPa	0,253 MPa	0,442 MPa	Safe
Marl (Akbelen)	20,35 MPa	8,14 MPa	0,253 MPa	0,442 MPa	Safe
Marl (Işıkdere)	23,92 MPa	9,57 MPa	0,253 MPa	0,442 MPa	Safe

Unfortunately, rock mass strength parameters are not available for the benches therefore bench bearing capacity is based on UCS figures. Safety factor is taken as 2,5. Even if UCS is high, the presence of fractures, joint sets, weakness zones, bedding planes, faults can weaken the bench floor reducing its effective load bearing capacity.

7.3. A Safety Factor Application to Ultimate Bearing Capacity of Bench Floor.

In open-pit mining, the Factor of Safety for a working bench floor typically ranges between 2.0 and 3.0. This margin is necessary to account for severe operational uncertainties: Blast Damage: Sub-grade drilling and blasting fracture the rock mass directly beneath the floor, creating highly unpredictable "soft spots." Dynamic Overturning Moments: When a shovel hoists a heavy bucket, its center of gravity shifts forward dynamically, concentrating massive peak edge pressures on the front of the tracks. Water Infiltration: Standing rainwater or pit seepage saturates the floor fines, drastically cutting the effective q_u value in half.

7.4. Calculating the allowable Bearing Capacity of Rock.

7.4.1. Introduction

To estimate whether a rock bench floor in an open-pit mine can withstand the ground pressure from mining equipment like shovels or loaders, the engineers want to compare the equipment**'s** ground pressure to the bearing capacity of the bench floor to be compared. Here's how to approach it: Conventionally, RMR (Rock Mass Rating) and Q-Systems so as to put degrees of weathering, fracture pattern, aperture / opening of fractures, availability of groundwater etc. in addition to strength of the rock under investigation. Q-system is a rock mass classification to assess the stability of tunnels and underground excavations.

The unconfined uniaxial compressive strength (UCS) is determined, first. UCS is determined in rock mechanics laboratories on rock samples or by using published data for similar rock types. Secondly, Rock Mass Rating (RMR) is calculated which is a commonly used emprical classification system. RMR system takes into account factors like rock type, joint spacing and its persistence, groundwater conditions and in situ stress state.

The allowable bearing capacity of benchfloor is estimated (calculated) by emprical relationships based on UCS and RMR or equivalent parameters. The bearing capacity of a bench floor in mining operations must be sufficient to

withstand the ground pressure exerted by mining shovels. This ensures stability and prevents excessive sinking or structural failure.

Insitu Plate Load Test (PLT) is also used in evaluating by an in situ plate load device which is a large rigid steel plate (typically 300mm to 760 mm diameter). It measures the direct relationship between applied force and ground setting (deformation), loaded by a heavy counterweight often by a mining truck or excavators. It is a large-scale in situ test. It evaluates the actual modulus of subgrade reactioın reaction (k) or determine the ultimate and allowable bearing capacity (q_{all}) of actual un-moulded rock mass/soil structure.

California Bearing Ratio (CBR) in situ CBR penetration device with a standard plunger of 50mm diameter. Measured penetration pressure devided by standard reference pressure multiplied by 100. CBR evaluates the near surface shear strength of matrix or fine grained fraction of the bench floor. More suitable for measuring bearing strength of airport aprons, runways, taxiways and highways rather than open-pit bench floor bearing strengths. CBR compares the bearing capacity of the material surface whether compacted soil, soft floor, or fine blasted muck, against a standard, high quality crushed limestone material which represents a reference CBR of 100%.

7.4.2. Ultimate Bearing Capacity, qu (q_{ult}).

In geotechnical and mining engineering, $\mathbf{q_u}$ and $\mathbf{q_a}$ are the fundamental design thresholds used to ensure a bench floor can support heavy equipment (like electric rope shovels, hydraulic excavators, or haul trucks) without failing structurally. qu and qa represent the Ultimate and Allowable bearing capacities of the ground, respectively.

Ultimate Bearing Capacity, q_u (sometimes written as q_{ult}), is the theoretical maximum pressure that the bench floor material can withstand before undergoing shear failure or severe plastic deformation. If the pressure exerted by a machine's tracks or tires exceeds q_u, the floor matrix will structurally collapse. Ultimate bearing capacity of the bench floor depends of the rock mass strength of the formation of the open-pit bench. Rock mass strength can be estimated by making use of the following rock mechanics & soil mechanics methods: Uniaxial Compressive Strength (UCS) of intact rock; Rock Mass Rating (RMR) or Q-system classification; Hoek-Brown failure criterion for more advanced analysis; In situ Plate Load Test (PLT); California Bearing Ratio (CBR) A simplified empirical estimate for ultimate bearing capacity (UBC) (q_u) of rock is:

$$q_u = k x UCS \qquad (4)$$

Where:

q_u = ultimate bearing capacity (UBC) (ground pressure limit), MPa
k= proportionality constant (empirical factor depending on rock mass conditions)
UCS = uniaxial compressive strength of the rock, MPa

(k) is a factor (typically between 0,1 and 0,5) depending on rock mass quality and discontinuities. The ultimate bearing capacity is directly proportional to the rock's compressive strength (UCS), scaled by the factor. To ensure stability, divide the estimated bearing capacity by a factor of safety (SF) (commonly 2.0–3.0): Allowable pressure of the bench floor is obtained by a factor of safety (SF) which is commonly taken as 2.0 to 3.0.

$$q_a = q_u / SF \quad (5)$$

Where:
q_a = Allowable Bearing, MPa
q_u = Ultimate Bearing, MPa
SF= Safety Factor

8. CONCLUDING REMARKS

Ground pressure exerted by mining shovels is determined not only by machine design but also by site-specific geotechnical and operational conditions. Key factors include mine planning, geological characteristics, floor material properties, and operating practices. In practice, bench floors in mine sites are subjected to non-uniform stresses caused by load transfer, dynamic effects, and local variations in bearing capacity. As a result, site parameters are just as important as machine specifications. Effective management therefore requires systematic monitoring and proactive floor preparation to assess whether a rock bench floor of an open-pit mine can withstand the ground pressure exerted by equipment such as shovels or loaders, the exerted pressure must be compared with the bench floor's bearing capacity. It is essential to ensure that the bearing capacity exceeds the applied pressure, incorporating an appropriate safety factor—for example, 2,5. Dynamic forces generated during acceleration, braking, and digging introduce transient loads that can significantly increase ground pressure beyond static calculations. These dynamic effects must be accounted for in machine design and operational planning to prevent excessive ground deformation and equipment wear.
A dynamic factor of 1.1–1.3 is typically applied to account for breaking, turning, and concentrated loads of mining shovels, with even higher values recommended for wheel loaders in the literature. Safe operation is ensured when the allowable bench bearing capacity exceeds the equipment's ground pressure; if it is lower, risks such as rutting, sinking, or floor collapse may occur.

This study examines the operating weights, shoe lengths, and ground pressures of several electric rope and hydraulic mining shovels. The electric rope shovels evaluated includes the Komatsu P&H models- 1900AL (7,5 m^3), 2100BL (12 m^3), 2300XPC (21 m^3), 2800 XPC AC (35 m^3), 4100C AC (45 m^3) models-as well as the Cat 7295 (21m^3) and Cat 7394 (32 m^3). Additionally, the analysis covers the Komatsu PC4000-11 (22 m^3), PC7000-11 (37 m^3), and PC8000-11(42 m^3) model hydraulic shovels.
At Milas Yeniköy, the bench floor has an average strength of $23.76 ±8.38 MPa. Applying a safety factor of 2.5—which incorporates geological uncertainties, groundwater, dynamic loading, and blasting damage—yields an allowable bearing strength of 9.50 ±3.35 MPa. Because of the fact that the maximum ground pressures of hydraulic shovels (0.253 MPa) and electric rope shovels (0.442 MPa) are far below this limit, operations on the lignite stripping overburden are verified as safe.

An application was conducted for several pits in the Milas-Yeniköy lignite fields using available site data. The analysis shows that even large equipment — such as a 37 m^3, 682-ton hydraulic shovel exerting 0.253 MPa ground pressure with standard crawler shoes, and a 35 m^3 electric rope shovel weighing 1,084 tons exerting 0.442 MPa — can safely operate on lignite measure overburden benches. Historical records from 1985 to 2016 confirm that no bench floor bearing capacity failures occurred during this period, despite continuous use of two P&H 1900AL units (7.5 m^3, ~250 m.t working weight), with a ground pressure of (0.16–0.22 MPa), and four P&H 2100BL units (12 m^3, ~320 m.t working weight) with a ground pressure of (0.18–0.24 MPa) for about two and half decades. The only potential risks involve at bedding plane failures at bench edges, fault zones, or weak clayey layers. However, these areas are routinely surveyed by geological and mining engineers, and appropriate precautions are taken to ensure a safe operation. Bench floor bearing capacity should not be confused with bench slope stability and failures. Ground pressure exerted by mining shovels may impact the open-pit mine benches in the following ways: Floor stability; excessive ground pressure can damage the bench floor, leading to rutting or sinkage. Safety; uneven pressure increases risk of machine instability. Maintenance; high localized pressures accelerate undercarriage wear.

Ground pressure generally increases with equipment size. Large machines such as electric rope shovels and hydraulic mining shovels require a solid, well-prepared bench floor to operate effectively. Shovels equipped with wider track shoes can help to reduce ground pressure to some extent, which is particularly beneficial when the bench floor strength is insufficient. Meteorological conditions such as rainwater and freeze-thaw cycles affect and alter bench floor bearing capacity. Equipment should be able to maintain good mobility, traction, and flotation despite adverse conditions to ensure effective and productive operation.

Nominal ground pressure and gross equipment weight are indicators of the machine floatation in weak (poor) underfoot conditions. In order to reduce the exerted pressure of the equipment wider crawler shoe option to be chosen. The wider the crawler shoe, the lower the ground pressure applied to the bench surface. Crawler shoes spread weight over a large surface area, reducing ground pressure and preventing sinking. Selecting the right tread type and right dimensions (width, length) of the shoes is of supreme importance and essential for efficient operation and longevity of mining shovels.

Crawler shoes are typically made of hardened steel, designed to withstand extreme loads and abrasive surfaces. Crawler shoes have flat or ridged surfaces optimized for distributing weight and gripping uneven terrain. Crawler shoes are rigid and designed for slow, controlled movement on rough terrain. Planning; bench design and shovel selection must consider allowable ground bearing capacity. If ground pressure exerted by mining shovel is smaller or equal to the allowable bearing capacity of the bench floor, then the bench floor is likely to withstand the load exerted by the equipment. Allowable bearing strength is the ultimate bearing strength by a factor of safety.

Bearing capacity of the bench floor depends on the rock mass strength of the bench rock formation. Rock mass strength of the bench can be estimated by using the following methods: Uniaxial Compressive Strength (UCS) of intact rock. Rock Mass Rating (RMR) or Q-system classification. Hoek-Brown failure criterion for more advanced analysis. A simplified empirical estimate for ultimate bearing capacity (UBC) (q_u) of rock is: $q_u = k \times UCS$. Where (k) is a factor (typically between 0,1 and 0,5) depending on rock mass quality and discontinuities.

Civil engineers evaluate soil bearing capacity to ensure buildings remain stable and settlements are controlled. Mining engineers, by contrast, assess bench rock mass bearing capacity to guarantee safe operation of massive equipment on potentially damaged or fractured rock floors. The conceptual difference lies in material behavior (soil vs rock mass), load characteristics (static vs dynamic), and failure modes (settlement vs rutting/collapse).

REFERENCES

Anon (a), 2025: "*P&H 4100XPC AC and P&H 4800XPC E.R.S.Specifications*", Komatsu Mining Corp. Group, https://www.komatsu.com

Anon (b), 2025: "*PC7000-11 and PC8000-11 H.M.S. Specifications*", H.M.S Komatsu Germany GmbH, https://www.komatsu-mining.de

Anon (c), 2025:" "Komatsu Japan", https://www.komatsu.jp

Anon (d), 2025: "Komatsu Australia", https://www.komatsu.com.au

Anon (e), 2025: "Cat Electric Rope Shovels", https://www.cat.com

Anon (f), 2025: “Cat Hydraulic Mining Shovels”, https://www.empire-cat.com
Anon (g), 2026:“E.R.S. Cat 7295”, Electric Rope Shovels 7295 - Caterpillar Global Mining - PDF Catalogs | Technical Documentation | Brochure
Anon (h), 2026: “ E.R.S. Cat 7395”, Electric Rope Shovels 7395 - Caterpillar Global Mining - PDF Catalogs | Technical Documentation | Brochure
Achelpohl, E., 2026: Personal communication, Komatsu Global, USA.
Frimpong, S. et al., 2007: "Spatial Nonlinear Cable Shovel Dynamics and Ground Interaction", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, ASME.
Joseph, T.G., 2002: *Exploration of Cable Shovel–Track Formation Interaction*. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Canada.
Norris, J., 2026: Personal communication, Komatsu Global, USA.
Palmström, A., 2008: "Comparing the RMR, Q and RMi Classification Systems", www.rockmass.net, March 2008.
Palmström, A., 2011: "An Introduction to the Rock Mass Index (RMi) and Its Applications", https://www.rockmass.net/files/intro_rmi_system.pdf
Read, J. & Stacey, P., 2009: *Guidelines for Open-Pit Slope Design*. CSIRO Publishing, Melbourne, Australia.
Özdoğan, M. and Özdoğan, H., 2026: “ Unpublished Photograph and Drawing”, Ankara, Türkiye.
Wood, A., 2025: Personal communication, Komatsu Global, U.K.

BIBLIOGRAPHY

Anonymous, “*Caterpillar Performance Handbook, 30th Edition”.* Caterpillar Inc, Peoria, Illinois, USA, 1999.
Anonymous, “ *Specifications and Application Handbook, 27th Edition*”, August 2006, Komatsu Ltd., Japan
Bowles, J.E., “*Foundation Analysis and Design, 5th Edition*.”McGraw-Hill, New York, 1996.
Darling, P. (Ed.). “*SME Mining Engineering Handbook”*, Third Edition. Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), Englewood, Colorado, 2011.
Das, B.M. & Sobhan, K. *“Principles of Geotechnical Engineering”,* 9th Edition. Cengage Learning, Boston, 2018.
Hambley, D.F.*“Mining Equipment Selection for Surface Mining: A Review.”* International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 1, No. 3, 1987.
Hustrulid, W., Kuchta, M.& Martin,,R.,*“Open Pit Mine Planning and Design, Third Edition.”* CRC Press, Boca Raton, Florida, 2013.
Terzaghi, K., Peck, R.B. & Mesri, G. *“Soil Mechanics in Engineering Practice*,” Third Edition. John Wiley & Sons, New York, 1996.

KAYAÇ VE KÖMÜR KAZISINDA KULLANILAN KONİK UÇLU KESKİLERİN DÖNMESİ İÇİN VEREVLİK AÇISI GEREKLİ Mİ?

IS SKEW ANGLE REQUIRED FOR ROTATION OF POINT ATTACK PICKS EMPLOYED IN EXCAVATION OF ROCKS AND COAL?

Osman Zeki Hekimoğlu*
Professor Emeritus

Emekli Profesör

ÖZET Konik uçlu keskiler eksenleri etrafında dönerek kendilerini bileme özellikleri nedeniyle uzun ömürlü olup kayaç ve kömür kazısında yaygın olarak kullanırlar. Eksenleri etrafında dönme özelliği bu keskiler için hayati derecede önemlidir. Verevlik (yamukluk) açısı bu alanda en çok kullanılan öğelerden birisi olmasına karşın, farklı yaklaşımlarla uygulandığı görülmektedir. Uygulamada gözlenen bazı çelişkili yöntemler nedeniyle bu açının uygun kullanımı konusunda ortak bir yöntemin tanımına gerek duyulmaktadır.

Bu bildiride kayaç ve kömürlerin mekanik kazısında kullanılan konik uçlu keskilerin dönmesi için verevlik (yamukluk) açısının nasıl kullanılabileceği konusu anlatılmaktadır. Keskinin kendi etrafında dönmesinin daha çok keski kuvvetlerinden kaynaklana döndürme kuvveti ile birlikte keskinin kesici kafaya göre olan radyal konumdan ileri geldiği vurgulanmıştır. Dönmeyi sağlayan eski kuvvetleri etkin konumda olduğu sürece, salt bir verevlik (yamukluk) açısına gerek kalmayabileceği belirtilmiştir. Ancak galeri açma makinelerinde eğim açılı keskilerin aşınmalarını en aza indirmek için keskiyi radyal hat'a göre uygun konumlandırmak amacıyla farklı değerlere sahip verevlik açısına gerek olduğu vurgulanmıştır.

ABSTRACT Point attack picks have been widely employed for mechanical excavation of rocks and coal, due to their self-sharpening ability gained by rotative movement about their tool axes. The rotative motion is, therefore, of crucial importance for the success of these picks. Skew angle is one of the key parameters considered in tool rotation, it has, however, been employed with different approaches. A common understanding is, therefore, needed for proper use of skew angle, owing to discrepancies among the methods employed.

This paper explains how a skew angle should be considered for rotative movement of point attack picks in mechanical excavation of rocks and coal. It was emphasized that tool rotation was rather due to rotational force mainly induced by tool forces, along with tool position with respect to the radial line of the cutter head. Furthermore, skew angles may not be necessary for picks with zero tilt angles if the tool force components are in effect. However, with roadheaders skew angles of varying values needed for correct alignment of axes of tilted picks with respect to radial line to minimize tool wear.

**ozhekimoglu@gmail.com*

1. INTRODUCTION

Point attack picks, also known as pencil point picks or conical picks, have been widely used in mechanical excavation of rocks, coal and construction materials. These picks are known to exhibit higher longevity for relatively hard and abrasive rock conditions over the radial picks which are also used in the same field of application. The longer life span of point attack picks arises from their self-sharpening feature which results from the rotative motion of the whole pick proper about their tool axes. The point attack picks are, however, not successful at all, if the picks are not able to rotate during cutting action. Under such circumstances, both the tools and tool holders are subject to heavy damage or rapid destruction. It is, therefore, of crucial issue to sustain their rotative ability throughout the process of cutting operation.

Introduction of skew angle or offset angle has long been one of the major parameters for rotative movement of these picks. Basic definitions of point attack pics are presented in Figure 1. Studies on the aspects of skew angle have rather been limited to laboratory-bound investigations, and the findings of such studies have not, unfortunately, been conclusively verified through comprehensive in-situ trials which are scarcely available in the literature of point attack picks.

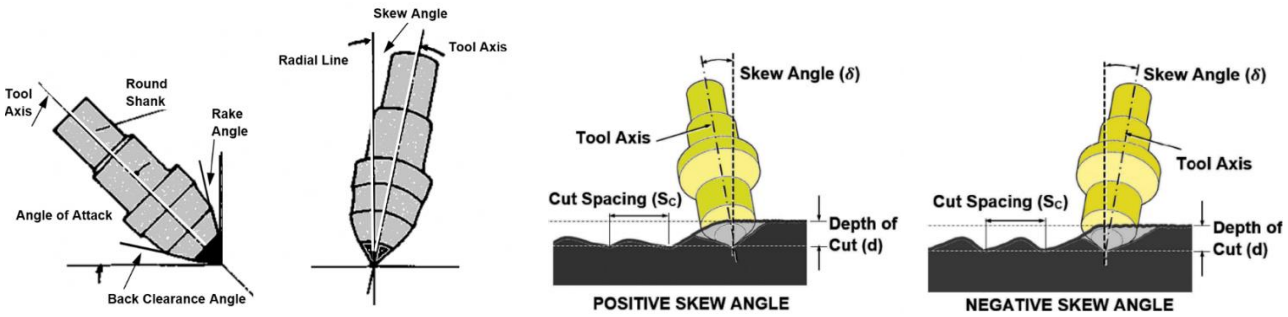


Figure 1. Basic definitions of point attack pics (Hekimoglu, 2019).

Laboratory linear cutting trials on point attack picks with skew angles ranging from 0° up to 30° revealed that there was no great effect on the measured cutting forces, although there was some indication of a minimum mean cutting force at about 15° skew angle. Furthermore, no tool rotation was reported during these trials (Hurt and Jones, 1979). Laboratory linear cutting trials carried out on point attack picks having skew angles of 0°, 6.5° and 13° respectively, at 45° angle of attack on a sandstone, reported that tool forces with 6.5° skew angle were lower than those of 0° and 13° skew angles. It was also stated that no visible tool rotation was observed during this investigation (Tecen, 1982). With axial type roadheaders cutting heads, the skew angle was suggested to be a minimum of 8° and as high as 35° at the nose section of the cutter head, while the value of 8° was recommended for transverse heads (Kleinert, 1982). With laboratory trials on the aspects of tool rotation at skew angles ranging from −10° to +10°, it was reported that a 10° negative skew angle and 35° attack angle produced the maximum rotation, whilst a negative skew angle produced more rotation than a

positive skew angle (Myren et al, 1985). Point attack picks were noted to rotate if the pick forces are able to create a torque and do not act through the tool axis (Frenyo and Lange, 1994). Moreover, skew angle of 10° was recommended for slender tools operating at large penetration depth, and 25° for large diameter tools at shallow depths. Impact of skew angle, depth of cut and spacing on bit rotation was investigated through full-scale laboratory linear cutting tests on sandstone (Kim et al, 2012). It was found that no systematic bit rotation occurs when bit is fully engaged and is under load, and there was no relation between bit rotation and skew angle, as well as depth of cut. A laboratory linear cutting experiments on point attack picks was conducted with skew angles ranging from −10° to+10°, by using mortar specimens of various strength. cutting experiments (Park et al, 2018). It was stated that a positive skew angle appears advantageous in terms of both cutting efficiency and structural stability. A series of laboratory experiments were carried out to investigate the effect of the spring placed between the tool holder and rear part of the pick in order to induce rotation (Yasar et al, 2023). It was reported that the combination of spring and conical picks resulted in higher amounts of rotation especially when cutting at 5 mm depth of cut. However, no field data verifying the results of this study was found.

Despite a certain number of laboratory studies, in-situ investigations on the effects of skew angle on the rotative movement of point attack picks were found to be extremely limited. This may be attributed to the fact that field trials are generally difficult, as well as costly, to conduct for a given set of conditions. Two field trials were, however, found on comparison between point attack picks and radial tools through long-term underground investigations with coal shearers and roadheaders (Hekimoglu, 1998 and 2019. It was stated that with drum shearers the point attack tools exhibited successful performance without any skew angle, while with roadheaders the effects of skew angle on tool rotation required special attention on protection of both tools and tool holders.

It has been understood that there is no common definition and suggestion on optimum value of skew angle, due to the differences between the findings of the above-mentioned laboratory research studies. In practice the skew angles were also observed to be employed in different manners by machinery manufacturers, probably due to a lack of conclusive information in this field.

This paper discusses the aspects of skew angle with the objective of defining a common understanding in application of this angle for roadheaders and drum type mechanical miners. The findings of the previous investigations on rotation of point attack picks in terms of skew angle were analyzed, and suggestions were presented.

2. GENERAL CHARACTERISTICS OF POINT ATTACK PICKS

Point attack picks are of drag tool type, characterized by their peculiar design where the tool axis is angled to the direction of cutting, as shown in Figure 1. With this feature, these picks are also termed as tangential picks. The tool tip possesses the common geometry as with radial picks in terms of rake and clearance angle, with the exception

of angle of attack which is claimed to cause the resultant tool force to act through the tool axis.

The value of angle of attack generally varies between 45° and 55° depending type of application. With laboratory trials when cutting a sandstone with point attack picks, it was stated that the value of 55° was the most appropriate in terms of cutting efficiency, whereas regarding the tool life the attack angle of attack was suggested be around 45° (Mostafavi et al, 2011). During this study, the cutting and normal forces were reported to reach their maximum value at 45°, whilst the ratio of cutting force to normal force was stated to be almost one. In this way, the resultant force was reported to act along the pick axis, which helps to minimize the bending moment and tensile stress and in turns reduces the risk of tool failure. This assumption may be true, to a certain extent, if the effects of sideway force component is not counted in. The sideway force is the third tool force component acting perpendicular to the plane formed by cutting and normal force, and is regarded to be the smallest one among all, under normal circumstances. Previous laboratory investigations showed that sideway forces exhibit the degree of variations with the characteristics of lacing pattern employed (Figure 2a), and in some cases approaching the value of normal force component, in the form of side force coefficient, as shown in Figure 2b (Hekimoglu and Ozdemir, 2004). This situation implies that the resultant tool force is not ideally acting through the tool axis. In practical conditions, the angle of attack for drum shearers is considered to be 45°, while the value of 55° is adopted for roadheaders.

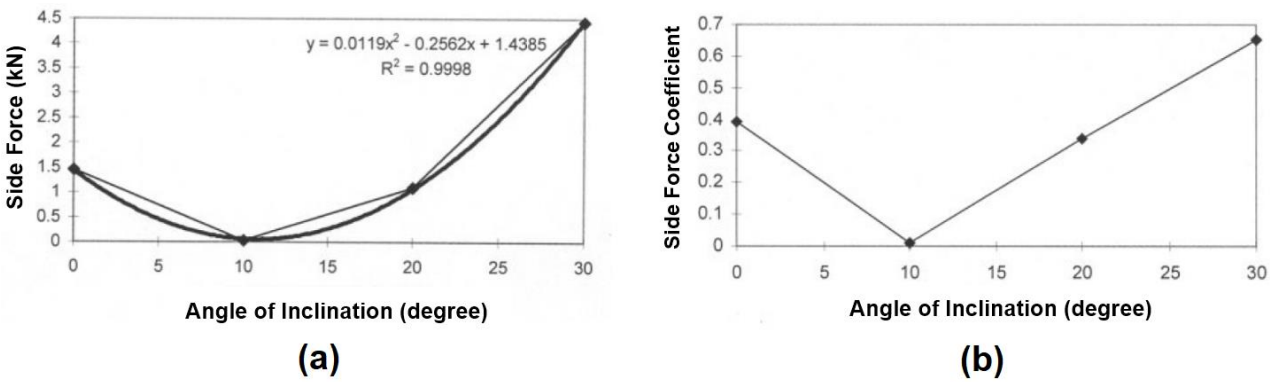


Figure 2. Variation of sideway force (a) and side force coefficient (b) with angle of inclination.

The service life of drag tools is said to terminate when the carbide tip is wholly worn out or disappears. With pristine tools, the tool geometry is initially designed with ideal values related to rake, back clearance and wedge angles. It is known to be advantageous to increase the positive values of rake angle to obtain lower cutting forces, whilst it is suggested to be 0° or minus 5° to avoid rapid tool wear. The back clearance angle is ideally kept not less than 5° to avoid unnecessarily high tool forces. The cutter tools are, however, not able to maintain such ideal tool geometry throughout the process of cutting operation, owing to the progressive wear of carbide tips during the cutting. It is observed in practice that under normal circumstances the back clearance angle diminishes to zero consequently resulting in increase in the magnitude of the tool

forces. With radial picks the tip bottom develops a complete wear flat which leads to the rapid termination of pick life. This process is, however, not exactly similar to the case of point attack picks where the tool is still able to maintain its cutting potential even at zero degree back clearance angle, at the expense of increased tool forces, due to its self-sharpening feature. As a matter of fact, the tool rotation itself does not result in self- sharpening, since the tool tip wears in a symmetrical pattern to approximately twice the angle of attack imposed on it (Hurt and Jones, 1979). The point attack picks are, therefore, required to sustain their cutting potential in such 'a self-blunting' condition, until the carbide tip ceases to be functional. This is why point attack picks exhibit higher longevity over the radial picks. At the other hand, it is very important to emphasize that the longer life span of point attack picks is possible only if these picks are able to maintain their rotation in tool holders successfully. It is for this reason that aspect of tool rotation is of crucial importance in application of point attack picks.

3. DISCUSSION

Laboratory research findings on tool rotation are mainly based upon the aspects of skew angle, and they do not suggest a common definition of skew angle, due to the differences in these results. The number of comprehensive in-situ trials on this particular subject is not, unfortunately, available with the exceptions of two consecutive investigations conducted during actual underground cutting operations with coal shearers and roadheaders, as given above. The author of this paper, therefore, relied upon the remarks of these practical trials which is believed to pave a way to a correct definition of tool rotation.

It was stated that point attack picks fitted on shearer drums without any skew angles rotated successfully, i.e., no rotation-related tool damage was reported when the skew angles were kept 0° for all of the tools on the entire drum (Hekimoglu, 1998 and 2019). Similar findings were also reported to be the case with the point attack picks of different types fitted on roadheaders cutting head. The findings reported in this study is interesting, as well as significant, as the factor of skew angle argued in the aspects of tool rotation seems to be disregarded. The idea behind tool rotation without skew angles is, therefore, needed to be explained for a common understanding of tool rotation. It may prove to be useful if the discussion is focused on the subject of reason inducing rotation, e.g., probably a rotative force resulting from the manner of tool cutting action. The sideway tool force component may be taken into account as the rotative force, in this particular aspect.

The previous researches on the fundamentals of rock cutting generally indicated that sideway force is of the smallest, and generally neglected in major machine performance analyses. It is, however, interesting to note that sideway force can rise from zero up to a value close to that of normal force component, if the Figure 2b is considered. Variation of sideway force with angle of wrap in this manner was stated to be related to the degree of symmetry between the grooves formed by adjacent tools. The relationship between the effective depth of cuts (d_1 and d_2) taken by the previous

neighboring picks may be considered as a measure of symmetry in this regard, as depicted in Figure 3 (Hekimoglu and Ozdemir, 2004). As an example, if d_1 equals d_2, the both sides of the grooves are assumed symmetrical, and sideway force emerges to be zero. whereas this symmetrical position vanishes, as d_1 gradually becomes greater than d_2. In other words, the sideway forces rise as the degree of asymmetry increases. The degree of symmetry is primarily affected by the tool-lacing pattern adopted, e.g., the angle of wrap of the cutting sequences (β) in this example. The grooves at both sides of the pick are required to take the form of asymmetry for a successful rotation of point attack picks, i.e., the tools are required to cut in an asymmetrical manner for a given machine and operating condition. It is possible to assess the degree of asymmetry characterized by the cutter tools in a given lacing pattern. The details of these topics are not intended to be repeated here, since they are extensively described elsewhere (Hekimoglu and Ozdemir, 2004: Hekimoglu, 2019). It was further noted that asymmetrical grooves are generally seen to be in effect if the design and operating characteristics of the current drum shearers operating in practice are examined. Accordingly, generation of sideway forces due to asymmetrical cutting position is probably one of the reasons for tool rotation without skew angles.

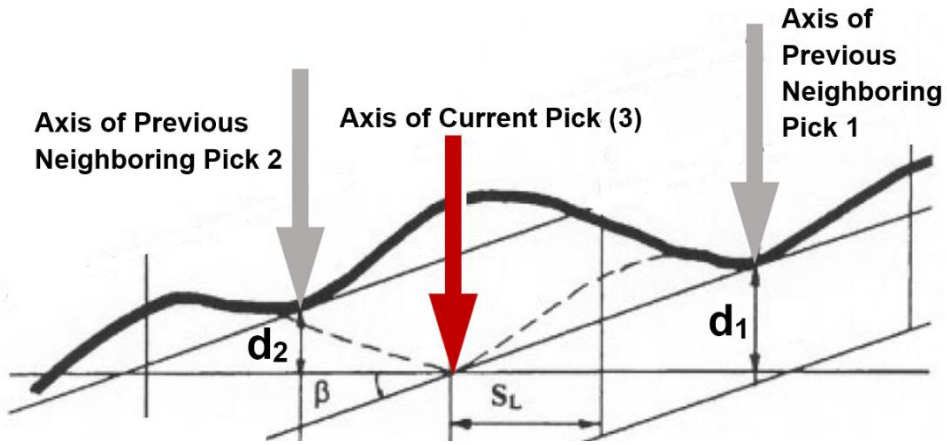


Figure 3. Sequential position of cutting grooves formed by neighboring picks.

It may be put forward that the friction between the tool tip and rock material is probably another reason causing tool rotation in this argument, along with the sideway force. With asymmetrical grooves, the cross-sectional area of rock being in contact with the tool tip is not equal at both sides of the pick, due to the differences in effective depth of cuts, as seen in Figure 3. Under such circumstance, the tool is confined at the side with larger cross section (right side), while it is rather relieved at the other side (left) exhibiting smaller section, hence generating different frictional forces at both sides. The frictional force generated at the confined side obviously supersedes that at the relieved side, thus creating net frictional force which induces tool rotation.

Aspects of tool rotation with roadheaders, though being similar to that described for coal shearers, require special attention on possible tool failure and tool holder damage. Previous underground investigations demonstrated that the point attack picks fitted on

roadheaders exhibited rotation in conditions whether skew angles employed or not, at the expense of severe tool wear and tool holder damage particularly inflicted on those picks which were located at the nose section of the cutting head. Severe pick damage was observed when a constant skew angle of 8° was employed for each pick respectively on the entire cutting head, despite tool rotation. It was later understood that successful tool rotation accompanied with minimized pick and tool holder damage was possible with correct tool lacing, other than employing an absolute skew angle. The picks on roadheaders are laced with tilt angles which systematically increases from rear towards the nose section in an attempt to avoid inverse corner cutting condition. Moreover, the cutting radii related to nose picks are also very small, due to the hemi-spherical geometry of the cutter head. The picks together with the tool holders, located at or very close to the frontmost part of the cutter head are, therefore, the most vulnerable picks to heavy wear or rapid damage. Tool rotation without skew angles observed with the roadheaders is also due to the formation of asymmetrical grooves as is the case with drum shearers Utmost care should, however, be paid for correct orientation of tool axis with respect to the radial line of the cutter head in an effort to prevent heavy tool holder damage, as well as to increase longevity of picks. The optimum radial line position which offers better tool rotation with minimized tool holder damage was reported to occur when the radial line was taken through the midway of the tool axis, as depicted in Figure 4 (Hekimoglu, 2019). Within the framework of this concept, the tool axes of tilted picks need to be skewed towards the cutting head center to obtain the optimum radial line position. It is very important to emphasize that this skew angle is only needed for tilted picks, not for the picks with 0° tilt angles which can rotate without skew angles. The value of skew angle suggested for tilted picks is given as follows (Hekimoglu, 2019:

$$\delta = \tan^{-1} [(l \cos \varphi) / r] \quad (1)$$

Where;
δ, tilt angle (degree),
φ, angle of attack (degree),
r, cutting radius of the pick (mm).

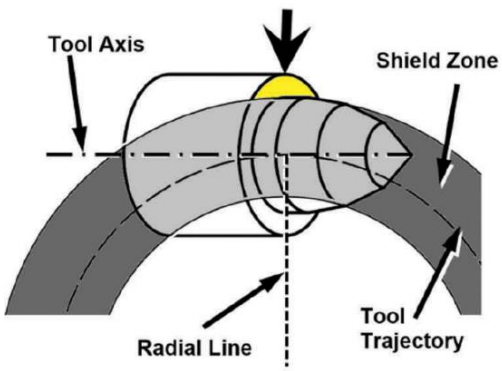


Figure 4. Position of tool axis with respect to radial line for optimum rotation.

It is very important to emphasize that the above-mentioned tool position suggested for optimum rotation and tool wear is recommended for point attack picks with large shank diameter, and is not suggested for slender type picks.

4. CONCLUSSION

The point attack picks have to sustain their rotative ability to achieve self-sharpening. The skew angle has long been suggested to be employed for tool rotation, while no conclusive definition was suggested for practical conditions.

Based upon the findings of the practical research mentioned in this paper, it may be concluded that;

- The sideway forces which is generated due to the formation of asymmetrical grooves predominantly induce rotation of point attack picks.
- Skew angle may not be necessary for coal shearers, in consideration with the design and operating characteristics of these machines currently operating in practice.
- Skew angle may not be necessary for roadheaders employing picks possessing no tilt angle, whereas skew angle is needed for the tilted picks for correct alignment of tool axis with respect to the radial line of the cutter head. This skew angle is required to minimize the damage inflicted on both picks and tool holders, and is not particularly considered for tool rotation.

REFERENCES

Frenyo, P. and Lange, W. 1994. Design of cutting heads for optimal cutting performance, Glückauf Min. Rep. 1, pp. 4–6.

Hekimoglu, O.Z. 1998. Investigations into performance of point-attack and radial-type rock- and coal-cutting picks, Trans. Inst. Min. Metall. Sec. A Min. Ind. 107, pp. A55–A59.

Hekimoglu, O. Z. 2020. Suggested methods for optimum rotative motion of point attack type drag tools in terms of skew angles. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *34*(8), 573–591. https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1680096.

Hekimoglu, O.Z. and Ozdemir, L. 2004. Effects of Angle of Wrap on the Performance of Continuous Miners and Drum Shearers, *Mining Technology (Trans. Inst. Min. Metall. A)*, Vol. 113, No. 2.

Hurt, K.G. and Jones, J.P. 1979. Effect of presentation angles on the performance of a point attack tool, MRDE Report. No. 86,

Kim, E., Rostami, J. and Swope, C. 2012. Full scale linear cutting experiment to examine conical bit rotation, J. Min. Sci. 48 (5), pp. 882–895. doi:10.1134/S1062739148050139.

Kleinert, H.W. 1982. New test-bed results for cutting heads on selective-cut headings machines, Gückauf 118, pp. 174–178.

Mostafavi, S. S., Yao, Q. Y., Zhang, L. C., Li, X. S., Lunn, J., & Melmeth, C. (2011, June). Effect of attack angle on the pick performance in linear rock cutting. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-11).

.Myren, T., Roepke, W.W., Hanson, B.D. and Wingquist, C.F. 1985. Conical Bit Rotation as a Function of Selected Cutting Parameters, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, Pittsburgh, PA,

Park, J.Y., Kang, H., Lee, J.W., Kim, J.H., Oh, J.Y., Cho, J.W., Rostami, J. and Kim, H.D. 2018. A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 103, pp. 215–229. doi:10.1016/j.ijrmms.2018.01.034.

Tecen, O. 1982. High pressure water jet assisted drag tool cutting of rock materials, Ph.D. thesis, The University of Newcastle Upon Tyne, England.

Yasar, S., Odoom, K., Shepel, T., Bretschneider, J., & Drebenstedt, C. (2023). Rotation Enhancement of Conical Picks Coupled with Springs. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *56*(7), 5447-5453.

PREDICTING THE MECHANICAL PROPERTIES OF COAL-BEARING ROCKS FROM SIMPLE TEST RESULTS USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Yunus Iskender[a*], Kadir Karaman[a], Davood Fereidooni[b,a], Ercan Sahinoglu[a], Ferdi Cihangir[a]

a. Karadeniz Technical University, Mining Engineering Department, Trabzon, TURKIYE

b. School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Semnan, IRAN

ABSTRACT This study investigates the use of machine learning (ML) techniques to predict the mechanical properties of coal-bearing rocks, including Uniaxial Compressive Strength (UCS), Brazilian Tensile Strength (BTS), and Point Load Index (PLI), using non-destructive physical index parameters. Accurate determination of these properties is critical for safe and economical geotechnical engineering; however, conventional laboratory testing is often limited by the difficulty of obtaining intact rock cores from weak or highly fractured formations. To address this challenge, three ML algorithms—Linear Regression (LR), K-Nearest Neighbors (kNN), and Artificial Neural Networks (ANN)—were evaluated using dry unit weight (γ_d), effective porosity (n_e), and ultrasonic P-wave velocity (UPV) as input variables. Experimental data were collected from coal and host rock samples obtained from the Zonguldak hard coal field in Türkiye. Comparative analysis revealed that the kNN algorithm consistently achieved the highest predictive performance, particularly when UPV was used as the predictor. The best kNN models produced coefficient of determination (R^2) values of 0.832 for BTS, 0.760 for PLI, and 0.822 for UCS, while also yielding the lowest prediction errors, with RMSE values of 1.727 MPa, 0.658 MPa, and 10.397 MPa, respectively. In contrast, models based solely on effective porosity demonstrated poor predictive capability, with R^2 values below 0.217 and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) values exceeding 260%. Sensitivity analysis identified UPV and dry unit weight as the most influential variables, whereas effective porosity contributed minimally. The findings demonstrate that ML, particularly kNN combined with UPV, provides a reliable, cost-effective, and practical alternative for indirect strength estimation of coal-bearing rocks when destructive testing is impractical.

Keywords: Coal-bearing rocks; Dry unit weight; Effective porosity; Mechanical properties; Machine learning algorithms; Sensitivity analysis

1. INTRODUCTION

The sustainability and long-term viability of rock engineering systems have become paramount considerations in modern geotechnical engineering and mining operations projects. Sustainable engineering practices inherently rely on the performance, resilience, and durability of complex rock structures, including tunnels, deep underground excavations, rock slopes, bridge foundations, and mining facilities (Fereidooni and Sousa, 2022; Diamantis and Fereidooni, 2023; Karaman et al., 2026). Within this technical landscape, the accurate and precise characterization of rock materials and their effective parameters stand out as essential requirements, since mechanical design parameters constitute the foundational input data required for structural modeling, risk mitigation, and asset maintenance throughout a project's

lifecycle. A reliable determination of rock strength and deformability properties allows design engineers to optimize structural configurations, reduce geological uncertainties, minimize materials waste, and significantly elevate the safety, overall sustainability, and economic efficiency of complex engineering operations (Karaman and Kolaylı, 2024). Specifically, the systematic determination of rock mechanical properties—most notably Uniaxial Compressive Strength (UCS), Brazilian Tensile Strength (BTS), the Elastic Modulus (E), and the Point Load Index (PLI)—along with a rigorous understanding of the internal physical parameters that dictate them, represents the absolute cornerstone for the secure and cost-effective execution of rock engineering works.

Traditionally, these critical mechanical properties are determined via destructive direct laboratory testing methodologies, such as testing cylindrical rock cores or executing controlled tensile splitting procedures. While these direct laboratory procedures remain a traditional standard, they are governed by fundamental theoretical frameworks that demand strict adherence to sample preparation geometries and testing environmental conditions (Fereidooni, 2025). Consequently, direct testing is frequently restricted by practical challenges: it is inherently time-consuming, expensive, and completely dependent on recovering continuous, high-quality core samples. Obtaining pristine, intact cylindrical core specimens of required lengths is often technically unfeasible when dealing with heavily jointed, highly fractured, weak, or highly weathered rock masses, which tend to break apart during the rotary drilling process. To overcome these logistical and physical limitations, engineering geology and rock mechanics have experienced a paradigm shift toward establishing indirect estimation techniques. These alternative approaches seek to accurately forecast the mechanical performance and strength behavior of varied lithologies from effecting parameters by leveraging easily obtainable, non-destructive physical index properties—such as dry unit weight, bulk density, P-wave velocity, and effective porosity—thereby bypassing the need for extensive destructive testing.

Historically, engineering geologists relied on classical empirical equations, simple linear regressions, and rudimentary polynomial statistical correlations to map these physical index parameters to mechanical strengths. However, these traditional statistical frameworks consistently fall short when attempting to capture the highly complex, multi-variable, and non-linear relationships that are structurally inherent to rock matrices. To address these mathematical gaps, artificial intelligence (AI), machine learning (ML), and data-driven computational intelligence techniques have emerged as robust, highly adaptable alternatives that operate well beyond the analytical capabilities of classical empirical modeling (Gong et al., 2019). Extensive comparative research spanning numerous global datasets has demonstrated the undeniable superiority of ML methodologies in predicting UCS across generalized rock types (Wen et al., 2024; Khatti and Grover, 2024). These computational workflows utilize both standard statistical intelligence and advanced evolutionary computation architectures, such as age-layered population structure genetic programming, to systematically map hidden data patterns (Özdemir, 2022). Broad systematic literature reviews underscore this

massive shift toward artificial intelligence, showing how advanced ML frameworks successfully handle multi-variable spaces to output highly accurate rock strength estimations while eliminating the rigid assumptions of older empirical formulas (Akosah et al., 2025). As a direct result, data-driven computational models have achieved global recognition as viable, precise tools for interpreting the deep dependencies connecting a rock's physical index properties to its macroscopic mechanical response.

This robust predictive capacity has been successfully validated across a wide array of specific lithologies and distinct engineering contexts. For instance, machine learning has drastically enhanced UCS and elasticity modulus predictions in sedimentary formations like sandstones (Fereidooni and Hejazifar, 2026), improved multivariate prediction accuracy for the UCS of dry travertines using density, porosity, and ultrasonic wave velocities (Malkawi et al., 2023; Saldaña et al., 2020), and accurately forecasted intact rock strength behavior under highly variable environmental states, such as dry versus fully saturated conditions (Gulzar et al., 2026). Furthermore, diverse ML architectures have proven highly effective at resolving other vital, non-linear rock mechanics problems, such as predicting the BTS of highly sensitive evaporitic rocks (Hassan and Arman, 2021) and evaluating complex, multi-component rock brittleness indices (Fereidooni and Karimi, 2023). In parallel, recent studies have confirmed that deploying multiple ML algorithms to evaluate non-destructive test data offers an efficient pathway for modeling rock characteristics without destroying the underlying sample structure (Karakaya and Ince, 2025).

The present study aims to conduct a comprehensive, highly systematic comparative analysis of multiple predictive computational models—including Linear Regression (LR), K-Nearest Neighbors (kNN), and Artificial Neural Network (ANN)—to accurately forecast the mechanical properties of coal-bearing rocks strictly from three fundamental physical inputs, namely dry unit weight, effective porosity, and ultrasonic P-wave velocity, and to examine the importance degree of the estimating parameters on the mechanical properties of rocks. By implementing a rigorous scoring and evaluation system based on standardized statistical performance metrics (such as RMSE, MAE, MAPE, and R^2), this research uncovers the predictive efficacy of diverse algorithmic structures when faced with igneous datasets. Ultimately, this study aims to define the most reliable, optimized computational framework for indirect mechanical assessment, providing the rock engineering community with a high-fidelity, non-destructive tool that drastically lowers laboratory engineering costs while preserving superior estimation accuracy.

2. METHODOLOGY

2.1. General Geology, Sample Selection and Specimen Preparation

The Zonguldak hard coal field extends as a belt approximately 180 km long and 40 km wide between Ereğli and Azdavay-Söğütözü, where the coal deposits developed within

limnotelmatic zones, such as forests and reed swamps, as well as fluvial, upper delta, and lagoonal environments (Karayiğit, 1989). The Carboniferous sediments in the field, which belongs to the Istanbul Zone, are represented from bottom to top by the Yılanlı (Middle Devonian–Visean), Alacaağzı (Namurian), Kozlu (Westphalian A), and Karadon (Westphalian B-C-D) formations (Okay, 1989; MTA, 1994; Tüysüz et al., 2004; Ünalan, 2021). The Alacaağzı Formation, a deltaic product overlying the limestone- and dolomite-bearing Yılanlı Formation, contains uneconomic, thin coal seams; in contrast, the Kozlu Formation, deposited in a meandering river environment (comprising 22 seams in Zonguldak and 18 seams in Amasra), and the Karadon Formation, developed in a fluvial environment (comprising 5 seams in Zonguldak and 13 seams in Amasra), host the primary exploitable hard coal deposits in the field (MTA, 1994; Tüysüz et al., 2004; Ünalan, 2021). These Carboniferous basement sediments in the region are unconformably overlain by the Upper Jurassic–Lower Cretaceous Zonguldak Formation in the Zonguldak area, and by the Permo-Triassic Çakraz Formation along with younger Mesozoic–Cenozoic cover units in the vicinity of Bartın (Figure 2) (Özdemir et al., 2022).

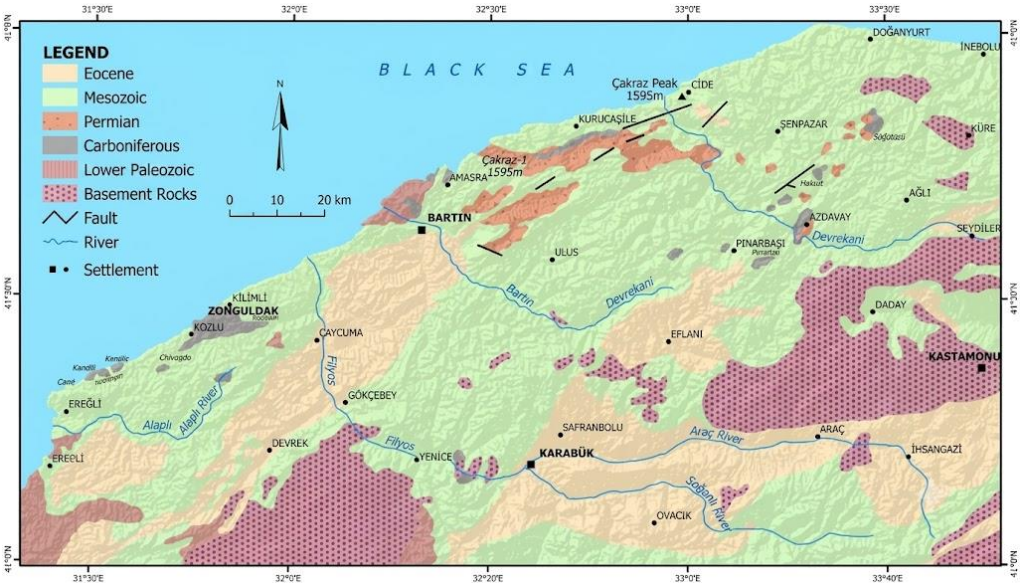


Figure 2. Simplified geological map of Zonguldak (Özdemir et al., 2022).

Coal and host rock blocks to be used in laboratory studies were obtained from the underground mines of the Kozlu Institution and Üzülmez Institution, indicated as points A and B in Fig. 3, respectively. Samples K2 (Kozlu 2) and K4 (Kozlu 4) were collected from the Çay seam, which was worked at a level of -485 m. Sample K3 (Kozlu 3) was retrieved from the Milopero (Kurul) seam, also worked at the -485 m level. The sandstone sample coded as K1K (Kozlu Kumtaşı 1) was collected from a ventilation drift driven at the -447 m level. The coal sample coded as U1 (Uzulmez 1), along with the host rock samples U1M (Uzulmez Marn 1) and U2M (Uzulmez Marn 2), were obtained from the Çay seam within a semi-mechanized longwall face with timber supports located in the 3rd Mine District at the -273 m level. These collected samples were transported by road from Zonguldak to Trabzon via a vehicle and brought

to the Laboratories of the Department of Mining Engineering at Karadeniz Technical University (KTU), where standard specimens suitable for testing were prepared.

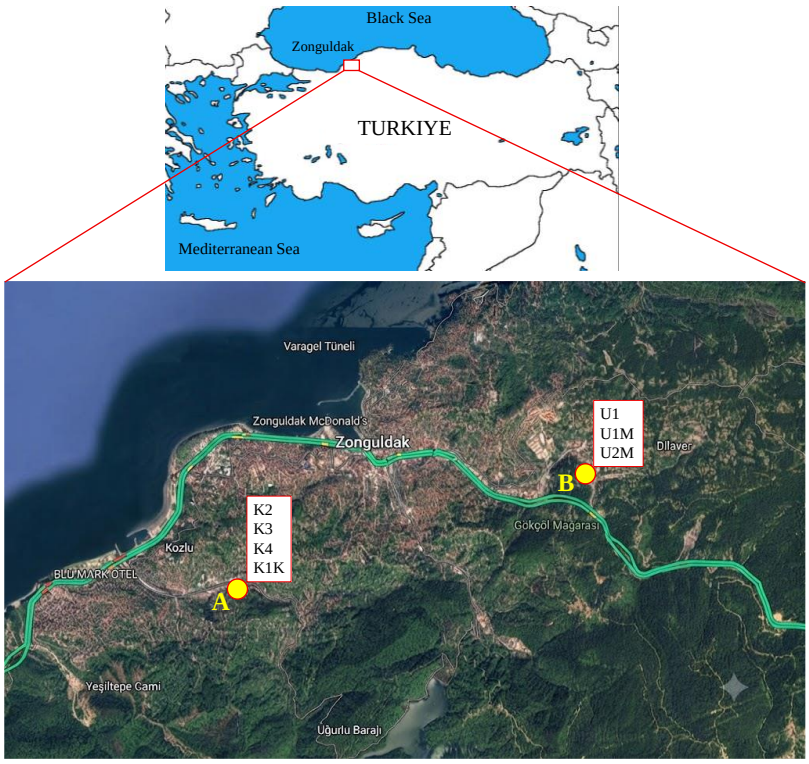


Figure 3. Location map of the study area in Zonguldak, Türkiye, showing the geographic positions of the sampling points (A and B) and their respective sample codes (K1K, K2, K3, K4 at site A; U1, U1M, U2M at site B)

2.2. Laboratory Investigations

Laboratory testing included the determination of dry density (γ_d), effective porosity (n_e), unconfined compressive strength (UCS) (Fig. 4a), ultrasonic P-wave velocity (UPV) (Fig. 4b), Brazilian tensile strength (BTS) (Fig. 4c), and point load strength index (PLI) (Fig. 4d). While all tests except the UCS were conducted based on the standards suggested by ISRM (2007), the UCS tests were performed in accordance with ASTM (2010). A length-to-diameter (L/D) ratio of 2–2.5 was proposed for the UCS testing. This range is particularly advantageous, as it mitigates challenges associated with the low compressive strength of coal and its surrounding strata, as well as the inherent difficulty of extracting intact core specimens.

Figure 4. Experimental laboratory test setups for rock characterization: a) Uniaxial Compressive Strength (UCS) testing; b) Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) testing; c) Brazilian Tensile Strength (BTS) testing; and d) Point Load Index (PLI) testing (Source: İskender, 2024)

2.3. Desk Studies

In this step, to evaluating the effects of dry unit weight and porosity on mechanical properties of the igneous rocks and predicting the mechanical properties from dry unit weight and porosity, some machine learning algorithm including Linear Regression (LR), K-Nearest Neighbors (kNN), and Artificial Neural Network (ANN) were used.

2.3.1. Linear Regression (LR)

The linear regression (LR) model constitutes a fundamental analytical approach for predicting dependent variables based on one or more independent variables. The underlying mathematical formulation of the simple regression (SR) model is expressed as follows (Fereidooni and Karimi, 2023):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \tag{1}$$

where y is dependent variable, β_0 is the intercept, β_1 is the slope are unknown constants, and ε is a random error component. In this research, the independent variables are dry unit weight (γ_d), effective porosity (n_e), and ultrasonic P-wave velocity (UPV). The dependent variables include Brazilian tensile strength (BTS), point load index (PLI), and uniaxial compressive strength (UCS). in the linear regression model, the values of R and R^2 can be calculated from the following equations:

$$R = \frac{n\Sigma x_i y_i - (\Sigma x_i)(\Sigma y_i)}{\sqrt{n(\Sigma x_i^2) - (\Sigma x_i)^2}\sqrt{n(\Sigma y_i^2) - (\Sigma y_i)^2}} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

where x and y are independent and dependent variables, respectively. n is the total number of data (rock samples). f_i and $\bar{y}$ are the predicted and mean values of the y, respectively.

2.3.2 K-Nearest Neighbors (kNN)

The k-Nearest Neighbors (kNN) algorithm is a non-parametric technique applied to both classification and regression tasks, where predictive performance depends heavily on the chosen value of the parameter k. This hyperparameter defines the specific number of proximal training instances utilized to evaluate a given target sample. In a regression framework, the model determines the final output by computing the mathematical average of these k closest neighbors. Because kNN bypasses a traditional training phase and defers all computational mapping until the evaluation phase, it is classified as an instance-based or 'lazy' learning algorithm. To enhance prediction accuracy, individual neighbor contributions can be dynamically weighted based on their spatial proximity to the target point. Furthermore, the selection of adjacent data points relies on distinct distance metrics (most notably the Euclidean distance formula) to establish geometric proximity. This spatial distance is quantified using the following equation:

$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

where x represents the coordinate vector of the training instances, y denotes the target test sample vector, and i signifies the specific index of the input geomechanical parameters. Following the distance calculation, the training data points are sorted in ascending order based on their spatial proximity to the target instance, and the top k specimens are isolated to interpolate the unknown target variable. Calibrating the optimal number of neighbors (k) constitutes one of the most critical phases of the modeling process, necessitating a systematic trial-and-error approach to balance localized variance and global bias (Kramer, 2013).

2.3.3 Artificial Neural Network (ANN)

The Artificial Neural Network (ANN) is an advanced computational intelligence method applied to both classification and regression tasks. The problem is defined as a classification type when the target output parameter consists of qualitative, categorical classes, whereas it is treated as a regression problem when the output variable is numerical and continuous. The fundamental building blocks of this methodology are processing units termed neurons (or nodes). These units are structurally organized into

three distinct operational layers (input, hidden, and output) to effectively map complex, intrinsic non-linear relationships within the dataset. The hidden layer transforms the raw features received from the input layer before transmitting the processed signals to the final output node. The network achieves optimization through iterative exposure to training datasets, during which the synaptic weights and biases assigned to the neurons are continuously adjusted via back-propagation to minimize the global estimation error. Once the residual error converges within a statistically acceptable threshold, the trained network structure is validated and deemed reliable for predictive deployment (Wang, 2003).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Rock Properties

The obtained engineering properties for the studied rocks include dry unit weight (γ_d), effective porosity (n_e), ultrasonic P-wave velocity (UPV), Brazilian tensile strength (BTS), point load index (PLI), and uniaxial compressive strength (UCS). The average values of the determined parameters are outlined in Table 1. Based on the results, the engineering properties of the studied rock samples exhibit substantial lithological variability. The coal samples (U1, K2, K3, and K4) display relatively low dry unit weights (12.65–21.09 kN/m³), high effective porosity (0.36–13.00%), and low ultrasonic P-wave velocities (1550–2376 m/s), corresponding to consistently weak mechanical responses with UCS values ranging from 1.532 to 16.921 MPa. In marked contrast, the sandstone (K1K) and marl (U1M, U2M) samples demonstrate significantly higher dry unit weights (24.33–28.55 kN/m³), lower porosities (0.75–1.82%), and elevated P-wave velocities (2900–4900 m/s), yielding substantially greater strength parameters, with UCS reaching up to 74.382 MPa for sandstone and 70.000 MPa for marl. This clear dichotomy underscores the dominant control of lithology, density, porosity, and ultrasonic velocity on the mechanical behavior of the investigated rock types. The correlation matrix reveals strong positive relationships between dry unit weight (γd), ultrasonic P-wave velocity (UPV), and all mechanical properties (BTS, PLI, UCS), with correlation coefficients ranging from 0.70 to 0.94 (Fig. 5). Conversely, effective porosity (ne) exhibits weak negative correlations with all strength parameters (-0.23 to -0.26), indicating its minor detrimental influence on rock mechanical performance.

Table 1. Summary of the engineering properties for the studied rock samples, including dry unit weight (γ_d), effective porosity (n_e), ultrasonic P-wave velocity (UPV), Brazilian tensile strength (BTS), point load index (PLI), and uniaxial compressive strength (UCS)

Rock mark	Lithology	γ_d (kN/m³)	n_e (%)	UPV (m/s)	BTS (MPa)	PLI (MPa)	UCS (MPa)
U1	Coal	12.65	1.22	1650	0.658	0.140	3.500
		13.24	1.01	1600	0.417	0.118	3.000
		13.15	1.71	1550	0.250	0.051	1.500
		12.95	1.60	1580	0.300	0.068	2.000
		12.75	1.40	1630	0.550	0.134	3.200
K2	Coal	12.65	0.98	2040	1.178	0.449	10.173
		12.75	1.50	1782	1.112	0.215	6.680
		12.85	1.45	1814	0.850	0.725	4.816
		12.75	1.10	2000	1.100	0.443	10.000
K3	Coal	13.05	0.36	2369	1.343	0.660	5.161
		13.24	0.44	2349	1.180	0.500	4.109
		12.75	0.51	2306	1.183	0.850	16.921
		12.95	0.45	2311	1.959	0.800	15.773
		13.15	0.40	2346	1.963	0.361	5.682
		13.05	0.48	2205	0.744	0.512	5.802
		12.85	0.50	2376	1.068	0.483	16.631
		13.24	0.42	2117	1.784	0.574	3.881
		12.95	0.38	2348	2.176	0.904	13.722
		13.05	0.45	2300	1.776	0.771	12.000
K1K	Sandstone	24.33	1.82	3102	6.913	1.934	72.941
		26.98	1.33	3223	7.192	4.014	60.355
		26.68	1.69	3022	7.500	4.017	74.382
		26.00	1.70	3050	7.000	3.583	65.000
		25.51	1.75	2900	5.500	2.113	40.000
U1M	Silty Marl	27.86	1.00	4726	2.838	2.796	35.165
		27.86	1.06	4734	6.902	1.821	18.218
		28.55	1.72	4828	4.000	1.011	37.328
		28.45	1.10	4900	6.000	3.589	60.000
		27.96	1.50	4700	3.000	1.061	20.000
		28.25	1.20	4800	4.500	2.725	45.000
K4	Coal	20.60	12.00	1984	0.350	0.150	2.856
		21.09	11.50	2057	0.400	0.170	3.289
		20.11	13.00	1745	0.200	0.080	1.532
U2M	Silty Marl	26.00	0.80	3987	15.292	3.500	64.547
		25.51	0.90	4167	13.374	2.500	41.145
		25.70	0.85	4145	9.113	3.000	54.031
		25.80	0.82	4226	7.915	3.200	58.290
		26.29	0.75	4412	16.059	3.800	70.000
		25.60	0.88	4293	9.698	2.800	45.000

	γ_d (kN/m³)	n_e (%)	UPV (m/s)	BTS (MPa)	PLI (MPa)	UCS (MPa)
γ_d (kN/m³)	1.00					
n_e (%)	0.10	1.00				
UPV (m/s)	0.87	-0.24	1.00			
BTS (MPa)	0.70	-0.24	0.70	1.00		
PLI (MPa)	0.80	-0.26	0.75	0.84	1.00	
UCS (MPa)	0.79	-0.23	0.70	0.83	0.94	1.00

Figure 5. Pearson correlation matrix demonstrating the inter-relationships between rock engineering properties of the rocks

3.2. Machine Learning-Based Data Analysis

To predicting the mechanical properties of the coal bearing and measuring rocks (coal, sandstone, marl) from dry unit weight and porosity and comparison to each other, a computational intelligence workflow was systematically constructed in orange software 3.40.0, sequentially integrating data curation, feature engineering, and multi-algorithm evaluation. For all models including Linear Regression (LR), K-Nearest Neighbors (kNN), and Artificial Neural Network (ANN), initial data preprocessing focused on scale-invariance, utilizing a feature normalization stage where input parameters were mapped into a unified range using both Min-Max scaling [0,1] and Z-score standardization ($\mu = 0$, $\sigma^2 = 1$) to prevent hyperparameter bias in distance-based metrics. Concurrently, data refinement was pursued via an unsupervised Local Outlier Factor (LOF) algorithm operating at a 20% contamination threshold and utilizing Euclidean metrics across 40 neighbors to filter anomalous variances.

The machine learning pipeline is constructed using Linear Regression (LR) with a fit intercept (unchecking it fixes it to zero), to ensure the model includes a constant intercept term. the "Regularization" properties are configured with Elastic net regression selected as the active regularization method. The settings for this method reveal a "Regularization strength" (Alpha) slider set to a value of 0.01, and an "Elastic net mixing" slider balanced evenly at 0.50: 0.50 between L1 (Lasso) and L2 (Ridge) penalties. Concurrently, the predictive framework was expanded to evaluate a distance-based learning paradigm utilizing a k-Nearest Neighbors (kNN) regressor. The model architecture was configured with a neighborhood parameter (k) set to 4, dictating that the final prediction for any given test instance is determined by the properties of its four mathematically closest experimental profiles. Spatial proximity between these geological profiles was calculated using the Euclidean distance metric. Furthermore, the distance-weighting function was set to Uniform, ensuring that all four neighboring

instances contribute equally to the predictive synthesis, irrespective of their exact relative distance from the target vector. Operating on an active input stream, this configuration provides a smooth, non-linear alternative to the gradient-boosted trees, balancing localized sample similarities against global variance patterns. Following the evaluation of the distance-based algorithm, an Artificial Neural Network (ANN) regressor—specifically configured as a Multi-Layer Perceptron (MLP)—was introduced to handle the complex, highly non-linear interactions mapping onto the mechanical properties. The neural network structure was engineered with a dual hidden layer topology containing 30 neurons in the first hidden layer and 10 neurons in the second hidden layer, allowing the model to progressively extract intricate abstractions from the inputs. To introduce non-linear decision boundaries, the network utilizes the Rectified Linear Unit (ReLU) activation function across hidden nodes. Weight optimization was handled via the L-BFGS-B solver (a quasi-Newton optimization method well-suited for smaller, dense datasets), capped at a maximal number of 500 iterations. To suppress overfitting tendencies within the network nodes, an L_2 regularization penalty (α) was set to 0.01. Replicable training was enforced to ensure deterministic weight initialization and consistent error convergence across validation trials.

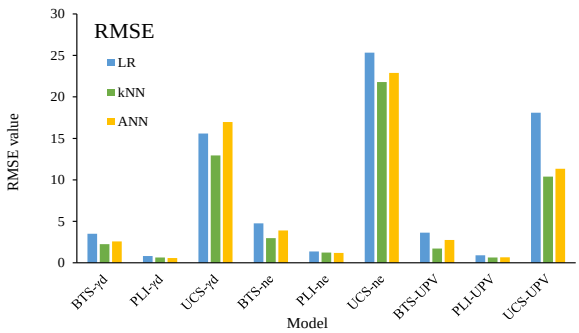
The configuration panel for the Test and Score was set to evaluate a machine learning model using cross validation. With these settings, the widget will shuffle and split the dataset five independent times, using 80% of the data for training and 20% for testing in each iteration. The Stratified option is enabled to maintain consistent target class proportions across all splits. The Rank interface was used to evaluate the importance of input features relative to numeric target variables. In this study, the three numeric attributes, dry unit weight, effective porosity, and ultrasonic P-wave velocity were being evaluated using two feature-scoring methods suited for regression tasks: Univariate Regression and ReliefF. The values of the outputted from the constructed computational intelligence workflow for predicting the mechanical properties are presented in Table 2. Based on the performance indices presented in this table, the k-Nearest Neighbors (kNN) algorithm consistently outperforms both Linear Regression (LR) and Artificial Neural Network (ANN) across most predictive models, particularly when utilizing ultrasonic P-wave velocity (UPV) as the input parameter. For UPV-based predictions, kNN achieves the highest R^2 values (0.832 for BTS, 0.760 for PLI, and 0.822 for UCS) alongside the lowest error metrics (RMSE of 1.727, 0.658, and 10.397 MPa, respectively). In contrast, models relying solely on effective porosity (ne) exhibit poor predictive performance across all algorithms, with R^2 values below 0.217 and substantially elevated MAPE values exceeding 260%, indicating that porosity alone is an inadequate predictor. Overall, kNN with UPV input provides the most reliable and accurate estimations, while ANN demonstrates moderate performance and LR shows the weakest predictive capability.

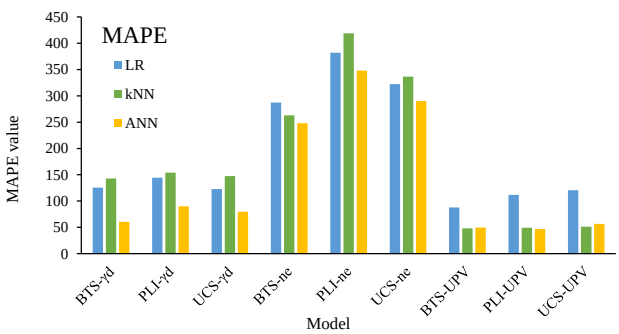
Based on the summarized performance metrics (Fig. 6), the predictive accuracy varies considerably across input parameters and mechanical properties. Models utilizing dry unit weight (γd) and ultrasonic P-wave velocity (UPV) demonstrate notably superior

performance, with R^2 values ranging from 0.45 to 0.65 and relatively moderate error indices (RMSE: 1.5–18.0, MAPE: 100–165%). In contrast, effective porosity (ne)-based models exhibit the weakest predictive capability, characterized by very low R^2 values (0.25) and excessively high MAPE (170–225%) and RMSE (2.5–26.0), indicating porosity alone is an unreliable predictor. Overall, γd and UPV serve as effective input parameters, while ne-based estimations are markedly inferior.

Table 2. Values of the performance indices for evaluating the mechanical properties form dry unit weight-based developed models

Algorithm	Model	Train	Test	RMSE	MAE	MAPE	R^2
LR	BTS-γ_d	0.021	0.005	3.516	2.165	125.567	0.420
	PLI-γ_d	0.025	0.004	0.830	0.603	144.478	0.615
	UCS-γ_d	0.024	0.006	15.580	11.504	122.714	0.590
	BTS-n_e	0.021	0.003	4.759	3.794	287.267	0.062
	PLI-n_e	0.028	0.004	1.378	1.239	381.900	0.060
	UCS-n_e	0.021	0.007	25.344	22.734	322.103	0.086
	BTS-UPV	0.023	0.005	3.643	2.415	87.845	0.377
	PLI-UPV	0.021	0.004	0.921	0.651	111.716	0.526
	UCS-UPV	0.025	0.002	18.101	13.222	120.678	0.446
kNN	BTS-γ_d	0.011	0.003	2.256	1.592	142.775	0.714
	PLI-γ_d	0.01	0.005	0.640	0.503	154.040	0.772
	UCS-γ_d	0.011	0.004	12.950	9.545	147.311	0.724
	BTS-n_e	0.008	0.005	2.982	2.351	262.825	0.501
	PLI-n_e	0.011	0.004	1.236	0.880	418.751	0.151
	UCS-n_e	0.01	0.004	21.798	16.507	336.399	0.217
	BTS-UPV	0.009	0.004	1.727	1.154	48.273	0.832
	PLI-UPV	0.01	0.003	0.658	0.451	49.237	0.760
	UCS-UPV	0.01	0.003	10.397	7.629	51.158	0.822
ANN	BTS-γ_d	0.321	0.007	2.594	1.594	60.460	0.622
	PLI-γ_d	0.354	0.004	0.574	0.385	89.990	0.817
	UCS-γ_d	0.326	0.002	16.985	10.559	79.762	0.525
	BTS-n_e	0.391	0.006	3.900	2.769	247.879	0.146
	PLI-n_e	0.398	0.008	1.207	0.864	347.964	0.191
	UCS-n_e	0.279	0.005	22.884	17.182	290.172	0.137
	BTS-UPV	0.456	0.007	2.764	1.518	49.844	0.571
	PLI-UPV	0.334	0.004	0.668	0.449	46.931	0.752
	UCS-UPV	0.469	0.005	11.351	8.309	56.551	0.788





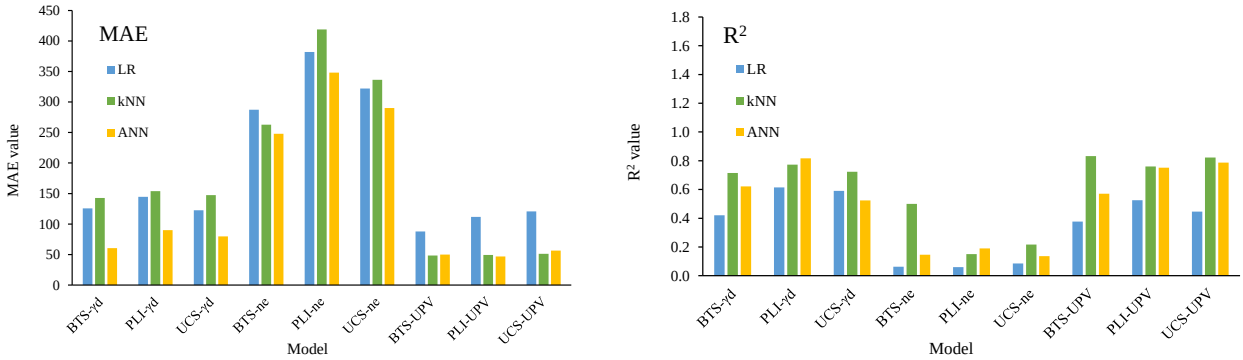


Figure 6. Comparative performance evaluation of the developed machine learning frameworks (LR, kNN, and ANN) across different input-output parameters based on four statistical metrics: Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), and Coefficient of Determination (R^2)

3.3. Sensitivity Analysis

3.3.1. Univariate Regression Method

The Univariate Regression framework—commonly referred to as single-variable feature selection—isolates each independent variable to systematically evaluate the individual strength of its correlation with the target response. Owing to its algorithmic simplicity and ease of implementation, this approach serves as an efficient diagnostic tool for initial data comprehension. Within classification architectures, feature discrimination is assessed by analyzing the distribution of feature values across the distinct categorical classes of the response variable. Standard parametric and non-parametric statistical criteria, such as independent t-tests and Analysis of Variance (ANOVA), are typically deployed to verify whether the mean variations of the scrutinized feature exhibit statistical significance between these classes (Jović et al., 2015).

3.3.2. Relieff Method

This methodology integrates an advanced feature selection paradigm originally developed by Kira and Rendell (1992). Operating as a filter-based feature selection mechanism, this approach is exceptionally responsive to localized interactions and dependencies between input parameters. Although initially engineered exclusively for binary classification architectures, its mathematical framework was subsequently expanded to accommodate multi-class and continuous regression prediction tasks. The underlying algorithm computes an individual quality score for each attribute, which serves as the metric for ranking and isolating the most informative features. This scoring routine is executed by analyzing the absolute differences in feature values between proximal pairs of data instances. When a noticeable variance in a specific feature value occurs between adjacent samples that share identical class labels or target

outputs, the algorithm penalizes that feature by reducing its importance score (Spolaôr et al., 2013).

In modeling and incorporating different input parameters, sensitivity analysis of the output parameter relative to the inputs is crucial for understanding their influence. Here, two methods, Univariate Regression and RReliefF, were used to rank the importance of parameters. Table 3 presents the scores assigned to each parameter based on these two criteria, ranked by their importance. The ranking and scoring analysis presented in this table and Fig. 7, utilizing both Univariate Regression and ReliefF feature selection methodologies, consistently identifies models incorporating dry unit weight (γ_d) as the most influential input parameters for predicting mechanical properties. Specifically, PLI-γ_d achieves the highest Univariate Regression score (66.516) and ranks first, followed closely by UCS-γ_d (61.666, rank 2) and PLI-UPV (46.323, rank 3), while the ReliefF method ranks UCS-γ_d as the most relevant feature (score 0.614), with PLI-γ_d (0.613) and BTS-γ_d (0.576) as close successors. In stark contrast, all models based on effective porosity (n_e) consistently receive the lowest rankings across both methodologies, with Univariate Regression scores below 2.6 and ReliefF scores around 0.12, confirming their negligible predictive contribution. Ultrasonic P-wave velocity (UPV)-based models occupy an intermediate position, demonstrating moderate relevance. Overall, the convergence of both ranking systems unequivocally establishes dry unit weight as the paramount input parameter, while porosity proves to be the least influential factor for mechanical property estimation.

Table 3. Ranking and scoring of input parameters

Model	Univariate regression	Rank	ReliefF	Rank
BTS-γ_d	36.002	5	0.576	3
PLI-γ_d	66.516	1	0.613	2
UCS-γ_d	61.666	2	0.614	1
BTS-n_e	2.256	8	0.115	9
PLI-n_e	2.588	7	0.124	7
UCS-n_e	2.048	9	0.123	8
BTS-UPV	35.401	6	0.488	6
PLI-UPV	46.323	3	0.492	4
UCS-UPV	36.541	4	0.488	5

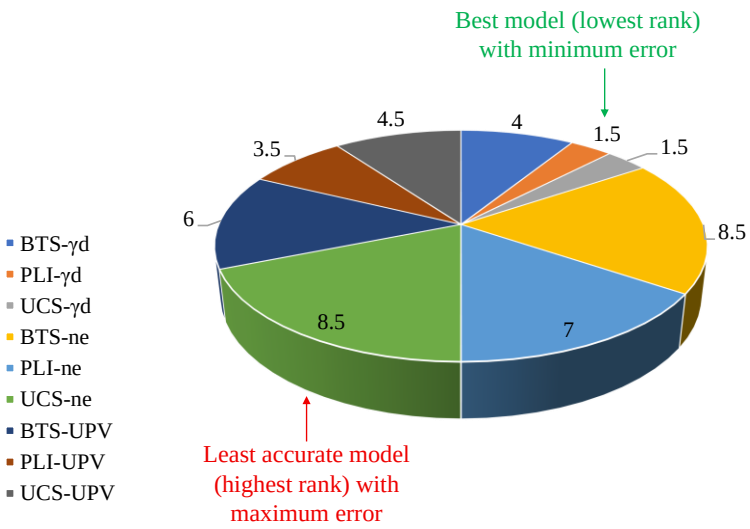


Figure 7. Final feature ranking and priority evaluation of the developed input-output parameter configurations using Univariate Regression and ReliefF feature selection methodologies

4. CONCLUSIONS

The present study evaluated the predictive capability of three distinct machine learning (ML) algorithms—Linear Regression (LR), K-Nearest Neighbors (kNN), and Artificial Neural Networks (ANN)—to characterize the mechanical properties of coal-bearing rocks, specifically Uniaxial Compressive Strength (UCS), Brazilian Tensile Strength (BTS), and the Point Load Index (PLI). By utilizing non-destructive, easily measurable physical parameters, including dry unit weight, effective porosity, and ultrasonic P-wave velocity (UPV), this research provides a viable, cost-effective framework for overcoming the significant logistical challenges associated with obtaining intact core samples from weak or fractured coal-bearing strata. The empirical results conclusively demonstrate that the kNN algorithm offers superior predictive performance compared to LR and ANN, particularly when integrated with P-wave velocity as a primary input feature. High coefficients of determination (R^2 of 0.832 for BTS, 0.760 for PLI, and 0.822 for UCS) and minimized error metrics underscore the reliability of this approach. Conversely, the study highlights the inadequacy of relying solely on effective porosity for mechanical estimations, which yielded high uncertainty and excessive MAPE values. Sensitivity analysis further emphasizes that dry unit weight and P-wave velocity are the most critical predictors of rock strength in the coal and surrounding rocks examined (A and B sites). This research establishes an optimized computational methodology that facilitates the indirect estimation of rock strength parameters. By providing a high-fidelity alternative to traditional destructive testing, this ML-based framework supports more efficient structural modeling and risk mitigation in geotechnical and mining engineering, offering a sustainable path forward for characterizing complex geological environments where intact sampling is rarely feasible. Coal samples exhibit considerable variability in their physical and mechanical properties. Therefore, future research should investigate coal-measure rocks in hard-coal basins separately according to lithological type (e.g., sandstone, siltstone), with

the aim of improving the prediction of their mechanical properties through the integration of machine learning and sensitivity analysis methods.

REFERENCES

Akosah, S., Gratchev, I., Gidigasu, S.S. 2025. A systematic literature review on the application of artificial intelligence techniques for rock strength estimation. Neural Computing and Applications. Sep;37(25):20721-53.

ASTM International. 2010. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures (ASTM D7012-10). West Conshohocken, PA

Diamantis, K., Fereidooni, D. 2023. Assessing the strength and deformation properties of serpentinite rocks in dry and saturated conditions. Iranian Journal of Science. Aug;47(4):1169-78.

Evcimen, Ö., Tunçdemir, V., Tok, T., Metin, Y. 2020. Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi'nin jeolojisi (Ordu-Giresun). MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni 29: 101-113 (in Turkish).

Eyüboğlu, Y. 2010. Late Cretaceous High-K Volcanism in The Eastern Pontide Orogenic Belt: Implications for The Geodynamic Evolution of NE Turkey. International Geology Review 52 (2–3), 142–186

Fereidooni, D., Hejazifar, M. 2026. Predicting the uniaxial compressive strength and elasticity modulus of sandstones from physical and mechanical properties using statistical analyses and artificial intelligence-based techniques. PLoS One. May 15;21(5):e0335703.

Fereidooni, D., Karimi, Z. 2023. Predicting rock brittleness indices from simple laboratory test results using some machine learning methods. Geomech. Eng. Jan 1;34(6):697-726.

Fereidooni, D., Sousa, L. 2022. Predicting the engineering properties of rocks from textural characteristics using some soft computing approaches. Materials. Nov 9;15(22):7922.

Fereidooni, D. 2025. Rock Mechanics: Theoretical Foundations of Laboratory Tests. CRC Press; Dec 4.

Gedikoğlu, A., Pelin, S., Özsayar, T. 1979. The Main Lines of Geotectonic Development of the East Pontids in the Mesozoic Era. Proceedings of the 1st. Geological Congress of The Middle East (Geocome), 1979, Ankara, 68-69.

Gong, Y., Mehana, M., El-Monier, I., Xu, F., Xiong, F. 2019. Machine learning for estimating rock mechanical properties beyond traditional considerations. InSPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference Jul 22 (p. D013S011R003). URTEC.

Gulzar, S.M., Roy, L.B., Lahiri, S., Rabidas, P. 2026. Predicting intact rock strength for mechanical excavation in dry and saturated condition using multivariate statistics and artificial neural networks optimized using genetic algorithm: SM Gulzar et al. Journal of Earth System Science. Jun 1;135(2):131.

Hassan, M.Y., Arman, H. 2021. Comparison of six machine-learning methods for predicting the tensile strength (Brazilian) of evaporitic rocks. Applied Sciences. Jun 3;11(11):5207.

ISRM. 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006, in Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, p 628.

İskender, Y. 2024. Investıgatıon of Geomechanıcal Propertıes of Coal and Surroundıng Rock in TTK Kozlu and Uzulmez Instıtutıons. Karadeniz Technical University, MSc Thesis. Trabzon.

Jović, A., Brkić, K., Bogunović, N. 2015. A review of feature selection methods with applications. In: 2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). IEEE; p. 1200–5. https://doi.org/10.1109/MIPRO.2015.7160458

Kanar, F., Kandemir, Ö., Çakır, K., Usta, D., Çobankaya, M., Atıcı, G., 2019. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 28: 33-40.

Karakaya, E., Ince, I. 2025. Prediction of Uniaxial Compressive Strength of Rocks by Non-Destructive Testing Via Different Machine Learning Algorithms. Acta Geodynamica et Geomaterialia. Jan 1;22(3).

Karaman, K., Kolaylı, H. 2024. Effects of olivine alteration on micro-internal structure and geomechanical properties of basalts and strength prediction in these rocks. Sustainability, 16, 5490. https://doi.org/10.3390/su16135490

Karayiğit, A.İ., 1989. Zonguldak ve Amasra Kömürlerinin Petrografik Özellikleri. Hacettepe University, PhD Thesis, 339 s. Ankara.

Karslı, O., Dokuz, A., Uysal, I., Aydın, F., Bin, C., Kandemir, R., Wijbrans, R.J. 2010. Relative Contributions of Crust and Mantleto Generation of Campanian High-K Calc-Alkaline I-type Granitoids in a Subdution Setting, with Spezial Reference to The Harşit Pluton, Eastern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology 160, 467-487.

Khatti, J., Grover, K.S. 2024. Assessment of the uniaxial compressive strength of intact rocks: an extended comparison between machine and advanced machine learning models. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. Sep;7(4):3301-25.

Khatti, J., Grover, K.S. 2024. Estimation of intact rock uniaxial compressive strength using advanced machine learning. Transportation Infrastructure Geotechnology. Aug;11(4):1989-2022.

Kira, K., Rendell, L.A. 1992. The feature selection problem: Traditional methods and a new algorithm. In: Proceedings of the Tenth National Conference on Artificial Intelligence. AAAI Press; p. 129–34.

Kramer, O. 2013. Dimensionality reduction with unsupervised nearest neighbors. Berlin: Springer.

Malkawi, D.A., Rabab'ah, S.R., Sharo, A.A., Aldeeky, H., Al-Souliman, GK., Saleh, HO. 2023. Enhancing of uniaxial compressive strength of travertine rock prediction through machine learning and multivariate analysis. Results in Engineering. Dec 1;20:101593.

MTA, 1994. Batı Karadeniz Taşkömür Havzası Hakkında Özet Bilgi. MTA Genel Müdürlüğü Batı Karadeniz Bölge Müdürlüğü Raporu, 43 s.

Okay, A., 1989. Tectonic units and sutures in the Pontides, northern Turkey. in A.M.C. Şengör (ed.), Tectonic evolution of the Tethyan region. NATO Advanced Science Institute (ASI) series, C259, 109-116

Okay, A.İ., Şahintürk, Ö. 1997. Geology of Pontides. In: Robinson, A. (Ed.), Regional and Petroleum Geology of Black Sea and Surrounding Regions. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 68, pp. 291–311

Özdemir, A., Palabıyık, Y., Özer, Ç., Kalkan, E., Erdoğan Y., Yılmaz, S., Toroğlu, İ., Bilen, M., Duru, H., 2022. The Coal-Derived Conventional Gas Reservoir Potential of Zonguldak and its Surroundings: an Assessment by Geological and Geophysical Data. 22nd International Coal Congress and Exhibition of Turkey, 29-30 September 2022, Zonguldak, 316-340.

Özdemir, E. 2022. A new predictive model for uniaxial compressive strength of rock using machine learning method: artificial intelligence-based age-layered population structure genetic programming (ALPS-GP). Arabian Journal for Science and Engineering. Jan;47(1):629-39.

Saldaña, M., González, J., Pérez-Rey, I., Jeldres, M., Toro, N. 2020. Applying statistical analysis and machine learning for modeling the UCS from P-wave velocity, density and porosity on dry travertine. Applied Sciences. Jun 30;10(13):4565.

Smola, A.J., Schölkopf, B. 2004. A tutorial on support vector regression. Statistics and computing. 14(3): 199–222. https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88

Spolaôr, N., Cherman, EA., Monard, MC., Lee, HD. 2013. ReliefF for multi-label feature selection. In: 2013 Brazilian Conference on Intelligent Systems. IEEE. p. 6–11.

Tüysüz, O., Aksay, A. ve Yiğitbaş, E. 2004. Batı Karadeniz Bölgesi Litostratigrafi Birimleri. Stratigrafi Komitesi Litostratigrafi Birimleri Serisi-1, MTA Genel Müdürlüğü Yayını, 92 s.

Ünalan, G., 2021. Petrol ve Doğalgaz Jeolojisi. MTA Genel Müdürlüğü, Eğitim Serisi

Wang, S.C. 2003. Artificial neural network. In: Interdisciplinary computing in java programming. Boston: Springer. p. 81–100.

Wen, T., Li, D., Wang, Y., Hu, M., Tang, R. 2024. Machine learning methods for predicting the uniaxial compressive strength of the rocks: a comparative study. Frontiers of Earth Science. Mar;18(2):400-11.

TÜRKİYE YERALTI KÖMÜR MADENCİLİNDE KOLLU GALERİ AÇMA MAKİNESİ KULLANIMI

USE OF ROADHEADER UNDERGROUND COAL MINING IN TÜRKİYE

Hakan Kıran*

Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü,MAPEG, Ankara

Olgay Yaralı

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZET Kollu galeri açma makineleri, yeraltı madencilik ve tünel açma işlerinde yaygın olarak kullanılan önemli bir kazı makinesidir. Bu makineler, çeşitli jeolojik ve operasyonel koşullarda yüksek verimlilikle çalışabilmeleri nedeniyle tercih edilirler. Bir yeraltı kazı projesinde kollu galeri açma makinesi seçimi yaparken jeolojik koşullar göz önünde bulundurulmalıdır. Performans tahmini için makine gücü, ağırlığı, anlık kazı oranı, keski tüketimi gibi teknik özelliklerin iyi belirlenmesi gerekir. Kollu galeri açma makinesinin performans tahmini ve seçimi, madencilik projelerinin başarısı için hayati öneme sahiptir. Bu sürecin optimize edilmesi, maliyetleri düşürürken, iş güvenliğini ve verimliliği de beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'de yeraltı linyit/taşkömürü madenciliğinde taş ve kömür içinde sürülen hazırlık galerilerinde kullanılan kollu galeri açma makineleri hakkında bilgi verilmiştir.

ABSTRACT Roadheader machines are a crucial excavation machine widely used in underground mining and tunnelling operations. These machines are preferred because of their ability to operate with high efficiency in various geological and operational conditions. When selecting roadheader machines for a project, geological conditions must be considered. For performance estimation, technical specifications such as machine power, weight, instantaneous excavation rate, and cutter consumption need to be well-defined. The performance prediction and selection of roadheader machines are vital for the success of mining projects. Optimizing this process not only reduces costs but also improves safety and productivity. In this study, provides information about roadheader machines used in preparation galleries driven through rock and coal in underground lignite/coal mining in Türkiye.

1. GİRİŞ

Kollu galeri açma makinaları (KGAM), yumuşak ve orta sertlikteki kaya oluşumlarının kazılması için benzersiz bir yetenek ve esneklik sunar; bu nedenle yeraltı madenciliği ve tünelcilik uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Kollu galeri açma makineleri, kazı işini yapıp, pasayı uygun bir nakliyat donanımına veren ve kendiliğinden ileri doğru hareket eden makinelerdir (Yaralı, 2008).

Türkiye'de madencilik faaliyetleri, yeraltı kaynaklarının ekonomik olarak değerlendirilmesi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Özellikle kömür, metalik madenler ve endüstriyel hammaddeler sektörlerinde yürütülen yeraltı madencilik faaliyetleri, güvenli ve verimli galeri açma yöntemlerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Yeraltı üretim faaliyetlerinin temel aşamalarından biri olan galeri açma işlemleri; cevhere ulaşımın sağlanması, havalandırma sistemlerinin kurulması, nakliye yollarının oluşturulması ve üretim alanlarının hazırlanması açısından kritik bir role sahiptir. Bu nedenle galeri açma çalışmalarında kullanılan makinelerin teknik özellikleri, performansları ve çalışma prensipleri madencilik verimliliğini doğrudan etkilemektedir (Özfırat et al., 2017).

Teknolojinin gelişmesiyle delme-patlatma yöntemleri ile birlikte mekanize kazı sistemleri de yaygınlaşmış, özellikle galeri açma makineleri yeraltı madenciliğinde önemli bir alternatif haline gelmiştir. Türkiye'de kullanılan galeri açma makineleri; jeolojik yapı, kaya dayanımı, işletme kapasitesi ve ekonomik koşullar gibi faktörlere bağlı olarak farklı tip ve özelliklerde tercih edilmektedir. Kollu galeri açma makineleri (KGAM) de madencilik uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu makineler sayesinde üretim maliyetleri düşürülerek, daha güvenli ve hızlı ilerleme sağlanabilmektedir (Yaralı, 2008).

Türkiye'nin farklı bölgelerinde bulunan yeraltı maden işletmelerinde kullanılan kollu galeri açma makineleri, işletmelerin teknik altyapısına ve rezerv özelliklerine göre çeşitlilik göstermektedir. Özellikle sert kaya koşullarında çalışan makinelerde kesici kafa tasarımı, motor gücü, ilerleme kapasitesi ve tahkimat sistemleri büyük önem taşımaktadır. Bunun yanında enerji tüketimi, bakım maliyetleri ve operasyonel verimlilik gibi unsurlar da makine seçiminde belirleyici olmaktadır. Son 10-15 yılda otomasyon ve uzaktan kontrol teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte daha güvenli ve yüksek performanslı sistemlerin kullanımına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Ancak genel ekonomik koşullardan dolayı son 2-3 yıllık süreçte büyük işletmelerde dâhil olmak üzere çalışan galeri açma makinası sayısında azalma gözlemlenmektedir (Özfırat ve Yetkin, 2024).

Bu çalışmada, Türkiye'de faaliyette bulunan toplam 10 ilde ve 14 farklı yeraltı kömür/linyit madenciliği işletmesinde kullanılan galeri açma makineleri incelenmiş olup makinelerin çalışma prensipleri, kullanım alanları, avantaj ve dezavantajları ile işletmelere sağladıkları teknik ve ekonomik katkılar genel hatlarıyla değerlendirilmiştir.

2. KOLLU GALERİ AÇMA MAKİNELERİNİN TARİHÇESİ VE ÖZELLİKLERİ

Galeri açma makineleri ilk olarak 1950 ’li yıllarda kömürün kazımı için Macarlar tarafından f2 modeli olarak tasarlanmış ve kömür madenlerinde kullanılmıştır. Daha sonra Ruslar bu makineleri geliştirerek Pk modeli KGAM ’ni üretmişlerdir. Batı Avrupa’da kullanılan ilk makineler ise 1961 ‘de İngiliz Kömür İşletmelerince eski Sovyetler Birliği’nden ithal edilen PK3 ‘ler dir. Daha sonraki yıllarda İngilizler, mekanik ve hidrolik sistemi daha gelişmiş makineleri tasarlamışlar ve Dosco adıyla üretmeye başlamışlardır. Son 50 yılda makine ağırlığı, boyutları ve kesici kafa motor gücü, kol (boom) dizaynı kazılan malzemenin yüklenme sistemi, hidrolik ve elektrik sisteminde gelişmeler, kesici uçların metalürjik gelişmeleri ve uzaktan komuta ve otomasyon gibi birçok bölümünde teknolojik gelişmeler yaşanarak bugünkü seviyesine gelmiştir (Hekimoğlu and Fowell, 1979; Bilgin et al., 2014).

İlk galeri açma makineleri hafif tipte olup, ilerleyen teknoloji ve artan ihtiyaçlara bağlı olarak daha ağır ve güçlü makineler geliştirilmiştir. Günümüzde galeri açma makinelerinin ağırlıkları 120 tona çıkmaktadır (Çizelge 1). Böylelikle sert kayaçlara daha yüksek itme kuvveti uygulamaya imkân veren daha sağlam ve daha az titreşimle çalışıp, daha az bakım gerektiren platform sağlanabilmektedir. Ayrıca kesici kafa güçleri daha yüksek tork kapasitelerine imkan verebilmek için 500 kW’a kadar çıkabilmektedir (Çopur et al., 1998).

Çizelge 1. KGAM ağırlığına ve kesici kafa gücüne göre sınıflaması (Heiniö, 1999).

Sınıf	**Ağırlık (ton)**	**Kesici Kafa Gücü (kW)**	**Kazılabilirlik Ortalama (Maks) Kesit Alanı (m^2)**	**Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)**	**RQD (%)**
Hafif	10-40	50-170	25 (40)	60-80	0-100
Orta	40-70	160-230	30 (60)	80-100	0-100
Ağır	70-110	250-300	40 (70)	100-120	<80
Çok Ağır	>100	350-400	45 (80)	120-140	<60

- Güç arttıkça kol reaksiyon kuvvetleri artacağından, daha ağır makine kullanmak gerekir (Güç ile ağırlık doğru orantılıdır).
- Yer altı uygulamalarında, açıklık boyutu, makine boyutunu sınırlayıcı bir etkendir.

Ağır galeri açma makineleri 120 MPa’a kadar ki kayaçlarda ekonomik olarak kullanılabilmekte ve düşük RQD değeri içeren tabakalı veya çatlaklı basınç dayanımı

160 MPa' a kadar olan kayaçları da kazabilmektedir. Kayacın içinde bulunan silis ve aşındırıcı minerallerin artması KGAM 'nin performansını oldukça düşürmektedir. Eğer kayaç çok abrasif özellikli ise uç tüketim değeri 1 adet/m^3'den fazla olur. Bu durum, fazla uç tüketimi olacağından hem makine performansını düşürür hem de kazı birim maliyetlerini artırır (Yaralı vd., 2018). KGAM uygulamalarının ekonomik sınırlar içinde olması için uç tüketiminin 0,5 adet/m^3'den az olması gerekir (Çopur et al., 1998).

Kollu Galeri Açma Makinelerinin Diğer Kazı Makinelerine Göre Temel Avantajları (Bilgin et al. 2014)***:***

- Seçimli Kazı Yeteneği: Kısmi cepheli olduklarından, farklı formasyon tabakaları seçimli olarak kazılabilir, bu da kazıda kolaylık sağlar. Ayrıca, kazı aynasına giriş çok rahat olduğundan, kesici kafa rahatlıkla incelenebilir ve keski değişimleri kolaylıkla yapılabilir.

- Kolay Yer Değiştirme - Hareket Etme Yeteneği: Paletli olduklarından, gerektiğinde bir kazı aynasından diğerine kolaylıkla gidebilirler. Makine montajı veya sökümü birkaç günde kolaylıkla yapılabilir. TBM'lere göre daha küçük ve hafif olduklarından, ilk yatırım maliyetleri çok daha düşüktür.

- Bu tür makinelerde arından açılan yere hemen tahkimat yapılabilmekte, bakım ve onarım için makinenin her tarafına ulaşmak kolay olmaktadır. Böylece kollu galeri açma makinelerinde, makineden yararlanma oranı % 40 ile % 60 değerine çıkabilmektedir.

- Esneklik Yeteneği (Değişen İşletme Koşullarına Uyabilme: Kollu galeri açma makineleri herhangi bir kesit şeklinde (at nalı, kare, dikdörtgen, dairesel, vs.) tünel açabilirler. 90°'ye kadar keskin viraj kazısı yapabilirler. Ortalama 15°'ye kadar eğimli tünellerde kolayca kazı yapabilirler.

Kollu Galeri Açma Makinelerinin Dezavantajları:

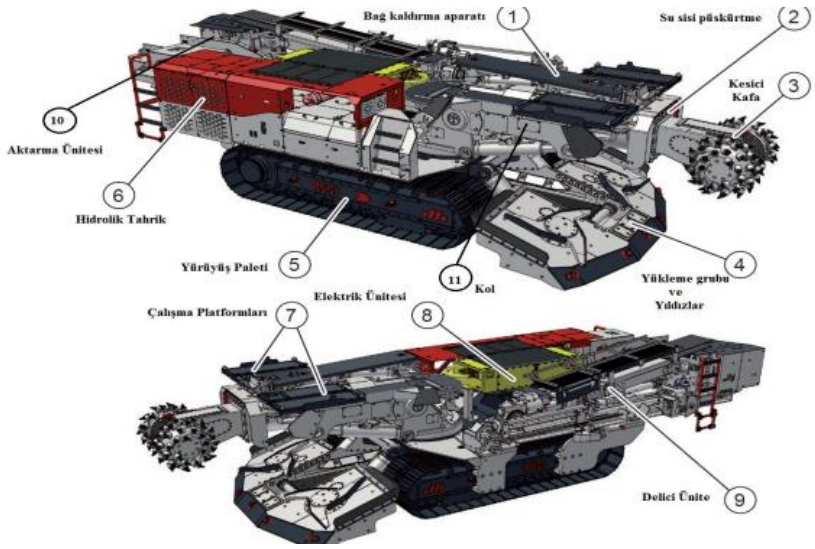
- 14° -20° den fazla eğimlerde verimli olarak çalışamazlar.

- Kazı kapasiteleri sınırlı olup çok sert ve aşındırıcı kayaçlar için ekonomik değillerdir.

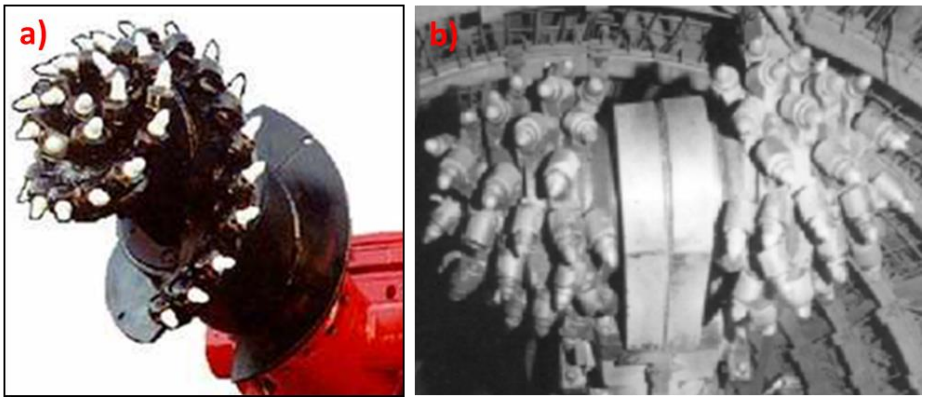
- Sert kesme koşulları için dizayn edilen ağır ve güçlü makinelerin maliyeti tam cephe galeri açma makinelerine yaklaşmakta, montajları ve sökülmeleri güç ve zaman almaktadır.

Kollu galeri açma makineleri (KGAM) makine tipi (paletli, şiltli), makine ağırlığı, kesici kafa tipi, kesici kafa gücü, kesici kafanın geometrik yapısı, kol (boom) tipi (tek, çift, tamburlu) ve diğer yardımcı ekipmanlardan (lazer ünitesi, uç soğutma sistemi ve toz bastırma sistemi, vb.) oluşmaktadır (Şekil 1).

Kollu galeri açma makineleri kesme kafasına göre eksenel (axial) ve eksene dik (transvers) olarak iki tipe ayrılmakta olup kazı işlemini gerçekleştiren parçadır. Eksenel olarak adlandırılan kesici kafalarda kesici kafa ile kol ekseni birbirine paraleldir (KEP). Eksene dik tip kesici kafalarda ise kesici kafa ekseni kol eksenine diktir (KED). Şekil 2'de örnek kesici kafa tipleri gösterilmektedir. KED ve KEP tipi kesici kafalar arasında temel farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıklar Çizelge 2'de tanımlanmıştır (Çopur, 2014).



Şekil 1. Bir kollu galeri açma makinasının parçaları (DH Mining Systems 2015; Akkaş'dan, 2019).



Şekil 2. Kesici kafa tipleri a) KEP (Eksenel) tip kesici kafa, b) KED (Eksene dik) tip kesici kafa

Çizelge 2. KEP ve KED makineleri arasındaki farklılıklar (Çopur, 2014).

Kıyaslama Kriteri	Eksenel Kesici Kafa (KEP)	Eksene Dik Kesici Kafa (KED)
Profil Düzgünlüğü	Avantajlı	Dezavantajlı
Makine Stabilitesi	Dezavantajlı	Avantajlı
Pasa Yükleme Verimi	Dezavantajlı	Avantajlı
Genel Uygulama Sınırı	UCS<60-80 MPa	UCS<100-120 MPa
Net Kazı Hızı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (UCS) 40-60 MPa'a kadar olan formasyonlarda daha hızlı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (UCS) 60-80 MPa'dan yüksek olan formasyonlarda daha hızlı

3. KOLLU GALERİ AÇMA MAKİNELERİNİN SEÇİMİNDE DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

Madenlerde galeri açma işlemi, yeraltı madenciliğinin temel adımlarından birini oluşturur ve cevhere güvenli ve ekonomik bir şekilde ulaşmayı sağlar. Bu işlem hem maden sahasının hazırlanması hem de cevherin taşınması için gerekli altyapının oluşturulması açısından kritik öneme sahiptir. Galeri açma sürecinde kullanılan yöntem ve ekipmanlar, madenin türüne, kaya kütlesinin özelliklerine ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Geleneksel patlayıcı tekniklerin yanı sıra, modern galeri açma makineleri, özellikle sert kayaçlarda daha hızlı, güvenli ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. Bu makineler, yüksek performanslı kesici başlıkları ve otomasyon sistemleri sayesinde verimliliği artırırken, iş gücü ihtiyacını ve iş kazası riskini de en aza düşürmektedir (Yaralı ve Kıran, 2018).

Ülkelerin gelişmesi ve kalkınmasında yeraltı maden kaynaklarının bilimsel metotlarla işletmeye alınması hayati önem taşımaktadır. Gelişmiş ülkelerin kalkınmasının temelinde, kaynakların verimli olarak kullanılması bulunmaktadır. Çünkü günlük yaşantımızın devamını sağlayan unsurların çoğunu madenler oluşturmaktadır. Ülkemizde son yıllarda çeşitli amaçlar için açılan tünel, maden galerileri ve yeraltı deposu vb. yapıların artması nedeniyle dünya da ve ülkemizde tünel ve madencilik faaliyetlerinin daha verimli daha ekonomik yapabilmek, insan gücünü en aza indirmek amacıyla mekanize kazı sistemlerini kullanmak kaçınılmaz olmuştur. Kazıcı/delici-yükleyici makineyi kullanacak olan firmaların daha verimli ve ekonomik bir kazı yapabilmeleri için bilimsel verilere dayanarak makine seçimini yapmaları gerekmektedir. Çünkü ilk yatırım maliyeti çok yüksek olan bu tür projelerde yatırımcı firmanın proje maliyetlerini önceden tahmin edebilmesi ve bu firmaların ileriye dönük güvenli bir üretim, finans planlamasını yapabilmesini sağlaması açısından önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle mekanize kazı sistemlerinde kazı performansının güvenli ve doğru şekilde önceden kestirimi çok önemli olmaktadır.

Mekanize kazı sistemleri patlatmalı kazı yöntemine göre çeşitli avantajlar (yüksek ilerleme hızı, güvenli çalışma ortamı ve minimum yer sarsıntısı vb.) sunmaktadır. KGAM'ler her kesitte ve şekilde kazı yapabilmektedir (Kwietnewski vd., 2011). Tüm üstünlüklerine karşın, KGAM'ler de diğer mekanize kazı sistemleri gibi kazılacak olan formasyona uygun olarak seçilmelidirler ve kazı performansları proje öncesi belirlenmelidir. Bir kazı makinesinin performansından bahsedilirken üç farklı bileşen dikkate alınmaktadır. Bunlar; net kazı hızı (ICR, m^3/h), keski tüketim miktarı (keski/m^3) ve makine kullanım oranıdır (MKO, %) (Bilgin et al., 2005).

ICR'nin önceden kestirilmesinde kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır ancak sıklıkla başvurulan yöntemler, kaya kesme deneyleri ve görgül (ampirik) tahmin yöntemleridir. Görgül yöntemlerde çeşitli araştırmacılar, kazılan formasyona ait kayacın bazı mekanik ya da fiziksel özelliklerini, birtakım makine parametrelerini ve kaya kütlesi özelliklerini kullanarak, sahadaki kesme hızlarını tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu amaç için görgül bağıntılar ve abaklar önermişlerdir (Bilgin, 1983; Aleman, 1983; Sandbak, 1985; Farmer and Garrity, 1987; Schneider, 1988; Gehring, 1989; Natau et al., 1991; Matsui and Shimada, 1993; Rostami et al., 1994;Bilgin vd., 1996; Çopur et al., 1997; Thuro and Plinninger, 1999; Balcı et al., 2004; Balcı and Bilgin, 2007; Çopur vd., 2004; Ocak et al., 2007;Çopur vd., 2012: Restner and Plinninger, 2015; Kahraman and Kahraman, 2016; Yaşar ve Yılmaz, 2018; Özfırat ve Yetkin, 2024). Ancak, görgül yöntemlerin başarısı elde edilen verinin kalitesine, veri sayısına ve dikkate alınan parametre sayısına bağlıdır. Bundan dolayı, kullanılırken bu hususlar dikkate alınmalıdır.

KGAM seçilirken kazı yapılacak kayaca ilişkin parametrelerden göz önüne alınması gereken en önemli kriterlerden birisi hiç şüphesiz kazısı yapılacak kayacın özellikleridir. Kayaca ait fiziko-mekanik özellikler, temel olarak tek eksenli basınç (UCS) ve çekme dayanımları (BTS) kayacın kesilebilirliklerine dolayısıyla da makinenin performansına ilişkin fikir verebilmekte olup, tek başına yeterli bir kriter olmadığı da bilinmektedir (Fowell and Pycroft, 1980). Kesilebilirlik konusu ile ilgili olarak en etkin parametre kayacın spesifik/özgül enerjisinin (SE) hesaba katıldığı yöntemlerdir. Kesme deneyleri vasıtasıyla kayacın spesifik enerjisi belirlenip bu bilgi yerinde yapılan çalışmalar ile desteklenerek, kayaç için bir kesilebilirlik sınıflandırılması oluşturulur. Buradan yola çıkarak en uygun kollu galeri açma makinesi seçilmesinin yanı sıra kesici uçlarla ilgili sarfiyat tahminleri de yapılmaktadır (Balcı et al., 2004). Başta makinenin kesici kafa gücü olmak üzere toplam kurulu güç ve makine ağırlığı makinenin sınıflandırmasında önemlidir (Hekimoğlu and Fowell, 1990).

Kesilebilirliklerin yanı sıra kayacın aşındırıcılık değeri makine seçimine etki eden önemli faktörlerdendir. Kayaçların aşındırıcılık değerini belirleyen en önemli deneylerden biri de Cerchar aşınma indeks (CAI) deneyidir (Yaralı ve Akçın, 2005). Galeri açma makinesinin işletme maliyetlerine olan en büyük etkisi kesici uç sarfiyatından oluşmaktadır. Buna ek olarak, çalışma sırasında oluşan titreşimlerden vb. nedenlerden ötürü hidrolik sistemlerde hortum, piston ve bağlantı elemanlarında ve

ayrıca yükleme ünitesinde meydana gelen aşınmalar nedeniyle de parça değişimleri gerçekleşmektedir. Bu da işletme maliyetine dolayısıyla ekonomik bir makine seçimine etki eden parametrelerden birisidir (Bilgin et al., 2014).

Seçilen kollu galeri açma makinesiyle yapılan kazının verimli olması için makine özelliklerine bağlı olmayan birtakım parametreler de mevcuttur. Örneğin, çalışılacak kazı kesiti bunlardan biridir. Kazı yapılacak galeri kesiti havalandırmayı, nakliyatı, ekipman ve malzemenin taşınmasını etkilemektedir. Bu da kazı veriminin değişmesine neden olabilmektedir. Bu parametrelerin değiştirilememesi durumunda ise KGAM nin boyutlarında veya modelinde değişikliğe gitme durumu ortaya çıkmaktadır (Yaralı, 2008).

4. TÜRKİYE'DE KULLANILAN KOLLU GALERİ AÇMA MAKİNE BİLGİLERİ

Türkiye'de Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG) tarafından IV-b Grup taşkömürü, linyit, asfaltit, bitümlü şist, kil olarak ruhsatlandırılmış olan ve 2026 yılının Mayıs ayı itibariyle yürürlükte olan toplam 391 adet ruhsat sahası, söz konusu ruhsat sahalarından taşkömürü ve linyit olarak toplam 343 adet ruhsat sahası mevcuttur. Bu ruhsatlardan 281 tanesinde açık işletme yöntemiyle 62 tanesinde ise yeraltı işletme yöntemiyle faaliyette bulunulmaktadır. 62 adet yeraltı kömür işletmesinden 10 farklı ilde (Ankara, Bartın, Denizli, Edirne, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla, Tekirdağ ve Zonguldak) (Şekil 3) toplam 14 farklı işletmede (Çizelge 3) galeri açma makinesi kullanılmaktadır (Kıran, 2026).

Şekil 3. Türkiye'de 2026-Mayıs ayı itibarıyla faaliyette bulunan toplam yeraltı kömür/linyit madenciliği işletmesinde kullanılan galeri açma makineleri (Kıran, 2026).

Türkiye genelinde 2026-Mayıs ayı itibarıyla aktif olarak faaliyet gösteren 14 farklı işletmede, 6 farklı firmaya adet toplam 21 farklı kollu galeri açma makinası (KGAM) modeli kullanılmaktadır. Kullanımda olan söz konusu makinelerin marka, model ve

menşei bilgileri Çizelge 4'te, işletmelere göre dağılımları ve firma isimleri ise Çizelge 5'te listelenmiştir. (Akkaş, 2019; Kiremitçiler, 2023; Yazıcı, 2023; Özçoşkun, 2026, Labris, 2026).

Yeraltı taşkömürü/linyit işletmelerinde 2026 yılı Mayıs ayı itibariyle de 18 adet makinenin aktif kullanıldığı tespit edilmiştir. Aktif ve aktif olmayan KGAM toplam sayısı 59 adettir. Çizelge 6'da Türkiye'de geçmiş yıllarda kullanılmış ve mevcut durumda kullanılmakta olan KGAM tamamı, arına dik ya da paralel çalışma prensibine, kesici kafa gücü, toplam kurulu gücü, uygun kesme dayanımını, açabileceği maksimum kesiti, makine ağırlığını, toplam sayı ve kullanım durumu ile kullanan firma gibi veriler kullanılarak hafiften ağıra göre sıralanmıştır.

Çizelge 3. Türkiye'de kollu galeri açma makinesi bulunan firmalar (Kıran, 2026).

	FİRMA ADI	İL	İLÇE
1	Çayırhan Termik Elektrik Üretim ve Madencilik Anonim Şirketi	Ankara	Beypazarı
2	Hattat Enerji Ve Maden Ticaret Anonim Şirketi	Bartın	Amasra
3	Özçoşkun Maden Orman Ürünleri İnşaat Malzemeleri Gıda Turizm Temizlik Nakliyat Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi	Denizli	Kale
4	Bki Batı Kömür İşletmeleri Anonim Şirketi	Edirne	Uzunköprü
5	Özşen Maden İşletmeleri Sanayi ve Ticaret Ltd.Şti.	Edirne	Uzunköprü
6	Polyak Eynez Enerji Üretim Madencilik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi	İzmir	Kınık
7	Fernas İnşaat Anonim Şirketi	İzmir	Kınık
8	Bozdağ Kömür İşletme Madencilik Enerji İnşaat Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi	Kütahya	Domaniç
9	Ege Taşkömür Maden Enerji Petrol İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Kütahya	Tavşanlı
10	İmbat Madencilik Enerji Turizm San.ve Tic.A.Ş.	Manisa	Soma
11	Defaş Madencilik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi	Manisa	Soma
12	Yatağan Termik Enerji Üretim Anonim Şirketi	Muğla	Yatağan
13	Kar-Deniz Madencilik Nakliye Hafriyat Petrol ve Orman Ürünleri İnşaat Malzemeleri Sanayi Ticaret Limited Şirketi	Tekirdağ	Malkara
14	Erdemir Madencilik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi	Zonguldak	Merkez

Çizelge 4. Kollu galeri açma makinesi marka ve modelleri (Kıran, 2026).

	Marka	Model	Menşei
1	DOSCO	MK-2A, MK-2B	İngiltere
2	Sandvik	AM-45, AM-50, MR340/341, MT/MR520/521	Avusturya, İsveç
3	Deilmann-Haniel	R60t, R75t	Almanya
4	SANY	EBZ100, 132, 135, 160, 200E, 200H, 260, 320	Çin
5	Kopeysk	KSP-42	Rusya
6	IBS	SM-130	Almanya

Çayırhan yeraltı linyit işletmesi, Türkiye'de tam mekanize yeraltı kömür üretiminin öncü örneklerinden biri olup KGAM (roadheader) performans verileri açısından en zengin sahadır. Dosco MK-2B makineleriyle yapılan ölçümler; kömür ve kiltaşı ağırlıklı arınlarda performans modellemeye temel oluşturmaktadır (Bilim, 2007).

Soma Eynez sahası, kömür ile şeyl/kiltaşı geçişli litolojiler içinde kollu galeri açma makinesi ve benzeri mekanize kazı çalışmaları açısından önemlidir. Yapılan saha çalışmaları ve literatürde de Polyak, İmbat ve DemirExport/Defaş bağlantılı çalışmaların bulunması, bu sahanın mekanize kazı verisi bakımından da dikkat çekici olduğunu gösterir.

Çizelge 5. Türkiye'de firmaların sahip olduğu kollu galeri açma makineleri (Kıran, 2026).

	Firma Adı	Mevcut GAM Modelleri	Aktif Olarak Kullanılanlar
1	Çayırhan	DOSCO MK-2B (9 ad.)	DOSCO MK-2B (6 ad.)
2	Hattat	EBZ260 (7 ad.), R75t (2 ad.), R60t (1 ad.)	EBZ260 (2 ad.)
3	Özcoşkun	EBZ135 (1 ad.)	-
4	BKİ Batı	EBZ132 (2 ad.)	EBZ132 (1 ad.)
5	Özşen	EBZ132 (6 ad.)	-
6	Polyak	EBZ200E (3 ad.), SM130 (1 ad.)	-
7	Fernas	EBZ200E (3 ad.), EBZ200H (1 ad.)	EBZ200E (1 ad.), EBZ200H (1ad.)
8	Bozdağ	AM50 (1 ad.), KSP-42 (1 ad.)	AM50 (1 ad.)
9	Ege Taşk.	AM50 (1 ad.)	AM50 (1 ad.)
10	İmbat	AM50 (4 ad.), EBZ200H (2 ad.), EBZ320 (1 ad.), R60t (1 ad.), AM45 (1 ad.)	AM50 (1 ad.), EBZ200H (1 ad.)
11	Defaş	SM130 (4 adet), EBZ200E (2 ad.), AM50 (1 ad.)	SM130 (2 adet)
12	Yatağan	EBZ160 (2 ad.)	EBZ160 (1 ad.)
13	Kar-Deniz	EBZ132 (2 ad.)	-
14	Erdemir	EBZ132 (2 ad.)	-

Soma bölgesinde kullanılan başlıca kollu galeri açma makineleri ise EBZ200E (8 ad.), EBZ200H (1 ad.), AM50 (5 ad.), SM130 (4 ad.) dır. EBZ serisi makineler son yıllarda Türkiye'de özel işletmeler ve proje bazlı uygulamalarda daha fazla görülmeye

başlamıştır. Bu makineler genellikle arına paralel kafa düzenine (KED) sahiptir. Orta-yüksek güç aralığında kazıda kullanılmaktadır ve kullanıcısına bakım kolaylığı sağlamaktadır. Sandvik makineleri ise daha yüksek mühendislik seviyesine, sert kaya kazısında kullanılmakta ve çoğunlukla tünelcilik uygulamalarında kullanılmalarıyla öne çıkmaktadır.

Tunçbilek ve Seyitömer linyit havzaları, daha düşük-orta dayanımlı çevre kayaçlar içinde kollu galeri açma makinesi kullanımının ekonomik olabildiği saha örnekleridir. Son yıllarda Kütahya ilinde bulunan Türkiye Kömür İşletmeleri başta olmak üzere faaliyetleri azaltmasından dolayı kullanılan galeri açma makina sayısı oldukça düşmüştür. Bölgede kullanılmakta olan AM50 ve KSP-42 model kollu galeri açma makineleri ile istenilen verim elde edilememiştir.

Çizelge 6. Kullanılan kollu galeri açma makinelerinin sıralaması (Kıran, 2026).

Sıra	GAM Model	Uygun Kaya Dayanımı (MPa)	KED / KEP	Maks. Galeri Kesiti (m^2)	Ağırlık (ton)	Kesici Kafa / Kurulu Gücü (kW)	Mevcut ve Kullanım Durumu (adet)	Kullanan Firma
1	KSP-42	30-70	KED	16	25	60/200	1/1	Bozdağ
2	MK-2A	30-80	KED	26	26	67/149	0/0	-
3	AM45	40-75	KEP	18	30	110/185	1/0	-
4	EBZ100	40-60	KED	21	30	100/181	0/0	-
5	SM130	45-75	KEP	19	35	132/207	5/2	Defaş
6	EBZ135	50-70	KED	24	39	135/221	1/0	-
7	AM50	50-70	KEP	35	27	100/169	7/2	Defaş,Bozdağ
8	EBZ132	50-75	KED	23	36	132/207	10/1	BKİ Batı
9	EBZ160	60-70	KED	27	43	160/260	2/1	Yatağan
10	R60t	60-100	KEP	34	60	160/305	2/0	-
11	MK-2B	60-110	KED	28	38	112/224	9/6	Çayırhan
12	EBZ200E	65-90	KED	30	55	200/285	8/1	Fernas
13	EBZ200H	65-90	KED	30	78	200/285	3/2	İmbat, Fernas
14	MR-340	70-90	KEP	42	67	230/412	0/0	-
15	R75t	70-110	KEP	31	75	200/355	2/0	-
16	MR-341	80-100	KEP	42	67	230/412	0/0	-
17	EBZ260	80-120	KED	33	85	260/420	5/2	Hattat
18	MT/MR520	80-130	KEP	60	102	325/547	0/0	-
19	EBZ320	90-130	KED	40	110	320/520	1/0	-
20	MT/MR521	90-130	KEP	60	102	325/547	0/0	-

Kütahya bölgesine kıyasla daha sert bir formasyon olarak Zonguldak havzasındaki Kozlu, Karadon ve Armutçuk gibi taşkömürü sahalarında aşındırıcı mineral içeri fazla (>%60) kumtaşı ve daha sert çevre kayaçlar bulunmaktadır (Yaralı, 2008). Bu durum, kollu galeri açma makinesi performansını daha zorlayıcı hale getirmektedir. Zonguldak

Ereğlisi'nde bulunan Oyak grubu işletmesinde ise kullanılan kollu galeri açma makineleriyle kazı yapılırken 70 MPa üzerinde bulunan tek eksenli basınç dayanımından dolayı ara ara kazı öncesinde delme-patlatma yapılmaktadır. İlde bulunan Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK)'nun kollu galeri açma makine kullanım deneyimleri olumsuz sonuçlandığından kurumda hali hazırda aktif halde kollu galeri açma makinesi bulunmamaktadır. Gelik bölgesinde 2005 yılında kullanılan KSP-42 model kollu galeri açma makinesinden çeşitli sebeplerle istenilen verim alınamamıştır (Akçın ve Akkaş, 2011). Benzer durum, özel bir firmanın 2023 yılında farklı kesme kafası tasarımlarıyla önce Karadon sonra da Armutçuk bölgelerinde denemeler yapılmış, fakat beklenen performans elde edilememiştir.

Bartın ili Amasra ilçesinde faaliyet gösteren Hattat Enerji ve Maden Ticaret Anonim Şirketi tarafından Amasra taşkömürü sahasında kullanılan, transvers tip DH serisi makineler SANDVIK AM-105 (300 kW), Deilmann-Haniel RT-60 (200 kW), Deilmann-Haniel RT-75 (200 kW) yüksek kesme kafası güçlerine sahip kollu galeri açma makinesi uygulamaları ile başarılı hazırlık galerileri sürülmüştür. Akkaş ve Su (2019) tarafından yapılan çalışmada, kollu galeri açma makinalarının (DH R60T ve DH R75T model transvers tip) 2015-2017 yılları arasındaki kazı faaliyetleri incelenmiş ve galeri açma makinaları ile **B24** kesitli galerilerde **41 ayda toplam 3182m** ilerleme yapılarak **ortalama 78 m/ay** ilerleme gerçekleştiği belirlenmiştir (Soyer, 2026).

Söz konusu saha, hazırlık galerilerinde sert kaya etkisinin ve makine seçim mantığının birlikte tartışılması açısından önemlidir. 2023 yılından günümüze kadar geçen sürede, üretim ve hazırlığa yönelik yatırımlar arttırılarak 7 adet SANY EBZ 260-A (260 kW) model kollu galeri açma makinesi alarak makine parkını genişletmiştir. İlgili işletmede kollu galeri açma makineleri ile 2011-2019 yılları arasında ana galerilerde (taş içinde) 1930 m, taban yollarında (kömür içinde) 6760 m hazırlık galeri sürülmüştür (Soyer, 2026).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İçinde bulunduğumuz zaman dilimindeki olaylara bakıldığında kömür üretiminin uzun bir süre daha enerji ihtiyacını karşılayacak bir kaynak olarak görülmektedir. Dolayısıyla, kömür rezervlerinin en kısa sürede ekonomiye kazandırılması amacıyla yeraltı ve yerüstü kömür madenciliğinin en önemli aşaması olan hazırlık işlerinin en kısa sürede tamamlanması işi gelmektedir. Üretimin artırılması ve mekanize kazıyı gerçekleştirmek için hazırlık işlerinin de mekanize olması gerekmektedir. Kazıların kollu galeri açma makinesi ile yapılması, delme-patlatma yöntemine göre daha emniyetli ve ekonomik olarak daha verimli bir sistemdir.

Ülkemizde Çayırhan'da başlayan mekanize kazı işlerinde kollu galeri açma makinesinin kullanımı ile yeraltı madenciliğinde hazırlık işlerinde mekanize kazının rolünü ortaya koymuştur. İlerleyen süreç içinde Türkiye'de birçok kamu ve özel madencilik kuruluşlarında KGAM makinesi yaygın hale gelmiştir. Bugün ülkemizde yeraltı işletme yöntemiyle faaliyette bulunan 62 adet yeraltı kömür işletmesinden 10

farklı (Ankara, Bartın, Denizli, Edirne, İzmir, Kütahya, Manisa, Muğla, Tekirdağ ve Zonguldak) ilde toplamda 14 farklı işletmede aktif ve aktif olmayan KGAM toplam sayısı 59 adet olup bunların 18 adeti aktif kullanılmaktadır.

KGAM için gerçek bir performans tahmini yapabilmek için arazide ve laboratuarda detaylı araştırma yapmak gerekir. Sadece makine kullanımına bakılarak galeri ilerleme randımanları değerlendirilmemelidir. Nakliyat (pasa, malzeme temini vb.), havalandırma, su atımı, kalifiye eleman gibi diğer parametrelerin de göz önünde bulundurulması gerekir. Amasra Hema Madencilik Şirketi'nde KGAM kullanımı başarıyla sürdürülmektedir. Dolayısıyla, Havza'da mekanize kazı ile hızlı ve ekonomik kazı yapmak mümkündür.

Yaralı vd., (2018), yapmış oldukları çalışmaya göre TTK'ya bağlı Karadon, Üzülmez ve Kozlu Müessesesi kömür çevre kayaçlarına ait tek eksenli basınç dayanımlarına (veri sayısı (n) =140) bakıldığında silttaşlarının (σ_c= 30-80 MPa) orta – yüksek, kumtaşlarının (σ_c= 60-150 MPa) ise yüksek dayanım sınıfında yer aldığı bildirilmiştir. Kayacın içindeki aşındırıcı mineral oranına bağlı olarak, CAI verilerine (veri sayısı (n) =108) göre ise silttaşlarının orta-aşındırıcı-çok aşındırıcı sınıfında, kumtaşlarının ise çok aşındırıcı sınıfında yer aldığı saptanmıştır. Buna göre Zonguldak Havzası kömür çevre kayaçları içinde taban yolları açılmasında kesme kafası gücü en az 132-160 kW olan, ana galerilerin açılmasında da kesme kafası gücü 200 ile 250 kW olan kollu galeri açma makinesi kullanımının uygun olacağı önerilmiştir.

KAYNAKLAR

Akçın, N.A., Akkaş, E. 2011. Gelik İşletmesi'nde Kullanılan Kollu Galeri Açma Makinasının Performansının İncelenmesi, Türkiye 22. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Ankara, 11-13 Mayıs, 171-180.

Akkaş, M., 2019. Amasra Bölgesinde Kullanılan Orta Ağırlıktaki Galeri Açma Makinalarının Performans ve Uç Tüketimlerinin Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 242s.

Aleman, V.P., 1983. Prediction of Cutting Rates for Boom Type Roadheaders, Tunnels and Tunnelling, 15, January, 23-25.

Balcı, C., Demircin, M.A., Copur, H., Tunçdemir, H., 2004. Estimation of Optimum Specific Energy Based on Rock Properties for Assessment of Roadheader Performance, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 104,11, 633-642.

Balcı, C., Bilgin, N., 2007. Correlative Study of Linear Small and Full Scale Rock Cutting Tests to Select Mechanized Excavation Machines, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 44, 468 - 476.

Bilgin, N., 1983. Prediction of Roadheader Performance From Penetration Rates of Percussive Drills: Some Applications to Turkish Coalfields, Eurotunnel'83 Conference, 22–24 June, Basle, Switzerland, 111–114.

Bilgin, N., Yazıcı, S., Eskikaya, S., 1996. A Model to Predict The Performance of Roadheaders And Impact Hammers in Tunnel Drivages, International Eurock'96 Symposium, Torino, 715-720.

Bilgin, N., Tumaç, D., Feridunoğlu, C., Karakaş, AR., 2005. The Performance of a Roadheader in High Strength Rock Formations in Küçüksu Tunnel, In: Erdem, Y, Solak, T, (eds), Proc.The 20th Int. Mining Kongress, İstanbul, 815-820.

Bilgin, N, Copur, H, Balci, C, 2014. Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13:978-1466584747,388s.

Bilim, N., 2007. Çayırhan Yeraltı Kömür Ocağında Kazı Makinelerinin Performanslarının Araştırılması ve Kayaç Özellikleri ile İlişkilendirilmesi, *Doktora Tezi,* Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya., 270s.

Çopur, H., Rostami, J., Ozdemir, L., Bilgin, N., 1997. Studies on Performance Prediction of Roadheaders Based on Field Data in Mining and Tunneling Projects, International 4th Mine Mechanization and Automation Symposium, Brisbane, A1–A7.

Çopur H., Özdemir, L., Rostami, J. 1998. Roadheader Applications in Mining and Tunneling, Earth Mechanic İnstitute, Colorado School Of Mines, Golden, Colorado, 50: 38-42.

Çopur, H., Balcı, C., Tokat, M., 2012. Soma-Kınık Bölgesinde Bir Kömür Ocağının Galeri Kazısı İçin Kollu Galeri Açma Makinesi Seçimi ve Performans Tahmini, Türkiye 18. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 6-8 Haz., Zonguldak, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 335-351.

Çopur, H., Balcı, C., Tumaç, D., Avunduk, E., Çomaklı, R., Tokat, M., 2012. Amasya - Suluova Bölgesinde Bir Kömür Ocağının Galeri Kazıları İçin Kollu Galeri Açma Makinesi Seçimi ve Performans Tahmini, Türkiye 19. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 21-23 Mayıs, Zonguldak, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 87-104.

Çopur, H., 2014, Kollu Galeri Açma Makineleri Seçimi, Tasarımı, Performans Tahmini Ve Uygulamalar, 3. Tünelcilik Kısa Kursu, 28-31 Ağustos, İstanbul. 20s.

DH Mining Systems, 2015. DH R60T ve DH R75T Galeri Açma Makineleri Kullanım ve Bakım Kılavuzu, Almanya, 30p.

Farmer, I.W., Garrity, P., 1987. Prediction of Roadheader Cutting Performance from Fracture Toughness, Considerations, 6th International Congress on Rock Mechanics, Montreal, Canada, vol. 1, 621–624.

Gehring, K.H., 1989. A Cutting Comparison, Tunnels and Tunnelling, 27–30.

Heiniö, M., 1999. Rock Excavation Handbook. Sandvik Tamrock Corp., 364 p.

Hekimoğlu, O.Z., Fowell, R.J., 1990. From Research Into Practice: In-situ studies for Design of Boom Tunnelling Machine Cutting Heads, Rock Mechanics Contributions and Challenges, Proceedings of the 31st U.S. Symposium, Colorado School of Mines, Golden, 18-20 June, 481-488.

Kahraman, S., 2016. The Performance Prediction of Roadheaders From Easy Testing Methods, Bulletın Of Engıneerıng Geology And The Envıronment, .75, 4, 1585-1596.

Kıran, H., 2026. Türkiye'deki Galeri Açma Makinelerinin Genel Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Semineri, Zonguldak,28s.

Kiremitçiler Grup, Özşen Maden İşletmeleri, 2023. Kontrol merkezinden alınan faaliyet raporları, yayımlanmamış, Edirne, 45s.

Kwietnewski, D., Henn, R., Brierley, G., 2011. Versatility of Roadheaders in Tunnel Construction, Tunneling & Underground Construction, 5, 2, 17-21.

Labris 2026. https://www.labris.com.tr/post/galeri-a%C3%A7ma-maki-neleri-1., firma envanteri. (kaynağa erişilen tarih, Nisan 2026).

Matsui, K., Shimada, H., 1993. Rock Impact Hardness Index for Predicting Cuttability of Roadheader, Mine Mechanization and Automation, G. Almgren, U. Kumar, N. Vagenas, Ed., Balkema, Rotterdam, 265-270.

McFeat-Smith, I., Fowell, R.J., 1979. The Selection and Application of Roadheaders for Rock Tunnelling, Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference, Atlanta, Vol. 1, 261-279.

Natau, O., Mutschler, T.H., Lempp, C.H., 1991. Estimation of the Cutting Rate and Bit Wear of Partial Full Face Tunnelling Machines, 7th International Rock Mechanics Congress, ISRM, Aachen, 1591–1595.

Ocak, I., Eyigun, Y., Cinar, M., Nahya, T., 2007. Investigation into Roadheader Excavation Performance and Pick Consumption Used in Kadikoy–Kartal Metro Tunnels, Proc. the 2nd Symposium on Underground Excavations for Transportation, Turkish Chamber of Mines, Istanbul, Turkey, 199–206.

Özçoşkun Maden Orman Ürünleri İnşaat Malzemeleri Gıda Turizm Temizlik Nakliyat Sanayi Ve Ticaret Limited Şirketi, 2026. Firma Envanteri, 58s.

Özfırat, M.K., Mallı T., Özfırat M. P., Kahraman, B. 2017. The Performance Prediction of Roadheaders with Response Surface Analysis for Underground Metal Mine, Kuwait Journal of Science, 44.

Özfırat, M.K., Yetkin, M.E., 2024. Jeomekanik Parametrelerin Değerlendirilmesi ile En Uygun Kollu Galeri Açma Makinesi Seçimi, Kuzey Ege Teknik Bilimler ve Teknoloji Dergisi, Cilt 1, Sayı 1, 37-45.

Restner, U., Plinninger, R.J., 2015. Rock Mechanical Aspects of Roadheader Excavation, Eurock 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, W. Schubert ve A. Kluckner, Ed., 249-254.

Rostami, J., Özdemir, L., Neil, D., 1994. Performance Prediction: The Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining, Mining Engineering, 1263-1267.

Sandbak, L.A., 1985. Roadheader Drift Excavation and Geomechanical Rock Classification At San Manuel, Arizona. Rapid Excavation and Tunnelling Conference, New York, vol. 2, 902–916.

Schneider, H., 1988. Criteria for Selecting a Boom-Type Roadheader, Mining Magazine, September, 183-187.

Soyer, E. 2026. Kişisel Görüşme, Hattat Enerji ve Maden Ticaret Anonim Şirketi Amasra Taşkömür İşletmesi, Amasra, Bartın.

Thuro, K., Plinninger, R.J., 1999. Roadheader Excavation Performance - Geological and Geotechnical İnfluences, Proc. the 9th ISRM Congress, Paris, August 25-28, 1241-1244.

Yaralı, O, Akçın, N, 2005. Zonguldak Taşkömür Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Aşındırıcılık Özelliklerinin Araştırılması, Türkiye Uluslararası 19. Madencilik Kongresi Kitabı, TMMOB Maden Müh. Odası Yayını, İzmir, 243-251.

Yaralı, O. 2008. Türkiye Taşkömürü Kurumu Galeri İlerlemelerinde Kollu Galeri Açma Makinalarının Kullanımının Araştırılması, Türkiye 16. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Zonguldak, 77-89.

Yaralı, O., Kıran, H. 2018. Amasra Taşkömürü Havzasında Kullanılan AM105 Tipi Kollu Galeri Açma Makinasının Performans İncelemesi, 4. Uluslararası Yeraltı Kazıları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul, 13-14 Eylül,127-138.

Yaralı, O., Sakız, U., Duru, H., Aydın, H., Su, O., Geniş, M. 2018. Türkiye Taşkömürü Kurumu'nda Galeri İlerlemelerinde Kollu Galeri Açma Makinası Kullanımının Analizi, Türkiye 21. Uluslararası Kömür Kongresi "ICCET 2018" Bildiriler Kitabı, 11-13 Nisan 2018, Zonguldak, 69-93.

Yaşar, S., Yılmaz, A.O., 2018. Düşey Kayaç Kesme Seti İle Kollu Galeri Açma Makinesi Performans Tahmini: Bir Örnek uygulaması, Madencilik, Özel Sayı, 63-71.

Yazıcı, O., Sarımehmet, S., Yılmaz, C., Parlak, T., Bozdağ, B., 2023. Trakya Bölgesinde Galeri Hazırlık Çalışmalarının Performansının İncelenmesi, 9.Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi, İMMAT2023, İzmir, 79-88.

ÜZÜLMEZ BÖLGESİ BAZI KÖMÜR DAMARLARININ MEKANİZE KAZI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF SOME COAL SEAMS IN THE ÜZÜLMEZ REGION FROM THE PERSPECTIVE OF MECHANIZED EXCAVATION

Göktuğ Tosun*
TTK, ÜTİM, Zonguldak

Olgay Yaralı
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZET Bu çalışmada, mekanize kazı sistemi seçiminde birçok parametrenin etkili olduğu bilinmektedir. Mekanize kazı sistemi seçimi, kömür ve ara kesmelerin belirli indeks kayaç özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve bu özelliklerin kazılabilirlik ile mekanize kazı yönteminin seçimine etkisi araştırılmıştır. Türkiye Taşkömürü Kurumu Üzülmez Taşkömürü İşletme Müessesesi'nde -180/-230 kotları arasında bulunan Nasifoğlu, -273/-280 kotları arasında bulunan Çay ve -225/-240 kotları arasında bulunan Piriç kömür damarlarının mekanize kazıya uygunluğu araştırılmıştır. Arazi çalışmalarında kömür ve ara kesmeler üzerinde Schmidt çekici ölçümleri gerçekleştirilmiş, laboratuvar çalışmalarında ise kömür numunelerine Hardgrove Öğütülebilirlik İndeksi (HGİ) ve Darbe Dayanım İndeksi (DDİ) deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen Schmidt çekici sonuçlarına göre ara kesmeler sert kaya sınıfında yer alırken, kömür damarlarının kolay kesilebilir özellik gösterdiği belirlenmiştir. HGİ değerlerinin yaklaşık 93-94, DDİ değerlerinin ise 34–39 aralığında olması, incelenen kömürlerin kolay öğütülebilir ve yumuşak olduğu ortaya konulmuştur. Sonuçlar, uygun kazı makinesi seçimi ve gerekli planlamalarla, söz konusu damarların mekanize üretim yöntemleri için önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

ABSTRACT In this study, it is known that many parameters are effective in the selection of a mechanized excavation system. The selection of the mechanized excavation system was evaluated by taking into account the specific index rock properties of coal and interbedded rock layers, and the effect of these properties on excavatability and the selection of the mechanized excavation method was investigated. The suitability for mechanized excavation of the Nasifoğlu coal seam located between the -180/-230 levels, the Çay seam between the -273/-280 levels, and the Piriç seam between the -225/-240 levels at the Üzülmez Coal Mining Establishment of the Turkish Hardcoal Enterprises was investigated. In field studies, Schmidt hammer measurements were carried out on coal and interbedded rock layers, while in laboratory studies, Hardgrove Grindability Index (HGI) and Impact Strength Index (ISI) tests were applied to coal samples. According to the Schmidt hammer results obtained, it was determined that the interbedded rock layers fall into the hard rock class, while the coal seams exhibit easy-to-cut characteristics. The fact that HGI values are approximately 93–94 and ISI values are in the range of 34–39 revealed that the coals examined are easily grindable and soft. The results show that, with the appropriate excavation machine selection and necessary planning, the aforementioned seams hold significant potential for mechanized production methods.

*goktugtosun8@gmail.com

1. GİRİŞ

Türkiye topraklarında taşkömürü madenlerine sahip tek yer Zonguldak havzasıdır. Bölgede kömür çıkarımı, büyük ölçüde insan gücüne dayalı konvansiyonel uzunayak yöntemiyle yapılmaktadır.

Zonguldak taşkömürü havzasındaki karmaşık ve parçalı jeolojik yapı ile yüksek damar eğimleri, tam mekanize kazı sistemlerinin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Havzada üretim ağırlıklı olarak klasik/yarı mekanize yöntemlerle yapılmaktadır. Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) verimliliği ve işçi sağlığı ve güvenliğini artırmak amacıyla klasik ahşap tahkimat yerine yarı mekanize çelik tahkimat uygulamasına geçmiştir. TTK Karadon Müessesesi'nde yürüyen tam mekanize tahkimat sistemiyle ilgili pilot uygulamaları yürütülmektedir.

Yeraltı kömür mekanizasyonu ile yeraltı kömür madenlerinde kömürün çıkarılması, yüklenmesi, hazırlanması vb. gibi süreçlerin insan gücü yerine makine ve belli teçhizatların kullanılmasıdır. Amaç, hızlı bir hazırlık süreci, hızlı üretim süreci, güvenli çalışma ortamı sağlamak, işçi sayısı ve işçilik maliyetlerini azaltmak, belirli rezerv için ton başına yapılan ilk yatırımın azaltılması, işçilik randımanlarını arttırmak hedeflenmektedir (Yaralı, 2024).

Bu çalışmada, Türkiye Taşkömürü Kurumu Üzülmez Taşkömürü İşletme Müessesesi -180/-240 kotları arasında Nasifoğlu, Çay ve Piriç damarlarının mekanize kazıya uygunluğu araştırılmıştır. Bu amaçla arazide, Schmidht çekici ölçümleri (ara kesme ve kömür) yapılmıştır. Laboratuarda da kömürün öğütülebilirliğini ve sertliğini belirlemek amacıya Hardgrove Öğütülebilirlik İndeksi (HGİ) deneyi ile Darbe Dayanım İndeksi (DDİ) deneyleri yapılmıştır.

2. KÖMÜR ÜRETİMİNDE MEKANİZASYONA ETKEN OLAN ÖN KOŞULLAR

Kömür üretiminde mekanizasyon uygulaması her kömür damarı için uygun değildir. Her kömür damarı için uygun olmamakla beraber her işletme için de uygun olmayabilir. Tam mekanize üretim büyük ilk yatırımlar gerektiğinden işletme sahasında bulunan tam mekanize işletilebilir rezerv miktarına göre, ton başına düşen maliyetlere de dikkat etmek son derece önemlidir. Teknik olarak üretim mekanizasyonunda dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Damar eğim ve kalınlığı
2. Damar tavan ve taban koşulları
3. Mekanik dayanım ve kazı kolaylığı
4. Kaynak kömürün varlığı

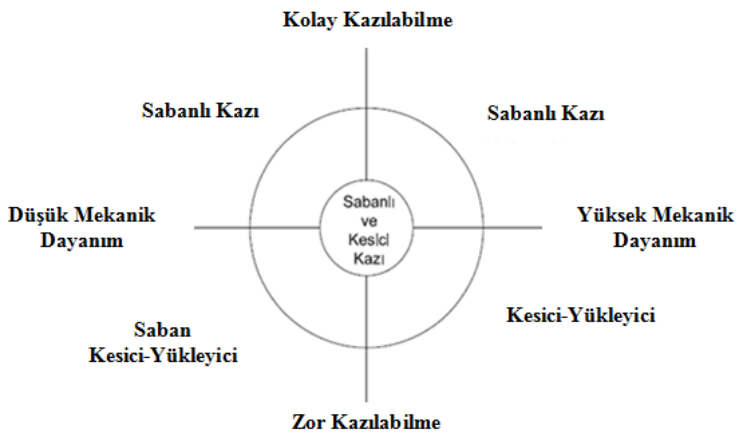
5. Klivaj (dilinim düzlemleri)
6. Ara kesmenin varlığı
7. Damardaki jeolojik arızalar
8. Tabaka kontrolü ve tahkimat
9. Pano boyu, ayak uzunluğu ve işletme yönü
10. Taşıma işleri
11. Havalandırma
12. Enerji gereksinimi
13. Diğer etkenler

Damarın eğimi ve kalınlığı kazı yöntemi seçiminde en önemli etkendir. Saban ve kesici yükleyiciler özel önlemlerle 60º'ye kadar eğimli damarlarda kullanılabilir. Kalınlık açısından bakılacak olursa kesici yükleyicilerin çalışabileceği minimum kalınlık 1 m civarıdır, fakat 2 m' nin üzerindeki damarlar için daha uygundur (Akçın 2016).

Kazı makinesinin arında kazı yapabilmesi için belirli genişlikte tahkimatsız bir açıklık gereklidir. Kazı makinesi kazı yaptıktan sonra tahkimat üniteleri öteleninceye kadar geçecek sürede tavanın kendini tutabilmesi gereklidir. Tavan sarmasında kape bulunan yürüyen tahkimat sistemleri tavan basıncı yüksek damarlarda büyük kolaylık sağlayabilir. Kazı aracı; taban taşı üzerinde hareket ediyorsa, sağlam ve ondülasyonsuz bir taban taşı gerekir. Zincirli oluk üzerinde hareket ediyorsa (saban ve kesici yükleyici gibi), önemli bir sorunla karşılaşılmaz. Zincirli oluğun uyum sağlayabildiği koşullara kazı araçları da uyum sağlamaktadır.

Taban taşı; yumuşak, kırılgan ve ondülasyonlu bir yapıya sahipse kazı aracı tabana saplanır, taban taşı kesilmek durumunda kalır, keski tüketimi artar, kazı verimi düşer ve kömür kalitesi bozulur (Akçın 2016).

Kazı kolaylığı; arazi ve üretim basınçları ile tektonik hareketler vb. etkenlerden dolayı damarda oluşan süreksizlikler, tabakalaşma düzlemleri, klivaj(dilinim) düzlemlerinin varlığı nedeniyle kömürün kendi doğal gevşeklik ve gevreklik derecesinin bir göstergesidir. Süreksizlik sayısı arttıkça kazı kolaylığı oluşur (Akçın 2016). Mekanik dayanım ve kazı kolaylığına göre kazı makinesi seçimi yapılmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Mekanik dayanım ve kazı kolaylığına göre makine seçimi (Akçın, 2016).

Kömürdeki eklem takımları (dilinim düzlemleri) bir ocağın planlanması ve işletilmesi sırasında göz önüne alınması gereken en önemli özelliklerdendir. Bunlar çoğunlukla damarın tabakalaşmasına dik yönde gelişmiştir ve alın çatlakları adını alırlar. Bunlara dik olanlar ise taban çatlakları olarak isimlendirilmiştir. Bunların sıklıkları 1 mm'den daha kısa aralıklardan 30 cm aralıklara kadar değişebilir (Akçın, 2016).

Yumuşak ve kalınlığı az olan bir arakesme mekanize kazıda sorun yaratmaz. Ancak kalın, sağlam, çatlaksız ve dayanımı yüksek bir arakesme, makine seçimini ve seçilen makinenin performansını olumsuz etkiler. Arakesme sabanlı kazıda kesme derinliğinin azalmasına ve kesici kazıda ilerleme hızının düşmesine yol açar. Pirit ve kil yumruları içeren çörtlü arakesmeler, en çok sorun yaratan ara kesmelerdir (Akçın, 2016).

Büyük atımlı faylar daha çok pano sınırlarını belirlemede önemlidir. Büyük atımlı fayların sıklığı pano ve ayak boylarını kısıtlamaktadır. Kazı cephesine göre dik, paralel ve çapraz yönlü olan küçük atımlı faylar mekanizasyon uygulamasında sorunlar yaratabilir. Küçük atımlı faylar uygun bir kazı ve tahkimat yöntemiyle geçilebilir.

Tabaka kontrolü açısından mekanize kazıya en uygun yöntem göçertmeli çalışmadır. Ayak ilerledikçe ayak arkası bir şekilde göçertilmelidir. Ancak, tasman ve diğer nedenlerle sınırlamalar varsa, kazı hızına uygun bir dolgu sistemiyle dolgulu çalışma (rambleli çalışma) uygulanabilir (Akçın, 2016).

3. ÜZÜLMEZ TAŞKÖMÜRÜ İŞLETME MÜESSESESİ (ÜTİM)

Zonguldak il merkezine 7 km uzaklıkta ve 28 km^2 alanda üretim faaliyetlerini sürdürmektedir. Müessesede 2.00–6.10 metre arasında değişen kalınlıklarda, 4 ayrı kömür damarında koklaşabilir özellikteki taşkömürü üretimi Asma- Dilaver İşletmesinde yapılmakta olup kömür damarları kuzeyde normal, güneyde ise dik yatımlıdır. Üretim çalışmaları -45/-280 kotları arasında kalan panolarda yapılmaktadır (TTK, 2024).

Üzülmez Taşkömürü İşletme Müessesesine bağlı üretim faaliyetleri Asma-Dilaver İşletme Müdürlüğü bünyesinde 3 Kartiye tarafından yürütülmektedir. Bu araştırma ÜTİM 1. ve 3. Ocak'taki Nasifoğlu, Çay ve Piriç damarlarında yapılmış olup bu panolara ait bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

3.1 Birinci Ocak

1. Ocak Nasifoğlu Panosu, -180/-230 kotları arasında üretim faaliyetlerini sürdürmektedir. Deneylerin yapılmış olduğu ayaklar, -180/-200 ve -200/-215 kotları arasında olan ayaklarda kirişli yarı mekanize sistem kullanılmaktadır. Asma-Dilaver İşletmesinde üretime devam edilen -200/-215 Nasifoğlu ayak içinde yaklaşık 67 adet kirişli yarı mekanize şilt bulunmaktadır. Buna ek olarak değişen koşullara bağlı olarak 3 adet ahşap tahkimat bulunmaktadır. Ayak boyu 70 metredir. Kömür kalınlığı ise 1.5-2 metre olmakla beraber ayağın ortalama yüksekliği 2 metredir (Koca, 2026).

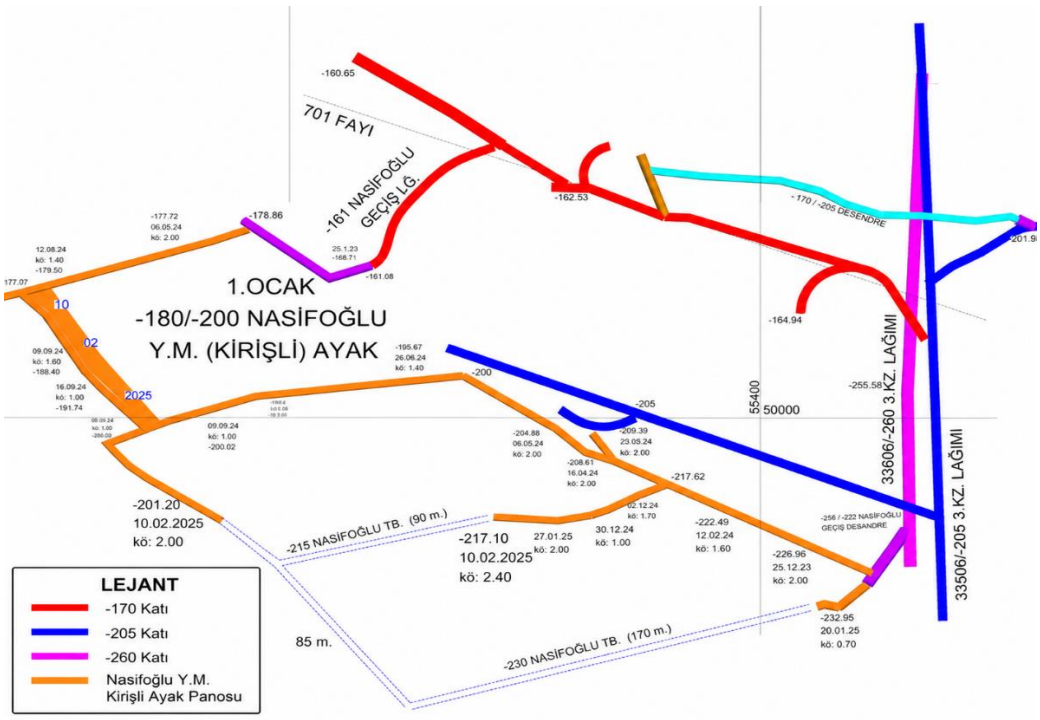
3.2 Üçüncü Ocak

3. Ocak çalışma sahalarında 2 adet panodan üretim yapılmaktadır. Bu panolar sırasıyla; -273/-280 kotları Çay kirişli yarı mekanize ayak ve -225/-240 kotları arasında Piriç zincirli yarı mekanize ayaktır (Çakmakçıoğlu, 2026).

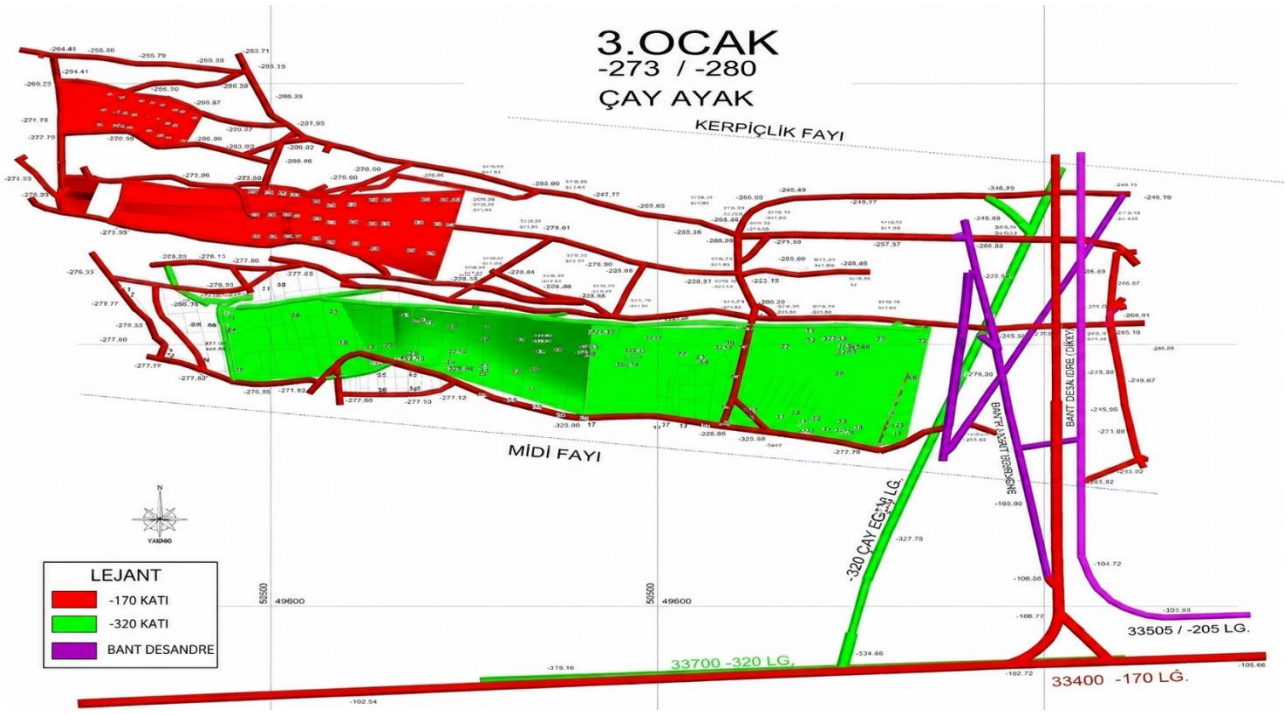
1. ve 3. Ocak'larda faaliyet alanında üretim yapılan panolara ilişkin bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 2-4'de -200/-215 Nasifoğlu, -273/-280 Çay ve -225/-240 Piriç ayak panolarına ait planlar Şekil 2-4'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. 1. ve 3. Ocaklara ait bilgiler (TTK ÜTİM, 2026).

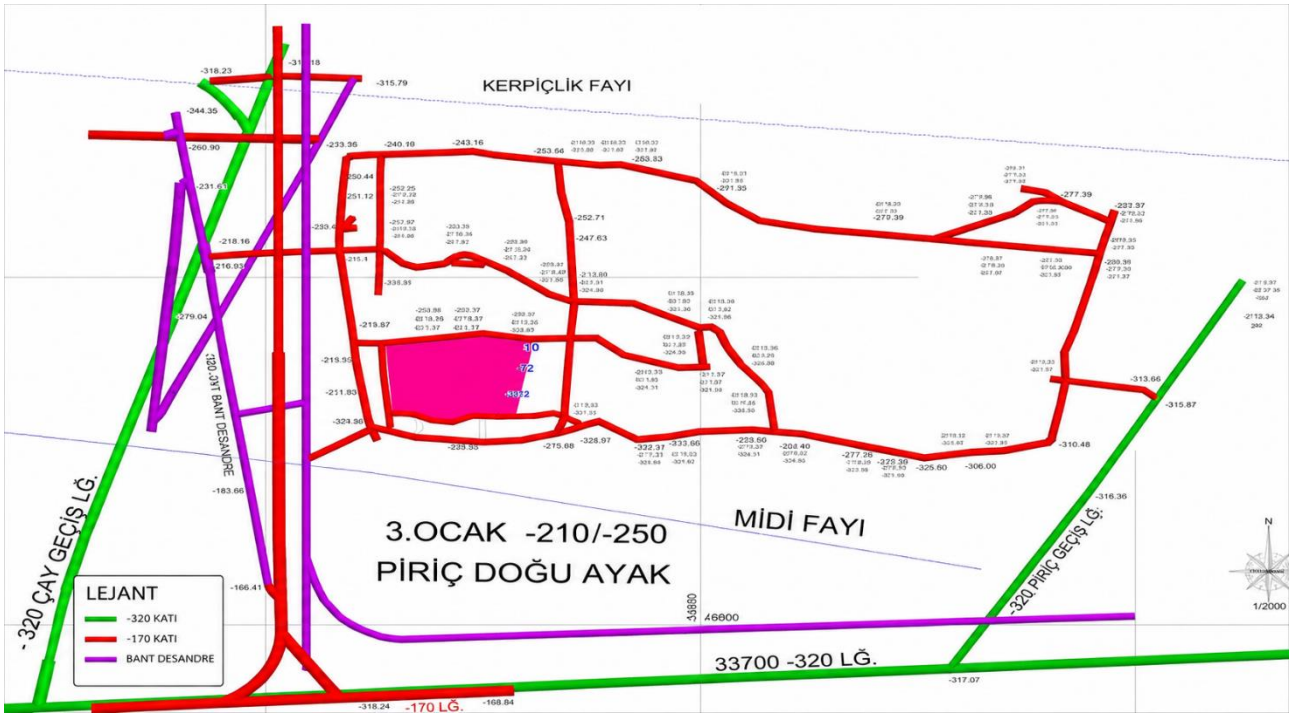
Parametreler	**-200/-215 Nasifoğlu Ayak**	**-273/-280 Çay Ayak**	**-225/-240 Piriç Ayak**
Damar Eğimi	7°	8°	19°
Damar Kalınlığı	2.00 m.	6.10 m.	2.00 m.
Tavan Taşı	Sert Şeyl	Kumtaşı	Kumtaşı Şeyl
Taban Taşı	Sert Şeyl	Şeyl	Kumtaşı Şeyl
Pano Boyu	165 m.	245 m.	360 m.
Hesaplanan Rezerv	95.000 ton	310.000 ton	178.000 ton
Ayak Boyu	85 m.	70 m.	136 m.
Çalışma Yöntemi	Dönümlü	Dönümlü	Dönümlü
Kullanılan Tahkimat Türü	Kirişli Yarı Mekanize	Kirişli Yarı Mekanize	Zincirli Yarı Mekanize



Şekil 2. -180/-230 Nasifoğlu yarı mekanize ayak panosu (Planda ölçek bilgisi bulunmamaktadır.) (TTK ÜTİM, 2026.).



Şekil 3. -273/-280 Çay yarı mekanize ayak (Planda ölçek bilgisi bulunmamaktadır.) (TTK ÜTİM, 2026).



Şekil 4. -225/-240 Piriç yarı mekanize ayak (Planda ölçek bilgisi bulunmamaktadır.) (TTK ÜTİM, 2026).

4. ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

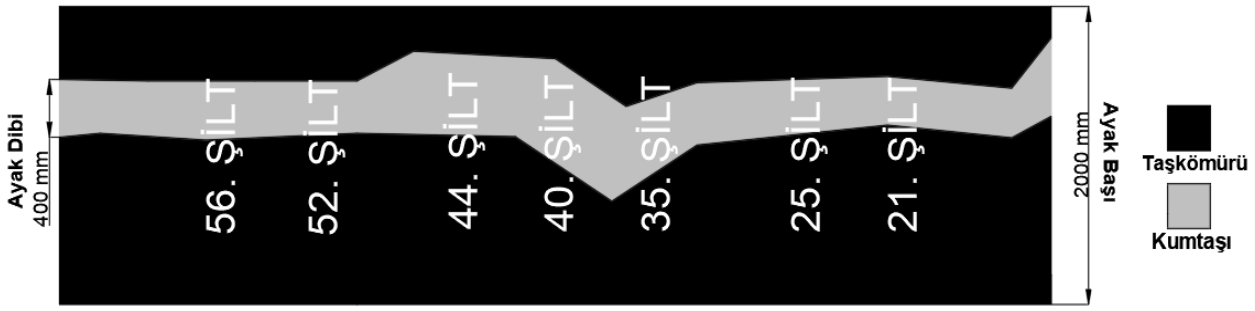
Bu çalışmada, üç damar için ayak içinde arında hem kömür hem de ara kesmede Schmidt çekici ölçümleri (SCH) yapılmıştır. Laboratuvarda da kömür örneklerinin sertliklerini belirlemek için darbe dayanım indeks (DDİ), öğütülebilirliklerini saptamak için de Hardgrove İndeks (HGİ) deneyi yapılmıştır.

4.1 Arazi Çalışmaları

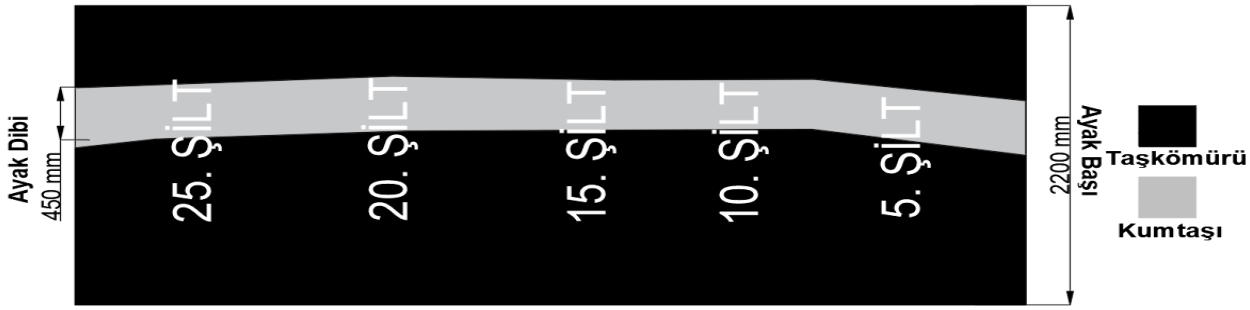
Arazi ölçümleri esnasında L Tipi (0.735 Nm) Schmidt çekici (SCH) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Arazi ölçümleri yapılmadan önce laboratuarda Schmidt çekici örsü ile düzeltme katsayısı bulunarak kalibrasyon yapılmıştır. Ölçümler ve değerlendirmeler ISRM (2007)'e göre yapılmıştır.

Schmidt çekici ölçümünün laboratuvarda yapılmasına yönelik öneriler veren ISRM (2007) ve ASTM (1993), saha uygulamalarının nasıl yapılacağı konusunda açık bir öneri vermemektedir. Karşılaşılan bu sorunun aşılmasına yönelik olarak Özkan ve Meriç (2020)'in TKİ-GLİ-Ömerler yeraltı maden ocağında hazırlık çalışmalarının yürütüldüğü A6 uzun ayak panosunda gerçekleştirdikleri Schmidt çekici ölçüm yöntemi dikkate alınmıştır. Araştırmacılar her biri 0.25 m^2 olacak şekilde 267 birim ölçüm hücresine bölerek ölçümler yapmışlardır. Bu çalışmada, ölçüm yapılan ayaklarda kullanılan şilt genişliği 1.3 m, ortalama damar kalınlığı 2-2.1 m olup her ayakta en az 6 veya 7 şiltlik mesafede arında en az 3 farklı bölgede (kömür + ara kesme) genelde 60-80 adet ölçüm yapılmıştır. Böylece ölçüm sıklığı 0.043m^2 olacak şekilde

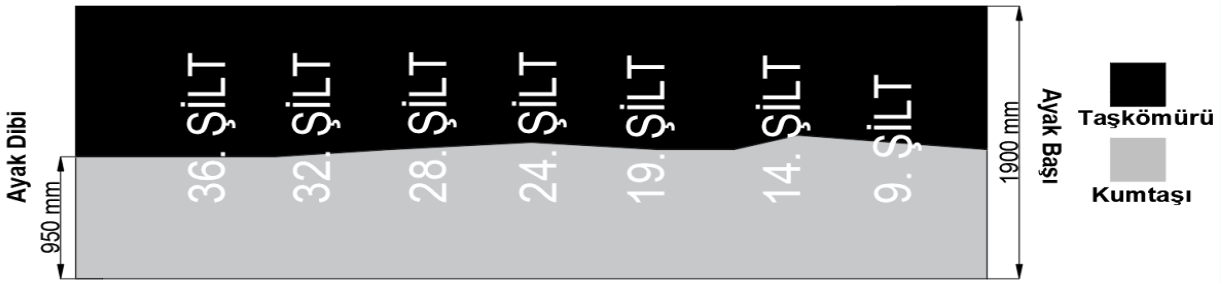
gerçekleşmiştir. Her bir bölgedeki 20 ölçümün ISRM (2007)'ye göre en yüksek 10 ölçümün ortalaması alınarak Schmidt çekici sertlik değeri bulunmuştur. Ölçüm yapılan arınların temsili görüntüsü Şekil 5-7'de gösterilmiştir (Özkan ve Meriç 2020).



Şekil 5. -200/-215 Nasifoğlu ayakta Schmidt çekici ölçümü.



Şekil 6. -273/-280 Çay ayakta Schmidt çekici ölçümü.



Şekil 7. -225/-240 Piriç ayakta Schmidt çekici ölçümü.

Ara kesme Schmidt çekici ölçümlerinin dayanım değerlendirmesi ISRM (1978)'e göre (Çizelge 2), kömürün kazılabilirlikleri ise Bilgin vd. (1992) tarafından önerilen sınıflamaya (Çizelge 3) göre değerlendirilmiştir. Schmidt çekici deneyleri beton ve kaya numunelerinin tek eksenli basınç dayanımlarının dolaylı olarak tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bu amaca yönelik yapılan ilk ve en kapsamlı çalışma Deere ve Miller (1966)'a aittir ve tek eksenli basınç dayanımının tahminine yönelik olarak Şekil 8'deki abakı geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, genellikle ince taneli kumtaşı olan (birim ağırlıkları/yoğunluk ortalama 26-27 kN/m^3) ara kesme SCH değerlerinden tek eksenli basınç dayanımları (UCS) Şekil 8'deki abaktan bulunmuştur.

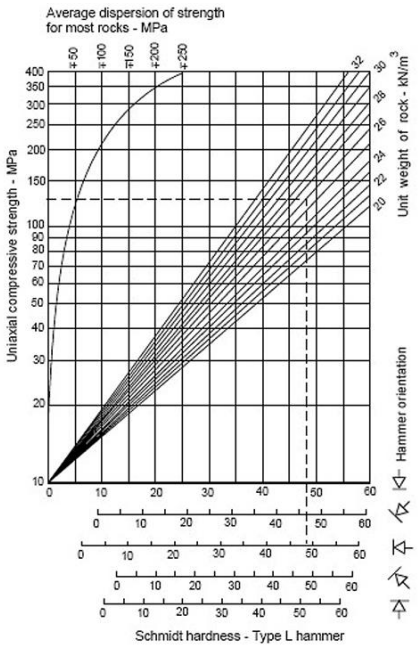
Çizelge 2. Schmidt çekicine (SCH) göre kaya sertliğinin sınıflandırılması (ISRM, 1978).

SH Sertlik Değeri	Sınıflandırılması
0-10	Yumuşak
10-20	Az yumuşak
20-30	Az sert
30-40	Sert
40-50	Oldukça Sert
>60	Çok Sert

Çizelge 3. Kömür damarlarında yapılan dayanım deneylerine göre oluşturulan kazılabilirlik sınıflaması (Bilgin vd., 1992).

*Dayanım özellikleri	Kolay kesilebilirler	Kesilebilir	Zor kesilebilir	Çok zor kesilebilir
σ_C (MPa)	<12	12-17	17-25	>25
NYD(MPa)	<0,35	0.35-0.45	0.46-1.1	>1.1
CS (dk)	<1,5	15-21	21-54	>54
KDD (I_W)	<1,5	1.5-1.8	1.8-1.6	>2.6
SCH	<20	20-27	27-42	>42
DDİ	<45	45-58	58-72	>72

*σ_C = Kömürün Tek Eksenli Basınç Dayanımı
CS = Cerchar Sertliği
NYD = Nokta Yük Dayanımı
SCH = Schmidt Çekici
KDD = Konik Delici Değeri
DDİ = Darbe Dayanım İndeksi.

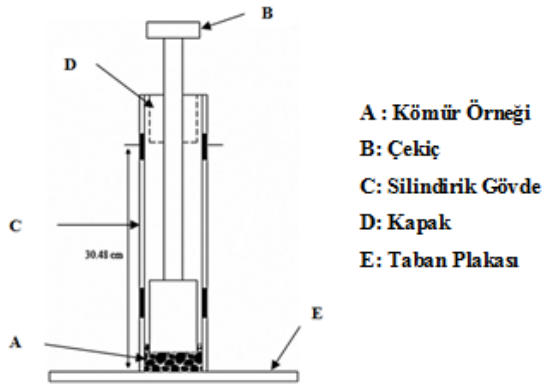


Şekil 8. Schmidt sertliğinden tek eksenli basınç dayanımının tahmini için oluşturulan abak (Deere ve Miller, 1966).

Çalışmanın yapıldığı ayaklarda üretim önce kömür damarını gevşetmek amacıyla lağım atıldıktan sonra martopikör ile kazı yapılmaktadır. Kömür numunesi alma işlemi her ayakta en az 6 veya 7 şiltlik mesafede, kömür arını boyunca önce martopikör aracılığıyla 30-40 cm derinlik taranmıştır. Açılan yarık boyunca 20 cm derinlik,50 cm genişlikte damar kalınlığı kadar olan bölgeden konileme-dörtleme yapılarak 2 torba (25-30 kg arası) kömür numune örneği ayak içerisinde çıkartılmıştır. Bu numuneler laboratuvara getirilince tekrar konileme dörtleme yöntemi ile azaltılarak ihtiyacımız (DDİ için 1.5 kg, HGI için 2 kg) kadar numune kullanılmıştır.

4.2 LABORATUVAR ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Nasifoğlu, Çay ve Piriç kömür damarını temsili olarak alınan tüvenan kömür, hava ile teması kesilecek şekilde paketlenerek ZBEÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi laboratuvarına getirilmiştir. Çalışma kapsamında, üç kömür damarından alınan numuneler üzerinde kesilebilirliği belirlemek amacıyla Protodyakonov darbe dayanım indeksi (DDİ) (Şekil 9) ve öğütülebilirliği belirlemek amacıyla da Hardgrove öğütülebilirlik indeksi (HGİ) (Şekil 10 deneyleri yapılmıştır.



Şekil 9. Darbe dayanım indeksi deney aleti.

Şekil 10. HGİ deney aleti.

4.2.1 *Darbe Dayanım İndeksi (DDİ)*

Bu deney yöntemi kömürlerin dayanım özellikleri, kırılganlık ve kazılabilirlik ölçütleri hakkında bilgi vermektedir. Deney aleti Şekil 9'da gösterilmiştir ve bu deney yöntemi daha sonraları Evans ve Pomeroy (1966) tarafından standart hale getirilmiştir (Su, 2003). Bu deneyde, kömür örnekleri 25.4 mm'lik elekten elenir ve elek üstü 3.6 kg.lık çekiç ile birer defa vurularak kırılır ve tekrar elenir. Elek altına geçen parçalar bu kez 9.52 mm'lik elek ile elenir ve -9.52/+3.17 mm fraksiyonundan 100 ± 0.05g' lık örnek (en az altı adet) alınır. Her bir örnek grubu önce tartılır (W_0) sonra silindirik kaba konulan her örnek üzerine ~ 1.8 kg kütlesindeki çekiç 20 kere düşürülür. Kırılan örnekler 3.17mm.lik elekten elendikten sonra elek üstü tartılır (W_1). Elek üstü DDİ değeri olarak elde edilir (Eşitlik 1). Elde edilen darbe dayanım indeks değerlerine göre kömürlerin sınıflaması Çizelge 4'te verilmiştir (Bilgin vd. 1988).

$$DD\dot{I} = W_1/W_0 * \%100 \quad (1)$$

Çizelge 4. DDİ deneyine göre kömürlerin sertlik sınıflaması (Bilgin vd.,1988).

DDİ Değeri	Sınıfı
DDİ> 75	Aşırı Sert
75> DDİ> 60	Çok Sert
60> DDİ> 40	Sert
DDİ <40	Yumuşak

Havzada daha önce farklı Müesseslerdeki kömür damarları üzerinde DDİ deneyleri yapılarak kömürlerin kazılabilirlik sınıflamaları ortaya konulmuştur (Bilgin vd., 1988; Akçın ve Baş 1990; Çoşkun, 1999; Su, 2003; Esen, 2013).

Bilgin vd. (1988) Amasra karbonifer Havzası'ndaki kömür damarlarının mekanize dayanımları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda DDİ'ye göre sınıflandırıldığında genel olarak çok sert ve sert sınıfa girdiği kazı açısından da zorlanacağı sonucuna varmışlardır. Akçın ve Baş (1990), Asma kömürleri (Hacımemiş, Çay, Kurul, Sulu) için yaptıkları darbe dayanımı deneylerin sonuçlarına göre (40-56) orta sert damarlar sınıfında olduğunu bulmuşlardır. Çoşkun (1999)'da Zonguldak Havzası kömürlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi konusunda bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, TTK tarafından, üretim ya da hazırlık çalışmaları sürdürülen 11 adet kömür damarından örnek alınmış ve dayanım ve sertlik indeks deneyleri (DDİ) yapmıştır. ÜTİM için (Sulu, Taşbaca, Hacımemiş, Acenta) DDİ sonuçlarının 44-63 arasında değiştiği ve yumuşak – sert sınıfa girdiğini saptamıştır. Su (2003), kömürün dayanım ve öğütülebilirlik özelliklerinin belirlenebilmesi amacı ile Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda 4 Müessesede DDİ ve HGİ deneyleri yapmıştır. ÜTİM için (Nasifoğlu, Sulu, Çay) DDİ sonuçlarının 40-43 arasında değiştiği ve genel olarak yumuşak sınıfa girdiğini belirlemiştir. Esen (2013), tarafından yapılan çalışma sonucunda, DDİ ile kömürün gaz ve toz püskürtmesi arasında bir ilişki belirlemiştir. Daha önce ani püskürme olaylarının meydana geldiği yerlerden alınan numunelerde saptanan tüm değerlerde DDİ 30'dan küçük olduğu ve buna göre darbe dayanım indeks değerinin 30'a çok yakın ve daha küçük kömürlerde ani püskürmeye eğilimli oldukları saptamıştır.

4.2.2 *Hardgrove İndeks Deneyi (HGİ)*

Bu deney, kömürün ne kadar kolay veya zor öğütülebileceğini gösteren bir deneydir. Kömürlerin, öğütülebilirlik özellikleri ile dayanım, kırılganlık ve kazılabilirlik özellikleri arasında ilişki bulunmaktadır. HGİ değerinin artması, kömürün daha kolay öğütülebildiğini göstermektedir. Deney aleti Şekil 10'da gösterilmiştir. Hardgrove İndeks deneyinin yapılması için Hardgrove değirmeni kullanılmaktadır. Buna göre öncelikle değirmendeki çukur kap ve çelik bilyalar fırça ile iyice temizlenir ve 50 gr'lık numuneler değirmen kabına boşaltılır. Değirmen 20 devir/dk'lık hızla 60 defa döndürülür ve otomatik olarak durduktan sonra, çukur kap değirmenden çıkartılır. Kap

içerisinde bulunan öğütme halkasındaki tozlar ve öğütülen numune 0.075 mm'lik elek üzerine boşaltılır. Eleğin üzeri kapağıyla kapatıldıktan sonra 5 dk elenir. Daha sonra kapak açılıp, numune biraz karıştırılmış ve 15 dk daha elenir. Bu işlem sonunda 0.075 mm'lik elek üzerinde kalan malzeme tartılır ve Eşitlik 2 ile Hardgrove İndeks değeri hesaplanır.

$$HGI = 13 + (6.93 x W) \quad (2)$$

Burada;
W = 0.075 mm'lik elek üstünde kalan malzeme miktar (gr).

Bu deney yöntemiyle kömürlerin öğütülebilirliğini belirlemek amacıyla sınırlı sayıda araştırmacı çalışma yapmıştır. Su (2003), tarafından yürütülen çalışmada, TTK Üzülmez Müessesesi Nasifoğlu, Çay, Sulu damarlarından alınan numuneler üzerinde kömürlerin öğütülebilirliğini belirlemek için Hardgrove İndeks deneyi yapmıştır. Deney sonuçları Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Deney sonuçları (Su, 2003).

Damar Adı	**HGİ**	**Öğütülebilirlik (Su, 2003)**
Çay	87.84	Kolay
Sulu	77.45	Orta Derecede Zor
Nasifoğlu	80.91	Kolay

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada, -200/-215 Nasifoğlu, -273/-280 Çay ve -225/-240 Piriç damarlarına ait ara kesme Schimdt çekici sertlik değerlerinin dayanım sınıflaması ISRM (1978)'e göre ve Deere ve Miller (1966)'a göre de abaktan tahmini tek eksenli basınç dayanımı Çizelge 6'da verilmiştir. Aynı damarlarlara ait kömür Schimdt çekici sertlik değerleri ve Bilgin vd. (1992) göre kazılabilirlikleri Çizelge 7'de gösterilmiştir.

Çizelge 6. İncelenen damarlara ait ara kesme Schmidt çekici sertlik değerleri.

Damar Adı	Ölçüm Yapılan Şilt No	Ara Kesme Kalınlığı Ort. (m)	SCH Ort.	Dayanım Sınıflaması ISRM (1978)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa) Deere and Miller(1966)
-200/-215 Nasifoğlu	21.	0.30	36.90±4.77	Sert	73
	25.	0.50	30.70±2	Sert	62
	35.	0.30	29.80±2.35	Az sert	61
	40.	0.90	31.20±1.99	Sert	63
	44.	1.10	36.20±1.23	Sert	72
	52.	1.10	30.50±2.72	Sert	62
	56.	0.70	33.90±1.45	Sert	70
-273/-280 Çay	5.	0.50	33.00±1.7	Sert	67
	10.	0.40	33.30±1.57	Sert	67
	15.	0.40	34.30±1.25	Sert	70
	20.	0.45	32.10±2.81	Sert	66
	25.	0.40	32.90±2.73	Sert	67
-225/-240 Piriç	9.	1.0	34.5±1.64	Sert	72
	14.	0.9	36.2±1.83	Sert	77
	19.	1.0	32.3±1.72	Sert	66
	24.	1.0	37.6±2.10	Sert	81
	28.	0.95	31.9±1.75	Sert	65
	32.	1.0	35.1±1.60	Sert	74
	36.	1.05	31.6±1.94	Sert	64

Çizelge 7. İncelenen damarlara ait kömür için Schmidt çekici sertlik değerleri.

Damar Adı	Ölçüm Yapılan Şilt No	Kalınlık Ort. (m)	SCH Ort.	Bilgin vd. (1992) göre kazılabilirlikleri
-200/-215 Nasifoğlu	21.	1.70	14.70±1.7	Kolay kesilebilirler
	25.	1.70	15.10±1.1	Kolay kesilebilirler
	35.	1.60	15.10±0.74	Kolay kesilebilirler
	40.	1.20	17.00±1.05	Kolay kesilebilirler
	44.	1.40	16.10±0.88	Kolay kesilebilirler
	52.	1.40	13.90±1.85	Kolay kesilebilirler
	56.	1.50	15.20±0.92	Kolay kesilebilirler
-273/-280 Çay	5.	1.70	13.60±0.97	Kolay kesilebilirler
	10.	1,80	14.60±0.97	Kolay kesilebilirler
	15.	1.80	19.10±1.1	Kolay kesilebilirler
	20.	1.55	14.00±0.47	Kolay kesilebilirler
	25.	1.80	13.90±0.99	Kolay kesilebilirler
-225/-240 Piriç	9.	1.00	17.00±1.05	Kolay kesilebilirler
	14.	0.90	16.40±0.84	Kolay kesilebilirler
	19.	1.00	16.60±1.43	Kolay kesilebilirler
	24.	1.00	19.40±1.45	Kolay kesilebilirler
	28.	0.95	16.90±1.66	Kolay kesilebilirler
	32.	1.00	16.10±0.99	Kolay kesilebilirler
	36.	1.05	15.00±1.33	Kolay kesilebilirler

Bu çalışmada, -200/-215 Nasifoğlu, -273/-280 Çay ve -225/-240 Piriç damarlarına ait kömür örneklerinin öğütülebilirliğini gösteren HGİ değerleri ve Su (2003)'e göre öğütülebilirlik sınıflaması ile Darbe Dayanım İndeks (DDİ) değerleri ile Bilgin vd. (1992)'ye göre kesilebilirlik sınıflaması Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. İncelenen damarlara ait kömür için Hardgrove İndeks (HGİ) ve Darbe Dayanım İndeks (DDİ) değerleri ve sınıflamaları.

Damar Adı	HGİ	Su (2003) Göre Öğütebilirlik	DDİ	Bilgin vd. (1992) Göre Kesilebilirlik
-200/-215 Nasifoğlu	93.85±2.61	Kolay	39.09±2.57	Kolay kesilebilir
-273/-280 Çay	93.92±1.92	Kolay	38.63±1.57	Kolay kesilebilir
-225/-240 Piriç	93.49±4.94	Kolay	34.42±2.28	Kolay kesilebilir

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

-200/-215 Nasifoğlu kömür damarı stampı 2.0–2.10 m arasında değişmekte olup ara kesme olarak ince taneli kumtaşı bulunmakta ve ara kesme kalınlığı 0.30–1.10 m arasında değişmektedir. Arında yapılan Schmidt çekici ölçümlerine göre ara kesme kumtaşının ISRM (1978)'e göre sert sınıfta yer aldığı, Deere ve Miller (1966) abaklarına göre tahmini tek eksenli basınç dayanımlarının 60–72 MPa arasında olduğu belirlenmiştir. Kömür için ölçülen Schmidt çekici değerlerinin 14–17 arasında değiştiği ve Bilgin vd. (1992) sınıflamasına göre kolay kesilebilir sınıfta yer aldığı saptanmıştır.
-273/-280 Çay kömür damarı stampı ortalama 2.20 m olup ara kesme ince taneli kumtaşıdır ve ortalama ara kesme kalınlığı 0.45 m'dir. Schmidt çekici ölçümlerine göre ara kesmeler ISRM (1978)'e göre sert kaya sınıfında yer almakta, tahmini tek eksenli basınç dayanımları yaklaşık 70 MPa civarında değişmektedir. Kömür için elde edilen Schmidt çekici değerleri 14–19 arasında olup Bilgin vd. (1992)'ye göre kolay kesilebilir sınıfında değerlendirilmiştir.

-225/-240 Piriç kömür damarında stamp kalınlığı ortalama 1.90 m olup ara kesme ince-orta taneli kumtaşından oluşmaktadır. Ölçümlerin yapıldığı dönemde ara kesme çoğunlukla taban taşında yer almakta ve kalınlığı 0.90–1.00 m arasında değişmektedir. Schmidt çekici ölçümlerine göre ara kesmeler sert kaya sınıfında değerlendirilmiş ve tahmini tek eksenli basınç dayanımları 65–75 MPa arasında bulunmuştur. Kömür için ölçülen Schmidt çekici değerlerinin 15–20 arasında değiştiği ve Bilgin vd. (1992)'ye göre kolay kesilebilir sınıfta olduğu belirlenmiştir.

Laboratuvar deneylerinden elde edilen HGİ değerlerinin üç damar için yaklaşık 93–94 aralığında olması, kömürlerin yüksek öğütülebilirlik özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. DDİ değerlerinin 34–39 arasında değişmesi ise kömürlerin yumuşak karakterde olduğunu ve mekanize kazı açısından uygun özellikler taşıdığını ortaya koymaktadır. Elde edilen HGİ ve DDİ sonuçlarının Schmidt çekici ölçümleri ile

uyumlu olması, incelenen kömür damarlarının kazılabilirlik açısından birbirini destekleyen mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir.

Ara kesmelerin sert kaya sınıfında yer almasına rağmen kömür damarlarının kolay kesilebilir özellik göstermesi, uygun kazı makinesinin seçilmesi durumunda mekanize kazının uygulanabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte ara kesme kalınlığının bazı bölgelerde 1 m'nin üzerine çıkması, makine performansı ve keski tüketimi açısından dikkate alınması gereken önemli parametredir.

Bu çalışma sonucunda, incelenen Nasifoğlu, Çay ve Piriç kömür damarlarının mekanik özellikleri bakımından mekanize kazı uygulamalarına uygun olduğu değerlendirilmiştir. Özellikle kömürlerin düşük Schmidt çekici değerleri, yüksek HGİ ve düşük DDİ değerleri, bu damarlarda mekanize üretime geçiş için önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak mekanize üretim sistemlerinin başarısı yalnızca kömürün kazılabilirliğine bağlı olmayıp damar eğimi, damar kalınlığı, ara kesme özellikleri, jeolojik süreksizlikler, tahkimat sistemi ve panoların geometrik özellikleri gibi işletme koşullarının birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Seçilecek makine için kesici uç tüketimi, enerji gereksinimi ve üretim performansını değerlendirecek pilot saha uygulamaları gerçekleştirilmelidir. Farklı damar ve panolarda Schmidt çekici, HGİ ve DDİ deneylerinin yanı sıra Cerchar aşındırıcılık indeksi, nokta yük dayanımı ve tek eksenli basınç dayanımı gibi ilave kaya mekaniği deneyleri yapılarak daha kapsamlı bir veri tabanı oluşturulmalıdır. Mekanize üretim uygulamalarının iş güvenliği, üretim verimliliği ve işletme maliyetleri üzerindeki etkileri uzun dönemli saha verileriyle izlenmeli ve elde edilen sonuçlar gelecekteki mekanizasyon projelerine rehber olacak şekilde değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

Akçın, H. 2016. Maden Mekanizasyonu Ders Notları, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, s. 70-75.

Akçın, H. ve Baş, A. 1990. Asma Kömür Damarlarının Darbe Dayanım İndeks Değerleri ve Kazılabilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi, Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, Ankara, s. 17-34.

ASTM D5873-14. 2014. Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bilgin, N., Akgün, İ. ve Shahriar, K. 1988. Amasra Karbonifer Havzasındaki Damarların Mekanik Dayanımı Açısından Sınıflandırılması, 6. Türkiye Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, s. 411–425.

Bilgin, N., Phillips, H.R. ve Yavuz, N. 1992. Kömür Damarlarının Kazılabilirlik Yönünden Sınıflandırılması ve ELİ Darkale Ocağında Sabanlı Ayak Uygulaması Örneği, 8. Türkiye Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, s. 31-49.

Çakmakçıoğlu, M. 2026. Üzülmez Taşkömürü İşletme Müessesesi 3. Ocak üretim ve pano bilgileri, Türkiye Taşkömürü Kurumu Üzülmez Taşkömürü İşletme Müessesesi, kişisel görüşme.

Deere, D.V. ve Miller, R.L. 1966. Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock, University of Illinois, Urbana, pp. 162-179.

Esen, O. 2013. Türkiye Taşkömürü Kurumu Ocaklarındaki Ani Gaz ve Kömür Püskürmesi Olaylarının Değerlendirilmesi ve Olayları Etkileyen Faktörlerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 68-69.

Evans, I. ve Pomeroy, C.D. 1966. The Strength, Fracture and Workability of Coal, Pergamon Press, Oxford, pp. 159-169.

ISRM. 1978. Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, s. 89–98.

ISRM. 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006, International Society for Rock Mechanics.

Koca, M. 2026. Üzülmez Taşkömürü İşletme Müessesesi 1. Ocak üretim ve pano bilgileri, Türkiye Taşkömürü Kurumu Üzülmez Taşkömürü İşletme Müessesesi, kişisel görüşme.

Coşkun, M. (1999). Zonguldak havzası kömürlerinin mekanik özellikleri (Tez No. 85180) [Yüksek lisans tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Özkan, İ. ve Kaya, M. 2020. Zayıf Kaya Malzemelerinin Yerinde Dayanımının Belirlenmesinde İndeks Deneylerin Kullanımı ile İlgili Bir Yaklaşım, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), pp. 135–150.

Su, O. 2003. Kömürün Dayanım Özellikleri ile Öğütülebilirliği Arasındaki İlişkilerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, s. 60-61.

TTK. 2024. Üzülmez Taşkömürü İşletme Müessesesi Faaliyet Raporu, Türkiye Taşkömürü Kurumu, Zonguldak.

TTK ÜTİM. 2026. Asma-Dilaver İşletmesi Pano Planları ve İşletme Verileri, Türkiye Taşkömürü Kurumu Üzülmez Taşkömürü İşletme Müessesesi, Zonguldak.

Yaralı, O. 2024. Maden Mekanizasyonu Ders Notları, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, s. 11-25.

ZONGULDAK TAŞKÖMÜRÜ HAVZASI'NDA GÜNÜMÜZE DEK KULLANILAN GALERİ AÇMA MAKİNELERİ VE EDİNİLEN TECRÜBELER

ROADHEADERS USED TO DATE AND LESSONS LEARNED IN ZONGULDAK HARDCOAL BASIN

Okan Su*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Zonguldak

ÖZET Bu bildiride, ilk olarak havzanın karmaşık jeolojik yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda bugüne kadar kullanılan galeri açma makinalarının teknik özellikleri verilmiştir. Bu bağlamda 2006 yılından günümüze kadar havzada kullanılan eksenel ve transvers tip galeri açma makinelerinin kazı hızı, keski tüketimi ve diğer performans verileri incelenmiştir. Bununla birlikte galeri açma makinesi (GAM) ilerlemelerinde yaşanan tecrübeler ve karşılaşılan sorunlar analiz edilmiştir. Sonuç olarak, Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda başarılı bir GAM kullanılabilirliği ile ilgili makine seçim kriterlerinin ve makine tasarımının havzanın jeolojik, mekanik ve kazılabilirlik özelliklerine uygun olarak belirlenmesinin kritik öneme sahip olduğu vurgulanmış ve havza yapısına uygun GAM seçimi ile ilgili öneriler sunulmuştur.

ABSTRACT In this paper, the complex geological characteristics of the Zonguldak Hardcoal Basin is initially introduced. Subsequently, the technical specifications of the roadheaders that have been used in the basin so far is presented. In this context, the excavation performances of axial and transverse-type roadheaders employed in the basin from 2006 to the present, including excavation rate, pick consumption, and other operational performance parameters, are evaluated. In addition, the lessons learned and experiences gained during roadheader operations and the major problems encountered in the field are analyzed. Based on these evaluations, it is emphasized that the successful selection and application of roadheaders in the Zonguldak Hardcoal Basin critically depends on designing machines in accordance with the basin's geological, mechanical, and rock cuttability characteristics. Finally, recommendations are provided for the selection of roadheaders suitable for the geological conditions of the Zonguldak Basin.

* *okansu@beun.edu.tr*

1. GİRİŞ

Türkiye taşkömürü madenciliğinin kalbi sayılan Zonguldak Taşkömürü Havzası (ZTH), yalnızca ülkemizin değil, aynı zamanda bölgesel endüstriyel kalkınmanın da temel taşlarından biridir. 19. yüzyıldan bu yana havzada gerçekleştirilen madencilik faaliyetleri, ülke sanayisinin gelişiminde önemli rol oynamıştır. Madencilik teknolojilerinin gelişimi ile yeni nesil kazı, yükleme, tahkimat vb. ekipmanlar otomasyon, mekanizasyon, yapay zeka ve robotik teknolojiler ile daha verimli, güvenli ve çevre dostu hale gelmeye başlamıştır. Bu çerçevede, hazırlık ilerlemelerinde kullanılan galeri açma makineleri önemli bir teknolojik dönüşüm yaşamaktadır. 2023 yılı itibarıyla üretilmeye başlayan yeni galeri açma makinelerinin %15'inden fazlası kısmi veya tam otomasyon sistemleriyle donatılmıştır. Bu durum işçilik maliyetlerinin azalmasına ve randımanların artırılmasına da katkı sağlamaktadır. 2024 yılı itibarıyla özellikle Avrupa ve Asya'nın bazı bölgelerinde 250'den fazla elektrikle tahrik edilen GAM'lar çalışmaya başlamıştır. SANY firması yapay zeka (AI) tabanlı 4 yeni modelini piyasaya sürmüştür (URL-1). Bu makinalarda ayrıca, 1080P HD kamera, kızılötesi aydınlatma, fay ve arıza uyarı sistemi, hassas konumlandırma, otomatik video ve arını tam olarak görüntüleme destekleri bulunmaktadır.

Her galeri açma makinesi belirli jeolojik koşullarda optimum performans gösterecek şekilde tasarlanır. ZTH'nin jeolojik ve tektonik yapısı, aşındırıcı kömür çevre kayaçları, kompleks üretim koşulları, dik damar eğimlerine sahip olması, mekanize kazı uygulamalarını diğer havzalara (Çayırhan, Soma, Edirne, vb.) kıyasla daha zorlu hale getirmektedir. Bu durum klasik üretim yöntemlerinden çok, havzanın özelliklerine özgü daha esnek ve uyarlanabilir mekanize sistemlerin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Havzada bugüne kadar farklı türde GAM uygulamalarının denemeleri sahada yapılmış ve bu konuda birçok çalışma yayınlanmıştır. Akçın vd. (2005) havza kömür çevre kayaçlarının kazısında güçlü ve ağır galeri açma makinelerinin kullanılabileceği, ancak kumtaşında keski tüketiminin yüksek olacağı belirtilmiştir. Ersoy vd. (2016) Amasra bölgesinde çalışan R60T galeri açma makinası ile çeşitli tahmin modelleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Yaralı vd. (2018) beş farklı müesseseden aldıkları örnekler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre kullanılabilecek galeri açma makinası ve performansını tahmin etmeye çalışmıştır. Yaralı ve Kıran (2018) havza kayaçlarının bazı laboratuvar ve arazi çalışmaları ile ilgili sonuçları ve GAM kullanılabilirliği ile ilgili önerilerini sunmuştur. Akkaş vd. (2018, 2019) kollu galeri açma makinası performansını Schmidt çekiciyle ve farklı kazılabilirlik kriterleri açısından değerlendirmelerini yapmıştır. Su ve Akkaş (2020) Amasra'da çalışan iki transverse (enine) tip galeri açma makinasında kullanılan konik keskilerin arazideki aşınma türlerini ve performanslarını incelemişlerdir. Bilgin (2023) ise ülkemizde kullanılan diğer galeri açma makinaları performans analizleri ile ilgili değerlendirmeler yapmıştır.

Bu bildiride Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda farklı güç ve ağırlık sınıflarında kullanılmış ve halen kullanılmakta olan makinelerin kazı performansları değerlendirilmiş, ilerleme hızı, keski tüketimi, makine kullanım oranı ve karşılaşılan

işletme problemlerine göre elde edilen tecrübeler irdelenmiştir. Ayrıca gelecekte gerçekleştirilecek mekanizasyon yatırımları açısından makine seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar sunulmuştur.

2. ZONGULDAK TAŞKÖMÜRÜ HAVZASI JEOLOJİSİ

Kömür madenciliğinde kazı makinesinin çalışacağı bölgenin jeolojisi makine performansı açısından çok önemli bir yer tutmaktadır. Klasik kazı yöntemlerinde işçilik maliyetlerinin yüksek ve randımanların düşük olması kömür ocaklarında makine ile kazı (mekanizasyon) yapılmasını ön plana çıkarmaktadır. Makine ile kazı hem emniyetli çalışma ortamı sağlar, hem de daha ekonomiktir. Bunların yanı sıra teknolojik açıdan da ilerleme hızlarının artırılmasını sağlar. Günümüzden 30-35 sene önceki jeolojik ve tektonik koşullar genellikle zayıf (yumuşak) dayanımdaki kayaçların kazılmasına daha çok olanak sağlarken, günümüzde elde edilen bilgi birikimi, tecrübe ve teknolojik yenilikler ışığında hemen hemen birçok kayaç türü güçlü makineler veya farklı kazı teknikleriyle mekanize olarak kazılabilmektedir. Ancak, Zonguldak Taşkömürü Havzası jeolojik yapısı da mekanize kazı uygulanabilirliğini etkilemektedir. Bu çerçevede havzada karşılaşılan kömür çevre kayaçları ile faylar ve süreksizliklerin mekanize kazı açısından değerlendirmesi aşağıda yapılmıştır.

2.1. Kayaç Yapısı

Galeri açma makinası performansı çalışılan formasyonun özelliklerine önemli ölçüde bağlıdır. Yumuşak ve orta dayanımdaki kayaçlarda bu makineler yüksek randıman sağlarken, granit ve aşındırıcılığı yüksek kayaçlarda kesici kafalarda hızlı aşınma meydana gelmektedir. Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda jeolojik koşullar ve kayaç yapısı GAM kullanımını önemli derecede etkilemektedir.

Zonguldak Taşkömürü Havzası, jeolojik açıdan Türkiye'nin en karmaşık kömür havzalarından biridir. Havzada kömür damarları, ağırlıklı olarak karbonifer yaşlı sedimenter kayaçlar içerisinde yer almakta olup, kayaç yapısı hem litolojik çeşitlilik hem de tektonik deformasyon bakımından oldukça değişkendir. Havza iki kere tektonizma geçirmiş olması nedeniyle jeolojisi oldukça karmaşıktır. Bu durum yeraltı galerilerinin açılmasını ve mekanize kazı makinelerinin kullanımını da kısıtlamaktadır. Havzada kömür çevre kayaçları olarak kumtaşı, şilttaşı, şeyl, kiltaşı ve konglomeradan oluşmaktadır. Kumtaşı ortalama dayanımı 80-100 MPa civarında orta–yüksek dayanımlıdır. Havzanın bazı bölgelerinde kumtaşı içindeki kuvars içeriğinin yüksek olması nedeniyle oldukça aşındırıcı olmaktadır. Bu durum makine kullanımı zorlaştırmakta ve keski kullanımını artırmaktadır. **S**ilttaşı ise 60-80 MPa dayanımda, orta dayanımlı, ince taneli bir kayaçtır. Kazılması kumtaşına göre daha kolaydır, ancak tabakalanma düzlemleri boyunca parçalanma eğilimi gösterebilir. Konglomera ise yine yüksek dayanımlı olup, iri taneli yapısı ve içerdiği çakıllar mekanize kazıyı zorlaştırmaktadır. Kiltaşı ve şeyl ise düşük dayanımlı kayaçlar olmakla birlikte, nem etkisiyle şişme ve kolay deformasyon olmasından dolayı diğer kayaçlara göre kazılabilirliği daha kolaydır, ancak kesici kafaya yapışkanlık özelliği verimi

düşürebilir. Bu çerçevede kazı yapılacak formasyondaki kayacın jeomekanik, kazılabilirlik ve aşındırıcılık deformasyon özelliklerinin önceden belirlenmesi uygun galeri açma makinesinin seçimi, kesici kafa tasarımı ve kazı performansının öngörülmesi oldukça önem taşımaktadır.

2.2. Faylar ve Süreksizlikler

Oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan Zonguldak havzasındaki faylar ve süreksizlikler galeri açma çalışmalarını doğrudan etkileyen en önemli jeolojik faktörlerdendir. Gök (1970) Karadon, Gelik, Üzülmez ve Kilimli'de 125 adet, Kozlu da ise 29 adet fayın var olduğunu belirtmiştir. Bölgede fay, kırık zonu, süreksizlik, antiklinal ve senklinal yapıların yoğunluğu, sedimantolojik açıdan karmaşık bir yapıya sahip olduğunun önemli bir göstergesidir. Fay zonlarındaki ezilmiş, parçalanmış ve ufalanmış kaya parçaları kesici kafanın dönme hızını yavaşlatır ve makine performansını düşürür. Sert kayaçlarda ilerleme hızı düşerken, zayıf kayaçlarda hızlansa bile galeri açma makinası üzerinde stabilite sorunları yaratır. Keskiler üzerinde rol oynayan kesme kuvvetleri önemli değişimler meydana gelir. Ortalama kesme kuvveti değerleri ve dolayısıyla kesici kafa üzerindeki titreşimler artar. Fay atımları nedeniyle galeri ekseni değişebilir ve güzergâh sapmaları meydana gelebilir. Tüm bu nedenlere bağlı olarak kazı yapılacak arının RQD değerinin belirlenmesi çok önemlidir. Farklı jeolojik koşullara uyum sağlayabilen özelleştirilebilir kesici kafa tasarımlarına yönelik talepte de artış yaşanmaktadır. 2023 yılı itibarıyla dünya genelinde farklı zemin ve kaya koşullarına uygun 60'tan fazla kesici kafa konfigürasyonu kullanılmıştır (URL-1).

3. HAVZADAKİ GALERİ AÇMA MAKİNESİ DENEYİMLERİ

Galeri açma makinelerinin kullanım kurulu gücü, makinenin boyutuna ve kullanım amacına bağlı olarak değişmektedir. Yumuşak kayaçlarda çalışmak üzere tasarlanan hafif tip makineler (8-40 ton) genellikle 50–170 kW aralığında kesme kafası gücüne sahiptir. Orta sınıf galeri açma makineleri (40-70 ton) çoğunlukla 160–230 kW kesme kafası gücünde, daha zorlu jeolojik koşullarda (100-120 MPa) çalışmak üzere tasarlanan ağır tip makinelerde (70-110 ton) ise 240-300 kW civarındadır. Ekstra ağır modellerde (> 110 ton) ise 300–500 kW seviyelerine ulaşmaktadır (Heiniö, 1999; Bilgin vd., 2014). Toplam kurulu güç ise, yalnızca kesici kafa gücü değil, aynı zamanda hidrolik sistemler, malzeme taşıma (yükleme ve konveyör) sistemleri ve kontrol sistemleri gibi yardımcı ekipmanların güç gereksinimlerini de kapsamaktadır.

GAM ağırlık ve güç özelliklerinin yanı sıra jeolojik koşullar ve gerçekleştirilecek kazı işinin niteliğine bağlı olarak eksenel (axial) ve enine (transverse) tip farklı kesici kafa konfigürasyonları kullanılmaktadır. Havzada ilk galeri açma makinası uygulaması bundan yirmi yıl önce 2006 yılında denenmiş ve bu zamana kadar hem eksenel hem de transvers türde makinalar ile farklı kesme kafası tasarımında makineler kullanılmaya çalışmıştır. Bu makinalardan Amasra bölgesinde çalışanlarda iyi performans sergilemiş olsa da, Karadon, Gelik ve Armutçuk'taki denemelerde istenilen kazı

performansı sağlanamamıştır. 2006'dan bu zamana kadar kullanılan GAM'ların bazı teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. ZTH'da kullanılmış ve halen kullanılmakta olan galeri açma makinalarının teknik özellikleri.

Özellik	KSP-42	AM-105	DH-R60T	DH-R75T	EBZ160	EBZ260
Makine ağırlığı	75 ton	118 ton	69 ton	79 ton	49 ton	99 ton
Ma σ_C (MPa)	120	160	100	120	80	100
Kazı kesiti (m^2)	12-37	41	14-31	14 -38	12,9-30,5	34
Kesici kafa türü	Eksenel	Transvers	Transvers	Transvers	Eksenel	Eksenel
Çalışma eğimi	±12 °	±20 °	±18 °	±18 °	±18 °	±18 °
Kes. kafa gücü (kW)	160-200	300	160	200	160	260
Toplam güç (kW)	350-390	478	305	355	250	472
Kes. kafa dev (dev/dk)	33	51	64,9	52,4	46	54
Keski sayısı (adet)	42	87	2 x 42	2 x 55	-	-
Kes. kafa çapı (m)	0,95	1,29	0,85	1,14	-	-
Zemin basıncı (MPa)	0,16	0,22	-	-	0,15	0,16

3.1. Yasinovatskiy KSP-42 Model Gam Uygulaması

Havzadaki ilk GAM uygulaması TTK'ya bağlı Karadon müessesesinde 2006 yılında Ukrayna'da Yasinovatskiy Fabrikası'ndan 1.000.050 $'a satın alınan KSP-42 galeri açma makinesi -540 katında kullanılmıştır.

Türkiye Taşkömürü Kurumu, galeri ilerlemelerindeki düşme eğilimini tekrar yükseltebilmek adına 2000'li yılların başlarında havzada ilk defa bir galeri açma makinası kullanmak istemiştir. Bu amaçla Karadon Yeni Servis Kuyusu -540 kat bağlantı galerisini sürme işini özel bir firmaya (Yapı-Tek) vermiştir. 18 m^2 kesitli galeride basınç dayanımı (σ_C) 100 MPa'ın üzerindeki kumtaşı içerisinde, 160 kW kesici kafa gücüne sahip KSP-42 model eksenel tip kollu galeri açma makinesi ile kazı çalışması denenmiştir. Ancak yerinde yapılan kazı testleri sonucunda 2 günde 2 m ilerleme yapılmış ve 540 adet keski tüketimi olmuştur. 1 m^3 kayaç kazısı için 15 adet keski harcanmıştır. Daha sonra Kennametal, Betek ve Sandvik'ten alınan farklı keskilerle deneme yapıldıktan sonra keski sarfiyatı 2,5 adet/m^3'e düşmüştür. 1100 m'lik rekup galerisinde yaklaşık 415 m kazı (271 m kumtaşı ve konglomera, 106 m silttaşı, 38 m ise şistli kömür ve kömür) yapılabilmiştir. Yüksek keski tüketiminden dolayı, daha sonra hem delme-patlatma yöntemiyle hem de makinadan yararlanarak kazıya devam edilmiştir. 18 m^2'lik aynanın 10 m^2'si delme-patlatma yöntemiyle, 8 m^2'si ise makina ile kazılmıştır. Makine zaman zaman tarama ve posta kaldırma çalışmalarında da kullanılmıştır. Silttaşı formasyonunda makina ile günde 3 m kazı yapılabilmiştir. Silttaşında keski tüketimi 0,5 adet/m^3 olmuştur (Akçın ve Akkaş, 2011). Bunun yanında, makinanın yürütüldüğü Namuriyen yaşlı formasyonda, tabanı oluşturan kiltaşı ve şeyl seviyelerinin düşük taşıma kapasitesine sahip olması nedeniyle makinenin paletleri zemine batma problemi yaşamış, bu durum makinenin hareket kabiliyetine ve stabilitesine olumsuz etki yaratmıştır.

Dolayısıyla elde edilen bu başarısızlıktan dolayı makine sökülmüş ve ocak dışına çıkarılmıştır. Yeterli sayıda laboratuvar deneyi yapılmaksızın, tamamen öngörülere dayalı olarak yapılan yanlış makine seçimi kurumun gelecek vizyonunu da olumsuz yönde etkilemiş ve yıllarca delme-patlatma ile kazıya devam edilmiştir (Akçın ve Akkaş, 2011).

3.2. Voest Alpıne AM-105 Model Gam Uygulaması

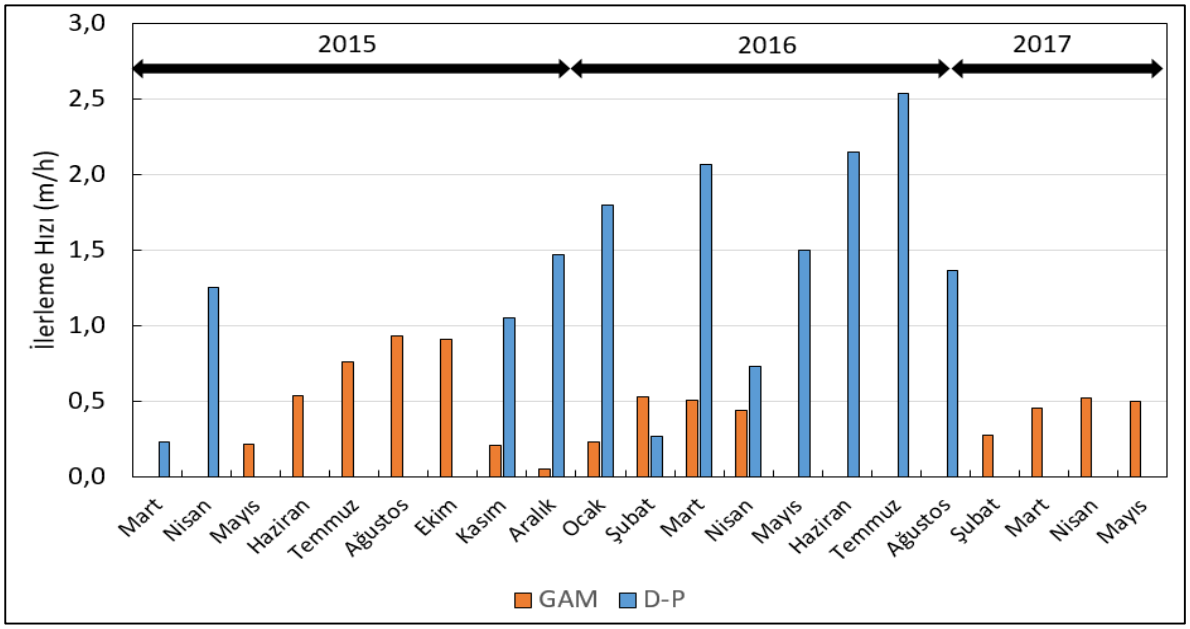
Hattat Enerji ve Maden Ticaret A.Ş. (HEMA) B sahasında kat galerileri ve taban yolları açmak üzere iki adet Sandvik AM-105 galeri açma makinası satın almıştır. İlk deneme çalışmasında, 08.01.2013-15.02.2013 tarihleri arasında, tek eksenli basınç dayanımı 80 MPa olan eklemli kireçtaşında açılan 30 m^2 kesitli galeride toplam 56 m ilerleme kaydedilmiştir. Buna göre net kazı hızı 0,84 m/h olarak hesaplanmıştır (Ersoy, 2014).

HEMA'nın alt işvereni olan Ersamak Makine ve Madencilik firması tarafından, 2017 yılı Mart–Haziran ayları arasında yine AM-105 galeri açma makinesi kullanılarak 14° eğimli bir desandre açılmıştır. Ortalama 26 m^2 kazı kesitine sahip galeride geçilen formasyonların %85'ten fazlasını kumtaşı oluştururken, silttaşı, kömür bantlı kumtaşı ve konglomera birimleri de kazılmıştır. Dört aylık çalışma sürecinde ortalama ilerleme hızının 2,05 ile 3,77 m/gün arasında değiştiği, keski tüketiminin ise 0,13-0,15 adet/m^3 aralığında gerçekleştiği belirlenmiştir (Yaralı ve Kıran, 2018).

3.3. Deilmann Haniell R60t ve R75t Model Gam Uygulamaları

Amasra B bölgesinde ana galeri, rekup ve taban yollarında kullanılmak üzere Hattat Enerji ve Maden Tic. A.Ş. tarafından Almanya'dan 1 adet DH R60T ve 2 adet DH 75T model galeri açma makinesi satın alınmıştır.

Şekil 1'de görüldüğü üzere DH-R60T 2015-2017 yılları arasında toplam 15 ay çalışmış ve 690,3 m kazı yapmıştır.



Şekil 1. DH-R60T galeri açma makinası ve delme patlatma (Akkaş, 2019).

Delme-patlatma ile 492,5 m galeri sürülmüştür. Kumtaşı gibi dayanımı yüksek kayaçlarda keski tüketiminin aşırı seviyelere ulaşması nedeniyle, kesici kafanın zarar görmemesi, keski tutucularının kırılmaması ve uç sarfiyatını en aza indirmek amacıyla delme-patlatma yöntemi ile kazı uygulanmıştır. DH-R60T daha çok silttaşı, kiltaşı ve kömür kazılarında tercih edilmiştir. 2015 yılı Ağustos ayında 84 m/ay kazı ile 0,93 m/h'lik en yüksek ilerleme hızına ulaşılmıştır (Akkaş, 2019).

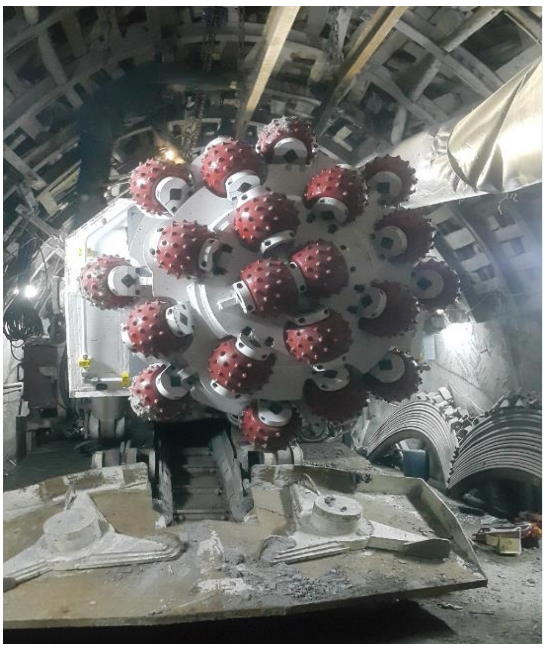
Amasra bölgesinde iki adet DH R75T galeri açma makinesi bir yıl boyunca işletmede galeri ilerlemelerinde kullanılmıştır. Bu makinaların bir tanesi 2015 Ekim ayından 2016 Kasım ayına kadar 1602 no'lu galeriyi sürmede kullanılmış ve toplam 877,5 m kazı yapmıştır. Makine, Eylül 2016 ayında aylık 132,5 m en iyi ilerleme performansına ulaşırken, en yüksek net kazı hızı ise 1,2 m/h olarak kaydedilmiştir.

Diğer DH R75T model galeri açma makinesi ise Ocak 2016 ile Mayıs 2017 tarihleri arasında 3704 No'lu Ana Galeri ve EC300 Üst Taban Yolu'nda toplam 996,5 m mekanize kazı gerçekleştirmiştir. Aynı dönemde 76 m uzunluğundaki galeri ise delme-patlatma yöntemiyle açılmış olup, toplam galeri ve taban yolu ilerleme uzunluğu 1.072,5 m'ye ulaşmıştır. Makinenin en yüksek aylık ilerleme performansı Nisan 2016'da 136 m/ay olarak gerçekleşmiş, bu dönemde ortalama net kazı hızı 1,0 m/h olarak kaydedilmiştir.

Sonuç olarak, Amasra B Bölgesi'nde kullanılan galeri açma makinelerinin her kayaç türünde aynı performansı göstermediğini**,** ancak uygun kayaç koşullarında 0,93-1,2 m/h aralığındaki ilerleme hızları ile başarılı mekanize kazı performansı sağladığı görülmüştür. Elde edilen veriler, mekanize kazının özellikle kömür, silttaşı ve kiltaşı gibi düşük ve orta dayanımlı kayaçlarda etkili olduğunu; buna karşılık dayanımı yüksek kumtaşı seviyelerinde keski aşınmasının artması nedeniyle delme-patlatma yönteminin tercih edilmesinin teknik ve ekonomik açıdan daha uygun olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla, jeolojik koşullara uygun doğru kazı makinesi seçiminin hem mekanize kazının verimliliği hem de işletme ekonomisini belirleyen önemli bir unsur olduğu ortaya çıkmıştır.

3.4. Yerli İmalat Gam Uygulaması

Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK), 2019 yılında Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda mekanizasyon çalışmalarını artırmak, hazırlık galerilerindeki ilerleme hızını yükseltmek ve delme-patlatma yöntemine olan bağımlılığı azaltmak amacıyla ikinci defa yerli üretim galeri açma makinesi ile kazı çalışmalarını havzada uygulamayı hedeflemiştir. Bu kapsamda, özel bir firmadan 6.000.000 TL'ye (1.100.000 $) dairesel kesitte bir kesici kafaya sahip galeri açma makinesi satın almıştır (Şekil 2). Makine, Türk Patent Enstitüsü Kurumunca "Faydalı Model" olarak tescillenmiştir. Türkiye'de ve dünyada ilk defa üretilen ve disk keskilerle tasarlanan bu makinenin Gelik ve Armutçuk işletmelerinde 2020-2022 yılları arasında deneme çalışmaları yapılmıştır.

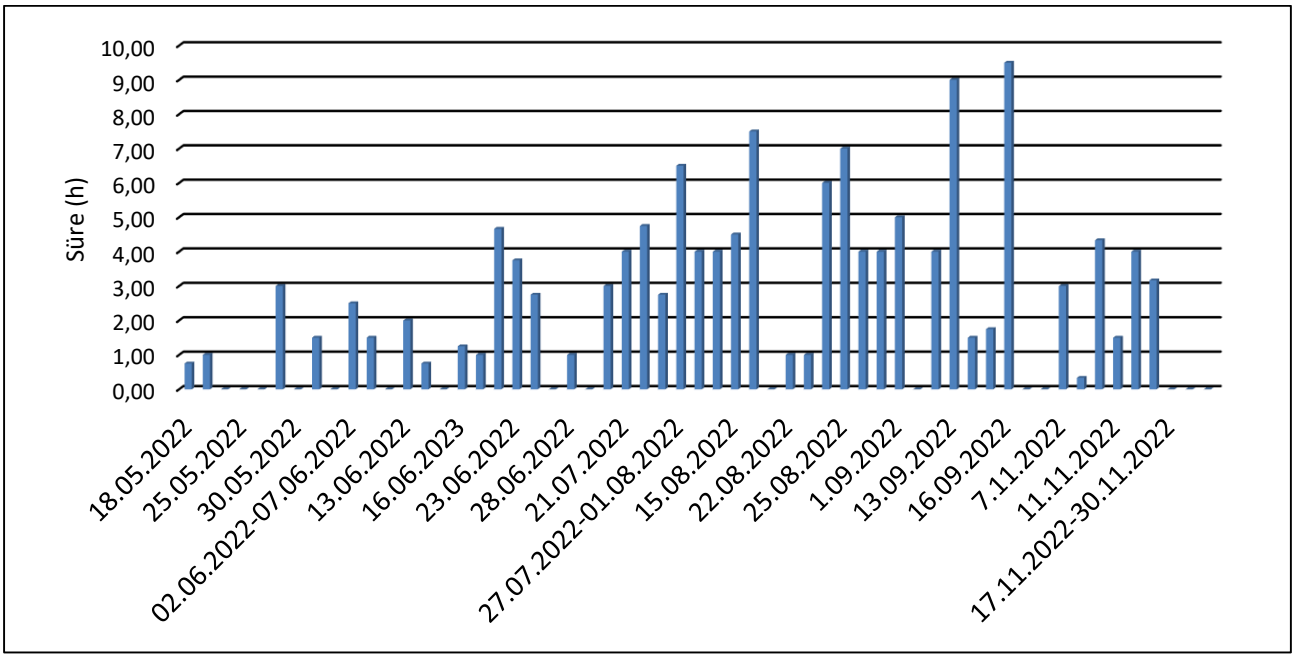


Şekil 2. Gelik ve Armutçuk'ta kullanılan GAM'da iki farklı kesici kafa tasarımları.

Makine, 50 tonluk ağırlıkta ve 150 kW kesici kafa gücüne sahip (toplam 350 kW kurulu güç) olarak imal edilmiştir ki bu ağırlık ve motor gücü normal koşullarda yumuşak-orta sert kayaçlara uygundur. Dairesel şekilli kesici kafası, yaklaşık 15-20 cm çapındaki disk keskilerden oluşturulmuştur. Bu yönüyle, havzada ve literatürde ilk defa tasarlanan ve sahada kullanılan galeri açma makinesi olma özelliği taşımaktadır. Bununla birlikte, geçmişte endüstriyel boyutlu disk keskiler yerine mini-disk keskilerle donatılmış kesici kafa tasarımlarına yönelik çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Acaroğlu ve Erdoğan (2017) mini-disk keskilerden oluşan aksiyel tip bir kesici kafa uygulamasını AM-105 tip makinaya uyarlamış, yüksek reaksiyon kuvvetleri nedeniyle makinada stabilite problemi oluşacağı ortaya konmuştur. Benzer şekilde Tiryaki vd. (2010)'nin yaptığı bir araştırmada, mini-diskler ile kazıda daha düşük kesme kuvvetleri sağlanmasına karşın, normal kuvvet değerlerinin konik keskilerdeki değerlere göre 1,5 kat yüksek olması, mini-disk keskilerin mekanize kazıda avantaj sağlamayacağını ifade etmiştir. Ancak, Gelik işletmesinde denenen makine; mini disk değil, endüstriyel boyutlu disk keskilerle tasarlanmıştır.

Gelik'te yapılan ilk deneme sırasında kesici kafa üzerine 12 adet disk keski monte edilmiştir. Galeri açma makinesi 07.08.2020 tarihinde -460 katı ana rekup galerisinde indirilmiş, montaj işlemleri tamamlandıktan sonra 01.09.2020 tarihinde deneme kazısı çalışmalarına başlamıştır. 2020 yılında Karadon müessesesi Gelik İşletmesinde B18 kesitte ilk olarak kazı çalışmalarına başlayan makine 2,5 m ilerleme yapabilmiştir. 05.12.2021 tarihine kadar devam eden çalışmalar süresinde toplam 165,5 saat fiili olarak kazı yapmıştır. Buna göre makinenin kazı performansının yetersiz kaldığı ve beklenen düzeye ulaşamadığı belirlenmiştir. TTK ile özel firma arasında yapılan bir mutabakat protokolü ile kesici kafa revizyona uğramış, üzerindeki disk keskiler sökülmüş ve kabaralı keskilerle donatılarak Armutçuk müessesesine nakil edilmiştir.
05.03.2022 – 17.05.2022 tarihleri arasında yaklaşık 2,5 aylık süre zarfında Armutçuk müessesesi -400 katı hazırlık lağımında montajı yapılan galeri açma makinesi,

18.05.2022 tarihinde kabaralı keskilere sahip kesici kafası ile deneme kazı çalışmalarına başlamış ve 16.11.2022 tarihinde deneme çalışmaları tamamlanmıştır. Makinanın günlük çalışma süreleri Şekil 3'te verilmiştir. 5 aylık çalışma süresi zarfında 52 günde toplam 139 saat çalışmıştır. B14 kesitte 7,2 m ilerleme yapılmıştır. Kazı işleri jeolojik ve mekanik nedenlerle sık sık kesintiye uğramıştır. Makinanın çalışmadığı süreler genellikle arıza-bakım veya onarım ile geçmiştir. Elde edilen bu verilere göre, makinanın Armutçuk müessesesinde de kararlı bir çalışma performansı sergileyemediği görülmüştür.



Şekil 3. Armutçuk Müessesesi'nde galeri açma makinası günlük çalışma süreleri.

Elde edilen veriler ışığında, makinenin ilerleme hızları Karadon Müessesesi Gelik İşletmesinde 0,58 m^3/h, Armutçuk Müessesesi'nde ise 0,27 m^3/h olarak ölçülmüş ve bir galeri açma makinasından beklenen başarı sağlanamamıştır. Sonuç olarak, daha çok mikrotünelcilik uygulamalarındaki 1-3 m çapındaki tünelleri açmada kullanılan kesici kafa geometrisine sahip olan bu makine, havzanın jeolojik koşullarına uygun olmadığı ortaya çıkmıştır.

3.5. Sany EBZ160 ve EBZ260A Gam Uygulamaları

Son yıllarda havzada faaliyetlerini sürdüren iki büyük ölçekli özel sektör olan Hattat Enerji ve Maden Ticaret A.Ş. ve Erdemir Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. (Ermaden) Çin'den yeni yatırımlar yaparak SANY firmasına ait farklı model galeri açma makinaları kullanmaya başlamıştır.

Bu bağlamda, HEMA daha önce kullandıkları AM-105 ve DH model GAM'larının yanı sıra 2022 yılından itibaren kurdukları yeni panolarda taban yolu ve ana galeriler sürmek üzere Çin'den 7 tane EBZ260 A model GAM satın almıştır. Bu yatırım, havzada ve Türkiye'de tek seferde gerçekleştirilen en büyük güçlü GAM

yatırımlarından biri olup, özellikle sert kaya koşullarında delme-patlatma yöntemine alternatif olarak mekanize kazının da yaygınlaşmaya başladığını göstermektedir.

Diğer taraftan yine Armutçuk'ta faaliyet gösteren bir diğer özel sektör Ermaden, Çin'den 4 adet EBZ160 satın almış ve halen bu makinelerden 3 tanesi yeraltında kullanılmaktadır.

4. HAVZADA YAŞANAN BAZI DURUMLAR

4.1. Kazi Kesiti Etkisi

Bir galeri açma makinesinin tek konumda açabileceği maksimum kazı kesiti; makinenin modeli, bom geometrisi ve kesici kafa konfigürasyonuna bağlıdır. Modern galeri açma makineleri, 25 ila 80 m² arasında değişen kesitlerde kazı yapabilmektedir. Kazı kesiti makinenin modeli, bom geometrisi, bom uzama mesafesi ve kesici kafa konfigürasyonu ile yakından ilişkilidir. Galeriye uygun bir makina tasarlanmadığı zaman makinanın galeri içerisindeki hareket kabiliyeti oldukça düşmektedir. Armutçuk Müessesesi'nde kullanılan GAM ilk olarak B18 kesitte kazı deneme çalışmalarına başlamış olsa da, bomdaki kaldırma kuvvetleri ve piston gücü yetmediği için, kesici kafa tavan seviyesine kadar kaldırılamamıştır (Şekil 4). Ayrıca, bomun teleskop mesafesi de arını taramada ve tavan kazısında yeterli yüksekliklere erişememiştir. Makinenin tavan kazısı sırasında yüksekliğini artırabilmek için ana şase ön kısmına ek pistonlar monte edilerek revizyon yapılmıştır. Eklenen kaldırma pistonları da fayda etmemiş, hatta fazla yükten dolayı palet dişlisi kırılmıştır. Sonuçta, önlemler yeterli olmadığından GAM daha sonra B14 kesitte deneme çalışmalarına devam etmiştir. Ancak, bu defa hareket edebilme ve manevra yapabilme alanı kalmamıştır.

Şekil 4. B14 kesitte GAM'n elektrik motoru tavan arası mesafesi.

Şekil 4'te görüldüğü üzere makinenin üstündeki elektrik motoru bağlara çok yakınlaşmış ve manevra kabiliyeti kısıtlanmıştır. Dolayısıyla bu deneyimler, galeri açma makinesi seçiminde; makinenin boyutları, bom geometrisi, teleskopik uzama mesafesi, maksimum kazı kesitinin, temel tasarım kriterleri olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4.2. Sert, Aşındırıcı ve Değişken Kayaç Yapısı

Zonguldak Havzası genelinde en sorunlu çevre kayaç ince taneli kumtaşı ve silttaşıdır. Laboratuvarda yapılan analiz sonuçlarına göre yüksek oranda kuvars, plajoiklas ve biyotit içeren kumtaşının eşdeğer kuvars içeriğinin %69, silttaşının ise %63 olduğu Akkaş vd. (2019) ve Su ve Akkaş (2020) tarafından hesaplanmıştır. Kayaçların aşındırıcı yapısı keski tüketimini artırmaktadır. Örneğin, 2015-2019 yılları arasında Amasra'da sürülen tabanyollarında 41 ayda toplam 3182 m ilerleme kaydedilmiş, aktif çalışan üç galeri açma makinasında toplam 9553 adet keski tüketilmiştir. Aylık ortalama keski tüketimi 233 adet ve birim keski tüketimi ise 0,1 adet/m^3 olarak belirlenmiştir. Ancak, bu süre zarfında karşılaşılan yüksek dayanımdaki çok aşındırıcı formasyonlar koşullar gereğince delme-patlatma ile geçilmiştir (Akkaş vd., 2019).

Bununla birlikte küçük atımlı fay ve süreksizlikler kazı performansını olumsuz etkilemektedir. Süreksizliklerin fazla olduğu arınlarda tahkimat işleri (çelik hasır, kaya saplama, halat saplama) için harcanan artmakta ve bu durum makinadan faydalanma oranını düşürmektedir. Amasra'da tahkimat sisteminin net kazı hızına etkisinin çok önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Kayacın RQD değeri ne kadar düşerse, tahkimat o kadar önem kazanır ve tahkimat için harcanan süre de artar. Bu da net kazı hızını düşürür. Makine seçimi yapılırken, mutlaka kazı yapılacak yüzeylerde karotlu sondajlar alınmalı, jeomekanik deneyler yapılmalı ve RQD değerlerine göre kazılabilirlik değerleri hesaplanmalıdır.

4.3. Su Püskürtme Sistemi

Galeri açma makineleri ile kazıda karşılaşılan en önemli sorunlardan biri kazı esnasında ortaya çıkan tozdur. Bu toz sadece sağlık açısından zararlı olmakla kalmayıp kazı faaliyetini de olumsuz etkiler. Kesici kafa üzerindeki su sistemi hem toz bastırma amacıyla hem de keskilerin ve kesici kafanın soğutulması açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, toz problemini etkili bir su püskürtme sistemi ve bununla birlikte toz emici cihazlarla desteklemek gerekir.

Armutçuk Müessesesi'nde kabaralı keskilerle yapılan kazı çalışmaları sırasında keskilerde yüksek düzeyde aşınmalar oluşmuş ve hatta kabaralar kırılmıştır (Şekil 5). Su püskürtme sistemi ve basıncı yetersiz kalmış, aşırı toz oluşumu nedeniyle zaman zaman elektrik arızası meydana gelmiştir. Ayrıca, keskilerde oluşan aşırı ısınmadan dolayı kıvılcımlar çıkmıştır. Dolayısıyla yerli üretim kesici kafa tasarımında keskilerde aşırı ısınmayı kontrol altına alınabilmesi için yeterli basınç ve debiye sahip su

püskürtme sistemleri kullanılmalı, su nozüllerinin konumu uçları doğrudan soğutacak şekilde konumlandırılmalıdır.

Şekil 5. Kazı sonrası aşınan kabaralı keskiler.

Armutçuk Müessesesi'nde kabaralı keskilerle öğütülerek kazılan malzeme fazla ufalandığından, pasa yüklemede sorunlar yaşanmıştır. Toz haline kadar ufalanan posta, su ile karıştığında arın önünde balçık/şlam haline dönmüş, pasa toplama ünitesindeki yıldız çarklar postayı süpürememiştir.

4.4. Zemine Batma

Madenlerde ana galeri, rekup, taban yolu gibi açıklıklarda veya tünellerde yürütülen faaliyetler zor ve karmaşık jeolojik şartlarda yapıldığı için galeri açma makinasının paletli tasarlanması zorunlu bir tercih sebebi olmaktadır. Paletler, kazı çalışmalarında ihtiyaç duyulan yüksek itme kuvvetlerini oluşturarak tonlarca ağırlıktaki makinanın zor yeraltı koşullarında yürümesini sağlar. Galeri açma makinasında kesici kafadan sonra en fazla güç çeken kısım paletlerdir. Makinenin tırmanabileceği eğimler, farklı zemin koşullarında hareket edebilme yeteneklerinin bilinmesi gerekir. Hareket sırasında makinanın ağırlığından dolayı tabana uyguladığı basınç mutlaka göz önüne alınmalıdır. Bu çerçevede makine seçimi yapılırken makinanın taban uyguladığı palet (zemin) basıncı son derece önemlidir. Eğer zemin basıncı dikkate alınmazsa, makine araziye geldiğinde özellikle kil taşı, seyl gibi yumuşak formasyonlar veya düşük dayanımdaki kumtaşı ve silttaşı üzerinde sürüldüğü takdirde zemine batar veya hareket kabiliyeti sınırlanır. Özellikle ağır tip GAM'larda bu husus çok daha önemli olmaktadır. Bayar vd. (2025) paletli elektro-hidrolik yükleyicilerde dönme kapasitesi, çekiş kuvveti, elektrik gücü, tork, batma derinliği gibi parametreleri hesaplayan bir yazılım geliştirilmiş olup, bu yazılım hareket sistemi palet olan her türlü kazıcı veya delici makinelere göre de revize edilebileceği belirtilmiştir.

Makine satın almak isteyen firmalar, çoğunlukla GAM'ın kazılabilirlik ve kesici kafa performansına odaklanırken, taban kayaçlarının taşıma kapasitesi, makinenin zemine

uyguladığı palet basıncı veya palet-zemin etkileşiminin yeterince dikkate alınmamaktadır. Bu durum, makinenin sahaya alınmasının ardından paletlerin taban taşı üzerinde yürürken zemine batmasına, stabilite kaybına ve ilerleme performansının düşmesine neden olabilmektedir. Karadon Müessesesi'nde kullanılan yerli üretim galeri açma makinesinin Armutçuk Müessesesi'ne taşınmasında etkili olan nedenlerden biri de, bulunduğu sahadaki zayıf taban koşulları nedeniyle yaşanan batma problemi ve buna bağlı hareket güçlüğü olmuştur.

5. GALERİ AÇMA MAKİNESİ SEÇİMİNDE DİKKATE ALINMASI GEREKEN TEKNİK KRİTERLER

Galeri açma makinasını doğru seçebilmek, öncelikle formasyonun jeolojik ve jeoteknik özelliklerine uygun kesici kafa tipinin seçilmesine ve sonra doğru keski kullanılmasına bağlıdır. Bu çerçevede galeri açma makinesinin kayaca, makinaya bağlı faktörlerin yanı sıra diğer işletmeye bağlı etkenlerin de iyi irdelenmesi gerekir. Öncelikle, kayacın dayanımı ve petrografik özellikleri iyi bilinmelidir. Laboratuvar, ampirik veya sayısal modelleme çalışmaları ile detaylı kazılabilirlik çalışmaları yapılmalı ve spesifik enerji hesaplanmalıdır. Buna göre kesici kafa gücü hesaplanmalı, uygun bir keski tipi ve kesici kafa seçimi yapılmalıdır. Elde edilen veriler ile performans kestirim modelleri (anlık kazı hızı, net kazı hızı, keski tüketimi, makineden faydalanma oranı, vb.) üzerinden tespitler yapılmalı, uygun ağırlıkta makine seçilmelidir. Bunun yanı sıra, oluşturulacak kesite ve kazılan malzeme boyutuna uygun pasa toplama ve nakliyat sistemi seçilmelidir. Kazı sırasında toz oluşumunu önlemek için uygun bir havalandırma düzeneği ile kesici kafanın soğutulması ve tozun bastırılması için su püskürtme sistemi de kurulur. Ayrıca, çalışılacak formasyonun özelliklerine göre palet (zemin) basıncı hesaplanmalıdır.

Sadece ekonomik etkenlerden dolayı yapılan hatalı makine seçimi, düşük kazı hızı, keski tüketiminin artması, bakım maliyetlerinin artması, toplam kazı maliyetinin yükselmesine neden olur. En kötü senaryo ise daha önce de havzada yaşanmış olan acı tecrübelerde olduğu gibi yapılan tüm yatırımlar boşa gider ve genellikle hukuki süreçler başlatılır. Bu nedenle GAM seçiminde yatırım maliyetinden ziyade, formasyonun jeolojik, mekanik ve kazılabilirlik özellikleri esas alınarak bilimsel performans analizleri ve mühendislik hesaplamaları ile birlikte gerçekleştirilmelidir.

6. SONUÇLAR VE ZONGULDAK HAVZASI İÇİN ÖNERİLER

Havzada ilk mekanizasyon çalışmaları 1980'li yıllarda saban denemeleriyle başlamış, galeri açma makinesi uygulamaları ise 2000'li yılların başında hayata geçirilmiştir. O günden bugüne kadar kullanılan makinelerinin kesici kafa güçlerinin 150–300 kW arasında değiştiği belirlenmiştir. Bunlardan Amasra bölgesinde kullanılanlar delme-patlatma yöntemiyle destekli olarak 0,84-1,2 m/h aralığındaki hızlarda başarılı performanslar sergilemiştir. KSP-32 uygulaması başarısız olmuş ve daha sonra İstanbul'daki özel bir işletmeye taşınmıştır. Yerli imalat GAM'lar hem Karadon, hem de Armutçuk'da başarısız olmuş, makine halen hukuki süreçler devam ettiğinden

Armutçuk Müessesesi'nde yeraltında bekletilmektedir. HEMA ve Ermaden firmalarının iki farklı bölgede (Amasra ve Armutçuk) kullandığı SANY firmasına ait GAM'ların ise performanslarıyla ilgili henüz bir çalışma yapılmamıştır.

Günümüzde 300 kW'ın üzerindeki yüksek güçlü GAM'lara yönelik Ar-Ge yatırımları da önemli ölçüde artmıştır. Artık, 150-160 MPa dayanıma sahip kayaları kazabilecek makineler üretilmektedir. Balcı vd. (2020) tarafından okyanus altında 160 bar hiperbarik koşullarda kullanılabilecek kazı veya galeri açma makinelerinin performans ve seçimi hakkında çalışmalar yapılmıştır. Son 5 sene içinde Almanya ve Türkiye'de sert kaya ortamlarında gerçekleştirilen tünel açma faaliyetlerinin %70'inden fazlasında 300 kW'ın üzerinde güce sahip oldukları belirlenmiştir (URL-1). Yurtdışından ithal edilen makineler her zaman istenen performansı sağlamayabilir. Bu makinelerin tasarımlarının farklı jeolojik ve işletme koşullarına göre geliştirildiği unutulmamalıdır.

Havza kayaçlarında eşdeğer kuvars oranları %70'lere ulaşmaktadır. Kesme kuvveti (FC) değerleri ise en riskli formasyonlar olan kumtaşı ve siltaşında 4-20 kN arasında değişmektedir (Akçın vd., 2005). Spesifik enerji değerleri yüksektir. Ayrıca, havzada yüksek atımlı faylar bulunmaktadır. Fay sayıları fazladır. Bu çerçevede havza çevre kayaçları değişken ve aşındırıcı kayaç yapılara sahiptir. Tüm bu nedenlerle havzada kullanılacak bir galeri açma makinası seçiminin sadece firma katalogları, üretici tavsiyeleri veya önceki kullanıcıların deneyimlerine göre değil, havza ve kayaç yapısı dikkate alınarak ve bilimsel veriler ışığında yapılması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada değerlendirilen GAM uygulamaları ve geçmişte yapılan laboratuvar verileri, Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda kullanılacak, özellikle Karadon'da GAM kesici kafa gücünün yüksek (ör; 200 kW üstü) ve orta veya ağır tip olmasının uygun olacağını göstermektedir. Ancak, yukarıda da açıklandığı üzere sadece tek bir parametre değil, detaylı analiz çalışmaları yürütülerek doğru makine seçiminin yapılması son derece önem arz etmektedir. Aksi takdirde, geçmişte yaşandığı üzere yüksek yatırım maliyetleriyle temin edilen makinelerin hedeflenen performansa ulaşamadan ve ekonomik ömürlerini tamamlayamadan kullanım dışı kalması, yaşanan başarısız mekanizasyon uygulamalarının tekrarlanması ve önemli ekonomik kayıplar gibi sonuçlara neden olacaktır.

KAYNAKLAR

Acaroğlu, E.Ö. ve Erdoğan, C. 2017. Stability Analysis of Roadheaders with Mini-disc, Tunnelling and Underground Space Technology, Cilt: 68, s.187-195.

Akçın, N,, Bilgin, N. ve Kel, K. (2005) Zonguldak Havzası'nda Galeri Açma Makinası Kullanımının Araştırılması, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, s. 177-183, İzmir.

Akçın, N.A., Akkaş, E., 2011. Gelik İşletmesi'nde Kullanılan Kollu Galeri Açma Makinasının Performansının İncelenmesi, Türkiye 22. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, s.171-180.

Akkaş, M. 2019. Amasra Bölgesinde Kullanılan Orta Ağırlıktaki Galeri Açma Makinalarının Performans ve Uç Tüketimlerinin Değerlendirilmesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, 223 s.

Akkaş, M., Su, O. ve Bacak, G. 2019. Orta ağırlıkta Bir Kollu Galeri Açma Makinası Arazi Performansının Farklı Kazılabilirlik Kriterleri Açısından Değerlendirmesi: Amasra Sahası Uygulaması, 7. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi, s. 55-68, İzmir.

Akkaş, M., Su, O. ve Şenkal, S.S. 2018. Amasra Taşkömürü Havzası'nda Kullanılan Kollu Galeri Açma Makinası Performansının Schmidt Çekiciyle Değerlendirilmesi, 4. Uluslararası Yeraltı Kazıları Sempozyumu ve Sergisi, s. 199-206, İstanbul.

Balci, C., Copur, H., Bilgin, N., Ozdemir, L. and Jones, G.R. 2020. Cuttability and Drillability Studies Towards Predicting Performance of Mechanical Miners Excavating in Hyperbaric Conditions of Deep Seafloor Mining, International J. of Rock Mechanics and Mining Sciences, Cilt:130, 15 p.

Bayar, G., Su, O., Özarslan, A., Topuz A., Erdoğan, B., Sakız, U., Kaya, H., Kiraz, M. ve Yıldırım H. 2023. Yeraltı kömür madenlerinde paletli yükleyicilerin hareket kabiliyetinin tasarımı, 9. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojisi Kongresi Bildiriler Kitabı, s. 108-117, İzmir.

Bilgin, N. 2023. Maden Üretiminde ve Tünel Açmada Yeni Kazı Teknolojileri, 9. Uluslararası Maden Makineleri ve Teknolojileri Kongresi, s. 1-9.

Bilgin, N., Copur, H., Balcı, C. 2014. Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries, 366 p.

Ersoy, C. 2014. Kollu Galeri Açma Makinelerinin Seçim Kriterleri ve Amasra Havzası Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 111 s.

Ersoy, C., Balcı, C. ve Şenkal, S. 2016. Amasra Taşkömürü Havzasında Çalışan Kollu Galeri Açma Makinesinin Performans Değerlendirmesi, Türkiye 20. Kömür Kongresi, s. 37-47.

Gök, M. Ş. 1970. Kuzey Anadolu Taşkömür Havzası (Tektonik Yapısı), Türkiye Jeoloji Bülteni, Cilt:13, Sayı 1, 120-145.

Heiniö 1999. Rock Excavation Handbook, Sandvik Tamrock Corp, 364 p.

Su, O. and Akkaş, M. 2020. Assessment of pick wear based on the field performance of two transverse type roadheaders: a case study from Amasra coalfield, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Cilt: 79, Sayı: 5, pp. 2499-2512.

Tiryaki, B., Gipps, I.D. ve Li, X.S. 2010. Laboratory Comparison of Mini-discs with Point-attack Picks, Advanced Materials Research, Cilt:126-128, pp. 189-194.

URL-1Market Research Report 2025. Roadheader Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type, By Application, Regional Insights and Forecast to 2035, Rapor No: IRB100526,107 p.

Yaralı O. ve Kıran H. (2018) Amasra Taşkömürü Havzasında Kullanılan AM105 Tipi Kollu Galeri Açma Makinasının Performans İncelemesi, 4. Uluslararası Yeraltı Kazıları Semp., s. 127-138.

Yaralı, O., Sakız, U., Duru, H., Aydın, H., Su, O., Geniş, M. (2018) Türkiye Taşkömürü Kurumu'nda Kollu Galeri Açma Makinası Kullanımının Analizi, Türkiye 21. Uluslararası Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 11-13 Nisan, pp. 69-83, Zonguldak.

MADEN KAZALARINDA BİLİRKİŞİ HEYETİNİN OLUŞTURULMASI: HUKUKİ ÇERÇEVE, UYGULAMA SORUNLARI VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

COMPOSITION OF EXPERT PANELS IN MINING ACCIDENTS: LEGAL FRAMEWORK, PROBLEMS ENCOUNTERED IN PRACTICE, AND PROPOSALS FOR ADDRESSING THESE PROBLEMS

Sibel Terzi Kahraman*
BEUN, İİBF, İşletme Bölümü, Ticaret Hukuku Anabilim Dalı, Zonguldak

Levent Yağcıoğlu**
Maden Yüksek Mühendisi, Zonguldak

ÖZET Bu çalışma, maden kazalarında görevlendirilecek bilirkişi heyetlerinin oluşturulmasına ilişkin hukuki çerçeveyi, uygulamada karşılaşılan sorunları ve bu sorunların giderilmesine yönelik çözüm önerilerini incelemektedir. Çalışmada, Türkiye'de meydana gelen başlıca maden kazalarına ilişkin bilirkişi raporları ve yargı kararları incelenmiş; ayrıca yabancı ülke uygulamaları karşılaştırmalı hukuk bakımından değerlendirilmiştir. Maden kazaları, iş kazası niteliği taşımalarının yanı sıra, teknik nedenleri, çalışma koşulları, işletme organizasyonu, iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları, denetim mekanizmaları ve çevresel etkileri bakımından çok boyutlu olaylardır. Bu nedenle, maden kazalarına ilişkin soruşturma ve yargılamalarda olayın teknik özelliklerinin ortaya konulabilmesi için bilirkişi incelemesine başvurulması önem taşımaktadır. Ancak bilirkişi heyetlerinin olayın niteliğine uygun uzmanlık alanlarını yeterince temsil etmemesi, bazı bilirkişilerin maden sahasında uygulama deneyimine sahip olmaması ve disiplinler arası değerlendirme imkânının yeterince sağlanamaması, kazaların nedenlerinin ve sorumluluk ilişkilerinin bütüncül biçimde ortaya konulmasını güçleştirebilmektedir. Bu kapsamda çalışmada, maden kazalarında bilirkişi görevlendirmelerinin olayın teknik ve hukuki özelliklerine uygun biçimde gerçekleştirilmesi amacıyla, disiplinler arası uzmanlık esasına dayalı bir bilirkişilik modelinin oluşturulmasına ilişkin mevzuat değişikliği önerileri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bilirkişilik, maden kazası, uzman bilirkişi, bilirkişi heyeti, teknik bilirkişi.

ABSTRACT This study examines the legal framework governing the composition of expert panels appointed in mining accidents, the problems encountered in practice, and proposals for addressing these problems. The study examines expert reports and judicial decisions concerning major mining accidents that have occurred in Türkiye and, additionally, evaluates the practices of foreign jurisdictions from a comparative law perspective. Mining accidents are not only occupational accidents but also multidimensional events in terms of their technical causes, working conditions, operational organization, occupational health and safety practices, inspection mechanisms, and environmental impacts. Accordingly, expert examination plays an important role in investigations and judicial proceedings concerning mining accidents in establishing the technical characteristics of the incident. However, the failure of expert panels to adequately represent the areas of expertise required by the nature of the incident, the lack of practical experience in mining operations among

* sibelterzi@beun.edu.tr
**levent_yagci@hotmail.com

some experts, and the insufficient provision of opportunities for interdisciplinary assessment may hinder the comprehensive determination of the causes of accidents and the relationships of responsibility. In this context, the study proposes legislative amendments aimed at establishing an expert-witness model based on interdisciplinary expertise, so as to ensure that expert appointments in mining accidents are made in accordance with the technical and legal characteristics of each incident.

Keywords: Expert witness, mining accidents, specialised expert witness, expert panel, technical expertise

1. GİRİŞ

Madencilik faaliyetleri, yeraltı ve açık ocak işletmelerinin kendine özgü teknik koşulları nedeniyle yüksek düzeyde risk içeren faaliyetler arasında yer almaktadır. Metan gazı ve kömür tozu patlamaları, yangın, göçük, su baskını, tahkimat yetersizliği, elektrik ve mekanik ekipman arızaları ile açık ocaklarda şev duraysızlığı gibi farklı riskler, birbirinden farklı teknik uzmanlıkların değerlendirilmesini gerektirebilmektedir. Türkiye'de geçmişte meydana gelen büyük maden kazaları da bu çeşitliliği açık biçimde ortaya koymaktadır.

Bir maden kazasının nedenlerinin belirlenmesi, yalnızca ceza sorumluluğunun değerlendirilmesi açısından değil; işverenin hukuki sorumluluğu, iş sağlığı ve güvenliği yükümlülükleri, idari denetim ve kamu görevlilerinin sorumluluğu gibi pek çok açıdan önem taşımaktadır. Teknik olguların hukuki değerlendirmeye aktarılmasında bilirkişilik kurumu önemli bir işlev üstlenmektedir.

Hukuk Muhakemeleri Kanunu'nu[1] (HMK) m.266. ile Ceza Muhakemesi Kanunu[2] (CMK) m.63, çözümü özel veya teknik bilgiyi gerektiren konularda bilirkişiye başvurulacağını düzenlemektedir. Bilirkişilik Kanunu[3] ve Bilirkişilik Yönetmeliği[4], bilirkişiliğin kurumsal yapısının yanı sıra bilirkişilerin seçimi, eğitimi, sicile kaydı ve denetimi ile uzmanlık alanlarına ilişkin usul ve esaslarını belirlemektedir. Bununla birlikte, maden kazalarının farklı teknik özelliklerine göre bilirkişi heyetinin hangi uzmanlık alanlarından oluşturulacağına ilişkin özel bir düzenleme bulunmamaktadır. Asıl sorun**,** mevcut uzmanlıkların kazanın teknik niteliğine göre sistematik biçimde bir araya getirilmesini sağlayan özel bir mekanizmanın bulunmamasıdır. Bu nedenle çalışmanın temel sorusu, "Maden kazalarının teknik niteliğine göre hangi uzmanlık alanlarından oluşan bilirkişi heyeti görevlendirilmelidir?" sorusudur.

Bu çalışma, maden kazalarında bilirkişiliğin hukuki çerçevesini incelemekte; mevcut mevzuatı, yargı kararlarını ve uygulama örneklerini karşılaştırmalı hukuk ışığında değerlendirmektedir. Çalışmanın temel iddiası, mevcut bilirkişilik sisteminin maden kazalarının çok disiplinli yapısını yeterince karşılamadığı ve bu nedenle uzmanlık

[1] 6100 sayılı Hukuk Muhakemeleri Kanunu. 2011. Resmî Gazete, Sayı: 27836, 04.02.2011.
[2] 5271 sayılı Ceza Muhakemesi Kanunu. 2004. Resmî Gazete, Sayı: 25673, 17.12.2004.
[3] 6754 sayılı Bilirkişilik Kanunu. 2016. Resmî Gazete, Sayı: 29898, 24.11.2016.
[4] 23818 sayılı Bilirkişilik Yönetmeliği. 2017. Resmî Gazete, Sayı: 30143, 03.08.2017.

alanlarına göre yapılandırılmış, disiplinler arası bir bilirkişilik modeline ihtiyaç bulunduğudur.

2. TÜRK HUKUKUNDA MADEN KAZALARINDA BİLİRKİŞİLİK

Türk hukukunda bilirkişiye başvurulmasının temel koşulu, uyuşmazlığın çözümünde özel veya teknik bilgiye ihtiyaç duyulmasıdır (Bilirkişilik Kanunu m.2, Bilirkişilik Yönetmeliği m.4, HMK m.266, CMK m.63). Bilirkişinin görevi, hukuk kurallarını yorumlamak veya uyuşmazlığı hukuken çözmek değildir. Bilirkişi, sahip olduğu özel ve teknik bilgi çerçevesinde maddi olguların açıklanmasına katkı sağlar. Bu teknik tespitlerin hangi hukuki sorumluluğu doğurduğunu belirlemek, hukuki nitelendirme ve nihai karar yargı makamına aittir.

Soruşturma sürecinde bilirkişi atamasını Cumhuriyet Savcısı, yargılama sürecinde mahkeme veya hâkim yapmaktadır. Hâkim ve savcıların hukuk kurallarını resen bilmeleri gerekse de hukuk dışındaki tüm bilimsel ve teknik alanlarda uzmanlık sahibi olmaları beklenemez (jura novit curia)[5]. Zira maden sahalarında kazanın meydana geliş nedenleri, teknik oluş mekanizmaları ve sorumluluk ilişkileri gibi uzmanlık bilgisi gerektiren hususlar, hukuk eğitiminin kapsamı dışında kalmaktadır. Bu sebeple, hâkimlerin ve savcıların, kendisinde bulunmayan özel ve teknik bilgiye sahip uzman bilirkişilerden yararlanması gerekir (HMK m.266, CMK m.63). Mevcut sistemde bilirkişilerin uzmanlık alanları belirli kategoriler altında sınıflandırılmakta ve bilirkişilerin uzman oldukları alanla sınırlı olarak görev yapmaları esası benimsenmektedir. Bu yaklaşım, bilirkişinin sahip olmadığı bir uzmanlık alanında değerlendirme yapmasını önlemeyi amaçlamaktadır. Nitekim bilirkişinin görevi, uzmanlık alanı içerisinde kalan teknik veya özel bilgi gerektiren hususları açıklamaktır.

Türk hukukunda, olayın niteliğine göre birden fazla bilirkişiden oluşan heyet görevlendirilmesi mümkündür. Özellikle çözümü birden fazla uzmanlık alanını ilgilendiren teknik uyuşmazlıklarda heyet görevlendirilmesi, teknik incelemenin kapsamlı biçimde yapılmasına imkân sağlamaktadır. Ancak mevcut mevzuatta "maden kazası" adı altında özel bir bilirkişi heyeti modeli bulunmadığı gibi, belirli kaza türleri bakımından hangi uzmanlık alanlarının birlikte görevlendirilmesi gerektiğini gösteren bir uzmanlık matrisi de bulunmamaktadır. Dolayısıyla birden fazla bilirkişiden oluşan heyet görevlendirilmesi hukuken mümkün olmakla birlikte, heyetin hangi uzmanlıklardan oluşturulacağı büyük ölçüde somut olayın değerlendirilmesine ve görevlendirmeyi yapan yargı makamının takdirine bağlıdır. Çalışmanın temel problemi de tam olarak bu noktada ortaya çıkmaktadır. Sorun, mevcut sistemin disiplinlerarası bilirkişi heyeti oluşturulmasına izin vermemesi değildir. Sorun, maden kazalarının teknik özellikleri ile gerekli uzmanlık alanları arasında önceden belirlenmiş, nesnel ve öngörülebilir bir bağlantı kurulmamış olmasıdır. Hangi kazada hangi uzmanlıkların

[5] SAVADOGO, Louis: "Le recours des juridictions internationales à des experts", Annuaire français de droit international, 2004, C.50, s. 231.(Naklen Tuğrul Çakır, "Uluslararası Adalet Divanı'nın Bilirkişilere Yaklaşımına İlişkin Bir Değerlendirme", *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi (AndHD)*, C. 12, S. 1, 2026, s.94).

öncelikli olarak görevlendirilmesi gerektiği konusunda uygulamaya yön verecek özel bir maden kazaları uzmanlık matrisi mevcut değildir. Çalışma kapsamında, maden kazalarının teknik özellikleri, önemli maden kazalarına ilişkin uygulamalar ve karşılaştırmalı hukuk dikkate alınarak değerlendirme yapılmış ve bilirkişi görevlendirmelerine yönelik öneriler sunulmuştur.

3. MADEN KAZALARINDA UYUŞMAZLIĞIN TEKNİK NİTELİĞİNİN BELİRLENMESİ

Maden kazaları; metan veya kömür tozu patlaması, ani gaz püskürmesi, yangın, göçük, kaya düşmesi, su baskını, zehirli veya boğucu gazlara maruziyet, havalandırma yetersizliği, elektrik veya mekanik kaynaklı olaylar, tahkimat yetersizliği, şev kayması ve yığın liçi sahalarında stabilite kaybı gibi farklı teknik nedenler ve olay mekanizmaları sonucunda meydana gelebilir[6]. Bu kazaların nedenlerinin belirlenmesinde; metan patlamasının oluşum mekanizması, karbonmonoksit ve diğer tehlikeli gazların oluşumu ve yayılımı, havalandırma sisteminin yeterliliği, gaz izleme ve algılama sistemlerinin işlevselliği, sensör kayıtlarının teknik analizi, galeri açıklığının stabilitesi, tahkimat sisteminin uygunluğu ve yeterliliği, şev stabilitesi, yangının çıkış ve yayılma nedenleri ile ilgili teknik standart, proje, prosedür ve güvenlik gereklerinin yerine getirilip getirilmediği gibi pek çok hususun incelenmesi gerekebilir. Kazanın türü ve buna bağlı olarak araştırılması gereken teknik sorunlar öncelikle ortaya konulmalı; ardından bu sorunların çözümü için gerekli uzmanlık alanları belirlenerek bilirkişi heyeti oluşturulmalıdır.

Yargıtay, bilirkişinin görevinin ve inceleme konusunun mahkemece açık, anlaşılır ve denetime elverişli şekilde belirlenmesi gerektiğini; bilirkişiden beklenen teknik incelemenin kapsamının hâkim tarafından özenle tespit edilmesinin zorunlu olduğunu vurgulamaktadır[7]. Mahkeme, tarafların da görüşünü almak suretiyle bilirkişinin görevlendirilmesine ilişkin kararında, inceleme konusunu bütün sınırlarıyla ve açıkça belirlemeli, bilirkişinin cevaplaması gereken sorulara yer vermelidir (HMK m.273). Örneğin yalnızca "Kazanın meydana gelmesinde kim kusurludur?" şeklindeki genel bir soru yerine; Kazanın teknik oluş mekanizması nedir? Kazanın meydana gelmesine etki eden teknik koşullar nelerdir? Havalandırma sistemi teknik olarak yeterli midir? Gaz izleme sistemi olay tarihinde çalışır durumda mıdır? Mevcut teknik riskler işletme tarafından bilinebilir durumda mıdır? Hangi teknik önlemler alınabilirdi? Alınması gereken önlemler kazanın meydana gelmesini önleyebilir miydi? İşletme kayıtları ile fiilî uygulama arasında teknik bir farklılık var mıdır? gibi sorular yöneltilmesi, teknik incelemenin kapsamını belirginleştirecektir.

Yargı makamlarının bilirkişi heyetinin oluşturması ve bilirkişinin cevaplaması gereken soruları yönlendirmesi hususunda gösterilecek özen, maddi gerçeğin ortaya çıkarılması

[6] Yaşar, S., İnal, S., Yaşar, Ö., Kaya, S. 2015. Geçmişten Günümüze Büyük Maden Kazaları, Madencilik, 54, 2, s. 33-43. Özdemir, C., Tunca, B., Çöl, M. 2023. Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları ve Risk Değerlendirmesi, Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 7, 2, s. 109-112.
[7] Yargıtay 4. HD., 21.03.1983, E.1276, K.3007.

ve mahkeme kararının isabeti bakımından belirleyici niteliktedir. Ancak, hâkim ve savcıların, bilirkişiye yöneltecekleri soruları teknik uyuşmazlığı tam olarak karşılayacak açıklıkta belirlemeleri her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle, bu konuyla ilgili karşılaştırmalı hukukta ve uygulamada öne çıkan yaklaşımlar üzerinde durulacaktır.

Bazı ülkelerde çevre, iş güvenliği, iş kazaları veya endüstriyel kazalardan kaynaklanan uyuşmazlıkların çözümü amacıyla uzmanlaşmış mahkemeler veya savcılık birimleri oluşturulmuştur. Bu birimlerde görev yapan hâkim ve savcılar hukukçu olmakla birlikte, göreve başladıktan sonra ilgili teknik alana ilişkin özel eğitim almaktadır[8].

Türkiye'de dikkat çekici bir gelişme yaşanmıştır. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Zonguldak Şubesi'nin taleplerinin de etkisiyle 2024 yılında, Zonguldak Cumhuriyet Başsavcılığı bünyesinde Türkiye'nin ilk "Maden Suçları Soruşturma Bürosu" kurulmuştur[9]**.** Büro; maden ve madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan ölümlü ve yaralanmalı iş kazaları ile kaçak maden işletmeciliğine ilişkin soruşturmaların uzmanlaşmış Cumhuriyet savcıları tarafından yürütülmesini amaçlamaktadır. Bu uygulama, maden suçlarının teknik niteliği dikkate alınarak soruşturmalarda uzmanlaşma anlayışının yargı teşkilatına yansıyan önemli bir örneği olarak değerlendirilebilir. Kanaatimizce, Zonguldak'ta başlatılan bu uygulamanın yaygınlaştırılması ve maden kazalarından kaynaklanan uyuşmazlıkların ihtisaslaşmış mahkemelerde görülmesi, teknik uyuşmazlıkların daha isabetli değerlendirilmesine ve bilirkişi incelemelerinin daha etkin yürütülmesine katkı sağlayacaktır.

4. BÜYÜK MADEN KAZALARININ BİLİRKİŞİLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Mustafa Kemal Paşa Maden Kazası (10 Aralık 2009)

Bursa'nın Mustafa Kemalpaşa ilçesinde meydana gelen grizu patlaması sonucunda 19 madenci yaşamını yitirmiştir. Kaza sonrasında yürütülen ceza soruşturması kapsamında düzenlenen bilirkişi raporlarında; işletmede uzun süredir metan gazı riskinin bilinmesine rağmen gerekli teknik ve idari tedbirlerin alınmadığı, otomatik gaz izleme ve erken uyarı sistemlerinin, gaz ölçüm cihazlarının yeterli olmadığı ve düzenli gaz ölçümlerinin yapılmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca havalandırma sisteminde sorunlar bulunduğu, üretim alanına yeterli temiz hava akışının sağlanamadığı, ocakta kullanılan tesisat ve ekipmanların anti-grizulu özellikte olmadığı, acil kaçış imkânı bulunmayan kör galerilerde (küldesak) üretime devam edildiği, iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin yeterli şekilde verilmediği ve iş güvenliği kayıtlarının gerçeği yansıtmadığı belirlenmiştir.

Bilirkişi incelemeleri, kazanın münferit bir teknik arızadan değil; metan gazı riskinin uzun yıllar bilinmesine rağmen sistematik biçimde göz ardı edilmesi, teknik önlemlerin

[8] https://judiciariesworldwide.fjc.gov/specialized-courts (Temmuz 2026)
[9] https://www.dha.com.tr/video/zonguldakta-maden-suclari-sorusturma-burosu-kuruldu-turkiyede-ilk-video-2393283; https://madencilikturkiye.com/zonguldakta-maden-suclari-sorusturma-burosu-kuruldu/.

alınmaması ve denetim mekanizmalarının etkisiz bırakılması sonucu meydana geldiğini ortaya koymuştur. Raporlarda, işletme yönetiminin ocakta metan gazı bulunduğunu gizleyerek idari denetimlerin etkinliğini de engellediği, bu nedenle güvenli işletmecilik ilkelerinden bilinçli şekilde uzaklaşıldığı değerlendirilmiştir.

Yargıtay, olayın değerlendirilmesinde bilirkişi raporlarında ortaya konulan teknik tespitleri esas alarak, sanıkların defalarca yapılan uyarılara ve tespitlere rağmen tehlikeli çalışma yöntemlerini sürdürdüklerini, grizu patlaması riskini öngörmelerine rağmen bu riski ortadan kaldıracak önlemleri almadıklarını, aksine mevcut tehlikeyi gizleyerek faaliyetlerine devam ettiklerini kabul etmiştir. Bu nedenle sanıkların kusurluluk düzeyinin bilinçli taksiri aştığı ve olası kast hükümleri kapsamında sorumlu tutulmaları gerektiği sonucuna ulaşılmıştır[10].

Mustafa Kemalpaşa maden kazası, bilirkişi raporlarının yalnızca teknik eksikliklerin belirlenmesinde değil, aynı zamanda kusur derecesinin ve ceza hukuku bakımından manevi unsurun tespitinde de belirleyici rol oynayabileceğini göstermektedir. Bu karar, özellikle maden kazalarında bilirkişi incelemelerinin teknik bulgular ile hukuki nitelendirme arasındaki ilişkiyi kuran en önemli delillerden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Bilirkişi incelemesinin yalnızca "maden işletmesinde kusur bulunup bulunmadığı" sorusuna indirgenmesinin yeterli olmadığını, olayın teknik özellikleri dikkate alındığında maden mühendisliği, havalandırma, gaz izleme, elektrik, iş sağlığı ve güvenliği alanlarının birlikte temsil edilmesinin maddi gerçeğin ortaya çıkarılması bakımından zorunlu olduğu anlaşılmaktadır.

4.2. Soma Maden Faciası Açısından Bilirkişilik (13 Mayıs 2014)

Manisa'nın Soma ilçesi, Eynez Ocağı'nda meydana gelen ve 301 işçinin yaşamını yitirdiği facia, Türkiye Cumhuriyeti tarihinin en ağır maden kazasıdır.

Kazaya ilişkin soruşturma ve kovuşturma aşamalarında farklı bilirkişi raporları düzenlenmiştir. Raporlarda kömürün kendiliğinden yanma özelliği, havalandırma sistemindeki eksiklikler, gaz izleme sistemlerinin etkisiz kullanılması, teknik ekipmanların yetersiz ve arızalı olması, tehlikeli üretim yöntemi, kolay yanıcı malzeme ve ekipman kullanılması, elektrik sisteminin güvenilir olmaması, kişisel koruyucu donanım ve haberleşme sistemlerindeki eksiklikler, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nda[11] öngörülen yükümlülüklerin tam olarak yerine getirilmemesi, acil durum planı ve kaçış yollarının bulunmaması, yetersiz risk değerlendirmesi ve risk yönetimindeki eksiklikler, iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin gerektiği ölçüde

[10] Doğan, R. 2026. Emir ve Talimatlara Aykırılık Sonucu Oluşan Maden, Deniz ve Tren Kazalarında Olası Kast-Bilinçli Taksir Ayrımının Belirsizliği, Hacettepe Hukuk Fakültesi Dergisi, 16, 1, s. 141-192. Yargıtay 12 CD, 2012/21104 E., 2013/25712 K., 14.11.2013.

[11] 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. 2012. Resmî Gazete, Sayı: 28339, 30.06.2012.

verilmemesi, iş güvenliği uzmanı sayısının ihtiyacı karşılamaması, üretim zorlaması gibi çok sayıda teknik ve organizasyonel unsur incelenmiştir[12].

Soma maden faciasına ilişkin yürütülen soruşturma sürecinde bilirkişi raporlarında, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı iş müfettişlerinin denetim yükümlülüklerini gereği gibi yerine getirmedikleri ve bu ihmallerin kazanın meydana gelmesine katkı sağladığı teknik olarak ortaya konulmuştur. Buna karşın İlgili kamu görevlileri hakkında soruşturma izni verilmemesi üzerine yapılan bireysel başvuruda Anayasa Mahkemesi, soruşturma makamlarının bilirkişi raporunda ortaya konulan teknik tespitleri ceza hukuku bakımından değerlendirmesine imkân tanınmadan adli sürecin sona erdirilmesinin, Anayasa'nın 17. maddesinde güvence altına alınan yaşam hakkının usul boyutunu ihlal ettiğine karar vermiştir[13].

Bilirkişi raporlarının en dikkat çekici yönlerinden biri, kazanın tek bir teknik arızadan değil, birden fazla sistematik güvenlik eksikliğinin birleşiminden kaynaklandığını ortaya koymasıdır. Bu yaklaşım, maden kazalarının "tek nedenli olaylar" değil, organizasyonel ve teknik eksikliklerin birleşmesiyle meydana gelen karmaşık olaylar olduğunu göstermektedir.

Soma dosyası, bilirkişi raporlarının yalnızca işletme içindeki teknik eksiklikleri değil; organizasyon, denetim sistemi, kurumsal risk yönetimi ve kamu gözetimi boyutunu da kapsaması gerektiğini göstermiştir.

4.3. Ermenek Maden Kazası (28 Ekim 2014)

Karaman'ın Ermenek ilçesinde meydana gelen su baskını sonucunda 18 madenci yaşamını yitirmiştir. Hazırlanan bilirkişi raporlarında temel neden olarak; eski üretim galerilerinde biriken suyun yeterince araştırılmaması, sondaj çalışmalarının yetersizliği, hidrojeolojik risk analizlerinin eksikliği, üretim planlamasındaki teknik yetersizlikler tespit edilmiştir. Bu olay, yeraltı su hareketlerinin, eski üretim galerilerinin ve hidrojeolojik risklerin yeterince değerlendirilmemesinin doğurabileceği sonuçları ortaya koymuştur[14].

Bu tür olaylarda klasik maden mühendisliği bilgisinin yanında özellikle hidrojeoloji, jeoloji ve jeoteknik uzmanlığının bilirkişi heyetinde temsil edilmesinin önemini göstermiştir. Aksi hâlde kazanın temel nedeninin doğru belirlenmesi güçleşmektedir.

---

[12] Derin, L., Varol, N., Uymaz, S. 2017. Türkiye'deki Kömür Madeni Kazalarına İlişkin Değerlendirme, Dirençlilik Dergisi (Resilience), 1, 1, s. 47-53. Yaşar, S., İnal, S., Yaşar, Ö., Kaya, S. 2015. Geçmişten Günümüze Büyük Maden Kazaları, Madencilik, 54, 2, s. 40-41. Kazayla ilgili mahkeme kararları: Akhisar Ağır Ceza Mahkemesi, 2015/81 E., 2018/296 K., 11.07.2018. İzmir BAM 14 CD, 313/1610, 18.04.2019. Yargıtay 12 CD, 200/4732, 30.09.2020. Yargıtay 12 CD, 744/307, 18.01.2021. Akhisar Ağır Ceza Mahkemesi, 49/299, 16.06.2021. Yargıtay 12 CD, 1547/2543, 04.04. 2022.

[13] AYM, *Abdülkadir Yılmaz ve Diğerleri*, B. No: 2016/13649, 29.01.2020.

[14] Kocasoy, G. 2020. Soma Maden Faciası Ve Yeraltı Maden Ocaklarında Alınması Gereken Önlemler, Erişim, 29, s.184-203. Yaşar, S., İnal, S., Yaşar, Ö., Kaya, S. 2015. Geçmişten Günümüze Büyük Maden Kazaları, Madencilik, 54, 2, s.41. Söz konusu kaza ile ilgili mahkeme kararları: Ermenek Ağır Ceza Mahkemesi, 2015/16 E., 2016/37 K., 20.07.2016 (Yayımlanmamıştır). Ankara BAM 12 CD, 2016/2 E., 2017/1668 K., 13.07. 2017. Yargıtay 12 CD, 4573/6919, 20.06.2018

Bu kaza, kaza türüne göre uzmanlık ve disiplinler arası bilirkişiliğin önemini açık biçimde ortaya koymaktadır.

4.4. Amasra Maden Kazası (14 Ekim 2022)

Bartın ili, Amasra İlçesinde faaliyet gösteren TTK Amasra Taşkömürü Müessesesi Amasra İşletme Müdürlüğü yeraltı maden işletmesinde meydana gelen metan patlamasında 43 madenci hayatını kaybetmiştir. Cumhuriyet Başsavcılığı tarafından görevlendirilen ilk bilirkişi heyeti; maden, jeoloji, jeofizik, elektrik ve makine mühendisleri ile iş güvenliği uzmanından oluşan disiplinler arası bir yapıdadır. Ön değerlendirmelerde özellikle havalandırma sistemi, metan gazı birikimi, patlatma faaliyetleri, gaz izleme sistemleri, risk yönetimi gibi farklı teknik alanlara odaklanılmıştır. Havalandırmanın iyileştirilmesine yönelik yatırımların hayata geçirilmemesinin ve patlatma faaliyetleriyle ilişkili teknik eksikliklerin kazanın meydana gelmesinde önemli rol oynadığı anlaşılmıştır. Bu heyetin yapısı, önceki büyük maden kazalarına kıyasla daha geniş uzmanlık alanlarını kapsaması bakımından dikkat çekicidir. Bu yaklaşımın uygulamada yasal zorunluluk hâline getirilmesi gerektiğini düşünmekteyiz. Sorun, disiplinler arası bilirkişi heyeti oluşturulmasının hukuken veya fiilen imkânsız olması değildir. Asıl sorun, bu yaklaşımın olayın niteliğine göre sistematik ve öngörülebilir bir yöntem haline getirilmemiş olmasıdır.

4.5. İliç Maden Kazası (13 Şubat 2024)

Erzincan'ın İliç ilçesinde meydana gelen yığın liçi sahası çökmesi, klasik yer altı kömür madeni kazalarından farklı teknik özellikler taşımaktadır. Bu olayda değerlendirilmesi gereken temel teknik alanlar şev stabilitesi, jeoteknik tasarım, hidrojeoloji, pasa yönetimi, liç sahası işletmesi, drenaj sistemi, çevresel risk analizidir[15]. Türkiye Barolar Birliği, yaptığı değerlendirmede olayın önlenebilir nitelikte olduğuna, teknik ve idari süreçlerin etkin işletilmesinin önemine ve kamu görevlilerinin sorumluluklarına dikkat çekmiştir[16].

İliç kazası, açık ocak madenciliği ile yeraltı madenciliğinde aynı bilirkişilik modelinin uygulanamayacağını göstermektedir. Bu nedenle bilirkişi uzmanlık alanları, kazanın türüne göre belirlenmelidir. Bu incelemeden anlaşılmaktadır ki maden kazalarının tamamı için tek tip bilirkişi modeli uygulanması bilimsel açıdan doğru değildir. Dolayısıyla önerdiğimiz modelin temel ilkesi; tek tip bilirkişi heyeti değil, kaza türüne göre belirlenen uzmanlık bileşimidir.

---

[15] Canbaz Akça, K. (2024). Erzincan İliç altın madeni: Politik ekoloji perspektifinden bir facianın anatomisi**.** *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 9*(2), 79 - 97. Taşdemir, S. (2013). *Erzincan-İliç-Çöpler maden sahasında yapılan basamak patlatmalarının çevresel etkilerinin incelenmesi* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

[16] https://www.barobirlik.org.tr/Haberler/erzincan-ilicte-yasanan-cevre-felaketinin-nedeni-hukuksuzluktur-84539.

5. KARŞILAŞTIRMALI HUKUKTA MADEN KAZALARINDA BİLİRKİŞİLİK SİSTEMLERİ

5.1. Genel Olarak

Maden kazalarının soruşturulması ve yargısal denetimi, yalnızca ulusal hukuk kurallarına göre şekillenen bir faaliyet değildir. Özellikle son otuz yılda meydana gelen büyük maden faciaları sonrasında birçok ülkede teknik soruşturma mekanizmaları yeniden yapılandırılmış; bilirkişilik faaliyetleri klasik "mahkeme bilirkişisi" anlayışının ötesine taşınarak disiplinler arası ve bilimsel temelli inceleme modelleri geliştirilmiştir.

İncelenen örneklerde ortak eğilim, büyük maden kazalarının tek bir uzmanın görüşüyle açıklanamayacağı; farklı disiplinlerden oluşan bağımsız uzman ekiplerin görevlendirilmesi yönündedir. ILO'nun maden güvenliğine ilişkin standartları da tehlikelerin sistematik olarak belirlenmesi, risk değerlendirmesinin bilimsel esaslara dayanması ve teknik incelemelerin uzman ekiplerce yürütülmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Bu bölümde Almanya, Kanada ve Avustralya uygulamaları incelenecek; ardından uluslararası standartlar ışığında Türk hukukunun güçlü ve zayıf yönleri değerlendirilecektir.

5.2. Almanya

Almanya'da madencilik faaliyetleri esas olarak Federal Madencilik Kanunu (Bundesberggesetz – BBergG) ile düzenlenmektedir[17]. Kanun yalnızca işletme ruhsatlarını düzenlemekle kalmamakta; aynı zamanda maden kazalarının araştırılması sırasında yetkili makamların delil toplama, örnek alma, işletme kayıtlarını inceleme ve kazanın nedenlerini araştırma yetkilerini de ayrıntılı biçimde düzenlemektedir. Ayrıca Federal Ekonomi Bakanlığı bünyesinde madencilik ve özellikle işletme güvenliği ile maden güvenliği konusunda danışmanlık yapan bir uzmanlar komitesi (Committee of Experts for Mining) öngörülmüştür[18]. Bu yapı, teknik incelemelerin yalnızca adli süreçlere bırakılmadığını; idari uzmanlık mekanizmalarıyla da desteklendiğini göstermektedir.

Alman hukukunda bilirkişi, mahkemenin teknik danışmanı olarak kabul edilir[19]. Bilirkişinin görevi teknik olguları açıklamak olup hukuki değerlendirme yapmak değildir. Mahkeme, bilirkişi görüşünü serbestçe değerlendirir; gerektiğinde yeni bilirkişi atanmasına veya ek rapor alınmasına karar verebilir.

---

[17] Bundesministerium der Justiz. (1980). *Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert*. https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/.

[18] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2023). *Committee of Experts for Mining*. https://www.bmwk.de

[19] Bundesministerium der Justiz. (2024). *Zivilprozessordnung (ZPO), §§ 402–414*. https://www.gesetze-im-internet.de/zpo/

Maden kazalarında özellikle maden mühendisliği, jeoteknik mühendisliği, kaya mekaniği, patlayıcı madde teknolojisi, havalandırma sistemleri, iş güvenliği, iş hijyeni, endüstriyel risk yönetimi uzmanlık alanlarından yararlanılmaktadır[20].

Bilirkişinin bireysel uzmanlığından ziyade kurumsal teknik uzmanlığa önem verilmektedir. Üniversiteler, teknik araştırma enstitüleri ve bağımsız teknik kuruluşlar soruşturma süreçlerine aktif katkı sunmaktadır.

5.3. Kanada

Kanada dünyanın en gelişmiş madencilik hukuk sistemlerinden birine sahiptir. Özellikle Ontario ve British Columbia eyaletlerinde maden güvenliği soruşturmaları, klasik ceza soruşturmasının yanında teknik inceleme süreçleriyle birlikte yürütülmektedir.

Kanada uygulamasında bilirkişilerden beklenen temel ilkeler bilimsel tarafsızlık, metodolojik şeffaflık, kullanılan verilerin doğrulanabilir olması, teknik varsayımların açıkça gösterilmesi, farklı uzmanlık alanlarının ortak çalışmasıdır[21].

Kanada uygulamasında dikkat çeken önemli özelliklerden biri de "qualified person" (yetkin uzman) anlayışıdır[22]. Özellikle madencilik alanındaki teknik değerlendirmelerde rapor hazırlayan uzmanların belirli mesleki yeterlilik ve deneyim şartlarını taşıması beklenmektedir. Bu yaklaşım, teknik görüşlerin güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca uluslararası CRIRSCO standartları ve Kanada'da kullanılan CIM kodu, uzman raporlarının belirli metodolojik esaslara göre hazırlanmasını teşvik etmektedir[23]. Bu yaklaşım Türk hukukunda maden kazası bilirkişilerinin belirlenmesinde yalnızca akademik unvanın değil, mesleki deneyim ve uygulama tecrübesinin de dikkate alınması gerektiği yönündeki öneriyi desteklemektedir.

5.4. Avustralya

Avustralya, kömür ve metal madenciliğinde dünyanın en gelişmiş iş güvenliği sistemlerinden birine sahiptir. Queensland ve New South Wales eyaletlerinde meydana gelen büyük maden kazalarından sonra teknik soruşturmalar bağımsız uzman ekipler tarafından yürütülmektedir.

---

[20] European Agency for Safety and Health at Work. (2023). *Occupational safety and health in mining*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources. (2023). *Mining and mineral resources*. https://www.bgr.bund.de

[21] Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. (2014). *CIM Definition Standards for Mineral Resources and Mineral Reserves*. https://www.cim.org

[22] Canadian Securities Administrators. (2024). *National Instrument 43-101: Standards of Disclosure for Mineral Projects*. https://www.securities-administrators.ca

[23] Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards. (2019). *International Reporting Template*. https://www.crirsco.com

Bu ekiplerde genellikle; maden mühendisi, jeoteknik uzmanı, havalandırma uzmanı, elektrik mühendisi, iş sağlığı ve güvenliği uzmanı, insan faktörleri uzmanı, risk yönetimi uzmanı birlikte görev almaktadır.

Avustralya uygulamasında bilirkişilik yalnızca geçmişte meydana gelen kazanın nedenlerini belirlemeyi değil, aynı zamanda benzer kazaların tekrarını önleyecek sistematik öneriler geliştirmeyi de amaçlamaktadır.

5.5. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) Standartları

Uluslararası Çalışma Örgütü'nün 176 sayılı Madenlerde Güvenlik ve Sağlık Sözleşmesi (Convention No. 176), maden güvenliğine ilişkin temel uluslararası belge niteliğindedir. Sözleşme; risk değerlendirmesi, etkili denetim, işveren yükümlülükleri ve güvenli çalışma ortamının sağlanması konusunda devletlere çerçeve yükümlülükler yüklemektedir[24].

ILO tarafından yayımlanan uygulama kodları; tehlikelerin sistematik olarak belirlenmesi, sürekli risk değerlendirmesi, kazaların araştırılması, iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemlerinin oluşturulması, acil durum planlaması ve teknik personelin eğitimi gibi temel ilkelere yer vermektedir. Bu belgeler doğrudan bilirkişilik kurumunu düzenlememekle birlikte, maden kazalarının teknik incelemesinde ve bilirkişi raporlarının bilimsel temellere dayanmasında dikkate alınabilecek uluslararası teknik standartlar ortaya koymaktadır.

5.6. ISO Standartları

Uluslararası Standardizasyon Örgütü tarafından yayımlanan ISO 19434:2017 "Mining — Classification of Mine Accidents", maden kazalarının nedenlerine, türlerine ve sonuçlarına göre ortak bir sınıflandırma çerçevesinde değerlendirilmesi bakımından teknik incelemelerde yardımcı bir referans olarak değerlendirilebilir[25]. Kanaatimizce Türkiye'de büyük maden kazalarında hazırlanacak bilirkişi raporlarında uluslararası sınıflandırma sistemlerinin kullanılması; raporların bilimsel niteliğini artıracak, farklı bilirkişi raporlarının karşılaştırılmasını kolaylaştıracak, uluslararası akademik literatürle uyumu güçlendirecektir.

6. MADEN KAZALARINDA BİLİRKİŞİ HEYETİNİN OLUŞTURULMASINA İLİŞKİN MODEL ÖNERİSİ VE SONUÇ

Türk hukukunda bilirkişilik sisteminin kurumsal yapısı, önemli ölçüde gelişmiş olmakla birlikte, maden kazaları gibi yüksek teknik uzmanlık gerektiren olaylarda ilave düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Büyük maden kazaları göstermektedir ki

[24] International Labour Organization. (1995). *Safety and Health in Mines Convention, 1995 (No. 176).* https://www.ilo.org
[25] International Organization for Standardization. (2017). *ISO 19434:2017 Mining—Classification of mine accidents*. https://www.iso.org/standard/64738.html.

Türkiye'de bilirkişilik kurumunun temel sorunu uzman eksikliği değil, uzmanlığın doğru organize edilememesidir.

Bilirkişi heyetinin oluşturulmasında, öncelikle kazanın teknik niteliği ve araştırılması gereken teknik sorunlar belirlenmeli; ardından bu sorunların çözümü için gerekli uzmanlık alanları tespit edilerek bilirkişi heyeti, belirlenen uzmanlık alanları doğrultusunda oluşturulmalıdır. Kanaatimizce, Zonguldak'ta başlatılan "Maden Suçları Soruşturma Bürosu" uygulamasının yaygınlaştırılması ve maden kazalarından kaynaklanan uyuşmazlıkların ihtisaslaşmış makamlarda görülmesi, teknik uyuşmazlıkların daha isabetli değerlendirilmesine ve bilirkişi incelemelerinin daha etkin yürütülmesine katkı sağlayacaktır.

Bilirkişileri görevlendiren hâkim ve savcıların, bilirkişilere hangi teknik soruların sorulabileceği ve hangi uzmanlıkların görevlendirilebileceği konusunda yardımcı olması için Adalet Bakanlığı ve Bilirkişilik Daire Başkanlığı tarafından "Maden Kazaları Bilirkişi Rehberi" hazırlanmalıdır. Rehberde, kaza türlerinin sınıflandırılması, her kaza türü için gerekli teknik uzmanlıklar, bilirkişi heyetinin oluşturulmasına ilişkin ölçütler, bilirkişilerde aranacak mesleki deneyim, saha deneyiminin değerlendirilme biçimi, bilirkişiye yöneltilebilecek örnek teknik sorular, teknik bulgu ile hukuki değerlendirme arasındaki sınır, gerekli teknik kayıt ve belgelerin listesi, kaza sonrası saha incelemesinde dikkat edilmesi gereken hususlara yer verilmelidir.

Türk bilirkişilik sisteminde uzmanlık alanları zaten mevcut olmakla birlikte, maden kazalarının olay bazlı teknik özellikleri ile bu uzmanlıkların eşleştirilmesini sağlayan standartlaştırılmış bir mekanizma bulunmamaktadır. Kanun, yüksek riskli ve çok disiplinli teknik olaylarda bilirkişi heyetlerinin nasıl oluşturulacağını ayrıntılı biçimde düzenlememektedir. Bu eksiklik özellikle büyük maden facialarında belirginleşmektedir. İncelenen kazalar, bütün maden kazaları için önceden belirlenmiş tek tip bir bilirkişi heyeti oluşturulmasının bilimsel ve hukuki açıdan uygun olmadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle çalışmada önerilen model, “her maden kazasında aynı sayıda ve aynı tür uzmanlardan oluşan bilirkişi heyeti” anlayışına değil, olay bazlı disiplinlerarası bilirkişilik anlayışına dayanmaktadır.

Önerimiz “Maden Kazaları Bilirkişi Uzmanlık Matrisi” oluşturulmasıdır. Bu matriste kaza türleri ile gerekli teknik uzmanlık alanları arasında ilişki kurulmalı; uzmanlıklar “zorunlu ve değişmez heyet üyeleri” şeklinde değil, somut olayın özelliklerine göre başvurulacak öncelikli ve tamamlayıcı uzmanlıklar şeklinde düzenlenmelidir. Heyet bileşimi kazanın türüne göre belirlenmelidir. Böylece aynı türde görünen ancak teknik mekanizması farklı olan kazalarda dahi heyetin somut olayın özelliklerine göre yapılandırılması mümkün olmalıdır (Çizelge 1).

Bu sebeple, bilirkişi heyetlerinde, maden sahası deneyimi olan, konusunda uzman maden mühendisi, maden işletmelerinde fiilî deneyime sahip A sınıfı iş güvenliği

uzmanı[26] ve kazanın türüne ilişkin en az bir teknik uzman çekirdek heyet olarak bulunmalıdır. Kazanın teknik niteliğine göre; elektrik, makine, jeoloji, jeoteknik, hidrojeoloji, havalandırma, iş hijyeni, patlayıcı madde, çevre, adli tıp gibi alanlardan uzmanlar heyete eklenmelidir.

Çizelge 1. Kaza türüne göre gereken temel uzmanlıklar.

Kaza Türü	**Temel Uzmanlıklar**
Metan/grizu patlaması	Maden mühendisliği + havalandırma + elektrik + İSG
Kömür tozu patlaması	Maden mühendisliği + havalandırma + iş hijyeni + patlayıcı/yangın uzmanlığı
Yeraltı yangını	Maden + havalandırma + elektrik + yangın/İSG
Göçük/tahkimat sorunu	Maden + jeoloji + jeoteknik/kaya mekaniği
Su baskını	Maden + hidrojeoloji + jeoloji + jeoteknik
Elektrik kaynaklı kaza	Maden + elektrik + İSG
Mekanik ekipman kazası	Maden + makine + İSG
Açık ocak şev kayması	Maden + jeoloji + jeoteknik + hidrojeoloji
Yığın liçi sahası çökmesi	Jeoteknik + jeoloji + hidrojeoloji + maden + çevresel uzmanlık

Bu tablo zorunlu ve değişmez bir heyet listesi olarak değil, bilirkişi heyetinin oluşturulmasında kullanılacak bir başlangıç matrisi olarak değerlendirilebilir. Kazanın özelliklerine göre ilave uzmanların heyete dâhil edilmesi mümkündür. Kaza türleri ile gerekli uzmanlık alanlarını eşleştiren maden kazaları bilirkişi uzmanlık matrisi oluşturulmalıdır. Bu disiplinler arası bilirkişi modeli**,** hem teknik incelemenin niteliğini hem de bilirkişi raporlarının denetlenebilirliğini artırabilecek bir çözüm olarak değerlendirilebilir.

Maden kazalarının teknik incelemesinde yalnızca akademik uzmanlığın bulunması her zaman yeterli değildir. Yeraltı madenciliğinin çalışma koşulları, üretim süreçleri, havalandırma düzeni, vardiya sistemi, tahkimat uygulaması ve iş organizasyonu gibi unsurların teknik olarak değerlendirilmesi, teorik bilgi yanında saha deneyimini de

[26] A sınıfı İş Güvenliği Uzmanı A Sınıfı olmak, maden kazalarında bilirkişilik yapmak için tek başına yeterli bir kriter olarak kabul edilmemelidir. A sınıfı iş güvenliği uzmanlığı belgesine sahip kişilerin, özellikle maden iş kazalarına ilişkin bilirkişilik görevlerinde, sahip oldukları mesleki ve saha deneyiminin de dikkate alınması gerekmektedir. Nitekim Bartın ili Amasra ilçesinde faaliyet gösteren özel bir yeraltı maden işletmesinde 26 Ekim 2024 tarihinde meydana gelen ve bir kişinin ölümüyle sonuçlanan olayda, keşif bilirkişi heyetinde A sınıfı iş güvenliği uzmanlığı belgesine sahip bir fizikçi, bir teknik öğretmen ve yeraltı madenciliği deneyimi bulunmayan açık işletmede görev yapan bir maden mühendisinin yer aldığı belirtilmiştir. Olay kapsamında işletme müdürü, daimi nezaretçi, iş güvenliği uzmanı ve vardiya mühendisi tutuklanmıştır.

gerektirir. Bu nedenle, eğitim, uzmanlık alanı, mesleki deneyim, maden işletmesindeki çalışma tecrübesi, özellikle ilgili kaza türüyle bağlantılı tecrübe birlikte değerlendirilmelidir. Genel bilirkişilik kabulünde aranan mesleki deneyim süresinden bağımsız olarak, ölüm veya ağır yaralanma ile sonuçlanan maden kazalarında olayın niteliğiyle doğrudan ilişkili saha deneyimi ayrıca değerlendirme kriteri haline getirilmelidir. Ayrıca çok disiplinli bilirkişi kurulu zorunlu hâle getirilmelidir. Bölge Bilirkişilik Kurulları bünyesinde "yüksek riskli endüstriyel kazalar" için özel bilirkişi listeleri oluşturulmalıdır.

İhtiyaç duyulan model; kazanın teknik niteliğinin belirlenmesi, teknik sorunların sınıflandırılması, gerekli uzmanlıkların bir uzmanlık matrisi üzerinden belirlenmesi, ilgili uzmanların mesleki ve saha deneyimlerinin değerlendirilmesi ve olayın özelliklerine uygun disiplinlerarası bilirkişi heyetinin oluşturulması esaslarına dayanmalıdır. Bu model, hem teknik incelemenin bilimsel niteliğini güçlendirecek hem de mahkemelerin daha sağlıklı ve denetlenebilir bilirkişi raporlarına ulaşmasını sağlayacaktır. Böylece, yalnızca bilirkişi raporlarının bilimsel kalitesini artırmakla kalmayacak; aynı zamanda mahkemelerin teknik delilleri daha tutarlı değerlendirmesine ve benzer olaylarda içtihat birliğinin güçlenmesine de katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Arslan, A. 2024. Maden Suçları Soruşturma Bürosu DHA | Demirören Haber Ajansı. https://www.dha.com.tr/video/zonguldakta-maden-suclari-sorusturma-burosu-kuruldu-turkiyede-ilk-video-2393283 (Temmuz 2026).

Canbaz Akça, K. 2024. Erzincan İliç Altın Madeni: Politik Ekoloji Perspektifinden Bir Facianın Anatomisi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 9(2), 79-97.

Çakır, T. 2026. Uluslararası Adalet Divanı'nın bilirkişilere yaklaşımına ilişkin bir değerlendirme. Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi (AndHD), 12(1), 93–116.

Derin, L., Varol, N., Uymaz, S. 2017. Türkiye'deki Kömür Madeni Kazalarına İlişkin Değerlendirme, Dirençlilik Dergisi (Resilience), 1, 1, s. 47-53.

Doğan, R. 2026. Emir ve Talimatlara Aykırılık Sonucu Oluşan Maden, Deniz ve Tren Kazalarında Olası Kast-Bilinçli Taksir Ayrımının Belirsizliği, Hacettepe Hukuk Fakültesi Dergisi, 16, 1, s. 141-192.

Judiciaries Worldwide. Specialized Courts. https://judiciariesworldwide.fjc.gov/specialized-courts (Temmuz 2026).

Kocasoy, G. 2020. Soma Maden Faciası Ve Yeraltı Maden Ocaklarında Alınması Gereken Önlemler, Erişim, 29, s.184- 203.

Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi. 2024. Zonguldak'ta Maden Suçları Soruşturma Bürosu Kuruldu, https://madencilikturkiye.com/zonguldakta-maden-suclari-sorusturma-burosu-kuruldu/ (Temmuz 2026).

Özdemir, C., Tunca, B., Çöl, M. 2023. Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları ve Risk Değerlendirmesi, Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 7, 2, s. 109-118.

Taşdemir, S. 2013. Erzincan-İliç-Çöpler maden sahasında yapılan basamak patlatmalarının çevresel etkilerinin incelenmesi (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Türkiye Barolar Birliği. 2024. Erzincan İliç'te Yaşanan Çevre Felaketinin Nedeni Hukuksuzluktur, https://www.barobirlik.org.tr/Haberler/erzincan-ilicte-yasanan-cevre-felaketinin-nedeni-hukuksuzluktur-84539 (Temmuz 2026).

Yaşar, S., İnal, S., Yaşar, Ö., Kaya, S. 2015. Geçmişten Günümüze Büyük Maden Kazaları, Madencilik, 54, 2, s. 33-43.

ÜLKEMİZ YERALTI KÖMÜR MADENLERİNDE YAŞANAN BÜYÜK KAZALARIN ANA NEDENLERİ VE SOMA MADEN KAZASININ TEKNİK ANALİZİ

THE MAIN CAUSES OF MAJOR ACCIDENTS IN TURKEY'S UNDERGROUND COAL MINES AND A TECHNICAL ANALYSIS OF THE SOMA MINE DISASTER

Prof. Dr. Tuğrul ÜNLÜ
ZBEÜ emekli öğretim üyesi

ÖZET Bu bildiride, ülkemiz yeraltı kömür madenlerinde yaşanan büyük ölçekteki iş kazalarının ana nedenleri ele alınmış ve daha sonra ülkemiz ve dünyanın en büyük ölçekli maden kazalarından biri olan Soma-Eynez, Karanlıkdere mevkiinde yaşanan 301 madencinin hayatını kaybettiği kazanın teknik analizine yer verilmiştir. Kazanın teknik analizinde, 2016 yılında yazarın da içinde bulunduğu bilirkişi heyetinin bulguları ve değerlendirmeleri özetlenmeye çalışılmıştır. Bilirkişi heyetince hazırlanan raporun hukuki kısımlarına değinilmemekle birlikte, kazanın başlangıcı, oluşumunu hazırlayan etkenler, kazanın gelişmesi ve sonuçlarına değinilmiştir. Son olarak, kazanın nasıl engellenebileceği üzerine görüşlere yer verilmiştir.

ABSTRACT This paper examines the main causes of large-scale work accidents in our country's underground coal mines and then presents a technical analysis of the Soma-Eynez, Karanlıkdere mine disaster, one of the largest mining accidents in our country and the world, in which 301 miners lost their lives. The technical analysis summarizes the findings and assessments of the expert committee, which included the author, in 2016. While the legal aspects of the expert committee's report are not discussed, the paper covers the beginning of the accident, the factors that led to its occurrence, its development, and its consequences. Finally, it includes opinions on how the accident could have been prevented.

1. GİRİŞ

Maden sektörü, özellikle yeraltı kömür madenciliği, doğal olarak dünyadaki en zor ve tehlikeli iş kollarının başında gelmektedir. Bu nedenle, bu iş kolunda her yıl çok sayıda küçüklü büyüklü iş kazaları meydana gelmektedir. Sayı olarak, (z sayıda madencinin can kaybının yaşandığı sıkça karşılaşılan (göçük vb.) kazalardaki yıllık can kaybı toplamının ani gelişen çoklu ölümlerin yaşandığı kazalardan (genellikle facia diye tabir edilir) genellikle daha fazla olmasına karşın çoklu ölümlerin yaşandığı kazalar daha çok akılda kalmaktadır. Ülkemiz yakın geçmişte Armutçuk, Kozlu, Karadon, Ermenek, Soma ve son Amasra facialarını yaşamıştır. Her büyük maden kazasının sonrasında bir infial yaşanan ülkemizde, madencilik mevzuatı değiştirilmiş sözde iyileştirmeler yapılmış olsa da büyük ölçekteki maden kazalarıyla maalesef bir türlü baş edilememiştir.

Son yıllarda "Havza madenciliği" sıkça telaffuz edilen bir kavram olduğundan, öncelikle bu terimin daha detaylı bir açıklamaya ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Havza madenciliği; Bir kömür havzasında, öncelikle kömür madenciliğinin temel gereksinimleri ve bilimsel üretim kurallarına uygun olacak şekilde oluşturulacak kısa orta ve uzun vadeli bir üretim planlamasının (master planlama) yetkin bir kurum ve bilimsel akla sahip bir ekip tarafından yapılması, üretim aşamasında yine etkin-yetkin kurumlarca denetlenmesi ve üretim sırasında karşılaşılan mücbir sebepler öngörüldüğünde de yetkili kurumlarca gerekli revizyonların gerçekleştirilmesine izin verilmesi ve/veya bu kurumlarca katkıda bulunmasını gerektirir.

Havza madenciliği üretim çalışmalarının mutlaka tek elden ve/veya devlet kurumları tarafından gerçekleştirilmesini gerektirmez. Ancak, başlangıçta havza planlanmasının mutlaka devletin yetkin kurumlarınca gerçekleştirilmesi, ilgili işletmenin(lerin) yıllara bağlı üretim planlamasına uygun olarak, hangi sıra, aşamalar ve miktarlarda üretim yapılması gerektiğini ilgili üretici taşerona dikte etmesini gerektirir.

Zonguldak kömür havzası, uzun yıllardır Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) genel müdürlüğüne bağlı farklı müesseseler tarafından işletilmekte olan bir yapıdır. Sözde havza madenciliği yapılan bu kurumda, Armutçuk, Kozlu, Karadon, ve son olarak Amasra'da facia boyutunda maden kazaları olmuş ve çok sayıda çalışan bu kazalarda maden şehidi olmuştur. İlk bakışta havza madenciliğine örnek olarak gösterilen böylesi deneyimli! bir kurumda, büyük ölçeklerde kazaların gerçekleşmiş olması oldukça düşündürücüdür. Bunun belli başlı nedenleri bellidir ve ilgililer tarafından ayrıca masaya yatırılmalıdır.

Maden kazalarında **kaçınılmazlık** diye bir unsurun ya yoktur ya da oldukça düşük bir olasılık olmasına karşın, maden kazalarında yaygın olarak bir olumsuzluğun üstünü örtmek, asıl nedenlerini görmezden gelmek için başvurulan bir söylemdir. Maden kazaları ya bilgi noksanlığından ya da kaygısızlık ve umursamazlıktan kaynaklanır. Son Amasra maden faciasında pervaneye bağlı havalandırma yetersizliği gibi gösterilen (maksimum1-2 ayak fiili olarak çalışmakta iken) kazanın asıl kök nedeni,

üretim planlanmasının yanlışlığı, üretim zorlamasına bağlı olarak köstebek yuvası gibi açılan açıklıklar nedeniyle havalandırma direncinin artması ve dolayısıyla etkin havalandırmanın sağlanamamasıdır. İşin gerektirdiğince planlamanın yapılmaması ve üretim zorlaması sonuçta 42 cana mal olmuştur. Asıl kök neden bu olmasına karşın, sorumluluğun tamamı en alt kademedeki üç beş mühendisin üzerine kalmıştır. Asıl havza üretim planlamasını yapması veya onaylaması gereken TTK Genel Müdürlüğü'dür. Havzanın madenciliğinde planlama tek elden TTK Genel Merkezi'nde, müessese sorumlularını da içeren bir birimde yapılmalı, akabinde de müesseseler planlamanın icracısı olmalıdır.

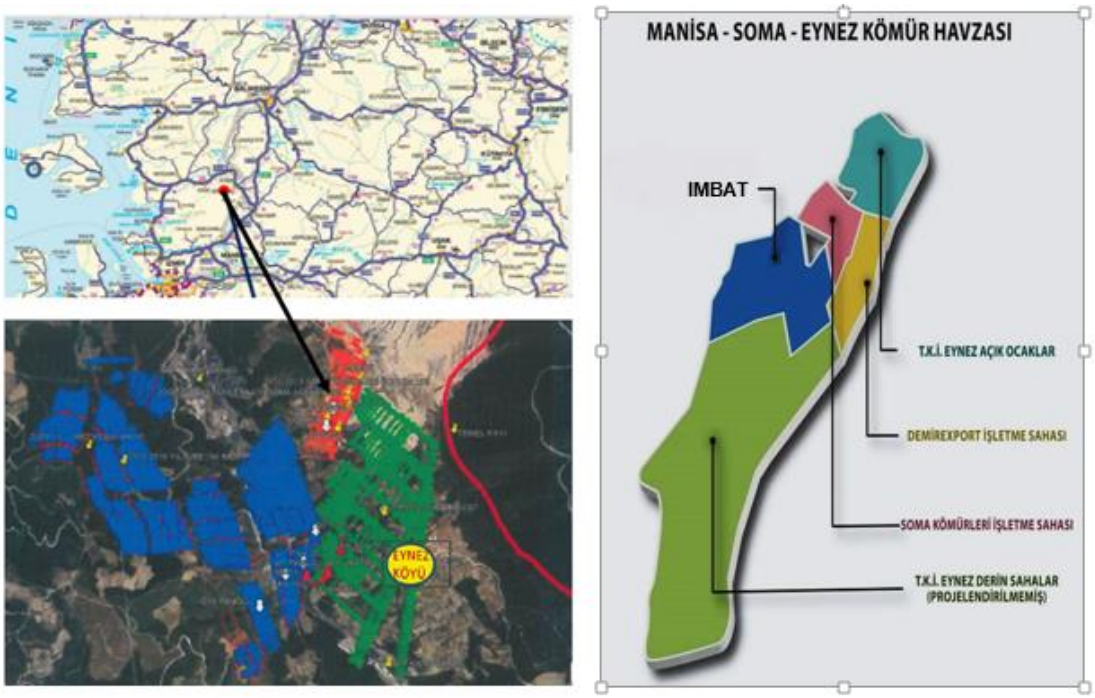
Ülkemizde gerçekleşen ve özellikle facia boyutuna ulaşan maden kazaları sonrası, çalışanlardan başlanarak, işletmelere ve sonuçta devlet kurumları-politikalarına uzanan bir suçlama zinciriyle karşılaşılmaktadır. Diğer bir anlatımla en alt kademeden bakanlığa kadar herkes birbirini suçlamaktadır. Sonuçta, facialaların kök nedenleri göz ardı edilerek tabiri caizse tetiği kim çekti aşamasına gelen süreçler izlenmektedir. Sonuç olarak üç beş suçlu (çoğunlukla alt kademedeki teknik elemanlar ve uzmanlar) bulunup, facianın sorumluluğu bu şahıslara yüklenmektedir. Asıl sebepler de her zaman olduğu gibi halının altına süpürülmektedir. Facialara zemin hazırlayan başlıca nedenlerden bazıları şunlardır:

- Havza madenciliğinin terk edilerek kumpanyalar dönemine dönülmesi: Yukarıda bahsedildiği gibi planlamanın yetkin bir kurum tarafından yapılmayıp şirket çalışanı, uzmanlığı sınırlı bir/birkaç mühendisin sorumluluğuna bırakılmasıdır. Daha da ileri gidilerek, alt kotu devlet üst kotları özel sektör gibi belki de hiç başvurulmaması veya çok istisnai hallerde yapılması mümkün olan yöntemlerin havza genelinde yaygınlaştırılmasıdır. Maden kanunu ve iş kanununun ilgili maddelerine göre yasaklanmış olmasına rağmen, hazırlık ve galeri açma işlerinin taşerona havale edilmesi de ayrı sorundur. Asıl görevini, salt daha ekonomik olacak diye emek sömürgen bir şirkete vermek beraberinde uygulama ve iş güvenliği zafiyetleri yaratmaktadır. Madencilik bu çift başlılığı kaldıramaz. Nitekim Karadon ve Kozlu maden kazalarının kök nedenlerinin başında bu çift başlı çalışma pratiği gelmektedir.
- Devlet denetim kurumlarının yetersizliği veya işleyişindeki zafiyetler: İş müfettişlerinin sorunları ve ağır sorumlulukları ele alınmalıdır. Devlete bağlı, ancak bağımsız çalışan, bünyesinde konusunda ileri düzeyde bilgi seviyesine sahip Almanya örneğine benzer bir **maden polisi** uygulamasına hızla geçilmelidir. Bu yapılanma içerisinde bilim insanları, iş güvenliği uzmanları, hekimler ve müfettişler yer almalıdır. Denetimleri yapılacak işletmelerin planlanmasına ve işleyişine hakim müfettişler sevk edilerek, denetimleri yapılacak bölgeler için gerçekleştirilecek denetimler, lokasyonlar ve kararlar ilgili müfettiş(ler) tarafından alınmalıdır (işletmenin göstermelik açıklıkları veya üretim alanlarında yapılan teftişlerle değil).
- Ülkemizde ilköğretimden başlayan ve eğitim aşamalarına bağlı olarak üniversite madencilik eğitimine kadar yaşanan erozyon ve mezunların bilgi seviyelerinde gözle görünür düşüşe bağlı olarak maden mühendisi eğitiminde branşlaşmaya

(uzmanlaşmaya) yer verilmemesi nedeniyle de her konudan az anlayan pratisyen hekim örneği mühendisler yetiştirilmesidir. Havalandırma ve iş güvenliği mühendisi, tabaka kontrolü ve tahkimat mühendisi, üretim hazırlık ve planlama mühendisi, ulaşım ve su atımı mühendisi ve cevher hazırlama mühendisi gibi konularında daha yetkin (yüksek mühendis seviyelerinde) mühendisler yetiştirilememesi ciddi eksikliktir. Diğer taraftan, iş yerlerinde mesleki hiyerarşinin de siyasal erk tarafından yerle yeksan edilmesi (devlet kurumlarında) sonucu usta çırak bağının kopmasıyla devam eden mesleki öğrenme sürecinin ortadan kaldırılması genç mühendislerin deneyim kazanmasını (alanında uzmanlaşması) zorlaştırmaktadır.

2. SOMA MADEN FACİASININ TEKNİK ANALİZİ

Maden kazasının gerçekleştiği Soma Eynez - Karanlıkdere Ocağı Şekil 1'de gösterildiği gibi Manisa, Soma ilçesi Karanlıkdere mevkiinde yer almaktadır. Soma maden kazası büyüklüğü ve can kayıpları açısından ülkemizin en büyük maden faciası, büyüklük açısından dünyanın da sayılı maden kazalarından biri olarak tarihe geçmiştir. Bu bildiride, kazanın oluşumunu hazırlayan nedenler ve sonuçlarına yer verilmekte ancak kazanın oluşumundaki sorumluluklar vb. hukuki konular bildiri kapsamı dışında tutulmuştur. Kazayı anlaşılır hale getirebilmek adına bilirkişi raporunda detaylandırılan hususlar daha öz şekilde; Ocağın kısa bir tanıtımı, mevcut havalandırma planı, üretim panoları, kazayı hazırlayan başlıca nedenler, kazanın gerçekleşme adımları, ilk yardım aşamaları ve nihai sonuçlar aşağıda sırasıyla anlatılmaktadır.



Şekil 1. Soma Eynez, Karanlıkdere Ocağı (kırmızı alan) lokasyonu

2.1. Ocakta Madencilik Koşulları ve Üretim

Soma Eynez - Karanlıkdere Ocağı'nda 2012 yılında 3 816 015 ton, 2013 yılında, 3 566 457 ton tüvenan kömür üretimi gerçekleştirilmiş olup, işletmede 2014 yılı Mart ayı itibarıyla sigortalı olarak çalışan işçi sayısı 3367'dir. Üretim yapılan panolar Çizelge 1'de verilmiş ve yeraltı ocak planı üzerinde gösterilmiştir (Şekil 2). Görüldüğü gibi, üç farklı panoda 2 mekanize, 5 yarı mekanize, 3 klasik ayakta kömür üretimi yapılmaktadır.

S Panoları; +210 ile +280 kotları arasında olup yeryüzüne en yakın panolardır. A Panoları; +86 ile +95 kotlarında (S Panolarına göre 125 ile 150 m daha derinlerde) olup metanca zengindir. H Panoları +40 ile +65 kotlarında olup ocağın en derin panolarıdır. Kömür damarının kalınlığı 15 ila 35 m, eğimi ise 7° civarındadır. Tek dilim olarak alınamayan damarda klasik ve yarı mekanize ayaklarda 3 ve tam mekanize ayaklarda 2 dilim halinde çalışılmaktadır.

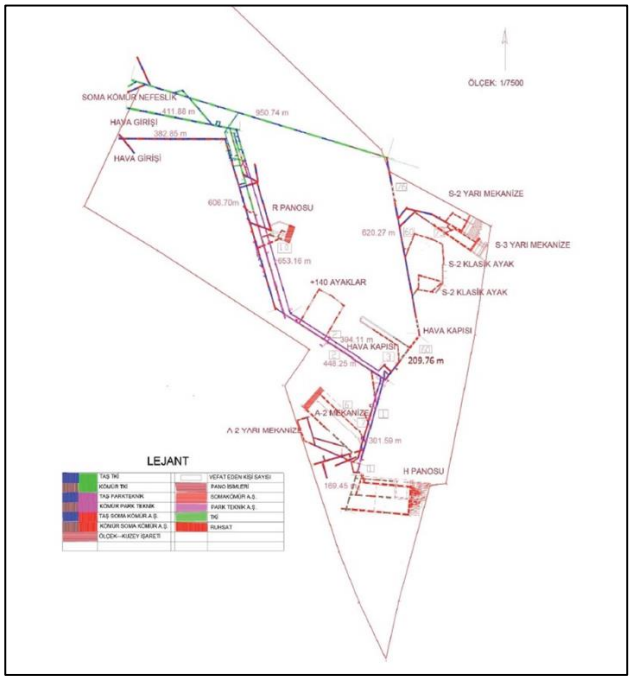
Çizelge 1 Ocakta çalışan panolar ve ayaklar

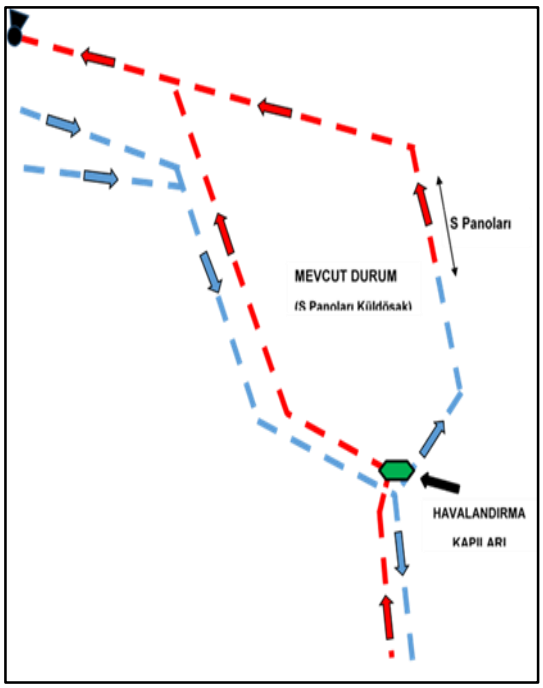
Pano	Ayak	Teknoloji
A	A1	Yarı Mekanize
A	A2	Mekanize
H	H1	Yarı Mekanize
H	H2	Yarı Mekanize
S	S2	Klasik
S	S2	Yarı Mekanize
S	S3	Klasik
S	S3	Yarı Mekanize
R7	Doğu Mekanize	Mekanize
-	140	Klasik

Klasik ayaklarda emek yoğun üretim söz konusudur. Tahkimat, sürtünmeli veya hidrolik direk ve çelik sarmalarla ve kömür kazısı patlayıcı madde ve martopikör ile yapılmaktadır. Yarı mekanize ayakları klasik ayaklardan ayıran, kalkan tipi tahkimat (shield) kullanımıdır. Yine emek-yoğun bir çalışma söz konusudur. Tam mekanize ayaklarda kalkan tipi tahkimat, kesici-yükleyici kazı makinesi ve konveyörün bir arada çalıştığı sistemler bulunmaktadır. Patlayıcı madde kullanılmadan makine yoğun yapılan bir çalışma vardır.

Ocakta malzeme nakli "kulikar" ile demiryolundan yapılmakta; kömür, ayaklardan zincirli konveyörlerle gelip taban yolunda bant konveyörlere ve buradan da ana galerilerdeki bant konveyörlere (entegre 8 bant) devrederek ocak dışına kadar çıkarılmaktadır. 2 si nefeslik galerisi içinde olmak üzere, 5 adet insan nakil bandı kuruludur.
Ocağa +340 kotundan sürülen iki desandreden giren hava, +152 kotunda bu desandreler irtibatlandırılarak, tek galeriden +142 kotuna ulaştırılmakta ve iki paralel kola (aşağı ve yukarı ocak) ayrılarak panolara sevk edilmektedir. Bu kollardan biri A-

H panolarına gitmekte olup, bu panolar için oluşturulan nefeslik yolu +340 kotunda sürülmüş olan ocak ana nefeslik galerisine bağlanmaktadır. Diğer kol ise S panolarındaki iş yerlerini *karma* olarak havalandırarak doğrudan ocak ana nefeslik galerisine ulaşmaktadır. Ancak, S panosundaki ayakların A ve H panolarında olduğu gibi bağımsız bir nefeslik görevi görecek bir ikinci bağlantı yolu yoktur. Ocağı 110 kW gücünde, 2400 m³/dk kapasiteli bir santrifüj (radyal) vantilatör emici olarak havalandırmaktadır. Ocağa sevk edilen hava miktarı 1900-2000 m³/dk civarındadır (Şekil 2).
Ocağın taşıyıcı kolonlarını oluşturan topuk sistemi aşağıda Şekil 3'te gösterilmiştir. Arazi yükünün bir kısmı da çalışılan panoların pekişmiş göçükleri üzerinde taşınmaktadır.





Şekil 2. Soma Eynez Karanlıkdere yeraltı planı (solda) ve Havalandırma planı (sağda).

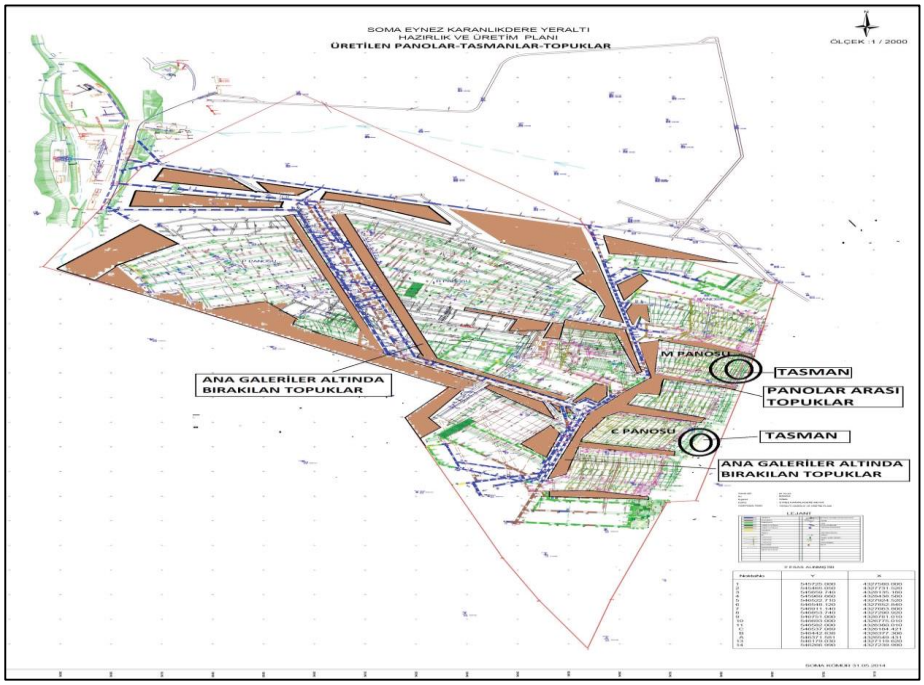
2.2. Olayın Meydana Gelişi

Olay; 13 Mayıs 2014 günü ocağın ana giriş noktalarından (+340 kotundaki iki desandre ağzı) yaklaşık 1450 m mesafede ve ana hava giriş yolunun ikiye ayrıldığı +142 kavşak noktasının az ötesinde, ocağın merkezi sayılan U3 bölgesinde, 4. bant galerisinde ve 3. bant kuyruğunun bulunduğu galeri kısmında başlamıştır. Olay 301 madencinin yaşamını yitirmesi ve 162 madencinin de yaralanmasıyla sonuçlanmıştır. Olayın başlangıç bölgesi Şekil 4'te gösterilen 5 noktası civarında yer almaktadır. Yoğun gaz ve duman geliri 4. bant galerisi ile ilgilidir. Bu galerideki kömür nakliyatına hizmet veren bant konveyörün şeması yine Şekil 4'te altta gösterilmiştir.

2.2.1 Olayın Başlamasını Hazırlayan Durumlar

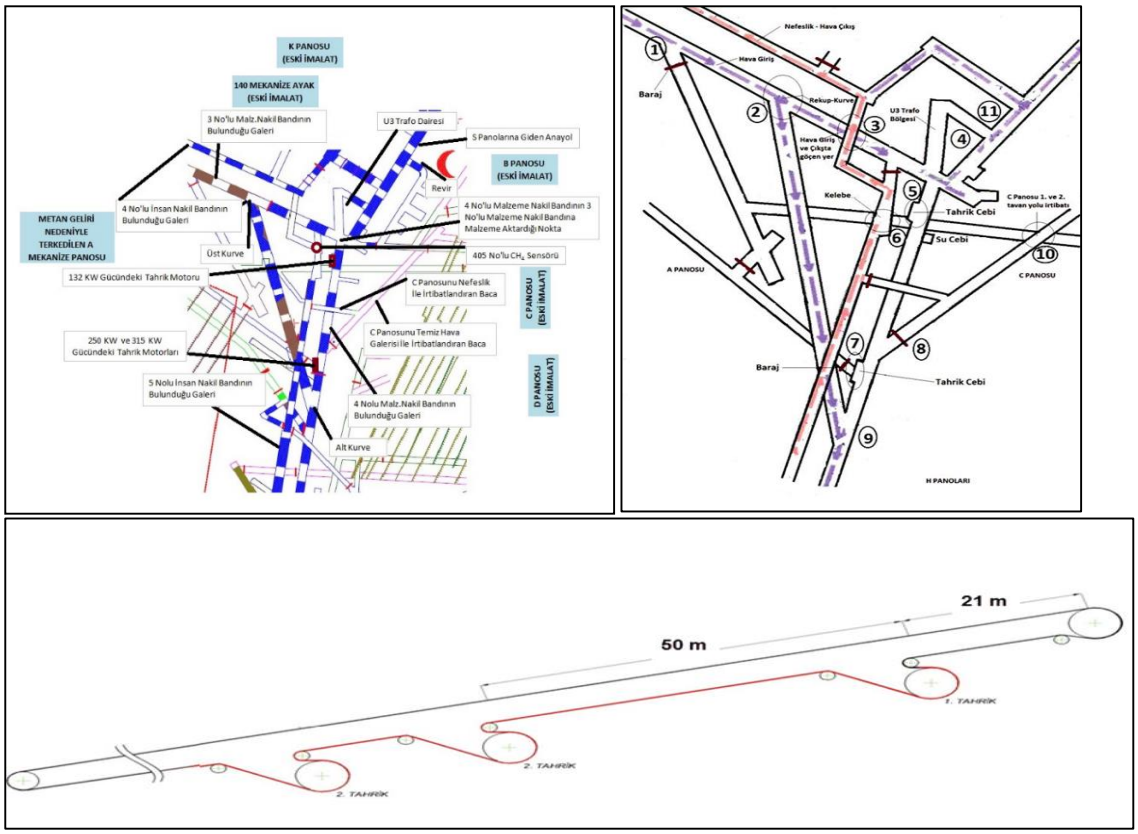
Olayın başlamasına neden olan gaz ve dumanın kaynağının, esas olarak 4. bant galerisi olduğu hususunda ortak kanaate varılmıştır. İncelemeler ve değerlendirmeler sonucunda olayın başlamasına neden olan durumlar şu şekilde belirlenmiştir:

i. Ocağın önceki yıllardaki özgün havalandırması, merkezi sistemde olup dengeli iki paralel koldan ve birbirine uzak olmayan hava giriş ve çıkış açıklıklarından oluşmakta ve ağırlıklı olarak iki sektörden oluşan üretim panolarına hizmet vermektedir. Ancak, pano sayısının giderek artması ve A-H panolarında öngörülen ayak mekanizasyonu için gerekli donanımın nakliyatında çıkan güçlüklerden dolayı "kulikar yolu" olarak anılan **galerinin** sürülmesi zorunluluğu doğmuştur. Bu durum ise havalandırmanın dengesinde önemli bozulmalar yaratmış ve daha sonra da S panolarında yoğunlaşan iş yeri ve işçi sayılarındaki olağan dışı artışla havalandırmayı problemli bir duruma getirmiştir



Şekil 3. Ocakta güvenlik amaçlı bırakılan topuklar.

ii. U3 bölgesi olarak anılan kısımdaki tabaka kontrolü açısından zaten olumsuz olan koşullar, kulikar yolunun açılması ile daha da olumsuz duruma gelmiştir. Bir kenarını bu galerinin, diğer kenarlarını da kısmen 3. ve 4. bant galerilerinin oluşturduğu üçgen bölgenin civarında (birbirine yakın seviyelerde bazı noktalarda temiz hava ile kirli havanın karışmasına yol açacak kadar yakın) düzensiz olarak geliştirilmiş ve yüksek basınç altında çok sayıda ocak açıklığı ve barajlanmış eski imalat bağlantıları bulunmaktadır. Bu bölgedeki galeriler, kömürün hemen üzerinde yer alan yalancı tavan tabakası ve ana tavan M2 marnı geçişi içinde açılmışlar ve taban kısımlarında kısmen kömür kesmişlerdir. Bu nedenle, tamamen taş içinde olması gereken pano bağlantıları kısmen kömür içinden sürülmüş olup bu durum, üretimi biten panoların barajlarındaki sızdırmazlık sorununun başlıca nedeni olmuştur.



Şekil 4. U3 olay bölgesi ve 4. Bant konveyör şeması

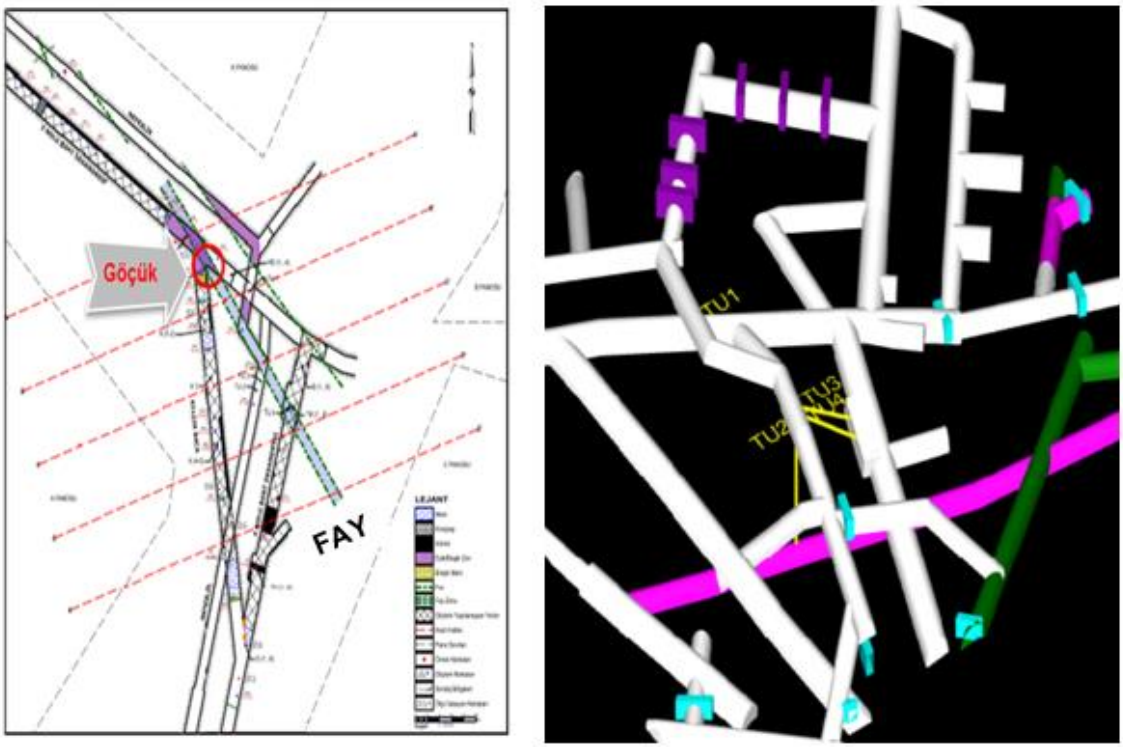
iii. Galeriler, hem yatayda hem de düşeyde, tabaka kontrolü açısından kabul edilemeyecek ölçüde birbirlerine yakın sürülmüş olup, gerilme yığılmaları açısından birbirlerinin etki alanları içerisine girmektedirler. Düşey gerilme yığılmaları nedeniyle de galeriler arasında kalan, yetersiz genişlikteki eğimli topuklar oldukça yüksek basınç gerilmelerine maruz kalmıştır. Özellikle, 1. tahrik ünitesi ile nefeslik arasındaki topuk genişliği 4 m'ye kadar düşmektedir. 1. tahrik cebinin 7-8 m yukarısında ve sol çaprazında nefeslik yer almaktadır.

iv. U3 topuğu içerisinde, birinci tahrik cebinden başlayarak, kulikar üst kurvesine doğru devam eden ve olaydan 3 ay kadar önceki önemli boyuttaki bir göçüğe de neden olan 3-4 m genişliğinde oldukça kırıklı yapıda bir fay zonu mevcuttur. Bu fayın neden olduğu göçük, o dönemde 14 adet domuzdamı ile doldurularak tavan tabakaları desteklenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, bu galeriler arasındaki kaya kütlesi oldukça çatlaklı, göçüklere, kaymalara müsait, eski imalatların dolgu yapılmış bağlantı yollarına irtibatlanabilecek bir yapıdadır. Dolayısıyla, eski imalattan gaz ve eski imalata hava kaçaklarına neden olacak bir durum söz konusudur. 5 Şubat 2016 günü gerçekleştirilen keşifte, U3 bölgesindeki açıklıkların yan duvarlarının çatlaklı, ezilmiş ve yer yer bloklu yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, 5 Şubat 2016 tarihindeki keşif sonrası alınan karara göre, özellikle U3 topuğunun geo-mekanik yapısını belirlemek üzere 4 adet karotlu sondaj (TU1, TU2, TU3 ve TU4) yapılması bilirkişi heyeti tarafından mahkemeden talep edilmiştir (Şekil 5). TU3 nolu sondaj, nefeslikten 1. tahrik cebine (8.5 m sonra 1. tahrik cebini delmiştir) ve TU4 nolu sondaj da 4. bant

galerisi 1. tahrik cebinden nefesliğe (10.6 m sonra nefesliği delmiştir) doğru gerçekleştirilmiştir. Sondajlardan elde edilen sonuçlara göre; nefeslik ile 4. bant galerisi arasındaki topuk tamamen yenilmiş, aşırı kırıklı ve ezik yapıdadır. RQD (Kaya Kalitesi Belirteci) değerinin 0-10 arasında (çok zayıf) değiştiği görülmektedir. Diğer taraftan, 4. bant galerisi kül ile doldurulurken bu topuğun içine de kül basılmasına rağmen, açılan TU1 ve TU3 nolu sondajlardan çok düşük seviyelerde de olsa CH_4 ve CO_2 gelirinin olduğu saptanmıştır. TU1 nolu sondajda %0.18 CH_4 ve TU3 nolu sondajda %0.07 CH_4 ve %0.54 CO_2 ölçülmüştür. Bu sondaj deliklerinin ağızları ocak güvenliğini tehlikeye düşürmemek için, mahkeme emri ile külle doldurularak mühürlenmiştir.

TU2 nolu sondaj doğrultusu dik bir şekilde, nefeslik galerisinden eski C panosu bağlantı yolunu kesecek şekilde seçilmiştir. Bu sondaj, 9 m sonra kömüre girmiş kömür içerisinde devam ederek 11. m'den sonra balçığa (taze doldurulmuş kül) girdiği için tij sıkışmıştır. Balçık nedeniyle devam ettirilemeyen sondaj sonlandırılmıştır.

Diğer taraftan, kül ile doldurularak barajlanmış olan eski C panosunun bağlantı yolu da, nefesliğin ve 4. bant galerisinin 1. tahrik cebinin altından geçmektedir (4. bant galerisinin 1. tahrik cebinin 6 m altında kömür olduğu da bu bölgeye sanık müdafileri tarafından yaptırılan karotlu sondajda görülmektedir). A panosunun barajlı pano bağlantı yolu kulikar yoluna ve 4. bant galerisine (2. tahrik cebi) irtibatlıdır.



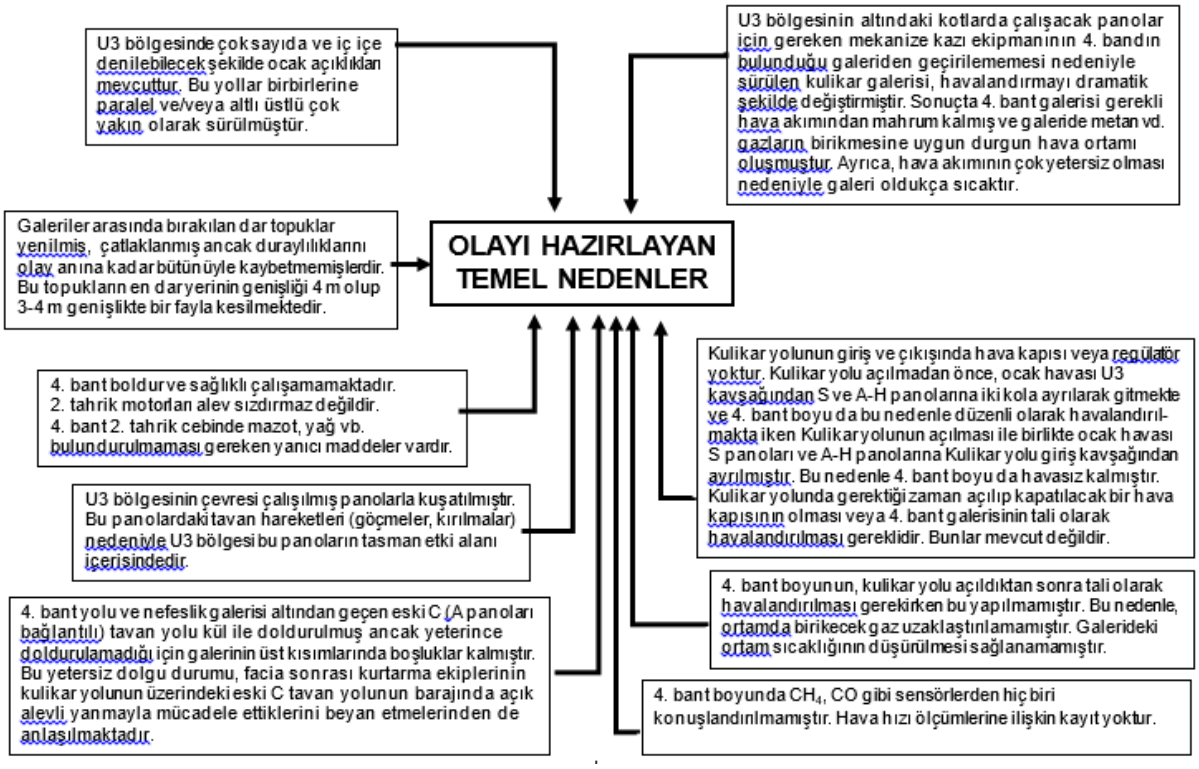
Şekil 5. U3 fay zonu ve U3 topuğunda gerçekleştirilen "TU" kodlu sondajlar.

Soma Eynez Karanlıkdere ocağı, U3 bölgesinde meydana gelen olayı hazırlayan temel nedenler aşağıda Şekil 6'da detaylı olarak gösterilmektedir.

2.3. Olayın Başlangıcındaki durumlar

Olayın nasıl başladığını net olarak anlatabilen tanık ya da tanıklar yoktur. Olayın geliştiği U3 bölgesine en yakın konumda olanlar 3. bant galerisinde iki ayrı ekip halinde çalışmalarını sürdüren kişilerdir. 3. bant kuyruğunu düşürmek amaçlı küçük atımları takiben taban temizliği ve tarama işi yapan üçer kişilik iki ekip vardır. Ayrıca, bantların çalıştırılmasından sorumlu operatör ve ajöstör de 3. ve 4. bant galerilerinin birleştiği açıklıkta görev yapmaktadırlar. Bantçı yedeği 3. bant kuyruğundaki çalışmalara katılmakta, bir kişi de nezaret görevini sürdürmektedir. Burada çalışanlar, birbirini izleyen ya da eş zamanlı meydana gelen iki olaya tanıklık etmektedirler. Bant sensörlerinden elde edilen bilgiler kullanılarak olayların **başlangıcı olması mümkün en doğru zaman**, Çizelge 2'de koyu puntolarla işaret edilmiştir.

Çizelge 2'deki veriler irdelendiğinde, 3. bantın 14:52 ye kadar çalıştığı görülmektedir. 4. bandın da eş zamanlı çalışıyor olması gerekmektedir. Ancak, saat 14:47:05'e kadar sorunsuz çalışan 4. bant, 14:47:05'den 14:48:20'e kadar çalışmış-durmuştur. Duran 4. bant ise sorumlu operatörün ifadesine göre ilk yol vermede çok az hareket etmiş ve durmuştur.



Şekil 6. Olayı hazırlayan temel nedenler.

İkinci yol vermede ise bant hiç hareket etmemiştir. Bir başka deyişle, 14:47:40-14:48:20 aralığında elektriksel olarak banda 2. kez yol verilmesine rağmen, bant hiç hareket etmemiştir. Yani bant zorlanmıştır. Akabinde, aşağıdan (4. bant galerisinden) önce beyaz sonra siyah bir duman geldiğini beyan etmişlerdir (ifadelere göre 14.50

civarı). Bu, muhtemelen 4. bant galerisi içinde olaya yol açan durumların (kısmi göçük ve akmalar, eski imalatla irtibatlı taban yollarından gelen gazların üflenerek yayılması) başlangıcıdır. Düşen taşlar, bant zorlanmasının esas nedeni olmuştur.

Çizelge 2. Bant sensörlerinin gösterdiği değerlere göre olayın süreci (Bilirkişi raporu, 2016)

Zaman Aralığı	Durum
12:32 – 12:42	3. bant ve 4. bandın aynı anda durmuş oldukları 10 dakikalık süre (birinci patar atımının gerçekleştirilmesi).
13:53 – 14:40	3. bant ve 4. bandın beraberce çalıştığı zaman dilimi.
14:40 – 14:41	3. bant ve 4. bandın aynı anda durmuş oldukları süre (ikinci patar atımının yapılması).
14:41 – 14:52	3. bandın çalıştığı zaman dilimi. Bu bant 14:52-15:10'a kadar durmuş, sonra sensör hatası vermiştir.
14:41 – 14:47:05	4. bandın sorunsuzca çalıştığı zaman dilimi.
14:47:05 – 14:47:40	4. bant 35 saniye durmuştur.
14:47:40 – **14:48:20**	4. bandın elektriksel olarak çalıştığı ancak hareket etmediği son 40 saniyelik zaman dilimi.
14:48:20 – 14:50:30	4. bandın durduğu zaman dilimi.
14:50:30	Sensör kablolarının kopması nedeniyle 4. bant sensöründen alınan son veri.

İfadelere göre saat 14:50 sıralarında 3 nolu malzeme nakil bandı kuyruğunda taban alma işinde çalışan bantçı yedeğinin yanına, galeri yan duvarı ile tavanının birleştiği köşeden (üçgen topuk tarafındaki) bir taş kütlesi düşmüştür. Bu gelişmenin ardından burada çalışanlar, tavan ile yan duvarın kesiştiği yerden önce yavaş şekilde beyaz bir dumanın gelmeye başladığını, dumanın hızla artıp yoğunlaşarak gri-siyah bir renge dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Olay bir bütün olarak değerlendirildiğinde, taş düşmesinin ifadelerde belirtilenden 2-3 dakika daha önce (14.47-14.48)**,** yukarıdaki olayla hemen hemen eş zamanlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu zaman zarfında, 4. bant galerisine üflenen gaz ve dumanın bir kısmı kısa devreyle 3. bant kuyruğuna ulaşmıştır.

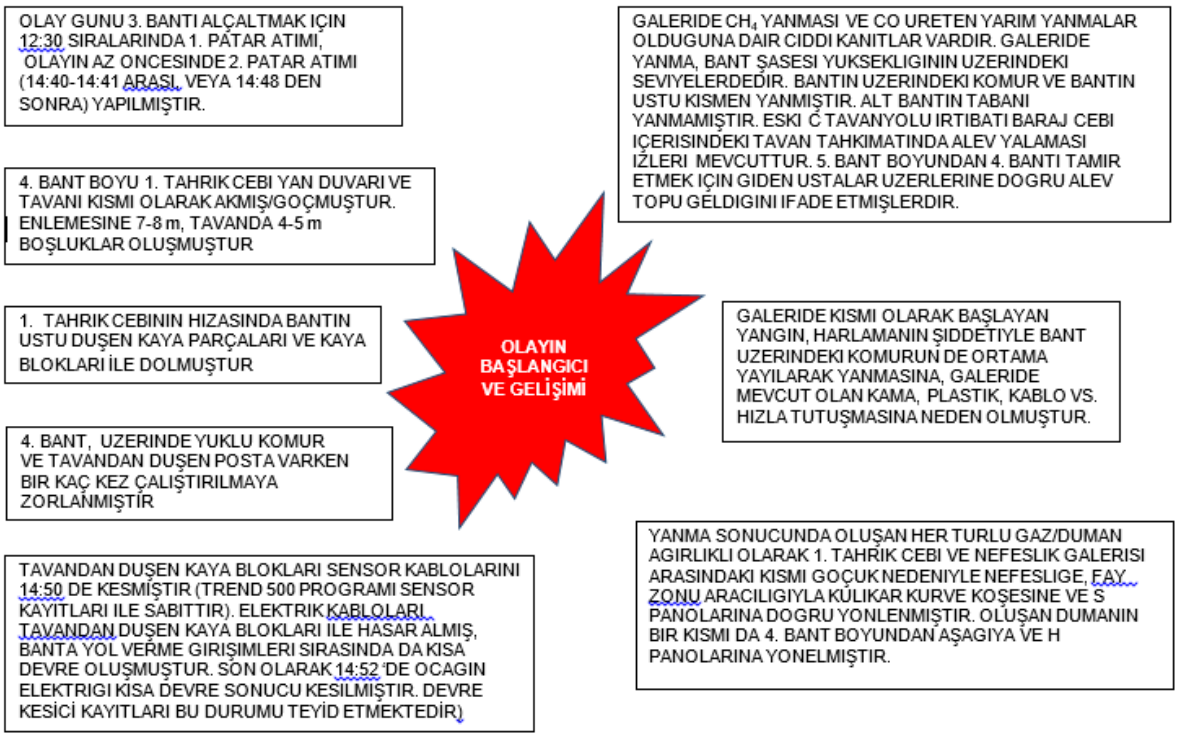
Bu olaylarla, eski imalatla irtibatı olan patikalar/akış yolları oluşmuş ve ifadelere göre gazlar yoğun biçimde galerilere gelmeye başlamıştır. Saat 14:50'de tavandan düşen posta nedeniyle sensör kabloları zarar görerek A ve H panolarından gelen tüm verilerin iletimi kesilmiştir (sensör veri iletim hattı 4. bant galerisinden geçmektedir). Çalışanların panik içinde oldukları birkaç dakika içinde de uygun yoğunluğa ulaşan metan gazı taş düşmesiyle ezilen/sıyrılan bir elektrik kablosunun/kabloların neden olduğu arkın sıcaklığı ile tutuşmuş/parlamış/yanmış **(**elektriğin kesilme saati **14:52)** ve olayın gelişme süreci başlamıştır.

1. sınıf bant ustası ve 5. bant şaltercisi ifadelerinde 4. bandın aşırı yüklü ve bol olduğunu beyan etmektedirler. Bu bant motorları fazla yüklü olması nedeniyle aşırı akım çekmektedirler. Saat 14:52 de tavandan düşen taşların enerji kablolarını ezerek/kopararak kısa devreye yol açması sonucu oluşan ark ve yüksek ısı, önce metan ve bant çevresindeki kömür tozu gibi kolay yanacak malzemeyi, daha sonra bant üstündeki kömür ile bant kayışını ve kabloları tutuşturarak duman çıkarmaya başlamıştır. Çok kısa bir süre içerisinde de (5-10 saniye) 1. ve 2. tahrik cepleri arasındaki galeri kısmında yeterli yoğunluğa ulaşmış olan metan parlamış ve yanmaya başlamıştır. Bu olay, eski imalattan üflenmenin hızı düşene ve yoğunluğu azalana kadar devam etmiştir. Alt kurvede bulunan tanık, 4. bandın üst yüzeyinde önce bir alev topu görmüş daha sonra bu alevin tüm galeriyi kaplayacak şekilde 4. bant boyundan aşağı doğru hızla yayılarak üzerlerine doğru hücum ettiğini ve 4. bandın da koparak ve yanarak üzerlerine doğru kaydığını beyan etmiştir. Bu ifadelere yukarıda bahsedilen 4. bant başındaki işçilerin ifadeleri ile birlikte bakıldığında (alev görmemişlerdir), oluşan yanma alevinin 4. bant boyunca aşağıya doğru geliştiği, bandın (üst bant) yandığı ve koptuğu, dumanın ise aşağıya ve yukarıya doğru geliştiği anlaşılmaktadır.

Saat 14:52 de başlayan yangın neticesinde oluşan ve hemen akabinde parlayan/yanan metan gazı nedeniyle yukarıya ilerleyen duman; S panolarına ve nefeslik galerisi ile 4. bant 1. tahrik cebi arasındaki kısmi göçüğün neden olduğu bağlantı (kısa devre) yoluyla nefesliğe ve yine 1. tahrik cebinden geçen fay zonu yoluyla 3-4 ay önce göçen ve tamir gören kulikar kavşağına yönlenmiştir. Yukarıya ilerleyen dumanın bir kısmı da nefeslik ile 3. bant galerisinin kesiştiği kesimin arasında kalan 2 m kalınlığındaki göçmüş, tamir görmekte olan tavan topuğundan tekrar 3. bant yoluna kısa devre yapmaktadır. Bu dumanın bir kısmı 3. bant yolu-kulikar kavşağında aşağıya doğru dönmektedir. 4. bant yolunda aşağıya doğru ilerleyen duman da 4. bant yolu-kulikar kavşağında kısmen topuktaki çatlaklara ve nefesliğe sızmış ve büyük ölçüde kulikar yolundan aşağıya doğru gelen dumanla birleşerek A-H panolarına doğru yönelmiştir. U3 topuğu sünger gibi aşırı geçirgen bir yapıda olduğu için tüm çatlaklardan galerilere duman sızması olmuştur. Kaçaklar ve kısa devreler sonucunda gerçekleşen duman sirkülasyonu, dumanın önemli bir kısmının U3 bölgesinde dönmesine neden olmuştur.

U3 bölgesi ve altında kalan sensörlerden veri alınamamasına karşın, U3 bölgesinden bağımsız enerji ve veri iletim kablolarına sahip olan S panolarına giden yol üzerindeki S2 klasik ayak 545 nolu CO sensöründe (U3 bölgesine ~725 m uzaklıkta) saat **14:57'**den itibaren gaz artışı başlamış, saat 15:02 de 500 ppm değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, 545 nolu CO sensörünün az ilerisinde ve aynı yol üzerindeki S1 yarı mekanize 501 nolu CO sensöründe (U3 bölgesine ~900 m uzaklıkta) saat **15:02**'de CO artışı başlamış, 15:06'da 500 ppm değerine ulaşmıştır. A ve H panolarının hava dönüşünü sağlayan ana nefesliğin ocak ağzına yakın konumlandırılmış, 260 Nefeslik Personel 3. bant başındaki 431 nolu CO sensörüne (U3 bölgesine ~1120 m uzaklıkta) ilişkin veriler incelendiğinde, saat **15:03**'de CO değerlerinde kayda değer ilk yükselmenin başladığı ve saat **15:08** de CO'nun 500 ppm değerine yükseldiği görülmektedir. Esasen bu değer, sensörler için maksimum ölçüm değeri olup CO

değerlerinin bundan sonra daha da hızla arttığı düşünülmektedir. Aşağıda olayın başlangıcı ve gelişiminin toplu bir gösterimi Şekil 7'de özetlenmiştir.



Şekil 7. Olayın başlangıcı ve gelişimi

2.4. Olay Başlangıcında Ocakta Yürütülen Mücadele

Kazanın meydana geldiği bölgede 3 no'lu malzeme nakil bandının tabanındaki kabarmadan dolayı oluşan killi tabakanın alınarak bant yüksekliğinin düşürülmesi amacıyla, 13.05.2014 tarihinden birkaç gün önce başlatılan taban taraması çalışmasına 13.05.2014 tarihinde 2. vardiyada da devam edilmiştir. Bu amaçla galeri tabanında saat 12:00 sıralarında birinci patlatma, saat **14:30-14:45** sıralarında ise ikinci patlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Saat **14:47-14:48** de 3 nolu malzeme nakil bandı kuyruğunda taban alma işinde çalışan bantçı yedeğinin yanına, galeri yan duvarı ile tavanının birleştiği köşeden (üçgen topuk tarafındaki) bir taş kütlesi düşmüştür. Bu olayın akabinde sorumlu işçilerden biri, bu kısımdan ayrılarak U3 bölgesine geçmiş ve bir "güp" sesi duymuş ve dumanın üzerine geldiğini görmüştür (muhtemelen 4. bant galerisi içindeki taş düşmelerinden birkaç dakika sonra). Bu gelişmenin hemen ardından burada çalışanlar, tavan ile yan duvarın kesiştiği yerden önce yavaş bir şekilde beyaz bir dumanın gelmeye başladığını, duman gelişinin hızla artıp yoğunlaşarak gri-siyah bir renge dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Bu arada, 4. bandın çalıştırılmasında sorun yaşamış olan bant operatörü ve bazı galeriden yukarı doğru bir duman geldiğini de görmüşler, panik halinde, "kaçın!" diyerek tarama ekibine doğru koşmuşlardır. Çalışanlar temiz havaya doğru kaçmışlar, yeryüzüne haber verme ihtiyacı duymuşlardır. Ulaşabilen ilk telefondan izleme merkezi ile irtibat kurarak "U3 bölgesinde yoğun duman olduğunu" bildirilmiştir. İzleme merkezindeki görevli, U3 ve A-H panolarına giden yeraltı sensörlerinin enerjisinin gittiğini kısa bir süre önce

(14.50'de) bilgisayar ekranından görmüştür. Veri gelişinin kesildiğini, ekranda sayısal veri yerine çarpı işaretlerinin görüldüğünü tespit etmiştir. Hemen cihaz bakımcıyı araması üzerine, **saat 14:53** civarında cihaz bakımcısı ocağa girmiştir. Aynı anda teknik müdür aranmıştır. İzleme merkezine yakın bir bölgede olan teknik müdür izleme merkezine gitmiştir. Ocağa inen cihaz bakımcısı U1 bölgesinden arayarak U2 ve U3 de enerji olmadığı bilgisini vermiştir. İşletmeden alınan tek hat şemasında devre dışı kalan kesiciler ve devre dışı kalma zamanları belirtilmiştir. Buna göre 6.3 kV ve 3.3 kV enerji besleme kesicileri ve dışarıdaki bu kolu besleyen ana trafo kesicisi **14.52'**de devre dışı kalarak ocağın enerjisi kesilmiştir.

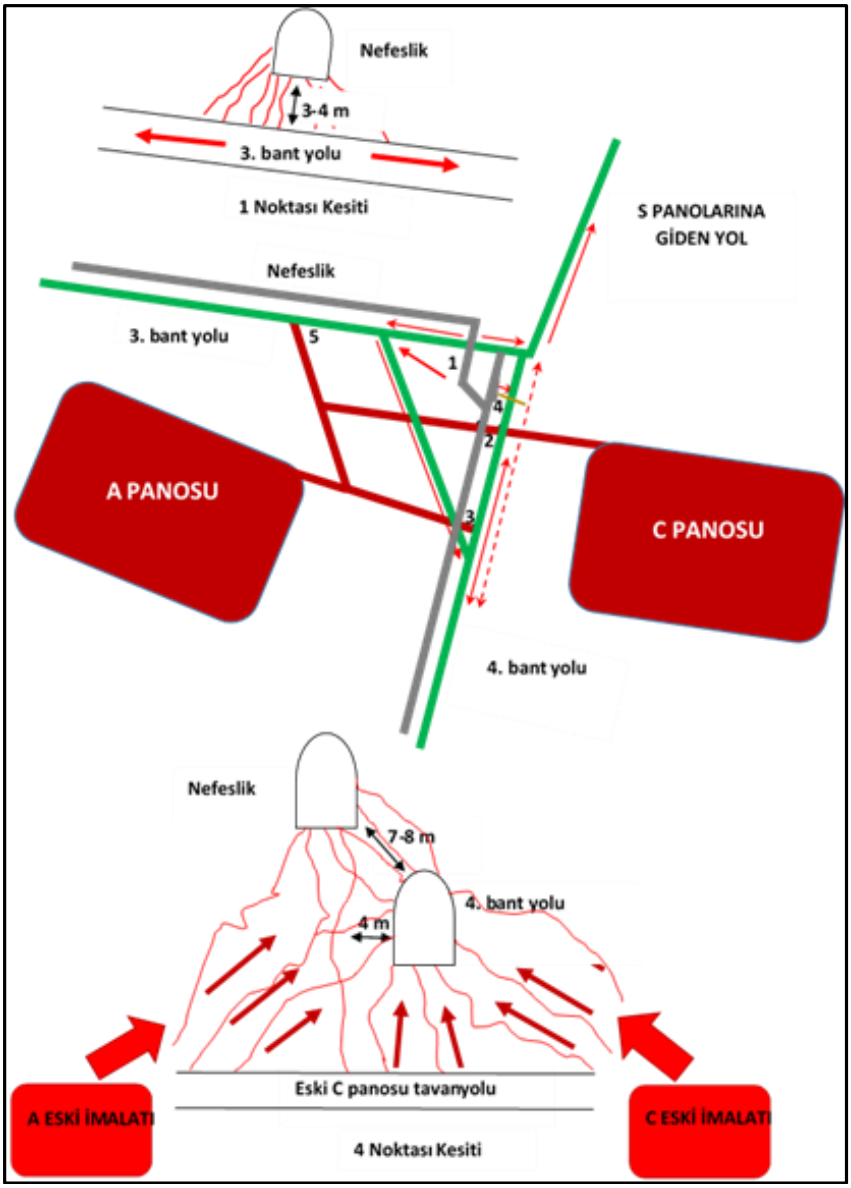
2.4.1 Olay Başlangıcında Gaz ve Dumanın Hareketi, Kısa Devreler

Yukarıda açıklandığı üzere kaza eş zamanlı ya da ardışık 2 olayla kendini göstermiştir:

- Bant kuyruğu ile 4. bandın başının bulunduğu noktada taş düşmesi ve tavana yakın kısımdan duman geliri.
- Bant galerisi içinde bir noktada galeri duvarından/tavanından taş düşmeleri (posta akması) sonucunda duman geliri.

Kazanın başlangıcını takiben şu durumlar kısa devrelere yol açarak doğrudan müdahale çalışmalarının başarısız olmasına yol açmıştır:

- 4. bant galerisinin 4 m solunda ve 7-8 m üzerinde A ve H panolarının nefesliği yer almaktadır. Bu 4 m genişliğindeki topuk oldukça yüksek gerilmeler altında ve çok çatlaklı ve kırıklı bir yapı arz etmektedir. Jeolojik etütte bu kısımdan etkin bir fayın da geçtiği saptanmıştır (bkz Şekil 5). Bu fay aynı zamanda 3. bant galerisindeki kulikar yolu kavşağı yakınında 3 ay kadar önce oluşmuş olan göçüğün de nedenidir. Dolayısıyla, bu civarda da kırıklı/çatlaklı bir yapı mevcuttur. Keza, bu noktadan da bir duman hareketi söz konusudur.
- Nefeslik ve 3. bant galerisinin kesiştiği noktada, 2-2.5 m kalınlığında bir topuk vardır (Şekil 8'de 1 noktası). Bu topuk, olay öncesinde göçmüş olup olay sırasında tamir (kül dolgusu) görmektedir.



Şekil 8. Üç ve dört no'lu bant galerileri çevresinde eski imalata irtibat sağlayan ve duman/gaz kısa devrelerine oluşturan çatlaklanmalar ve kırıklanmalar.

3. bant galerisi ile nefeslik galerisi arasındaki 4. bant 1. tahrik cebinin olduğu kesimdeki 4 m'lik topuğun kısmen yenilmiş olması nedeniyle burada kısa devre oluşmaktadır. 4. bant boyundaki her türlü duman-gazın bir kısmı bu kısa devreden nefesliğe, nefeslikten de bir kısmı 3. bant galerisindeki göçükten (tamir edilen kısımdan) tekrar U3 bölgesine dönmekte, bir kısmı da S panolarına giden temiz hava koluna eklenerek S panolarına yönelmektedir. Aynı anda 3. bant galerisindeki kurve civarındaki (kavşak yakınında) eski göçükten de gaz ve duman gelerek kulikar yolu üst kurvesinden aşağıya A ve H panolarına doğru yönelmekte, bir kısmı 4. bant galerisine geçmektedir. 4. bant boyunda gelişen yanmalar sonucu oluşan gazların önemli bir kısmı da sıcak ve hafif oluşlarının da etkisiyle S panolarına yönelmiştir. Bu nedenle görgü tanıkları, "havanın U3 kurve üçgeninde döndüğünü" ve "aşağı (A-H panoları) ve yukarıya (S panoları) yönlendiğini" beyan etmişlerdir.

Kaza sırasında oluşan dumanın S panolarına hizmet eden 545 nolu CO ve 501 nolu CO sensörlerine ve hava dönüş yolundaki +340 nefeslik sensörüne (431 nolu CO sensörü) ulaşma süreleri de bu yorumlamayı destekler şekildedir. Yani, 4. bant boyundaki dumanın bir kısmının 1. tahrik cebi kenarındaki çatlaklı, kırıklı zondan kısa devre yaparak nefesliğe ulaştığı, buradan da ocak dışına yöneldiği anlaşılmaktadır.

Olayın meydana geldiği galeriye yakın ana galeride bulunan bant konveyörün (anayol 3. bant) kuyruğunun yerleştirilmesi amacıyla yapılan patar atımları; bu riskli topukların daha da zayıflamasına, daha önce zaman içinde oluşmuş olan kırık ve çatlakların aniden gelişmesine ve açıklıkların cidarlarında kısmen göçmelere/dökülmelere ve fay zonunun da hareketlenmesine yol açmıştır. Sonuçta, eski imalat panolarında biriken gazlara ve dumana çıkış yolları ile bu gaz ve dumanın kısa devreler yapmasına uygun patikalar/akış yolları. Eski imalattan pano bağlantı yolları (tavan yolları, tavan dilimindeki taban yolları) kanalıyla nispeten dar kesitlerden gelen gaz, ocak havalandırma basıncının da (emişin) etkisiyle açıklıklara üflenmiş ve doğrudan hava akımına karışarak olayın başlıca nedeni olmuştur.

Olayın gelişimi, olaya yakın olan tanıkların ifadeleri, ocakta yürütülen mücadele ve kurtarma çalışmalarına katılanların ifadeleri; bir taraftan eski imalattan hızlıca gelen yanma ürünü gazların ve bir taraftan da ortamda biriken yanıcı gazların yanmasıyla oluşan gazların olaya birlikte katıldığı yönünde kuvvetli bir kanaat doğurmuştur.

2.5. Hava Yönünün Değiştirilmesinin İrdelenmesi

Yangın sırasında havalandırmanın ters çevrilmesi (üfleyici hale getirilmesi) her zaman zor ve dramatik bir karardır. Ocak havalandırmasını çok iyi bilmeyi ve hava yönünün ters çevrilmesi durumunda bundan etkilenecek çalışanların ocak açıklıklarında bulunmadığına emin olmayı gerektirir.
Olayın hemen sonrasında, kurtarma ekiplerinin kolayca ulaşabildiği tek yer kurve kavşağıdır. Bu noktadan ileriye doğru tüm galeriler yangın etkisinde veya duman altındadır (nefeslik, kulikar yolu, 4. bant galerisi ve S panolarına giden ana havalandırma galerisi). Yangının hemen akabinde, havalandırma başmühendisi tarafından hava kapılarının açılıp dumanlı havanın nefesliğe by-pass edilmesi A ve H panolarına gidecek zehirli-boğucu dumanın önemli bir kısmını bertaraf etmesi açısından önemlidir ve bu panolardaki işçilerin hayatını çok büyük ölçüde kurtarmıştır. Ancak, bu işçilerin tahliyesi mevcut koşullarda mümkün görünmemektedir. Çünkü yukarıda belirtilen nefeslik, kulikar yolu, 4. bant galerisi çok yoğun duman altındadır. Bu durum, A ve H panolarındaki işçilerin kaçamakta ve/veya ayaklar içinde çıkmaz bir bölgede mahsur kaldığını göstermektedir. Havalandırmanın ters çevrilmesiyle birlikte, nefeslik temiz havaya kavuşturulmuş ve işçilerin nefeslik yolu ile kurtarılması sağlanmıştır. Aksi takdirde, bu panolarda mahsur kalan çalışanlar da zaman içerisinde, CO maskelerinin işlevsiz kalması gibi nedenlerle büyük olasılıkla hayatlarını kaybedebilirlerdi.

S panolarındaki mühendisin elinde de havalandırma başmühendisinin sahip olduğuna benzer bir by-pass olanağı olsaydı (projelendirilmiş olan ve açılmayan galeri) buradaki işçilere de tahliye için zaman kazandırılabilirdi.

Havalandırma başmühendisi, A ve H panoları yönündeki hava kapılarını açıp yoğun dumanı nefesliğe doğru yönlendirerek (by pass ederek) ocak dışına çıkmasını sağlamıştır. U3 te 4. Bant galerisi ve nefeslik arasındaki göçük by-pass'ı da dumanın bertarafını sağlamıştır. Böylece, A ve H panolarına duman ve gazların ulaşması büyük ölçüde engellenmiş ve bu panolardaki işçilere zaman kazandırmıştır. Aynı engelleme S panoları yönünde, U3 trafo bölgesindeki kapılar da (Şekil 9) açılarak sağlanabilir ve S panolarındaki işçilere zaman kazandırılabilirdi. Hatta ana yola perde tutulup bu zaman daha da uzatılabilirdi. Ancak, yoğun dumanın bu tür bir çalışmaya izin vermediği anlaşılmaktadır. Bu işlemi yapabilecek olan elemanların, duman engeli nedeniyle 3. bant kuyruğunu aşıp da bu bölgeye girememeleri, aynı nedenle S panosu çalışanlarının ortamı terk edememesi şanssızlık olmuştur.

3. SONUÇLAR

Eski imalattan sızan gazlar içindeki metanın yanmasına yol açarak ocakta yangını başlatan neden; göçükler, kaymalar, posta akmaları sırasında darbe gören (ezilen/sıyrılan) bir kablonun/kabloların yarattığı ark veya kısa devredir. Eski imalattan sızan gazlara 4. bant galerisindeki yangın ürünü gazların da ilavesiyle ortama çok kısa sürede ve ani bir duman baskını gerçekleşmiştir. Bu gaz, ağırlıklı olarak S panolarına, nefeslik yoluyla dışarıya ve/veya kurve üçgenine ve bir kısmı da A ve H panolarına doğru yayılmıştır. Yukarıda açıklanan kısa devreler çalışanlar tarafından olayın tam olarak anlaşılmasını ve doğrudan müdahaleyi zorlaştırmıştır.

Dünyanın ve ülkemizin en büyük ve trajik maden kazalarından biri olan Soma Maden faciası göstermiştir ki bir maden kazasının ocağın büyük bir kesimi veya tamamını etkileyecek bir ölçekte gerçekleşmesinin farklı nedenleri vardır. Bunlar, ocak planlaması başta olmak üzere, havalandırma, denetim, iş sağlığı ve güvenliğindeki eksiklikler ve tabaka kontrolü-tahkimatta yaşanan sorunların ocak havalandırmasını kısmen veya tamamen bozmuş-engellemiş olması nedeniyledir. Ocak havalandırmasını doğrudan etkileyen kısa devreler ve ocak havalandırma düzeninin tamamen bozulmasına, patlayıcı-yanıcı gazların etkin havalandırma ile seyreltilip ocaktan bertaraf edilememesine ve dolayısıyla yanıcı ve zehirli gazlar ani ve yoğun ölçekte ocak açıklıklarına hücum ederek harlama ve/veya yanmaya neden neden olmuştur. Böylece, yanma sonucu da oluşan ölümcül gazlar ocağın neredeyse tamamına yayılmıştır.

Soma faciası nasıl adım adım geldi sorusuna yanıt vermeden önce, son söylenecek söz en başta söylenecek olursa, kazanın facia boyutuna ulaşması nasıl basit önlemlerle önlenirdi? sorusuna yanıt vermek daha doğru olacaktır.
Yukarıda detayları verilen bölge oldukça hassas bir konumda olup ocağın merkezidir. U3 bölgesi betonarme tahkimatla desteklenmiş olsaydı hem üçgen topuk diye tabir

edilen U3 topuğu etkin bir şekilde desteklenmiş-güçlendirilmiş olacak ve olası bir göçük ihtimalini ortadan kaldırabilecekti. Böylece havalandırma etkinliği sağlanacak alt kotlardan galerilere (özellikle facianın başladığı 4. Bant galerisine) gaz sızıntısının da önüne geçilebilecekti.

Kulikar yolu (kurve) diye adlandırılan galerinin üst yol ayrımına bir regülatörlü hava kapısı koyulmuş olsaydı, 4. Bant yolunda hava akışı sağlanmış olacak ve alt kotlardan sızan yanıcı-patlayıcı gaz seyreltilerek ocaktan atılabilecekti. Ancak, bu kapının üst kurveye yerleştirilmesi U3 bölgesinde 4. Bant 2. Tahrik motoru noktasında yaşanacak göçüğe engel olmayacaktı. Bir ihtimal ki hava akışı nedeniyle seyreltilmiş gaz yanıcı-patlayıcı ortam oluşturmayabilecek ancak bu bölgede göçük yine oluşacaktı.

U3 topuğunun tam altında kalan eski çalışma açıklıkları kül dolgusuyla doldurulmuş olsa da kül-su karışımı suyunu kaybedip çökelince arada dolmamış bir kesim yine kalmıştır. 4. bant yolu ve nefeslik galerisi altından geçen eski C (A panoları bağlantılı) tavan yolu kül ile doldurulmuş ancak yeterince doldurulamadığı için galerinin üst kısımlarında boşluklar kalmıştır. Bu yetersiz dolgu durumu, facia sonrası kurtarma ekiplerinin kulikar yolunun üzerindeki eski C tavan yolunun barajında açık alevli yanmayla mücadele ettiklerini beyan etmelerinden de anlaşılmaktadır. Aynı şekilde bölgede yapılan karotlu sondajlar da bu durumu teyit etmiştir.

U3 bölgesi, kazanın merkezi ve faciaya dönüşme sebebidir. U3 bölgesine gerekli önem verilseydi bu kaza hiç gerçekleşmezdi. Ancak, S panolarındaki dramatik şekilde artan can kayıpları, U3 te yaşanan kazanın sonucuna doğrudan bağlanamaz. S panolarının küldesak havalandırması (revize projelerin hayata geçirilmemesi), umursamazlık (olayı hafife alma), U3 teki havalandırma kapılarının açılarak dumanın kısa devre ile uzaklaştırılarak çalışanların S panolarından tahliyesini sağlanmaması ve çalışanların S panolarında beklemeleri için diretmesinden kaynaklanmıştır. Kısaca tahliye gecikmiş ve S panolarındaki ölümlere neden olmuştur. Diğer taraftan, yanma ürünü gazların A ve H panolarına yoğun bir şekilde ulaşmamasının asıl neden yukarıda Şekil 4'te 5'no ile gösterilen noktadaki göçük nedeniyle zehirli gazların kısa devre ile hava dönüş yoluna (nefeslik) geçmesidir. Havalandırma başmühendisi de daha alt kesimde havalandırma kapılarını açarak gelen dumanın nefesliğe yönlenmesini sağlamıştır. İkinci olarak da U3'ün hemen üstünde yer alan havalandırma kapılarını açmaya giderken (S panolarına duman gidişini önlemek için) yoğun dumandan etkilenerek hayatını kaybetmiştir.

Son söz olarak;

1. **Soma Havzası, Madenciliğin ve Havza Madenciliğinin temel ilkelerine göre yönetilseydi:**

- Soma Kömür Havzası'nın T.K.İ. tarafından yapılmış, çevreden merkeze (dönümlü) ve yukarıdan aşağıya çalışmayı esas alan bir genel planlaması (Master Plan) olsaydı ve Havzanın parsellenerek ihalelere çıkılması bu plana göre yapılsaydı ve hatta

sahalar yukarıdan aşağı ve sırasıyla rödevans projeleri yapıldıktan sonra ihale edilseydi.

- Dolayısıyla, Havza'da rödevansla çalışan firmalar kesin sahalarını ve hedeflerini bilerek ve ona göre yatırım ve termin planlaması yaparak çalışabilselerdi; madencilik faaliyetleri sürerken firmalara tahsis edilen sahaların yatay ve düşey koordinatlarında değişmeler yapılmak zorunda kalınmasaydı.

2. Soma Kömür İşletmeleri A.Ş., aşağıdaki konularda T.K.İ. ve MİGEM (MAPEG) tarafından zorlanabilseydi ya da firma yöneticileri basiretli davranabilselerdi:

- Revize planlarda öngörülen ek/yeni nefeslik ve havalandırma tasarımları yaşama geçirilseydi, yeni vantilatör kurulsaydı, riskli havalandırma sistemiyle üretime devam edilmesine itibar edilmeseydi,
- "Üretilen kömür miktarı ne olursa olsun alım garantisi" nin albenisine kapılınmasaydı, hedefin üzerinde üretime ancak alt yapı iyileştirmesi koşuluyla izin verilseydi,
- İşçilere Ferdi CO maskesi yerine, Oksijen maskesi (OFK) verilseydi,

3. Olay tarihinde yürürlükte olan mevzuatta, olayla doğrudan ilgili olarak aşağıdaki hususlardaki yetersizlikler olmasaydı:

- Acil durumlarda kaçış yollarının düzenlenmesi ile ilgili hükümlerde yetersizlikler olmasaydı,
- Damarların gazlılığının ve kendiliğinden yanmaya yatkınlığının bilimsel olarak ölçülmesi gibi koşullar bulunsaydı,
- Sensör tipleri, sayıları ve konumlarında açıklık olsaydı,
- Oksijen maskesi (OFK) kullanımı zorunlu tutulsaydı,
- Seri, hava giriş ve çıkışlarının aynı yola bağlanması vb. riskli havalandırma şekillerini kısıtlayan kesin hükümler bulunsaydı yaşanan olayın bir faciaya dönüşmesi önlenebilirdi.

Teşekkür: Yazar, kendisi ile birlikte Soma Bilirkişi Raporu'nun hazırlanmasında yer alarak katkı koymuş heyetin her bir bireyine sonsuz teşekkürler eder.

KAYNAKLAR

Soma Bilirkişi Raporu (2016), 13 Mayıs 2014 tarihinde Soma Kömür İşletmeleri A.Ş. tarafından işletilen Manisa İli, Soma İlçesi, Eynez Köyü, Karanlıkdere Mevkiindeki S.75153 nolu sahada bulunan yeraltı linyit kömürü ocağında 301 ölüm ve 162 yaralanma ile sonuçlanan olayla ilgili Rapor, Akhisar-Manisa, 239 s.

ÜRETİM ÖNCELİKLİ İŞLETME KARARLARININ HAVALANDIRMA SİSTEMİNE ETKİSİ: SOMA VE AMASRA ÖRNEKLERİ

THE IMPACT OF PRODUCTION-DRIVEN OPERATIONAL DECISIONS ON MINE VENTILATION SYSTEMS: THE SOMA AND AMASRA CASES

Derviş Emre AYDIN*

Avukat, Uzman Kriminalist

ÖZET Bu çalışma, 13 Mayıs 2014 tarihli Soma ve 14 Ekim 2022 tarihli Amasra maden katliamlarında üretim öncelikli işletme kararlarının yetersiz havalandırma altyapısı üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Çalışmanın odağını, bu kararların havalandırma sistemi üzerindeki etkileri ile yeraltı hava akışında meydana gelen değişikliklerin havalandırma ve sensör planlarına yansıtılmamasının sonuçları oluşturmaktadır. Bilirkişi raporları, havalandırma planları, hava ölçümleri, merkezi gaz izleme kayıtları ve kurum içi yazışmalar birlikte değerlendirilmiştir. Her iki olayda planların ocaktaki fiili durumu yansıtmamasının sonuçları; risk değerlendirmesi, ölçüm ve denetim ile acil durum müdahalesi olmak üzere üç güvenlik katmanı üzerinden incelenmiştir. Sonuçlar, yatırım ve üretimin sınırlandırılmasıyla çözülebilecek altyapı sorunlarının teknik planlar üzerinde görünmez kılınmasının riski ortadan kaldırmadığını, tersine bütün güvenlik sistemini çökerttiğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Yeraltı kömür madenciliği, havalandırma planı, seri havalandırma, gaz izleme, Soma, Amasra.

ABSTRACT This study comparatively examines the impact of production-driven operational decisions on inadequate ventilation infrastructure in the Soma mine disaster of 13 May 2014 and the Amasra mine disaster of 14 October 2022. It focuses on the effects of these decisions on the ventilation system and on the consequences of failing to reflect changes in underground airflow in ventilation and sensor plans. Expert reports, ventilation plans, airflow measurements, central gas-monitoring records, and internal correspondence were evaluated together. In both cases, the consequences of the plans' failure to reflect actual underground conditions were examined across three layers of safety: risk assessment, measurement and inspection, and emergency response. The findings show that infrastructure deficiencies cannot be resolved by concealing them in technical plans. Such deficiencies require investment and limits on production; making them invisible on paper does not eliminate the risk but instead undermines the entire safety system.

Keywords: Underground coal mining, ventilation plan, series ventilation, gas monitoring, Soma, Amasra.

1. GİRİŞ

Yeraltı kömür ocaklarında havalandırma, çalışanlara temiz hava sağlanmasının ötesinde, yanıcı, patlayıcı, zehirli ve boğucu gazların seyreltilmesi ve ocak dışına taşınması; toz, sıcaklık ve nemin denetlenmesi; yangın ve patlama halinde oluşan dumanın çalışma alanlarından uzaklaştırılması işlevlerini yerine getiren temel güvenlik sistemidir. Sistemin etkinliği ana vantilatörün kapasitesine, havanın ocak içindeki kollara nasıl dağıldığına, hangi hız ve yönde hareket ettiğine ve kirlenen havanın başka çalışma alanlarına uğramadan en kısa yoldan dışarı atılmasına bağlıdır. Bu nedenle havalandırma, ocaktaki bütün açıklıkların ve hava kontrol yapılarının birbirini etkilediği dinamik bir ağ olarak değerlendirilmelidir (McPherson, 1993).

Yeraltı kömür ocaklarında güvenli çalışma koşullarının oluşturulmasındaki en önemli bileşen havalandırmadır. Hava miktarı ve hızının yanı sıra gaz izleme sensörlerinin sayısı, konumu ve temsil ettiği hava akımının da sistemin güvenilirliği açısından belirleyicidir (Barış, Fişne ve Aydın, 2019). Sensörlerin gazların fiziksel özellikleri ve gerçek hava hareketi dikkate alınmadan yerleştirilmesinin izleme sistemini işlevsizleştirebildiği, havalandırma planının güncelliği bu bakımdan yalnızca çizim tekniğine ilişkin bir konu olmadığı vurgulanmaktadır (Barış, Fişne ve Aydın, 2019; Barış ve Aydın, 2020).

Yeraltı maden işletmelerindeki havalandırma ağı işletme süresince sabit kalmaz. Yeni bir galeri veya bağlantı yolunun açılması, üretim panolarının devreye alınması, çalışma alanlarının derinleştirilmesi, hava kapılarının konumunun değiştirilmesi ya da hava miktarının farklı üretim bölgeleri arasında yeniden paylaştırılması hava yollarındaki direnç ve basınç dağılımını değiştirir. Bu işlemler sonrasında şebeke yeniden analiz edilmez, hava yönleri yerinde ölçülmez ve planlar gerçek duruma göre güncellenmezse düşük hızlı bölgeler, kısa devreler, ters akımlar ve kirli havanın yeniden çalışma alanlarına taşındığı seri havalandırma düzenleri ortaya çıkabilir. Mevzuatın hava akımını etkileyen değişikliklerden sonra ölçümlerin yenilenmesini ve üretim bölgelerinin giriş ve dönüş havasının izlenmesini istemesinin nedeni budur (ÇSGB, 2015).

Havalandırma planı, galerileri ve hava yönlerini gösteren pasif bir çizim değildir. Hava ölçüm istasyonları ve sabit sensörler, gazların muhtemel yayılım yolları, risk değerlendirmeleri, yangın ve patlama senaryoları, kaçış güzergahları ve kurtarma ekiplerinin hareket planları bu belgeye göre belirlenir. Plandaki yönler gerçek hava hareketiyle uyuşmadığında, gazların biriktiği ya da taşındığı bölgeler ölçüm dışında kalabilir; temiz hava yolu kabul edilen bir güzergah kirli hava devresine dönüşebilir; olaydan uzak olduğu düşünülen çalışma alanları duman ve toksik gazların etkisine girebilir. Bu durumda sorun, tek bir plan veya kayıt hatası olmaktan çıkar ve aynı bilgiye dayanan farklı güvenlik katmanlarını birlikte etkileyen bir risk faktörüne dönüşür (Reason, 1997).

Soma Eynez Karanlıkdere ve Amasra faciaları farklı jeolojik koşullarda, farklı üretim yöntemleri ve farklı olay mekanizmaları içinde meydana gelmiştir. Bununla birlikte her iki ocakta da havalandırma altyapısının yetersiz olduğu bilinmesine rağmen üretim alanları genişletilmiş veya derinleştirilmiş, hava üretim ihtiyaçları arasında paylaştırılmış ve gerçek hava hareketi kullanılan planlara tam olarak yansıtılmamıştır. Soma'da mekanize üretim sisteminin taşınması için açılan kulikar yolu 4. bant galerisindeki hava dengesini bozmuş; Amasra'da ise üretim öncelikli nakliyat planlamasından kaynaklı 1. Rekup çalışma alanlarından çıkan kirli hava 2. Rekup temiz havasına karışmıştır. Bu çalışmayla, ilk olarak iki olayın teknik ayrıntılarını karşılaştırarak üretim kararlarının havalandırma sistemine etkisini inceleyeceğiz. İkinci aşamada ise ocaktaki gerçek hava akışını yansıtmayan havalandırma planlarının; risk değerlendirmesi, izleme, denetim ve acil durum müdahalesi üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlıyoruz.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

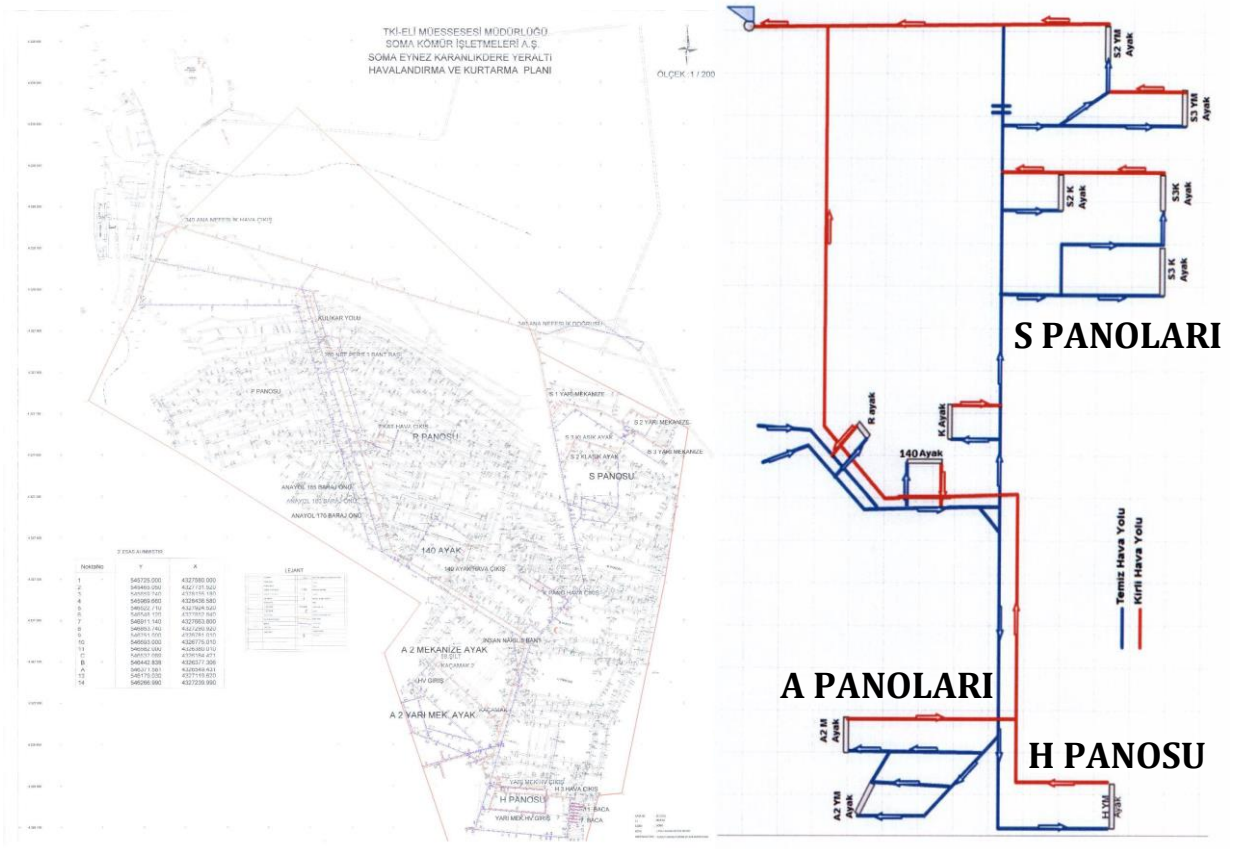
Çalışmamız, iki olayın karşılaştırmalı vaka incelemesine dayanmaktadır. Soma bakımından 15 Ağustos 2016 tarihli bilirkişi raporu, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı iş müfettişlerince hazırlanan inceleme raporu, işletmenin havalandırma planları, havalandırma şebekesi analizleri ve yargılama dosyasındaki teknik beyanlar incelenmiştir. Amasra bakımından 31 Ekim 2022 tarihli bilirkişi raporu, TBMM Araştırma Komisyonu raporu, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Teftiş Kurulu tespitleri, merkezi gaz izleme sistemi kayıtları, havalandırma ve sensör planları, kurum içi yazışmalar, merkezi izleme telefon görüşmeleri ve yargılama beyanları kullanılmıştır.

İnceleme dört aşamada yürütülmüştür. İlk olarak olaylardan önceki ana havalandırma altyapısı ve bu altyapının kapasitesini zorlayan üretim kararları belirlenmiştir. İkinci aşamada yeni galeri, hava kapısı, üretim alanı veya tali havalandırma düzenlerinin hava dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üçüncü aşamada planlarda gösterilen hava yönleri; hava miktarı ve hızı ölçümleri, şebeke analizleri, sensör zaman serileri ve teknik personel beyanlarıyla karşılaştırılmıştır. Son aşamada belirlenen planlardaki gerçeklikten sapmanın risk değerlendirmesi, ölçüm ve denetim ile tahliye ve kurtarma faaliyetlerine etkisi değerlendirilmiştir.

Farklı kaynaklardan elde edilen bulgular, tek bir belge veya beyana dayandırılmamış; plan, ölçüm, sensör kaydı ve beyanların birbirini doğruladığı durumlar esas alınmıştır. Bu yöntem, özellikle Amasra'da farklı sensörlerdeki gaz yükselmelerinin zaman sıralamasından hava yönünün belirlenmesi ve Soma'da hava miktarı ile galeri kesitinden hava hızının hesaplanması bakımından önem taşımaktadır. Çalışmanın sınırı, soruşturma ve yargılama dosyalarına giren teknik belge ve kayıtlarla belirlenmiştir.

3. SOMA: KULİKAR YOLU VE HAVALANDIRMA SİSTEMİNİN ÇÖKÜŞÜ

Soma Eynez Yeraltı Kömür İşletmesinde temiz hava +340 kotundaki iki desandreden ocağa girmekte, +152,39 kotunda birleşerek +142 ana galeri üzerinden üretim panolarına dağılmaktaydı. Kirlenen hava +340 ana nefesliğinde birleşerek emici vantilatörle dışarı atılıyordu. Havalandırma defterlerine göre ocaktan 1.900-2.000 m³/dk hava geçmekte, mevcut ana vantilatörün kapasitesi ise 2.400 m³/dk düzeyinde kalmaktaydı. Aynı anda on ayrı ayakta üretim yapılması ve vardiyada yaklaşık 700-800 işçinin bulunması, sistemin olay öncesinde de sınırlı kapasiteyle çalıştığını göstermektedir (Soma Bilirkişi Heyeti, 2016, ss. 136-138).



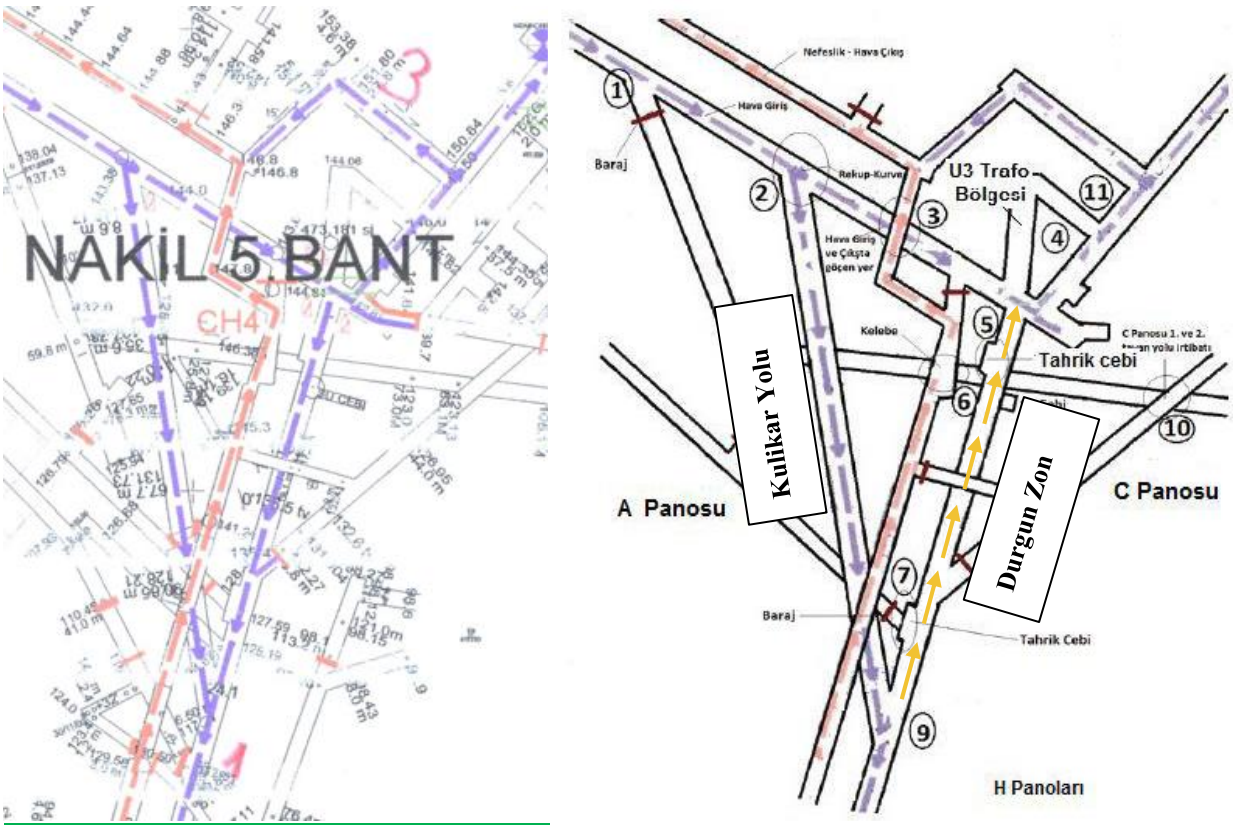
Şekil 1. Soma A.Ş. 2014 Havalandırma Planı (solda) ve 2014 Bilirkişi Raporu Basit Havalandırma Krokisi (sağda)

Ocağın yapısal sorunu yalnızca toplam hava miktarı değildi. R panosu ve 140 klasik ayaktan çıkan kirli hava yeniden temiz hava yoluna bağlanıyor; S panosunda bazı ayakların dönüş havası başka üretim alanlarının havalandırılmasında kullanılıyordu. S panolarının hava dönüşlerini bağımsız bir yol üzerinden yerüstüne bağlayacak ikinci bir galeri, Haziran 2011 tarihli revize uygulama projesinde öngörülmüş; artan hava ihtiyacının karşılanması amacıyla 6.000 m³/dk kapasiteli yeni bir ana vantilatör kurulması da planlanmıştı. Ancak bağımsız nefeslik olarak kullanılacak galerinin kömür rezervinde kayba neden olacağı gerekçesiyle bu proje uygulanmamış, yeni vantilatör kurulmadan S panosunda üretime başlanmış ve üretim giderek artırılmıştır. Türkiye Kömür İşletmeleri tarafından da onaylanan projenin hayata geçirilmemesi sonucunda S panosunun temiz hava girişi ile kirli hava çıkışı aynı ana yol sistemine

bağlı kalmış, panodaki tumba bacaları ise tali havalandırma ile çalıştırılmıştır. Bilirkişi heyeti, bağımsız nefeslik oluşturulmadan ve vantilatör kapasitesi artırılmadan çok sayıda ayağın üretime alınmasını "üretim zorlaması" olarak değerlendirmiş; olayda yaşamını yitiren 301 işçinin 209'unun S panolarında bulunması ile bu havalandırma düzeni arasında ilişki kurmuştur (Soma Bilirkişi Heyeti, 2016: 137–138).

Şekil 2. Soma Eynez 2014 mevcut havalandırma planı (solda), gerçekleştirilmeyen birinci iyileştirme seçeneği (ortada), gerçekleştirilmeyen ikinci -*Haziran 2011*- iyileştirme seçeneği (sağda)

Bu yapı içinde A ve H panolarına üretim teçhizatlarını ulaştırmak amacıyla açılan kulikar yolu (işçiler tarafından "kılçık baca" olarak adlandırılmaktadır), havalandırma ağının merkezindeki dağılımı değiştirmiştir. İşletme içi yazışmalara göre 2 Ekim 2013 tarihli toplantıda A panosu üzerinden ana yol irtibat bacalarının sürülme olanaklarının araştırılmasına karar verilmiş, kulikar yoluna ilişkin ilk çalışma aynı ayın faaliyet programına alınmış ve yol Şubat 2014'te tamamlanmıştır. Kulikar öncesinde +142 ana hava girişinden gelen hava U3 kavşağında iki kola ayrılıyor; bir kol S panolarına, diğer kol 4. bant galerisi üzerinden A ve H panolarına gidiyordu. Kulikarın Şubat 2014'te tamamlanmasından sonra A ve H panolarının temiz havası yeni bağlantıya yönelmiş, 4. bant galerisi alt kurve ile bant başı arasında yeterli hava alamayan bir kol haline gelmiştir (Soma Bilirkişi Heyeti, 2016, ss. 138-140).



Şekil 3. Soma Eynez mevcut planda kulikar yolu kesiti (solda), Kulikar yolunun fiili hava akışına etkisini gösteren kroki (sağda) *Mavi ok: temiz hava, Kırmızı ok: kirli hava, Sarı ok: durgun zon

İş müfettişlerinin incelemesinde bu bölgede yalnızca 30-40 m³/dk hava bulunduğu ve akımın işletme planında gösterilen yönün tersine S panolarına doğru ilerlediği belirlenmiştir. Galeri kesitinin 16 m², hava miktarının 40 m³/dk alınmasıyla ortalama hava hızı yaklaşık 0,042 m/s olarak hesaplanmıştır. Bu hız, galerideki gazları düzenli biçimde taşıyıp uzaklaştırmaya yeterli değildir. Eski imalat bağlantılarının yoğun olduğu olay bölgesinde düşük hava hareketi, metanın tavan ve tahkimat boşluklarında tabakalanmasına, karbon monoksit ve sıcak gazların uzun süre aynı bölgede kalmasına elverişli bir ortam yaratmıştır (ÇSGB İş Teftiş Kurulu, 2014; Soma Bilirkişi Heyeti, 2016, ss. 140-141).

Kulikar sonrasında oluşan düşük akımlı bölge merkezi gaz izleme sisteminin de dışında kalmıştır. Yangının başladığı değerlendirilen bu galeride sabit metan sensörü bulunmaması ve gazların S panolarındaki sensörlere taşınamayacak kadar zayıf bir akımın bulunması, izleme bakımından mekansal bir kör nokta oluşturmuştur. Belirli aralıklarla yapılan seyyar ölçümlerin ani gaz girişlerini sürekli izleme imkanı bulunmadığı gibi, cihazların tavana veya tahkimat arkasındaki boşluklara yaklaştırılmaması halinde tabakalaşmış metanın tespit edilememesi de mümkündür (Soma Bilirkişi Heyeti, 2016, s. 141).

Soma'da havalandırma planı ile gerçek hava hareketi arasındaki fark yalnızca 4. bant galerisiyle sınırlı değildir. Fiili durumda 140 klasik ayaktan çıkan kirli hava temiz hava

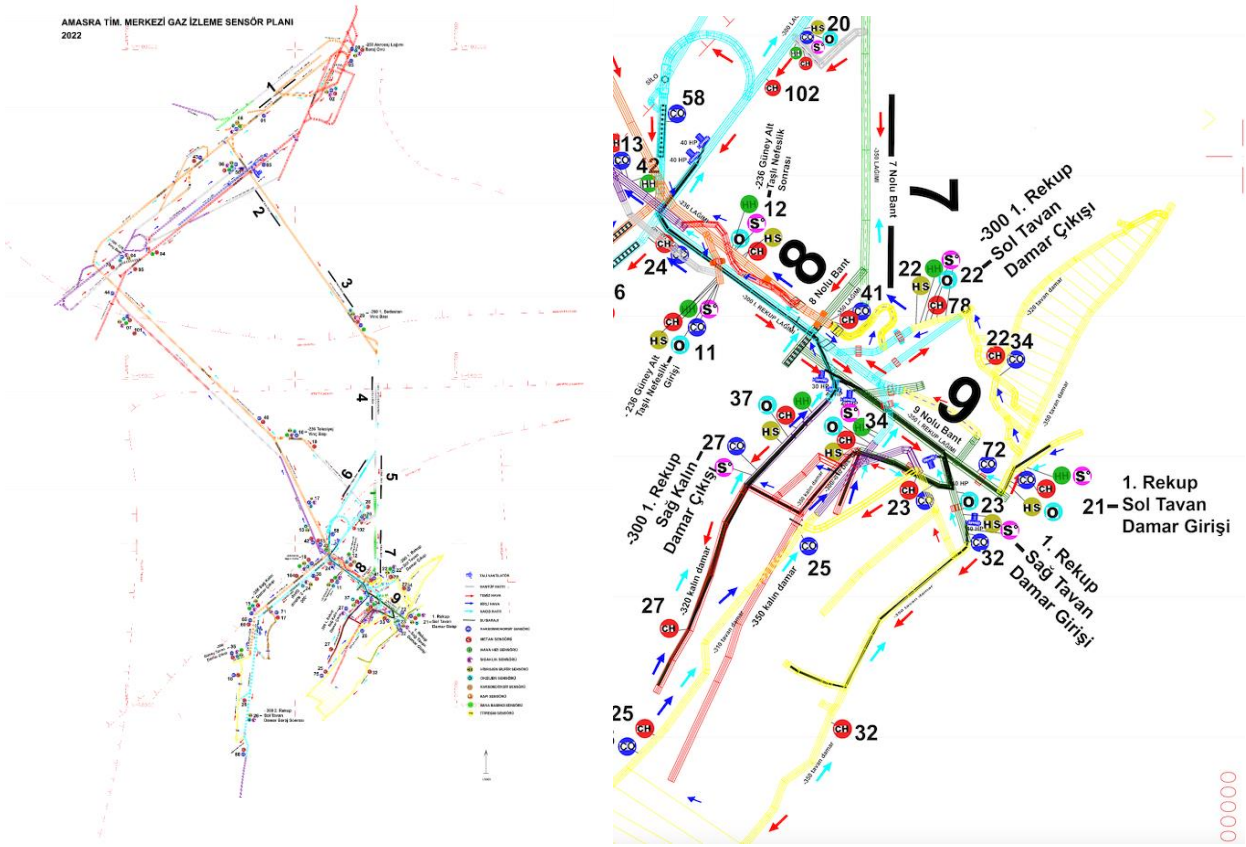
yoluna bağlanırken, işletme planında bu dönüş doğrudan nefesliğe ulaşıyormuş gibi gösterilmiştir. Böylece seri havalandırma düzeni ve kirli havanın alt kotlara taşınması plan üzerinde görünmez hale gelmiştir. Olay sonrasında yoğun duman gerçek hava yönünü izleyerek S panolarına taşınmış; bağımsız nefeslik ve ikinci çıkışın bulunmaması nedeniyle bu panodaki işçiler temiz hava ve kaçış bakımından aynı ana galeri sistemine bağımlı kalmıştır (Soma Bilirkişi Heyeti, 2016, ss. 143-150).

Soma örneğinde mekanize üretim teçhizatını taşımak için açılan kulikar yolunu tüm sistem içerisinde tek başına ele almak mümkün değildir. Zira kulikar yolunun açılması; üretim miktarı artmış, bağımsız hava dönüşü tamamlanmamış ve seri havalandırma sorunları bulunan bir sistem içerisinde yapılmıştır. Değişiklik sonrasında havalandırma sistemi ayrıntılı biçimde yeniden analiz edilmemiş, ortaya çıkan ters ve düşük hızlı akım plana işlenmemiş, kritik bölge sürekli gaz izleme kapsamına alınmamıştır. Bu nedenle işletme açısından üretim öncelikli bir ulaşım çözümü, 13 Mayıs 2014 tarihinden yangının başladığı bölgeyi gazların birikebildiği ve güvenlik sistemlerinden saklanan bir risk alanına dönüştürmüştür.

4. AMASRA: REKUPLAR ARASINDAKİ KİRLİ HAVA GEÇİŞİ

Amasra Taşkömürü İşletme Müessesesinde havalandırma, +40 kotundaki ana nefeslik aspiratörünün oluşturduğu emici akımla sağlanmaktaydı. Yaklaşık elli yıllık aspiratörün katalog kapasitesi 11.000 m³/dk olmakla birlikte, kurum içi yazışmalarda 3.600 m³/dk üzerinde kullanılamadığı ve mevcut ocak açıklığını karşılamadığı belirtilmiştir. Ana aspiratörün değiştirilmesi gerektiği 2019'dan itibaren raporlanmasına rağmen modernizasyon tamamlanmadan çalışma alanları derinleştirilmiş; işletme projesinde öngörülen -350 kotunun altında -370 ve -390 kotlarına kadar üretim ve hazırlık faaliyetleri sürdürülmüştür. Hava yolları uzayıp ocak direnci artarken yeterli kapasitede yeni hava giriş ve dönüş yolları oluşturulmamıştır (Amasra Bilirkişi Heyeti, 2022; TTK, 2022a; TTK, 2022b).

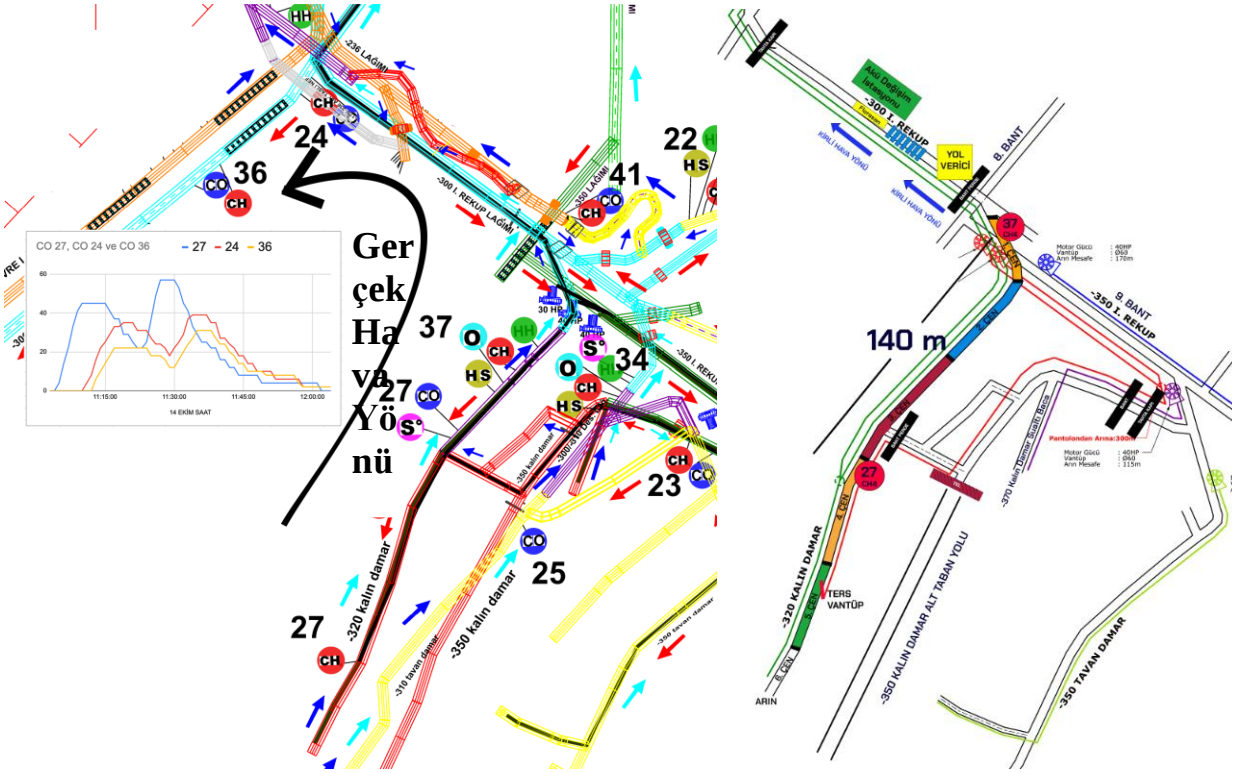
Ana havalandırmadaki yetersizlik, -300 ve -350 kotlarındaki tali sistemlerin çalışmasını da sınırlandırmıştır. TBMM Araştırma Komisyonu değerlendirmesinde yalnızca tali vantilatörlerin sağlıklı çalışması için gerekli hava miktarının 3.348 m³/dk olduğu, -300 katına ulaşan toplam havanın ise yaklaşık 1.100 m³/dk düzeyinde kaldığı belirtilmiştir. Ana yollarda yeterli hava bulunmadığından vantilatörler hazırlık bacalarının girişinden uzak noktalara yerleştirilmiş ve verimli çalışma mesafelerini aşan uzunluktaki vantüplerle -320 Sağ Kalın Damar ve -350 Sualtı bölgeleri havalandırılmaya çalışılmıştır. -320 bacasında bilirkişi hesabıyla 0,2-0,3 m/s, 27 ve 37 numaralı sensörlerdeki gaz yükselmelerinin ilerleme süresi üzerinden ise 0,23-0,25 m/s hava hızı belirlenmiştir (Amasra Bilirkişi Heyeti, 2022; TBMM, 2023).



Şekil 4. Amasra 2022 havalandırma ve sensör planı (solda), Planın 1. Rekup kesiti (sağda) *Mavi ok: kirli hava, Kırmızı ok: temiz hava

Mevcut havanın bütün çalışma alanlarına yetmemesi, dağılımın üretim öncelikleri doğrultusunda hava kapılarıyla değiştirilmesine yol açmıştır. Mekanize ayağa yeterli hava ulaştırabilmek için -320 Kalın Damar bağlantılarına giden doğal hava akımı kapılarla kesilmiş, Kalın Damar uzun vantüp hatlarına bağımlı bırakılmıştır. Arın çevresinde sınırlı bir hava hareketi oluşsa da baca boyunca metan tabakalanmasını önleyecek sürekli dolaşım sağlanamamıştır. ETKB Teftiş Kurulu raporunda, -350 Sualtı bacasının temiz havasının yarı mekanize ayak havasından ayrılmasının bağımsız olması gereken çalışma alanlarını birbirinin risklerine ortak ettiğini ve temiz havanın doğrudan 1. Rekup lağımından verilebileceği belirtilmiştir (ETKB Teftiş Kurulu Başkanlığı,2023).

Havalandırma planına göre mümkün görünen bu durum gerçekte mümkün değildir. İşletme planlarına göre 1. Rekup çalışma alanlarından çıkan kirli havanın ana nefesliğe ilerlemesi gerekmektedir. Buna karşın -320 Kalın Damar ve -350 Sualtı bölgelerindeki 27, 24 ve 36 numaralı CO sensörleri ile bunlara karşılık gelen CH_4 sensörlerinin zaman serileri, kirli havanın 1. Rekup ana lağımı üzerinden 2. Rekup yönüne hareket ettiğini göstermiştir. -236/-300 ana nefesliğindeki 41 numaralı CH_4 sensörü de karşılaştırmaya eklendiğinde, kirli havanın çok az bir bölümünün nefesliğe ulaştığı, önemli bir bölümünün 2. Rekup çalışma alanlarına taşındığı anlaşılmaktadır. Bir aylık kayıtlarda aynı sıralı yükselmelerin tekrarlanması, geçişin olay gününe özgü değil, süreklilik gösteren bir hava hareketi olduğunu ortaya koymaktadır (TTK, 2022a).



Şekil 5. Amasra -300 1. Rekup lağımındaki gerçek hava yönü (solda), -320 Kalın damar bacadaki CH4 sensörlerinin gerçek konumları (sağda) *Mavi ok: kirli hava, Kırmızı ok: temiz hava

Merkezi izleme telefon kayıtları bu sorunun en geç Kasım 2021'de fark edildiğini; olay günü İSG yönetimi ile gaz izleme personeli arasında da 1. Rekuptan 2. Rekup'a hava gittiğinin konuşulduğunu göstermektedir. Yargılama sırasında merkezi izleme personeli ve vardiya mühendisleri, kirli hava geçişini sensör yansımalarından bildiklerini belirtmiştir. -300 1. Rekup lağımı aynı zamanda -320 Kalın Damar bacadan çıkarılan kömürün vagonlarla taşındığı nakliye hattıdır. Sorun işletme yönetimi tarafından bilinmesine rağmen hava kapısı ve bağlantı düzeni düzeltilmemiş, çalışma alanları bağımsız hava devrelerine ayrılmamış ve gerçek hava yönü havalandırma planına işlenmemiştir (TTK, 2021-2022). Neticede üretim öncelikli planlamanın havalandırma sistemini etkilendiği başka bir örnek durum oluşmuştur.

Yargılama sırasında 27 ve 37 numaralı CH_4 sensörlerinin planda gösterilen noktalarda bulunmadığı anlaşılmış, hava hızı ancak gerçek konumlar yeniden belirlenerek hesaplanabilmiştir. MAPEG'in 16 Ağustos 2022 tarihli denetiminde, hazırlık galerilerindeki sensörlerin seyreltilmiş hava içinde kalmadan dönüş havasını ölçecek biçimde yerleştirilmesi gerektiği bildirilmiş olsa da olay tarihine kadar gerekli düzenleme yapılmamıştır (MAPEG, 2022).

14 Ekim 2022 tarihinde yaşanan patlama sonrasında duman ve zehirli gazlar, planlarda öngörüldüğü gibi yalnızca ana nefeslik yönünde ilerlememiş; gerçek hava akımını

izleyerek 1. Rekup ana lağımı üzerinden 2. Rekup çalışma alanlarına ulaşmıştır. Bu nedenle doğrudan patlama bölgesinde bulunmayan ve ayrı bir hava kolunda çalıştığı kabul edilen işçiler de toksik hava içinde kalmıştır. Amasra'da temel sorun yalnızca hava miktarının azlığı değildir. Yetersiz havanın üretim alanları arasında kapılar ve uzun tali hatlarla paylaştırılması havalandırma etkinliğini düşürerek galeri tavanında metan birikimine neden olmuş, üretim öncelikli yapılan galeri planlaması ise kirli havayı temiz hava bölgesine taşımıştır. Dahası bu işletmesel tercihlerin yarattığı sorunlar, hava yönü ve sensör yerlerinin plana gerçek dışı şekilde aktarılmasıyla gizlenmiştir.

5. PLANLARDA GERÇEKLİKTEN KOPUŞUN ÜÇ GÜVENLİK KATMANINA ETKİSİ

Soma ve Amasra'da ocak içindeki mevcut durumun havalandırma planlarına aktarılmaması üç farklı güvenlik katmanında ciddi zafiyetin oluşmasına neden olmuştur. Gerçeğe aykırı planlarla tehlikenin yeri ve etki alanı gizlenmiş; ikinci aşamada ölçüm ve sensör yerleşimi yanlış yönlendirilmiş; üçüncü aşamada ise tahliye ve kurtarma çalışmaları zafiyete uğratılmıştır. Vaka bölümlerinde ortaya konulan bulguların bu üç katmandaki karşılığı Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Gerçek hava koşullarının havalandırma planına yansıtılmamasının sonuçları

Güvenlik katmanı	**Soma**	**Amasra**	**Ortak sonuç**
Risk değerlendirmesi	Durgun zon ve dumanın S panolarına yayılımı risk değerlendirmesine alınmadı	1. Rekup olayının 2. Rekup çalışanlarını etkileme ihtimali risk değerlendirmesine alınmadı.	Tehlike ve tehlikenin etki alanı risk değerlendirmesine alınmadı
Ölçüm ve denetim	Olay bölgesi sabit metan sensörü dışında kaldı; seri havalandırma plan üzerinde gösterilmedi	Sensör konumları ve temsil ettikleri hava kolları yanlış gösterildi.	İzleme sisteminden takip edilen verilerin bir kısmı gerçek riski göstermedi.
Acil durum	Duman gerçek akımla S panolarına taşındı; bağımsız nefeslik ve ikinci çıkış yoktu.	Patlama dumanı 2. Rekup'a ulaştı; plana göre güvenli kabul edilen alanda çalışan işçiler zehirli gazlara maruz kaldı.	Tahliye ve kurtarma çalışmalarında, hava yönü yeniden belirlenmek zorunda kalındı

5.1. Önleyici risk değerlendirmesine etkisi

Risk değerlendirmesi, tehlike başlıklarının listelenmesinden ibaret bir faaliyet değildir. Gazın nerede birikeceğini, hava akımıyla hangi bölgelere taşınacağını ve hangi

çalışanları etkileyebileceğini göstermelidir. Soma'da havalandırma planı hava akışının gerçek yönünü göstermediği için 4. bant galerisi ile S panoları aynı yangın ve gaz yayılım senaryosu içinde ele alınmamıştır. Amasra'da ise 1. ve 2. Rekup kâğıt üzerinde ayrı hava devreleri kabul edilmiş, 1. Rekup kaynaklı bir patlamanın 2. Rekup çalışanlarını etkileyebileceği değerlendirme dışında bırakılmıştır.

Her iki olayda da üretim öncelikli yapılan müdahalelerin havalandırma sistemi üzerindeki etkisi havalandırma planına yansıtılmamış ve artan riskler risk değerlendirmesi dışında bırakılmıştır. Planlar mevcut üretim düzenini sınayan bir güvenlik aracı olmak yerine, bu düzenin sürdürülebilir olduğu varsayımını yeniden üreten belgelere dönüşmüştür. Durgun zon, seri havalandırma, kirli havanın temiz hava devresine karışması ve bir çalışma alanındaki olayın diğerine taşınması gibi riskler görünür hale gelmeden alınan önlemlerin yeterliliği de gerçekçi biçimde değerlendirilememiştir.

5.2. Ölçüm, izleme ve denetime etkisi

Sensörün teknik olarak çalışır durumda olması, ölçüm noktasının gerçek gaz taşınımını temsil etmediği durumda yeterli değildir. Soma'da düşük akımlı olay bölgesi merkezi sensör ağı dışında bırakılmıştır. Amasra'da sensörlerin fiili yerleri ile planlarda gösterilen konumları arasında farklılık olduğu, CH4 sensörlerinin uygun yükseklikte konumlandırılmadığı dahası dinamit atımları sırasında sensörlerin zemin seviyesine indirildiği tespit edilmiştir. Bu nedenle sistemler sürekli veri üretmesine rağmen tehlikenin kaynağını, yoğunluğunu ve yayılım yönünü doğru şekilde göstermemiştir.

Denetimler kağıt üzerinde kaldığında, planda bulunmayan ters akımlar ve kirli hava geçişleri inceleme dışında kalacaktır. Bu nedenle denetim sırasında hava yönleri yeraltında anemometre ve basınç ölçümleriyle, gerektiğinde duman tüpleriyle ve sensör zaman serilerinin karşılaştırılmasıyla doğrulanmalıdır. Plan, ölçüm ve sensör verileri arasında uyumsuzluk bulunması halinde belgenin biçimsel uygunluğu güvenli işletmenin kanıtı olarak kabul edilmemelidir.

5.3. Acil durum, tahliye ve kurtarma faaliyetlerine etkisi

Yangın ve patlama sonrasındaki ilk kararlar, dumanın hangi yönde ve ne hızla ilerleyeceği bilgisine dayanır. Hangi bölgelerin tahliye edileceği, hangi güzergahların güvenli olduğu, hava kapılarına veya vantilatör/aspiratör düzenine nasıl müdahale edileceği havalandırma planı üzerinden belirlenir. Soma'da duman S panolarına, Amasra'da ise 2. Rekup'a planlarda gösterilmeyen fakat yetkililer tarafından bilinen hava düzeninde taşınmıştır.
Yeraltındaki gerçek hava akışını göstermeyen planlar, olay sırasında tahlisiye çalışması için dışarıdan gelen ekiplerin hava yönünü tespit etmek için ayrı bir çalışma yapmasına ve zaman kaybına neden olmuştur. Duman, görüş kaybı, toksik atmosfer ve iletişim kesintileri altında yapılacak yeni ölçümler ise gecikmeye ve ek risklere neden olacaktır. Bu nedenle acil durum planları yalnızca ekip ve ekipman listelerinden

oluşmamalı; doğrulanmış hava akımlarına göre hazırlanmış yayılım senaryolarını, hava kapılarına müdahale sırasını ve alternatif kaçış yollarını güncel ve gerçek duruma uygun şekilde içermelidir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Soma ve Amasra örnekleri, yatırım ve altyapı eksikliğinden kaynaklanan havalandırma sorunlarının plan üzerinde yapılan değişikliklerle ortadan kaldırılamayacağını göstermektedir. Yetersiz ana havalandırma kapasitesi, bağımsız dönüş yollarının bulunmaması, üretim alanlarının sistem kapasitesinin üzerinde genişletilmesi ve kirli havanın çalışma bölgeleri arasında taşınması; yatırım yapılması, üretimin sınırlandırılması veya çalışma alanının durdurulmasıyla çözülebilecek sorunlardır. Gerçek hava yönünü farklı göstermenin, sensör konumlarını yanlış işaretlemenin ya da seri havalandırmayı bağımsız devre gibi sunmanın tehlikeyi ortadan kaldırmayacağını hepimiz biliyoruz.

Yatırım yapmama ve yetersiz altyapı altında üretimi sürdürme kararının asli sorumluluğu, bu kararları alma ve kaynak tahsis etme yetkisine sahip işveren ile üst yönetime aittir. Bununla birlikte altyapı yetersizliğinin ocak içerisindeki etkisini planlara aktarmayarak sorunu gizleyen teknik personel de bu asli sorumluluğu kendi tercihi ile paylaşır duruma gelmektedir. Öte yandan özel sektörde işini kaybetme, kamu işletmelerinde görev yeri, disiplin cezası veya terfi baskısı, teknik personelin üretimi durdurmasını ve yönetime itiraz etmesini güçleştirebilir. Elbette bu işletmesel baskılar ortadan kaldırılmadan teknik bağımsızlıktan söz edilemez. Ancak kariyer kaygısı da bilinen bir yapısal tehlikenin plan, rapor veya ölçüm kayıtlarında görünmez kılınmasını haklı göstermez. Gerçek durumu yansıtmayan belgeyi hazırlayan, onaylayan veya kullanmayı sürdüren teknik personel, yetkisi, bilgisi ve somut katkısı ölçüsünde ayrı bir mesleki ve hukuki sorumluluk üstlenir.

Bu nedenle havalandırma sistemini etkileyen her yeni galeri, pano, hava kapısı ve üretim değişikliğinden önce şebeke analizi yapılmalı; uygulama sonrasında hava miktarı, hızı ve yönü yerinde ölçülerek doğrulanmalıdır. Havalandırma planı, sensör yerleşim planı, risk değerlendirmesi ve acil durum senaryoları aynı güncel veriye dayanmalı; yapılan her değişiklik tarih, gerekçe, ölçüm sonucu ve sorumlu teknik personelle birlikte izlenebilir biçimde kaydedilmelidir. Plan ile gerçek hava hareketi arasında açıklanamayan bir farklılık tespit edildiğinde üretim derhal durdurulmalı ve sistem güvenli hale getirilmeden çalışma yeniden başlatılmamalıdır.

Teknik personelin güvenli olmadığını düşündüğü üretime yazılı itirazda bulunabilmesi, işin durdurulmasını talep edebilmesi ve bu nedenle işten çıkarma, görev değişikliği veya terfi engeliyle karşılaşmaması için kurumsal güvence oluşturulmalıdır. Denetimler yalnızca işletmenin sunduğu planın biçimsel kontrolüyle sınırlı kalmamalı; hava yönleri ve sensör konumları bağımsız yeraltı ölçümleriyle doğrulanmalıdır. Üretim hedeflerini tutturmak için kağıt üzerinde manipüle edilen yeraltı koşullarının tüm güvenlik sistemini çökerteceği unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

Amasra Bilirkişi Heyeti (2022). Amasra Taşkömürü İşletme Müessesesinde 14 Ekim 2022 tarihinde meydana gelen katliama ilişkin bilirkişi raporu [31.10.2022 tarihli rapor]. Amasra Cumhuriyet Başsavcılığı soruşturma dosyası.

Barış, K. ve Aydın, Y. (2020). Atmospheric monitoring systems in underground coal mines revisited: A study on sensor accuracy and location. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 23(3), 325-350. https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2020.105777

Barış, K., Fişne, A. ve Aydın, Y. (2019). Türkiye'de yeraltı kömür ocaklarına yönelik maden mevzuatı ve uygulamalarının havalandırma ve iş güvenliği açısından kritiği. IMCET 2019 Türkiye 26. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Antalya, 16-19 Nisan 2019, 1270-1280.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı [ÇSGB] (2013). Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği. Resmi Gazete, 19.09.2013, Sayı: 28770.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı [ÇSGB] (2015). Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılması Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete, 10.03.2015, Sayı: 29291.

ÇSGB İş Teftiş Kurulu (2014). Soma Kömür İşletmeleri A.Ş. Eynez Yeraltı Kömür İşletmesinde 13 Mayıs 2014 tarihinde meydana gelen iş kazasına ilişkin inceleme raporu [10.11.2014 tarihli rapor].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Teftiş Kurulu Başkanlığı [ETKB Teftiş Kurulu Başkanlığı] (2023). Amasra Taşkömürü İşletme Müessesesinde meydana gelen maden kazasına ilişkin teknik inceleme ve idari soruşturma raporu [Dava dosyası eki].

Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü [MAPEG] (2022). Amasra Taşkömürü İşletme Müessesesi 16.08.2022 tarihli denetim tespitleri [Dava dosyası eki].

McPherson, M. J. (1993). Subsurface ventilation and environmental engineering. Chapman & Hall.

Reason, J. (1997). Managing the risks of organizational accidents. Ashgate.

Soma Bilirkişi Heyeti (2016). Soma Eynez Yeraltı Kömür İşletmesinde 13 Mayıs 2014 tarihinde meydana gelen katliama ilişkin bilirkişi raporu [15.08.2016 tarihli rapor]. Akhisar Ağır Ceza Mahkemesi dava dosyası.

Türkiye Büyük Millet Meclisi [TBMM] (2023). Bartın'ın Amasra ilçesinde meydana gelen maden kazasının tüm yönleriyle araştırılarak benzer kazaların önlenmesine yönelik tedbirlerin belirlenmesi amacıyla kurulan Meclis Araştırması Komisyonu raporu. 27. Yasama Dönemi, Sıra Sayısı: 440.

Türkiye Taşkömürü Kurumu [TTK] (2021-2022). Amasra Taşkömürü İşletme Müessesesi Merkezi İzleme Birimi telefon kayıtları [Bartın Ağır Ceza Mahkemesi dava dosyası ekleri].

Türkiye Taşkömürü Kurumu [TTK] (2022a). Amasra Taşkömürü İşletme Müessesesi Merkezi Gaz İzleme Sistemi CO ve CH_4 sensör kayıtları [Bartın Ağır Ceza Mahkemesi dava dosyası ekleri].

Türkiye Taşkömürü Kurumu [TTK] (2022b). Amasra Taşkömürü İşletme Müessesesi havalandırma ve sensör yerleşim planları [Bartın Ağır Ceza Mahkemesi dava dosyası ekleri].

YERALTI MADEN İŞYERLERİNDE MESLEKİ EĞİTİM SORUNLARI

VOCATIONAL TRAINING ISSUES IN UNDERGROUND MINING OPERATIONS

Aygün Ekici*, Mehmet Şükrü Dağ

İmbat Madencilik Enerji Turizm Sanayi ve Ticaret A.Ş., Soma, Manisa

ÖZET Yeraltı maden işyerlerinde mesleki eğitimlerin mevzuata uygun verilmesi ve belgelendirilmesi oldukça önemlidir. İş kazalarının önüne, mesleki eğitimin yanı sıra iş güvenliği eğitimini de almış; görev, yetki ve sorumlulukları belirlenmiş çalışanlarla geçilir. Aksi durumda beklenmeyen bir olay karşısında işveren ve temsilcilerinin hukuki ve cezai durumlarla karşı karşıya kalma tehlikesi de mevcuttur.

Yakın geçmişe dönük olarak mesleki eğitim mevzuatının incelendiği bu bildiride yaşanmakta olan sorunlar ve çözüm önerileri yer almaktadır.

ABSTRACT Providing and documenting vocational training in compliance with the applicable legislation is of critical importance in underground mining workplaces. Occupational accidents can be prevented by employing workers who have received not only vocational training but also occupational health and safety training, and whose duties, authorities, and responsibilities have been clearly defined. Otherwise, in the event of an unforeseen incident, employers and their representatives may face both legal and criminal liability.

This paper examines the vocational training legislation in the recent past, identifies the problems currently encountered in practice, and presents recommendations for their resolution.

1. MESLEKİ EĞİTİMİN ÖNEMİ

Çalışma hayatının sağlıklı ve güvenli olarak sürdürülebilmesi için güncel mevzuata uygun mesleki eğitim verilmesi zorunludur.

6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu Madde 17-(3)'e göre:
Mesleki eğitim alma zorunluluğu bulunan tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta yer alan işlerde, yapacağı işle ilgili mesleki eğitim aldığını belgeleyemeyenler çalıştırılamaz.
Yargıtay 12. Ceza Dairesi'nin 2020/1413 E., 2021/8051 K. Kararına göre "Mesleki eğitimi olmayanı çalıştırmak bilinçli taksir suçu oluşturur".

Madencilik sektörü, İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliğinde çok tehlikeli sınıfta yer alan işlerdendir. Çalışanlara mevzuatta belirtilen çalışma alanına uygun mesleki eğitim verilmemiş olması, bir iş kazası durumunda işveren ve işveren temsilcilerini tehlike sınıfının yüksekliği ile doğru orantılı olarak artan hukuki ve cezai sorumluluk riskiyle karşı karşıya bırakmaktadır. Hem iş kazalarının önüne geçmek hem de hukuki yaptırımlarla karşı karşıya kalmamak için işletmelerdeki her kademe yöneticinin, sorumlulukları altındaki çalışanlara mevzuata uygun mesleki eğitim verilmesi ve belgelendirilmesi konusuna çok önem vermeleri gerekmektedir.

2. YERALTI İŞYERLERİNDE MESLEKİ EĞİTİM İLE İLGİLİ MEVZUAT

2.1. Ağır ve Tehlikeli İşlerde Çalıştırılacak İşçilerin Mesleki Eğitimlerine Dair Tebliğ

31 Mayıs 2009 tarihinde yürürlüğe giren tebliğ, ağır ve tehlikeli işlerde mesleki eğitim zorunluluğu getiren 4857 Sayılı İş Kanunu'nun 85. Maddesine dayanılarak düzenlenmiş, 2013 tarihinde yürürlükten kaldırılmıştır. Mevzuat sürecini irdeleyebilmek için ele aldığımız söz konusu tebliğ döneminde işyeri tehlike sınıfları henüz belirlenmemiştir. Bununla birlikte ağır ve tehlikeli işlerden sayılan bazı meslekler belirlenerek diğer işlerden ayrılmış ve bu sınıfa giren işler için önce Yönetmelik, sonra mesleki eğitim tebliği ile ayrı düzenleme yapılmıştır. Söz konusu Tebliğin 6. Maddesinde yer alan ve geçerli sayılacağı belirtilen mesleki eğitim belgelerinden ikisi özetle şu şekildedir:

- *8/2/2007 tarihli ve 5580 sayılı Özel Öğretim Kurumları Kanununun 2 nci maddesinin (g) ve (i) bentlerine göre faaliyet gösteren kurslardan alınan kurs bitirme belgesi…,*
- *…kamu kurum ve kuruluşları, kamu kurumu niteliğindeki meslek kuruluşları, eğitim amaçlı faaliyet gösteren vakıf ve dernekler ile işçi ve işveren kuruluşları veya işveren tarafından Milli Eğitim Bakanlığının onayı ile düzenlenen eğitim faaliyetleri sonucunda verilen belgeler,*

İlkinde Özel Öğretim Kurumları Kanununa göre faaliyet gösteren özel kurslardan alınan belgeler, diğerinde ise kamu kurum ve kuruluşları ile kamu kurumu niteliğindeki kuruluşlar tarafından verilen eğitim faaliyetleri sonucunda belgeler bu tebliğe göre geçerlidir. Diğer işverenlerin verdiği mesleki eğitim belgelerinin geçerli olabilmesi ise Milli Eğitim Bakanlığının onayına tabi tutulmuştur.

Ağır ve tehlikeli işlerdeki tüm mesleklerde, özellikle de yeraltı maden işyerlerindeki çalışanlara eğitim verebilecek kapasitede özel eğitim kurslarının varlığı tartışma konusudur. Anılan sektörlerde mesleki eğitim veren bir kamu kurumu olan Halk Eğitim de dahil tüm bu kurslardan kaynaklanan eğitim eksikliğinin işyerlerinde verilen eğitimlerle telafi edilmiş olduğu çok açıktır. Kamu kurum ve kuruluşlarına ait işletmeler ise bu tebliğe göre kendi işyeri eğitimlerini verip belgeleyebilmektedir.

2.2. Tehlikeli ve Çok Tehlikeli Sınıfta Yer Alan İşlerde Çalıştırılacakların Mesleki Eğitimlerine Dair Yönetmelik

2012 yılında yürürlüğe giren 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun 9'ncu maddesi kapsamında işyeri tehlike sınıfları, Az tehlikeli, Tehlikeli ve Çok Tehlikeli olarak belirlenmiştir. 6331 Sayılı Kanun'un 17'nci maddesinde tehlikeli ve çok tehlikeli işyeri sınıfları için mesleki eğitim zorunluluğu getirilmiştir. Böylece 6331 Sayılı Kanun ile birlikte "ağır ve tehlikeli işler" kavramı sona ermiş, bu işlerde eğitim zorunluluğunu getiren 4857 Sayılı İş Kanunu'nun 85. Maddesi de mülga edilmiştir.

13.07.2013 tarihinde *"Tehlikeli ve Çok Tehlikeli Sınıfta Yer Alan İşlerde Çalıştırılacakların Mesleki Eğitimlerine Dair Yönetmelik"* yürürlüğe girmiş, 3 Eylül 2013 tarihinde ise "*Ağır ve Tehlikeli İşlerde Çalıştırılacak İşçilerin Mesleki Eğitimlerine Dair Tebliğ*" yürürlükten kaldırılmıştır.

2013 Tarihli Yönetmeliğin en önemli kısmı da yine mesleki eğitimin belgelendirilmesi ile ilgili 6. Maddedir:

MADDE 6 – (1) Ek-1 çizelgede yer alan işlerde fiilen çalıştırılacakların, yaptığı işe uygun aşağıda belirtilen belgelerden birisine sahip olmaları zorunludur:

a) 3308 sayılı Mesleki Eğitim Kanunu'na göre verilen diploma, bitirme belgesi, yetki belgesi, sertifika, bağımsız işyeri açma belgesi, kalfalık, ustalık ve usta öğreticilik belgelerinden birisi,
b) 12/3/2013 tarihli ve 28585 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Aktif İşgücü Hizmetleri Yönetmeliğine göre mesleki eğitim kursları veya mesleki eğitim modülü/kursları ile eşit süreli olmak koşuluyla işbaşı eğitim programları sonucu alınan belgeler,
c) Millî Eğitim Bakanlığı veya Millî Eğitim Bakanlığı tarafından yetkilendirilen kurumlarca verilen operatör belgesi ve sürücü belgesi,

ç) 11/7/2002 tarihli ve 24812 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Patlayıcı Madde Ateşleyici Yeterlilik Belgesinin Verilmesi Esas ve Usullerinin Belirlenmesi Hakkında Yönetmelik kapsamında alınan ateşleyici yeterlilik belgesi,
d) Kuruluş kanunlarında veya ilgili kanunlarca yetkilendirilmiş kamu kurum ve kuruluşları tarafından düzenlenen eğitim faaliyetleri sonucunda verilen belgeler,
e) Millî Eğitim Bakanlığının ilgili biriminin onayının alınması şartıyla; kamu kurumu niteliğindeki meslek kuruluşları, eğitim amaçlı faaliyet gösteren vakıf ve dernekler, işçi ve işveren kuruluşları ile bünyelerinde kurulu iktisadi işletmeler, işçi ve işveren kuruluşları tarafından Türk Ticaret Kanunu hükümlerine göre kurulmuş eğitim amaçlı şirketler ve işveren tarafından düzenlenen eğitim faaliyetleri sonucunda verilen belgeler,
f) Uluslararası kurum ve kuruluşlardan alınan ve Millî Eğitim Bakanlığı tarafından denkliği sağlanan belgeler,
g) ***(Değişik:RG-11/5/2017-30063)*** *15/10/2015 tarihli ve 29503 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Mesleki Yeterlilik Kurumu Sınav, Ölçme, Değerlendirme ve Belgelendirme Yönetmeliği kapsamında verilen meslekî yeterlilik belgeleri,*
(2) ***(Değişik:RG-11/5/2017-30063)*** *Bu Yönetmelik kapsamına giren işlerde, Sosyal Güvenlik Kurumuna ait kayıtlar esas alınarak 1/5/2017 tarihinden önce çalışmaya başlayanlar, Millî Eğitim Bakanlığı ile birinci fıkranın (e) bendinde sayılan kurum ve kuruluşlar arasında yapılacak protokoller çerçevesinde verilecek en az 32 saatlik eğitim modüllerini tamamlayarak belgelendirilmeleri halinde bu Yönetmelik kapsamında mesleki eğitim almış olarak kabul edilir.*
(3) 22/5/2003 tarihli ve 4857 sayılı İş Kanunu'na göre istihdam edilecekler hariç olmak üzere, kamu kurum ve kuruluşlarında çalışacaklar için gerekli olan mesleki eğitim belgeleri kurum ve kuruluşlarca önceden belirlenir ve işe alımlar bu esaslar da göz önünde bulundurularak yapılır.

6. Maddede genel olarak istisnai durumlar anlatılmakla birlikte geniş çalışan kitlelerini ilgilendiren kısım 1. Fıkranın e bendidir. Ağır ve tehlikeli işler tebliğinde kamu kurum ve kuruluşları ile eğitim amaçlı vakıf ve derneklerce verilebilen belgelerin geçerliliği burada MEB'in ilgili biriminin onayına tabi tutulmuştur. MEB'in ilgili birimi Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğüdür. Söz konusu Genel Müdürlük bünyesindeki Halk Eğitim Merkezleri de ilgili maddedeki eğitim amaçlı kamu kurum ve kuruluşları arasında yer almaktadır. Tebliğdeki özel kursların eğitim ve belgelendirme yetkisi kaldırılmıştır.

Yine yeraltı maden işletmeleri açısından baktığımızda Halk Eğitim Merkezleri dahil diğer eğitim kurumlarındaki öğreticilerin nitelikleri madencilik gibi özel uzmanlık gerektiren bir alanda çoğu zaman yetersiz kaldığı için genel olarak bu eksiklik işyerlerinde verilen eğitimlerle telafi edilmeye çalışılmaktadır.

2013 tarihli Yönetmelikte mesleki eğitimler MEB ile ilişkilendirilerek mesleki eğitimlerde bir standart oluşturulmaya çalışılmıştır. Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğünde mesleki eğitim modülleri oluşturulmuştur. Modüller haliyle özet bir çerçeve sunmaktadır. Başlangıçtaki amaç, eğitim kurumlarının modüllere uygun

ayrıntılı kurs programı oluşturması ve mesleki eğitimleri vermesi olarak belirlenmişti ancak yukarıda belirtildiği üzere eğitim kurumlarında ve eğiticilerde genel bir yetkinlik sorunu bulunduğundan kurs programının oluşturulması da mesleki eğitimlerin verilmesi de genellikle işyerlerine kalmaktadır.

Bununla birlikte, 13.07.2013 tarihli yönetmelik sonrasında MEB onayıyla yapılmaya başlayan mesleki eğitimler, 06.05.2025 tarihinden itibaren kesintiye uğramıştır. Bu tarihte, MEB Eğitim Programları Daire Başkanlığı tarafından Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğüne yazılan E-74908354-101.04-131852258 sayılı ve "Kurs Program Onayı" konulu yazıda şunlar denilmektedir:

"10.07.2018 tarihli ve 30474 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Cumhurbaşkanlığı Teşkilatı Hakkında Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile zorunlu eğitim dışında, eğitim ve öğretimi hayat boyu devam edecek şekilde yaygınlaştırmak amacıyla çalışmalar yapmak, bireylere yaygın eğitim yoluyla genel veya meslekî ve teknik alanlarda eğitim vermek, yaygın eğitim ve öğretim programlarını hazırlamak görevi Genel Müdürlüğümüze verilmiştir. Bu doğrultuda Daire Başkanlığımızca "Yaygın Eğitim Kurumları Çerçeve Kurs Programları" çerçevesinde kurs programları geliştirilmekte, kurs programları güncellenmekte, güncelliğini yitiren kurs programları uygulamadan kaldırılmaktadır.
Bu kapsamda Tehlikeli ve Çok Tehlikeli Sınıfta Yer Alan İşlerde Çalıştırılacakların Mesleki Eğitimlerine Dair Yönetmeliğin 6. maddesinin 2. fıkrası kapsamında hazırlanan programların işlevini tamamladığı Daire Başkanlığımızca değerlendirilmiş ve İlgi (b) görüş yazısı ile Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı da bu yönde görüş belirtmiştir. Bu kapsamda e-Yaygın sisteminde bulunan 237 kurs programının uygulamadan kaldırılması uygun görülmektedir."

İlgili yazıda "işlevi tamamlanmıştır" denilen programlar, Yönetmelikte 2017 yılından önce işe girenler hakkındadır. Yazı ilk anda 2017 yılından önce işe girenlerle ilgili ibarelerin 2025 itibariyle güncellenmek istendiği izlenimini vermektedir. Zira bu ibareler Yönetmeliğin çıkarıldığı 2013 Tarihinde, 2013'den önce işe girenler hakkında olup Yönetmelik 2017 yılında güncellenmişti. Ancak yazıda ilginç bir ayrıntı bulunmaktadır. Yazının son cümlesine eklenen, *"Bu kapsamda e-Yaygın sisteminde bulunan 237 kurs programının uygulamadan kaldırılması uygun görülmektedir."* ibaresi ile basit bir güncelleme girişimi adı altında tehlikeli ve çok tehlikeli işlere ait 237 kurs programı sistemden kaldırılmıştır. Kaldırılan bu kurslardan 32'si Maden Çıkarma alanına dahil olup bu alanda sadece 6 kurs programı bırakılmış, ancak söz konusu yazının yazıldığı 06.05.2025 tarihinden sonra Milli Eğitim Bakanlığı bu 6 program için de bir daha kurs açmamıştır.

Kısacası Milli Eğitim Bakanlığı açıkça ilan etmese de kendilerince bazı nedenlerden dolayı tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta yer alan işlerdeki mesleki eğitimlerden çekilmiş görünmektedir. Ancak Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı bu yeni duruma göre ilgili Yönetmeliğini güncellememiş, alternatif geliştirmemiştir. Mayıs 2025 sonrasında ülke çapında bu konuda sıkıntılar yaşanmış ve yaşanmaktadır.

Anılan Yönetmeliğe ilişkin mesleki eğitimlerde MEB dışında bir seçenek olarak, bazı üniversitelerin sürekli eğitim merkezleri tarafından da mesleki eğitimler verilebilmekte ve belgelendirilmektedir. Yönetmelikte bu yetki açıkça belirtilmemiş olsa da Madde:6.1.e'de Aktif İşgücü Hizmetleri Yönetmeliğine göre mesleki eğitim kursları veya mesleki eğitim modülü/kursları ile eşit süreli olmak koşuluyla işbaşı eğitim programları sonucu alınan belgelerin geçerli olacağına dair ibare üzerinden üniversite ve yüksek okullar üzerinden mesleki eğitimler yapılmaktadır. Aktif İşgücü Hizmetleri Yönetmeliği, Türkiye İş Kurumu Genel Müdürlüğü tarafından düzenlenen aktif işgücü hizmetlerinin yürütülmesine ilişkin usul ve esasları belirlemektedir.

Ancak YÖK 02.07.2026 tarihinde E-19924119-100-45794 Sayılı bir yazı yayınlayarak üniversitelerin sürekli eğitim merkezleri tarafından yürütülen sertifika program başvurularının 1 Ekim 2026 tarihinden itibaren YÖK Başkanlığına yapılması gerektiğini, başvuruların YÖK tarafından merkezi olarak değerlendirileceğini duyurmuştur. Bu merkezileşmenin ne gibi sonuçlar doğuracağını, tehlikeli ve çok tehlikeli işlerde üniversiteler üzerinden mesleki eğitimlerin devam edip etmeyeceğini zaman gösterecektir.

Tehlikeli ve Çok Tehlikeli Sınıfta Yer Alan İşlerde Çalıştırılacakların Mesleki Eğitimlerine Dair Yönetmelik bu haliyle bir nevi dondurulma sürecine girmiş, alanını aşamalı olarak Mesleki Yeterlilik Kurumu (MYK) sistemine devretmekte olan bir Yönetmelik hüviyetindedir.

2.3. Mesleki Yeterlilik Kurumu (MYK) Sınav Ölçme, Değerlendirme ve Belgelendirme Sistemi

MYK Kanunu 2006 yılında, MYK Sınav Ölçme, Değerlendirme ve Belgelendirme Yönetmeliği ise 2015 yılında çıkarılmıştır.

Genel olarak Tehlikeli ve Çok Tehlikeli sınıfta yer alan mesleklerde yaşanan mesleki eğitim sorunlarının çözümü için MYK sisteminden büyük bir beklenti bulunduğu gözlenmektedir. Bu beklentinin özellikle yeraltı maden işletmelerinde gerçeği ne kadar yansıtıyor olduğunu görebilmek için MYK sisteminin özelliklerini ve yeraltı maden işletmelerindeki uygulamalarını şu şekilde özetlemek mümkündür:

- MYK bir sınav ölçme, değerlendirme ve belgelendirme sistemidir, mesleki eğitimi barındırmaz. Amacı nitelikli işgücünün ulusal ve uluslararası standartlarda belgelendirilmesidir. Bu amaçla her meslek için ulusal standartlar hazırlanır, bu standartlara uygun olarak akredite kuruluşlar tarafından görüntülü kayıt altında sınav yapılır. Burada en önemli sorun mesleki eğitimdir. Sınırlı sayıda meslek için endüstri meslek liseleri veya Mesem programı ile nitelikli işgücü yaratılacağı düşünülebilir ancak yüzlerce meslekten oluşan tehlikeli ve çok tehlikeli işlerin tamamını kapsayan mesleki eğitimler verilmeden adayların nitelikli hale nasıl geleceği tartışma konusudur.

- MYK'nın başlangıçtaki hedefi, çalışanların kendi edindiği MYK belgesi ile iş başvurusu yapmasıdır. Yeraltı maden işyerleri gibi niteliksiz çalışan kitlelerinin istihdama alındığı sektörler için bu gerçekçi bir yaklaşım değildir. Mevzuatımızda eğitimlerin işveren yükümlüğünde olduğunu belirten hükümler de bulunmaktadır.

- MYK niteliği ölçtüğüne göre önümüzdeki süreçte 2013 Tarihli Yönetmelik yürürlükten kalkıp MYK kapsamı genişletildiğinde yeni işe başlayan niteliksiz bir çalışanın yeraltına nasıl indirileceği anlaşılamamıştır.

- MYK gibi oldukça maliyetli bir sistemde belgelendirmenin süreli olması ilginçtir. Meslek içi eğitim elbette yadsınamaz ancak mesleki eğitimi içermemesine rağmen bu kadar öne çıkarılan bir belgenin bir süre sonra iptal edilip yenisinin çıkarılmak zorunda olması ticari bir dayatma olarak algılanmaktadır.

- Yeraltı maden işyerleri, MYK'nın "meslek" tanımına uymamaktadır. Çünkü yeraltında meslek yoktur, unvan veya sanat kolu vardır. Unvan ve sanatlar çoğu zaman kalıcı meslek hüviyetinde değildir. Yeraltında kişinin eforuna, kaza veya meslek hastalığı geçirmesine ya da işyerinin ihtiyacına göre unvanlar değişkenlik gösterebilmektedir.

- MYK'nın ulusal standart oluşturma hedefi ilk başta olumlu gibi gözükse de ülke yeraltı madenciliğindeki unvanların tek bir kalıba sokulmaya çalışılması imkansızdır. Kömür ve metal işletme ayrımı bir yana kömür havzaları arasında bile uygulamada büyük farklılıklar bulunmaktadır.

No	Beceri ve Yetkinlik İfadesi	UMS İlgili Bölüm	Yeterlilik Birimi Başarım Ölçütü	Değerlendirme Aracı
BY.13	Makine ve donanımlarının fiziksel kontrollerini yapar.	B.2.2	2.4	P1
BY.14	Makine ve donanımlarının kontrolleri sonucunda karşılaşılan olağandışı durumlarda yetkisi dahilindeki bakım ve onarımların yapılmasına yardımcı olur.	B.2.4	2.4	P1
BY.15	İş emrinde belirtilen ray türünün tabana döşenmesini sağlar.	E.1.1 E.1.2	3.1	P1
BY.16	İşletme talimatına göre kurulacak hat için (zincirli konveyör hattı veya bant konveyör hattı) zeminin hazırlanması amacıyla alınacak tedbiri belirler.	E.1.1 E.1.2	3.1	P1
BY.17	İşletme talimatına göre kurulacak hat için (zincirli konveyör hattı veya bant konveyör hattı) zeminin hazırlanmasını sağlar.	E.1.1 E.1.2	3.1	P1
BY.18	Su hattının sızma oluşmayacak şekilde bağlanmasını sağlar.	E.2.1 E.2.2 E.2.4	3.2	P1
BY.19	Basınçlı hava borusunun, gerekli güvenlik tedbirlerinin alınarak, bağlantı cıvatalarının uçları galeri çıkış istikametini gösterecek şekilde bağlanmasını sağlar.	E.2.3 E.2.4	3.2	P1
BY.20	Temiz hava sağlamak için mevcut vantüp çapına uygun olacak şekilde vantüpün ilave edilmesini sağlar.	E.3.1 E.3.2	3.3	P1
BY.21	Kirli havayı çalışma alanından uzaklaştırmak için emici vantüp (spiral, sac) bağlanmasını sağlar.	E.3.1 E.3.2	3.3	P1

Şekil 1. MYK hazırlık işçisi seviye 4 ulusal standardı.

Örneğin Şekil-1'deki hazırlık işçiliği ulusal standardına göre hazırlık işçisinin ray döşemesi öngörülmekte, sınavda bunu yapması istenmektedir. Oysa çoğu havzada ve belirli seviyedeki işletmelerde bu işi yol marangozları yapmaktadır. Ayrıca hazırlık işçisinin su ve basınçlı hava borusu bağlaması da talep edilmektedir. Bu işler için de çoğu işletmede ajöstör unvanlı çalışanlar istihdam edilir.

No	Beceri ve Yetkinlik İfadesi	UMS İlgili Bölüm	Yeterlilik Birimi Başarım Ölçütü	Değerlendirme Aracı
BY.10	Makine kontrol listesine göre makine ve donanımlarını kontrol ederek yetki alanına giren eksiklikleri tamamlar.	B.2.2	3.2	P1
BY.11	Makine kontrol listesine göre yaptığı kontrolde yetki alanı dışında tespit ettiği eksiklikleri amirine bildirir.	B.2.2	3.2	P1
*BY.12	Amirinden aldığı bilgiler ve iş planı doğrultusunda çalışma alanında çalışmaya engel bir durum olup olmadığını kontrol eder.	C.1.1-2	4.1	P1
BY.13	İş emri doğrultusunda yapılacak işin büyüklüğüne göre iş planını yapar.	D.1.1	4.2	P1
BY.14	Çalışma alanındaki çalışmayı etkileyecek mekanik, elektrik, hidrolik ve pnömatik sistemlerin devre dışı bırakıldığını kontrol eder.	D.1.3	4.1	P1
*BY.15	İş emrinde belirtilen mekanik/hidrolik/pnömatik sistemin (zincirli konveyör, bant konveyör, tulumba, tumba, silo ve silo kapakları, kömür delme-patlatma makineleri, pompa, hidrolik direk üniteleri ve benzeri) kurulumunu yapar.	D.1.4	4.3	P1
*BY.16	Kurulumunu yaptığı ünitelerin çalışıp çalışmadığını test ederek istenilen düzeyde çalışır duruma getirir.	D.1.5	4.4	P1
BY.17	İş emri doğrultusunda mekanik/hidrolik/pnömatik sistemin periyodik (günlük, haftalık, aylık ve benzeri) bakımlarını yapar.	D.3.1	5.1	P1

Şekil 2. Mekanizasyon işçisi seviye 4 ulusal standardı.

Şekil 2'de görülen mekanizasyon işçiliğinin görev tanımına ise zincirli konveyör, bant konveyör dahil geniş bir alandaki tüm mekanik işler konulmuş, özellikle de ayrı bir uzmanlık gerektiren yüksek basınçlı hidrolik sistemlerde yapılan çalışmalar da ilave edilmiştir. Çoğu maden işletmesinde bu sayılan görevler ayrı ayrı unvanlardaki çalışanlar tarafından yapılmaktadır.

Görüldüğü üzere işletmelerde benzer unvanlar için farklı uygulamalar söz konusudur. MYK ulusal meslek standartları belirlenirken daha geniş katılım sağlanması ile sorun çözülebilecek gibi de değildir. Sorun, ülke çapında yeraltı unvanlarının meslek olarak standarda sokulmak istenmesinin bizatihi kendisidir. Havzalarda ve işletmelerde yeraltı unvanlarının görev, yetki ve sorumluluklarının farklılık göstermesinde sakınca yoktur. İlgili unvanın fiili tüm çalışmalarını kapsayan eğitim programları hazırlanıp gerekli eğitimler sonrasında mevzuata uygun belgelendirmenin yapılması ideal olanıdır.

- MYK uygulama kapsamında alınması zorunlu meslek haline getirilen 'Tahlisiyecilik' bir yeraltı sanat kolu veya unvan bile değil, niteliktir.

Tahlisiye ekipleri, teknik elemanlar ile diğer yeraltı sanat kollarından seçilen kişilerden oluşur. İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik Madde 11-3'e göre, çok tehlikeli sınıfta yer alan işyerlerinde her 30 çalışana kadar, uygun donanıma sahip ve özel eğitimli en az bir çalışan destek elemanı olarak görevlendirilir. Yeraltı işletmelerinde tahlisiyeci olarak adlandırılan bu elemanlar tüm kademe ve unvanlardan uygun kişiler arasından seçilip özel olarak eğitilmekte ve belgelendirilmektedir. Türkiye Taşkömürü Kurumu halen tahlisiyeci eğitimi ve belgelendirmesi yapmaktadır.

Tahlisiyeciliğin MYK kapsamında alınması zorunlu bir meslek haline getirilmesi, meslek üzerine meslek sahibi olma gibi bir durum ortaya çıkarmış, MYK'nın, çalışanların kendi edindikleri MYK belgesi ile iş başvurusu yapma hedefini doğrudan çöpe atmıştır. Çünkü bir MYK belgesi sahibi olan hiçbir çalışan tahlisiyecilik gibi apayrı uzmanlık gerektiren ikinci bir belge almaya ihtiyaç duymayacağı gibi tahlisiyeci olabilmek de ciddi yeraltı tecrübesi gerektirmektedir.

Tahlisiyecilik örneğindeki meslek üzerine meslek zorunluluğu, MYK'nın bir ticari dayatma olduğu algısını da güçlendirmiştir.

Bununla birlikte tahlisiyeciliğin kapsama alınması MYK'nın kendi mevzuatına da aykırıdır. Tahlisiyecilik ulusal yeterliliği sınavına giriş şartlarından birisi şudur: *"Maden sektöründe çalışmak kaydıyla mühendis, tekniker veya teknisyen unvanı olmayanlar ya da bir MYK Mesleki Yeterlilik Belgesi veya ustalık belgesi olmayanlar sınava alınmaz."*

Meslekî Yeterlilik Kurumu Meslekî Yeterlilik Belgesi Zorunluluğu Getirilen Mesleklere İlişkin Tebliğ Madde 3-(2)'de ise, *"5/6/1986 tarihli ve 3308 sayılı Mesleki Eğitim Kanunu'na göre ustalık belgesi almış olanlar ile Millî Eğitim Bakanlığına bağlı meslekî ve teknik eğitim okullarından ve üniversitelerin meslekî ve teknik eğitim veren okul ve bölümlerinden mezun olup, diplomalarında veya ustalık belgelerinde belirtilen bölüm, alan ve dallarda çalıştırılanlar için birinci fıkradaki belge şartı aranmaz."* denmektedir.

MYK Tebliğinin anılan maddesine göre teknik elemanlar diplomalarında belirtilen alanlarda çalıştığı sürece MYK belge zorunluluğuna tabi değildir. Tahlisiye mühendisliği şeklinde bir disiplin olmadığına göre ve maden mühendisliğinin tahlisiyecilik gibi bir yeraltı faaliyetini de kapsayacağı ortada olduğuna göre, maden mühendislerinin MYK tahlisiyecilik mesleki yeterlilik kapsamına alınması MYK tebliğine aykırıdır.

Buradaki sorun şudur. Elbette ki tahlisiyecilik ciddi bir eğitim ve belgelendirme yapılmasını gerektiren bir niteliktir. Ancak yeraltında bir meslek sahiplerinin edindiği bu niteliğin ilave meslek olarak kabul edilmesi son derece yanlış olup görüldüğü üzere MYK'nın kendi mevzuatına aykırıdır.

- Sonuç olarak MYK sisteminin yeraltı maden işyerlerinin mesleki eğitim sorunlarına çare olmaktan uzak olduğu görülmektedir.

3. MESLEKİ EĞİTİM MEVZUATI HAKKINDA TESPİT VE DEĞERLENDİRMELER

Çizelge1'deki karşılaştırmada Mesleki Eğitim konusunda bir karışıklık olduğu, bu konunun çözülemediği gözlenmektedir. Özellikle maden işyerlerinde mesleki eğitimlerin verilmesinin çoğunlukla işyerlerine kaldığı bilinen bir gerçekliktir.

Çizelge 1. Eğitim mevzuatının karşılaştırılması.

	Mesleki Eğitim	Belgelendirme
2009 Tarihli Tebliğ	Özel Öğretim Kursları Kamu kurum ve kuruluşları	Özel kurs Kamu kurumu
2013 Tarihli Yönetmelik	Yetkilendirilmiş Eğitim Kurumu- Üniversiteler	MEB-Üniversite
MYK	Yok	MYK

Bütün bunların ışığında yeraltı maden işyerlerinde yaşanan mesleki eğitim sorunları hakkındaki önerilerimiz şu şekildedir:

1- Mesleki eğitimde işyerlerini yok sayan bir anlayışla mesleki eğitim sorunları çözülemez.
2- Mesleki eğitimi değil belgelendirmeyi öne çıkararak, belge varsa eğitim vardır yaklaşımı terk edilmelidir.
3- Belirli havzalarda maden mesleki eğitim merkezleri açılmalıdır.
4- Yeraltı maden işyerleri MYK kapsamından muaf tutulmalıdır.

YERALTI TAŞKÖMÜRÜ MADENCİLİĞİNDE 6331 SAYILI İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ KANUNUNUN ETKİLERİ

THE EFFECTS OF THE OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY LAW NO. 6331 ON UNDERGROUND HARD COAL MINING

Osman Bahadır*

TTK Karadon Taşkömürü İşletme Müessesesi, Zonguldak

Fatih Bayram

Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

ÖZET Yeraltı taşkömürü madenciliği, içerdiği yüksek riskler, dinamik ocak koşulları ve iş kazası potansiyeli nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği (İSG) önlemlerinin en üst düzeyde uygulanması gereken endüstri kollarının başında gelmektedir. Türkiye'de yüksek risk ve tehlike içeren kömür havzalarından biri de Zonguldak Havzasıdır. Ülkemizde 2012 yılında yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, çalışma hayatında proaktif bir yaklaşımı benimseyerek köklü bir yapısal dönüşüm hedeflemiştir. Bu çalışmada, 6331 sayılı Kanunun yeraltı taşkömürü madenciliğindeki somut etkileri, Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) bünyesindeki müesseselerin (Karadon, Kozlu, Üzülmez, Amasra ve Armutçuk) 2003-2023 yılları arasındaki bazı parametreleri (kaza sayısı, yıllık kaza ortalamaları, yıllık üretim miktarları, iş güvenliğinin maliyeti gibi) analiz edilmiştir. Kanun öncesi ve sonrası süreçleri kapsayan analizlerde bu parametreler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kanun sonrasında proaktif önlemlerin artmasına ve bazı dönemlerde kaza sayılarında gerilemeler yaşanmasına rağmen; jeolojik zorluklar, kadro eksiklikleri ve yapısal üretim kayıpları nedeniyle kaza oranlarında tam bir kararlılık sağlanamadığını göstermektedir. Çalışma, yeraltı madenciliğinde mevzuat uyumunun ötesinde, derinlemesine teknik modernizasyon ve bütüncül bir güvenlik kültürü dönüşümünün gerekliliğini ortaya koymaktadır.

ABSTRACT Underground hard coal mining is one of the foremost industries requiring the utmost level of occupational health and safety (OHS) precautions due to the high risks involved, dynamic mine conditions, and the potential for occupational accidents. One of Türkiye's coal basins with high risks and hazards is the Zonguldak Basin.Occupational Health and Safety Law No. 6331, which came into effect in our country in 2012, aims to bring about a fundamental structural reform by adopting a proactive approach to the workplace. In this study, the real effects of Law No. 6331 on underground hard coal mining were analyzed by evaluating various parameters (such as the number of accidents, annual accident averages, annual production amounts, and the cost of occupational safety) for the Turkish Hard Coal Enterprise (TTK) establishments (Karadon, Kozlu, Üzülmez, Amasra, and Armutçuk) between 2003 and 2023.The results indicate that, although proactive precautions increased after the law was enacted and accident numbers declined during some periods, a fully stable accident rate could not be achieved due to geological conditions, insufficient personnel, and structural production losses. The study highlights the need for comprehensive technical modernization and a holistic reform of safety culture, going beyond mere regulatory compliance in underground mining.

*osembahadir@gmail.com

1. GİRİŞ

Madencilik faaliyetlerinin bütün aşamaları, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından çok tehlikeli ve riskli gruba girmektedir. Bu risklerin önlenememesi durumunda ise iş kazalarının meydana gelmesi ve çalışma alanında oluşan zararlı ortamların meslek hastalıklarına sebep olması muhtemeldir. Madencilik faaliyetlerinde meydana gelen iş kazaları ve meslek hastalıkları neticesinde hem çalışanlar hem de firmalar maddi ve manevi olarak büyük zarar görmektedir. İş kazaları ve meslek hastalıklarının birçoğu önlenebilir olduklarından, bu kazalara ve meslek hastalıklarına sebebiyet veren tehlikeli durum ve davranışların önlenmesi elzemdir. Bu yüzden endüstrinin her alanında olduğu gibi madencilik alanında da iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin uygulanması, çeşitli kanun ve bu kanunlara bağlı yönetmeliklerle güvence altına alınmıştır. Ülkemizde de bu konuda, 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanun ve ilgili yönetmelikler uygulanmaktadır.

Her türlü endüstri alanında olduğu gibi madencilik alanında da iş sağlığı ve güvenliği kanun ve yönetmeliklerinin meydana gelen iş kazalarına, işletme performansına etkilerinin değerlendirilmesi önemli bir konudur. Bu değerlendirmeler kanunun olumlu ve olumsuz yanlarının ortaya konmasına yardımcı olur. Ülkemizde yürürlükte olan 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun ve ilgili yönetmeliklerinin bu kapsamda yeraltı taşkömürü madenciliği açısından değerlendirilmesi önemlidir. Çalışanların işyeri ve yapılan iş kaynaklı risklere karşı korunmasını sağlamak, üretim güvenliğini korumak amacıyla çıkarılan yasa ve yönetmelikler, iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının geliştirilmesi için kurumsal yapıları güçlendirmiştir. Kanunların ve yönetmeliklerin çıkartılmasının yanında, uygulamalarının sonuçları da incelenmeli ve ortaya konulmalıdır. Kanunların öncesinde ve sonrasında ortaya çıkan durum, uygulanan yasal düzenlemelerin etkilerini ortaya çıkarır. Böylece, yasal düzenlemelerin faydalı olduğu veya eksik kaldığı yönler belirlenebilir. İşletmeler açısından faydalı yönlerin ortaya konması, eksiklerin giderilmesi için gerekli düzenlemelerin yapılması iş sağlığı ve güvenliği açısından yasal düzenlemelerin uygulanmasında özendirici bir etki sağlar (Bahadır, 2026).

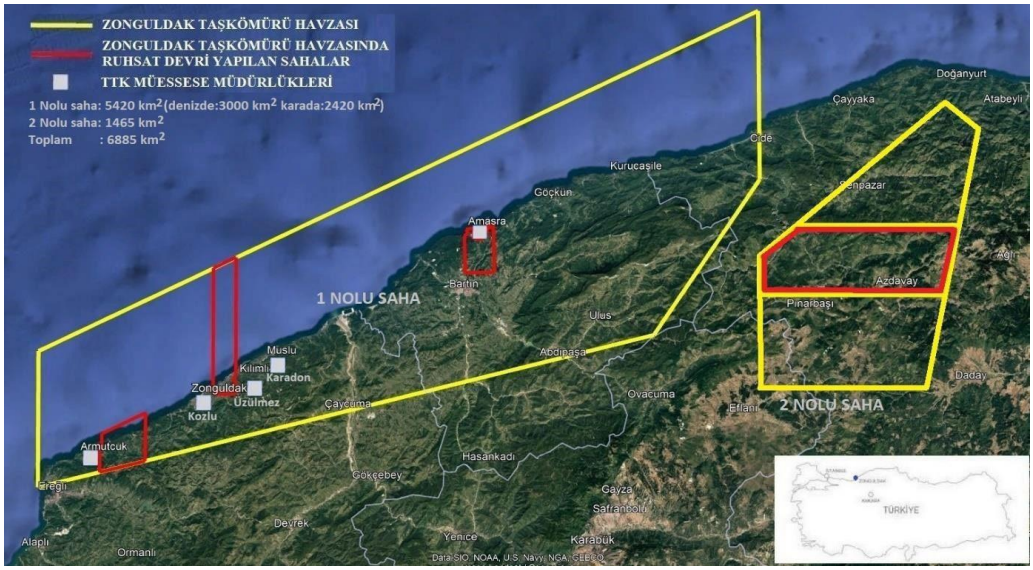
Literatürde 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun temel alınarak yapılan farklı çalışmalar bulunmaktadır; ancak sayıları kısıtlıdır. Korkmaz (2011), Türkiye Taşkömürü Kurumu örneğinde iş kazaları ile verimlilik üzerine yaptığı çalışmada, iş kazalarının üretim süreçleri üzerindeki etkisini inceleyerek iş kazalarının ve yaralanmaların verimlilikle ilişkisini istatistiksel olarak değerlendirmiştir. İş kazalarının artmasının iş gücü kaybı ve maliyet artışı yoluyla verimliliği olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur. Çalışkan (2016), 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile yöneticilerin iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarındaki sorumluluklarını ve bu sorumlulukların kurumsal güvenlik kültürüne etkisini incelemiştir. Korkusuz (2017), 6331 sayılı İş Sağlığı ve İş Güvenliği Kanunu'na göre işverenlerin risk değerlendirmesi, önleyici tedbirlerin alınması ve çalışanların bilgilendirilmesine ilişkin yükümlülüklerini hukuki çerçevede değerlendirmiştir. Şahin (2017), 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununa göre işyeri hekimi ve iş güvenliği uzmanlarının görev,

yetki ve sorumluluklarını ele almıştır. Özer (2018), 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun yürürlüğe girmesinden sonraki dönemde iş kazalarındaki değişimi istatistiksel veriler ışığında analiz etmiştir. Analizlerini Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) verilerine dayandırdığı bu çalışmasında, Türkiye'de iş kazası sayısının yıllar itibariyle artış gösterdiğini, bu artışın ise kanun sonrası dönemde kaza bildirim zorunluluğunun olmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Aktaş (2019) çalışmasında, kanun kapsamında uygulanan idari para cezalarının işverenler üzerindeki caydırıcılık düzeyini değerlendirmiş ve yaptırımların etkinliği tartışmıştır. Doğu (2019) yaptığı çalışmada, çalışanlara tanınan işçinin çalışmaktan kaçınma hakkının hukuki dayanaklarını, kullanım koşullarını ve uygulamada karşılaşılan sorunları ele almıştır.

Bu çalışmada ise Türkiye Taşkömürü Kurumu'nda 2003–2023 yılları arasında 6331 sayılı kanun öncesi ve sonrası dönemlerde oluşan durum çeşitli parametreler ele alınarak değerlendirilmiştir. Meydana gelen iş kazaları, üretim miktarları, işçi sayıları, iş güvenliği maliyetleri gibi konularda kanun öncesi ve sonrası oluşan etkiler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bunun yanında iş güvenliği açısından uygulamaların üretim maliyetlerine olan etkileri de değerlendirilmeye çalışılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANI HAKKINDA GENEL BİLGİLER

TTK, Zonguldak taşkömürü havzasında beş ana taşkömürü işletme müessesesi (Karadon, Kozlu, Üzülmez, Amasra ve Armutçuk) aracılığıyla faaliyet göstermektedir. Her müessese, farklı jeolojik ve teknik özelliklere sahip sahalarda üretim yapmaktadır. Tarihsel süreç içerisinde TTK Zonguldak Taşkömürü Havzası son olarak 14.04.2000 tarih ve 2000/525 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile 3.000 km²'sidenizde, 3.885 km²'si karada olmak üzere toplam 6.885 km² olarak düzenlenmiştir. Zonguldak Taşkömürü Havza haritası Şekil 1'de verilmektedir (TTK, 2025).



Şekil 1. Zonguldak taşkömürü havzası

3. MALZEME VE YÖNTEM

6331 sayılı kanun, Türkiye'de iş sağlığı ve güvenliği alanında köklü bir dönüşüm yaratmıştır. Kanunla birlikte İSG hizmetleri tüm işyerlerinde zorunlu hale gelmiş, risk değerlendirmesi, acil durum planlaması ve çalışan eğitimi gibi önleyici yaklaşımlar kurumsallaşmıştır. Ayrıca, iş güvenliği uzmanı ve işyeri hekimi görevlendirme zorunluluğu getirilmiş, iş kazalarının kayıt altına alınması ve bildirim süreçleri sıkılaştırılmıştır. Kamu kurumları da özel sektörle eşit yükümlülüklere tabi tutulmuştur.

Bu çalışmada, 2012 yılında yürürlüğe giren 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun, TTK bünyesindeki iş kazaları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analizler, yalnızca kaza sayılarına değil; üretim yöntemleri, işçi sayıları, işe alım politikaları, üretim hacmi, maliyetlere de odaklanmaktadır. Çalışmanın ana verilerini, Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) Genel Müdürlüğünden elde edilen resmi istatistiki veriler oluşturmaktadır. Araştırma kapsamında, 2003–2023 yılları arasındaki 21 yıllık döneme ait kaza sayıları, işgücü, üretim miktarları, maliyet ve İSG harcamaları gibi temel parametreler geriye dönük olarak derlenmiş ve analiz edilmiştir (Bahadır, 2026).

4. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Türkiye Taşkömürü Kurumu'nda (TTK) 2003–2023 yılları arasında meydana gelen iş kazaları, kişi başına düşen kaza oranı ve 1000 ton tüvenan üretim başına düşen kaza, toplam işgücü, iş güvenliği maliyetleri üzerinden analiz edilmiştir. Bu göstergeler, Dönem I [(2003-2013) kanun öncesi] ve Dönem II [(2014-2023) kanun sonrası] olmak üzere iki ayrı dönemde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

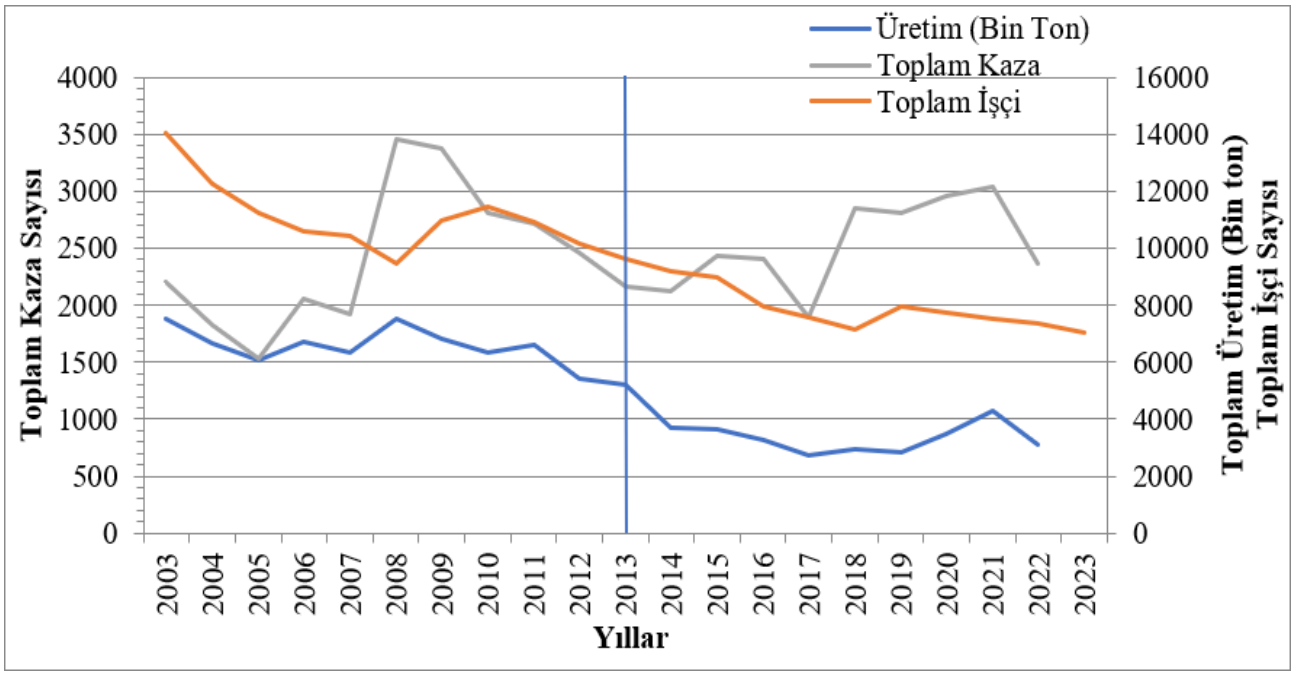
4.1. 2003–2023 Üretim – İşçi – Kaza Analizi

Türkiye Taşkömürü Kurumu'nun 2003–2023 yılları arasındaki üretim miktarı, toplam işçi sayısı ve toplam iş kazası verileri değerlendirilmiş; ayrıca 2012 yılında yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun etkileri incelenmiştir. Kanunun yayımlandığı tarih (30.06.2012) ve ilgili yönetmeliğin çıkış zamanı (19.09.2013) dikkate alınarak, 2013 yılı ilgili kanunun yürürlüğe girişi ve yönetmeliklerinin yayımlanma sürecinden dolayı kanun öncesi dönemden sayılmıştır. Çizelge 1, 2003–2023 dönemi için kömür üretimi, işgücü, kaza sayılarını vermektedir.

Çizelge 1'de yıllar itibariyle işçi başına düşen üretim miktarları genel olarak azalma eğilimindedir. Yapılan üretim miktarlarına karşılık bakıldığında, üretim ve işçi başına düşen kaza sayılarında artış görülmektedir.TTK Zonguldak Havzasındaki beş müessesede 2003–2023 dönemi için üretim miktarları, işgücü, kaza sayıları grafiksel olarak incelenmiştir (Şekil 2). Yapılan incelemede parametreler açısından havzadaki toplam rakamlar alınmış, kanun öncesi ve sonrası olarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Çizelge 1. 2003–2023 dönemi için kömür üretimi, işgücü, kaza sayıları

Yıl	Üretim (Bin Ton)	Toplam İşçi	Toplam Kaza	İşçi Başına Üretim Miktarı (ton/yıl)	Bin İşçi Başına Kaza Sayısı	Bin Ton Üretim Başına Kaza Sayısı
2003	2.011	14.062	2.488	143,01	176,93	1,24
2004	1.879	12.261	2.202	153,25	179,59	1,17
2005	1.665	11.249	1.823	148,01	162,06	1,09
2006	1.522	10.611	1.532	143,44	144,38	1,01
2007	1.675	10.442	2.057	160,41	196,99	1,23
2008	1.586	9.441	1.925	167,99	203,90	1,21
2009	1.879	10.979	3.456	171,14	314,78	1,84
2010	1.708	11.456	3.371	149,09	294,26	1,97
2011	1.583	10.904	2.808	145,18	257,52	1,77
2012	1.657	10.138	2.714	163,44	267,71	1,64
2013	1.357	9.619	2.459	141,07	255,64	1,81
2014	1.300	9.172	2.161	141,74	235,61	1,66
2015	931	8.956	2.126	103,95	237,38	2,28
2016	911	7.932	2.433	114,85	306,73	2,67
2017	822	7.575	2.412	108,51	318,42	2,93
2018	686	7.133	1.899	96,17	266,23	2,77
2019	734	7.958	2.855	92,23	358,76	3,89
2020	712	7.740	2.811	91,99	363,18	3,95
2021	870	7.509	2.958	115,86	393,93	3,40
2022	1.074	7.337	3.035	146,38	413,66	2,83
2023	782	7.056	2.366	110,83	335,32	3,03



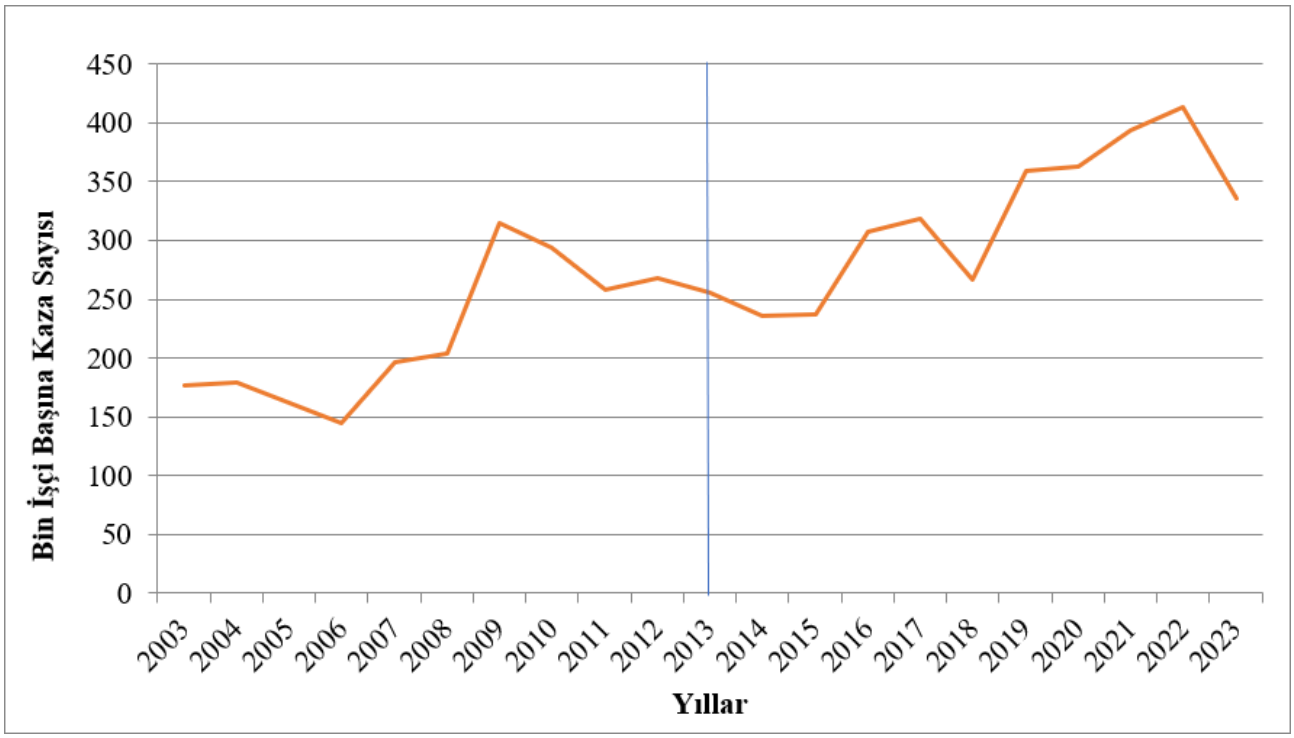
Şekil 2. 2003–2023 dönemi için üretim miktarları, işgücü, kaza sayıları

Şekilde, 2013 yılına eklenen dikey kesikli çizgi, İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun yürürlüğe giriş tarihini görsel olarak ayırmaktadır. Kanun öncesinde işçi sayısında

düzenli ve ciddi bir düşüş yaşanmıştır. Bu durum kurumun küçülmesi, kadro azaltmaları ve yapısal daralma ile ilişkili olabilir. Kanun sonrasında ise azalışın devam ettiği; ancak önceki döneme kıyasla daha yavaş seyrettiği görülmektedir. Bu yavaşlamada 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile getirilen iş yükü analizleri, risk değerlendirmeleri, eğitim faaliyetleri ve daha sistematik iş güvenliği uygulamalarının etkisi olduğu düşünülebilir.

Üretim açısından bakıldığında, her iki dönemde de genel bir düşüş eğilimi mevcuttur; ancak kanun sonrası dönemde üretimdeki azalmanın daha sert olduğu dikkat çekmektedir. Bunun temel nedenleri arasında azalan işçi sayısı, verimlilik sorunları ve yeni güvenlik uygulamalarının üretim hızını sınırlaması yer alabilir.

Kaza sayıları incelendiğinde ise kanun sonrasında iş güvenliği yapısının güçlendirilmesine rağmen kazalarda keskin bir düşüş olmadığı, dalgalı bir seyrin sürdüğü anlaşılmaktadır. Bununla birlikte 2009–2011 yıllarında görülen çok yüksek kaza sayılarına benzer seviyelerin kanun sonrasında yaşanmamış olması önemlidir. Bu durum, şiddetli kazalarda azalma yaşanırken toplam kaza sayılarında ise dönemsel dalgalanmaların sürdüğü biçiminde özetlenebilir. Şekil 3'te ise 2003–2023 yılları arasında Türkiye Taşkömürü Kurumu'nda bin işçi başına düşen kaza sayısının yıllık değişimi incelenmiştir.



Şekil 3. 2003–2023 dönemi için bin işçi başına kaza sayısı

Şekil 3 incelendiğinde, oranların uzun dönem boyunca yüksek düzeylerde seyrettiği ve iş sağlığı ve güvenliği açısından yapısal bir sorun alanı oluşturduğu görülmektedir. 2003–2006 döneminde kaza oranının 170–180 civarında dalgalandığı, 2006 yılında yaklaşık 150 seviyesine gerileyerek kısa süreli bir iyileşme gösterdiği; ancak 2007'den

itibaren yeniden artış eğilimine girerek 2009 yılında 300'ün üzerine çıkmak suretiyle dönemsel zirvesine ulaştığı anlaşılmaktadır. Bu artışın, işçi sayısındaki azalmaya bağlı iş yükü yoğunluğunun artması, üretim baskıları ve ekipman ile altyapı unsurlarının yaşlanması gibi kurumsal ve operasyonel faktörlerle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. 2012 yılı, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun yürürlüğe girmesi ve kurum içi iş güvenliği yapılanmalarındaki değişiklikler nedeniyle kritik bir eşik niteliği taşımakta olup bu dönemin ardından kaza oranlarında bir süre 215–240 civarına gerileyen görece iyileşmiş bir görünüm ortaya çıkmıştır. Ancak, 2016 sonrası süreçte oranlarda yeniden belirgin bir yükseliş gözlenmiş, 2017 itibarıyla değerler yeniden 300 seviyelerine ulaşmış; 2019 ve 2021 yıllarında ise 350'nin üzerine çıkarak oldukça yüksek risk düzeylerini işaret etmiştir. 2023 yılında hafif bir azalma olmakla birlikte genel eğilimde anlamlı ve sürdürülebilir bir düşüşün gerçekleşmediği açıkça görülmektedir. Bu bulgular, TTK'da iş kazalarının geçici önlemlerle yönetilemediğini, iş sağlığı ve güvenliği performansının kalıcı biçimde iyileştirilebilmesi için mekanizasyon, teknoloji kullanımı, eğitim faaliyetleri, risk değerlendirme süreçleri ve personel planlamasında daha kapsamlı, uzun vadeli ve bütüncül stratejilerin uygulanmasının zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

2003–2023 dönemi değerlendirildiğinde, 2012 yılında yürürlüğe giren İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun iş güvenliği süreçlerinin kurumsallaşmasını sağladığı, özellikle ağır kazaların azalmasına önemli katkı yaptığı görülmektedir. Ancak, toplam kaza sayılarında tam ve sürekli bir düşüş sağlanamamıştır. Üretim ve işçi sayısındaki uzun dönemli azalma eğilimi ise kurumun yapısal küçülme sürecinin iş güvenliği uygulamalarından bağımsız olarak devam ettiğini göstermektedir. İlgili veriler birlikte değerlendirildiğinde, 2012 sonrası dönemde güvenlik yaklaşımının iyileştiği, ancak yapısal ve organizasyonel değişimlerin işgücü ve üretim üzerinde daha güçlü etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

4.2. 2003–2023 Yılları İş Kazaları ile İşçi Alımları Analizi

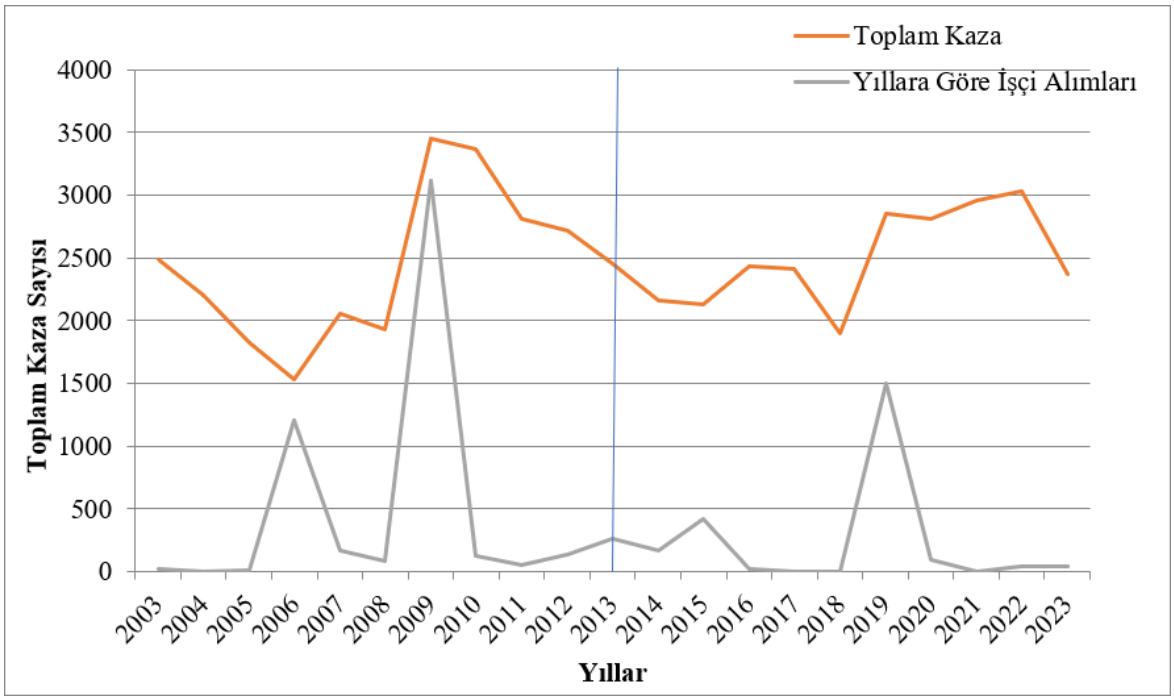
Türkiye Taşkömürü Kurumu'na (TTK) ait 2003–2023 dönemi toplam iş kazası sayıları ile yıllara göre işçi alım verileri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2 incelendiğinde, 2013 yılı itibarıyla iş sağlığı ve güvenliği performansı ile insan kaynağı politikaları arasındaki ilişkinin belirgin biçimde değiştiği görülmektedir. Bu durum, Şekil 4'te görüldüğü üzere 2013 öncesi ve sonrası dönemler dikkate alındığında daha net biçimde ortaya çıkmaktadır. Dönem I'de TTK'da toplam iş kazası sayıları genel olarak yüksek ve dalgalı bir seyir izlemiştir. Bu dönemde yıllık kaza sayıları 1500–3500 aralığında gerçekleşmiş; özellikle 2009 ve 2010 yıllarında 3000'in üzerine çıkarak dönem zirvelerine ulaşmıştır. Aynı dönemde işçi alımları ise oldukça düzensiz ve dalgalı bir yapı göstermektedir. Bazı yıllarda sınırlı sayıda alım yapılırken (2003–2005), 2006 ve özellikle 2009 yıllarında çok yüksek sayıda işçi alımı gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde dikkat çeken husus, yüksek işçi alımlarının yapıldığı yıllarda toplam kaza sayılarında da artış yaşanmasıdır. Özellikle 2009 yılında 3116 yeni işçi alımına karşılık toplam kaza sayısının 3456'ya yükselmesi, deneyimsiz

işgücünün üretim süreçlerine hızlı biçimde dâhil edilmesinin iş kazası risklerini artırdığını göstermektedir.

Çizelge 2. 2003–2023 dönemi TTK'de toplam kaza ve işçi alımları

Yıl	Toplam Kaza	Yıllara Göre İşçi Alımları
2003	2.488	17
2004	2.202	2
2005	1.823	13
2006	1.532	1.207
2007	2.057	166
2008	1.925	82
2009	3.456	3.116
2010	3.371	124
2011	2.808	48
2012	2.714	132
2013	2.459	256
2014	2.161	166
2015	2.126	416
2016	2.433	15
2017	2.412	0
2018	1.899	0
2019	2.855	1.500
2020	2.811	93
2021	2.958	0
2022	3.035	38
2023	2.366	41



Şekil 4. İşçi alımlarının iş kazalarına etkileri

Dönem II'de işçi alımları ve kaza sayıları arasındaki ilişki farklı bir karakter kazanmıştır. Bu dönemde işçi alımları genel olarak azalmış, bazı yıllarda ise hiç yeni işçi alımı yapılmamıştır (2017, 2018 ve 2021). Buna karşın toplam iş kazası sayılarında beklenen ölçüde bir azalma gerçekleşmemiş; yıllık kaza sayıları çoğu yıl 2000–3000 bandında seyretmiştir. Özellikle 2019–2022 döneminde, sınırlı ya da hiç işçi alımı yapılmamasına rağmen kaza sayılarının yeniden yükselmesi dikkat çekicidir.

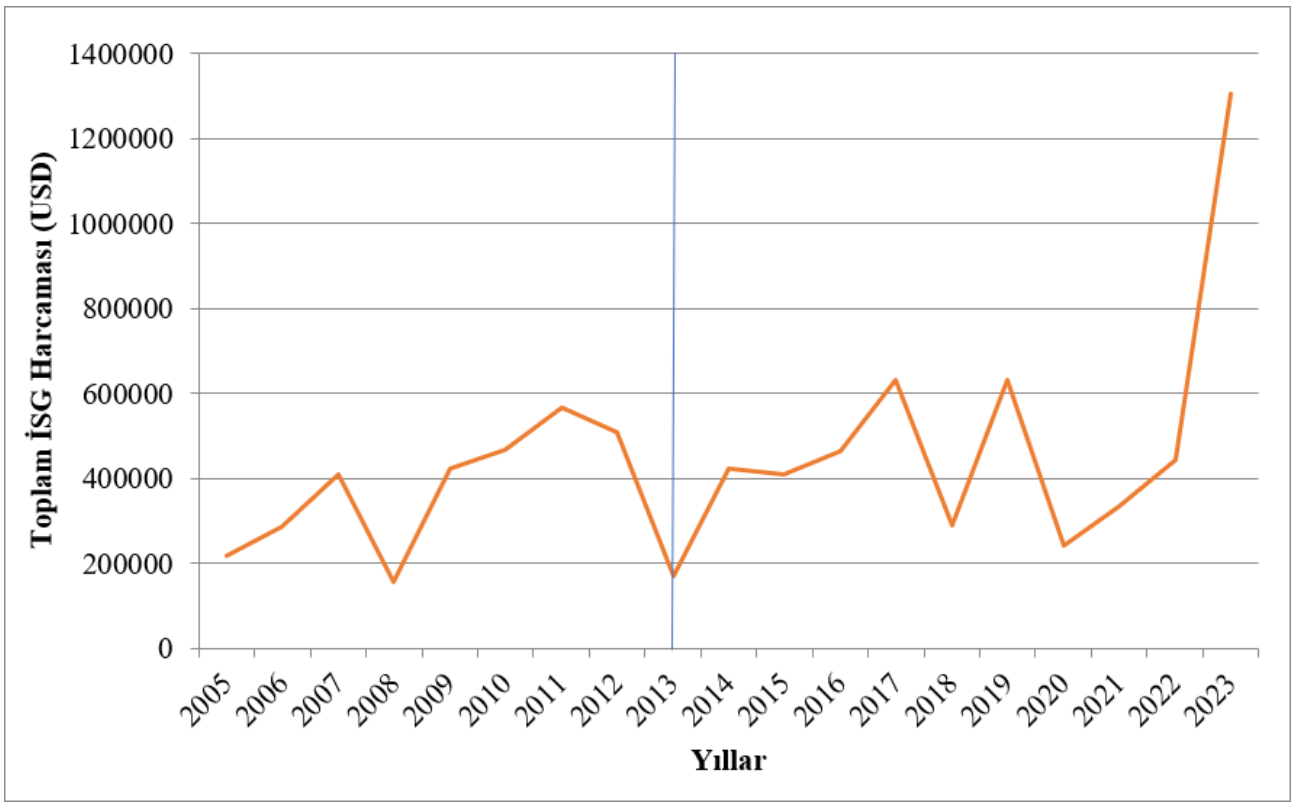
Bu durum, 2013 sonrası dönemde iş kazalarının yalnızca yeni ve deneyimsiz işgücünden kaynaklanmadığını; aksine üretim altyapısındaki yıpranma, işgücünün yaşlanması, artan iş yükü ve vardiya yoğunluğu gibi yapısal faktörlerin daha belirleyici hale geldiğini göstermektedir. Özellikle 2019 yılında 1500 kişilik yüksek bir işçi alımına rağmen kaza sayılarının 2855'e yükselmesi, yeni alımların kaza risklerini tek başına azaltmadığını ve iş güvenliği yönetiminin daha bütüncül ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.3. 2005–2023 Yılları Maliyet ve İş Sağlığı ve Güvenliği Harcamaları Analizi

Türkiye Taşkömürü Kurumu'nda Dönem I ve II için 2005-2023 yıllarına ait İSG harcamaları Çizelge 3'te verilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında, 2003 ve 2004 verilerine sağlıklı bir şekilde ulaşılamadığından analiz dışı bırakılmıştır. Yıllara göre toplam ve kişi başı İSG harcama eğilimleri ise Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2005–2023 dönemi iş sağlığı ve güvenliği harcamaları

Yıl	İSG Harcama (USD/yıl)	İşçi Sayısı	Kişi Başı İSG Harcama (USD)	Toplam Maliyet (Milyon USD)	Üretim (Bin Ton)	Ortalama Üretim Maliyeti (USD/ton)	İSG Harcamalarının Maliyete Etkisi (%)
2005	219.125,2	11.249	19,48	384,8	1.665	231,1	8,43
2006	286.632	10.611	27,01	358,2	1.522	235,3	11,48
2007	409.591,2	10.442	39,23	467,8	1.675	279,2	14,05
2008	155.960,5	9.441	16,52	465,2	1.586	293,1	5,64
2009	423.768	10.979	38,6	419,9	1.879	223,3	17,29
2010	467.257,5	11.456	40,79	482,5	1.708	282,3	14,45
2011	566.246	10.904	51,93	451,9	1.583	283,6	18,31
2012	508.006,9	10.138	50,11	447,6	1.657	307,2	16,31
2013	169.416,1	9.619	17,61	428,2	1.357	312,5	5,64
2014	422.480,3	9.172	46,06	391,4	1.300	301	15,30
2015	407.703,6	8.956	45,52	350,3	931	369,1	12,33
2016	465.008,4	7.932	58,62	351,1	911	386,6	15,16
2017	631.348,7	7.575	83,35	303,0	822	368,1	22,64
2018	288.052,5	7.133	40,38	240,5	686	350,5	11,52
2019	630.364,3	7.958	79,21	246,0	734	335,1	23,64
2020	240.515,7	7.740	31,07	226,9	712	318,2	9,76
2021	334.345	7.509	44,53	215,4	870	247,5	17,99
2022	443.796,1	7.337	60,49	227,6	1.074	211,7	28,57
2023	1.304.172	7.056	184,83	309,4	782	395,6	46,72

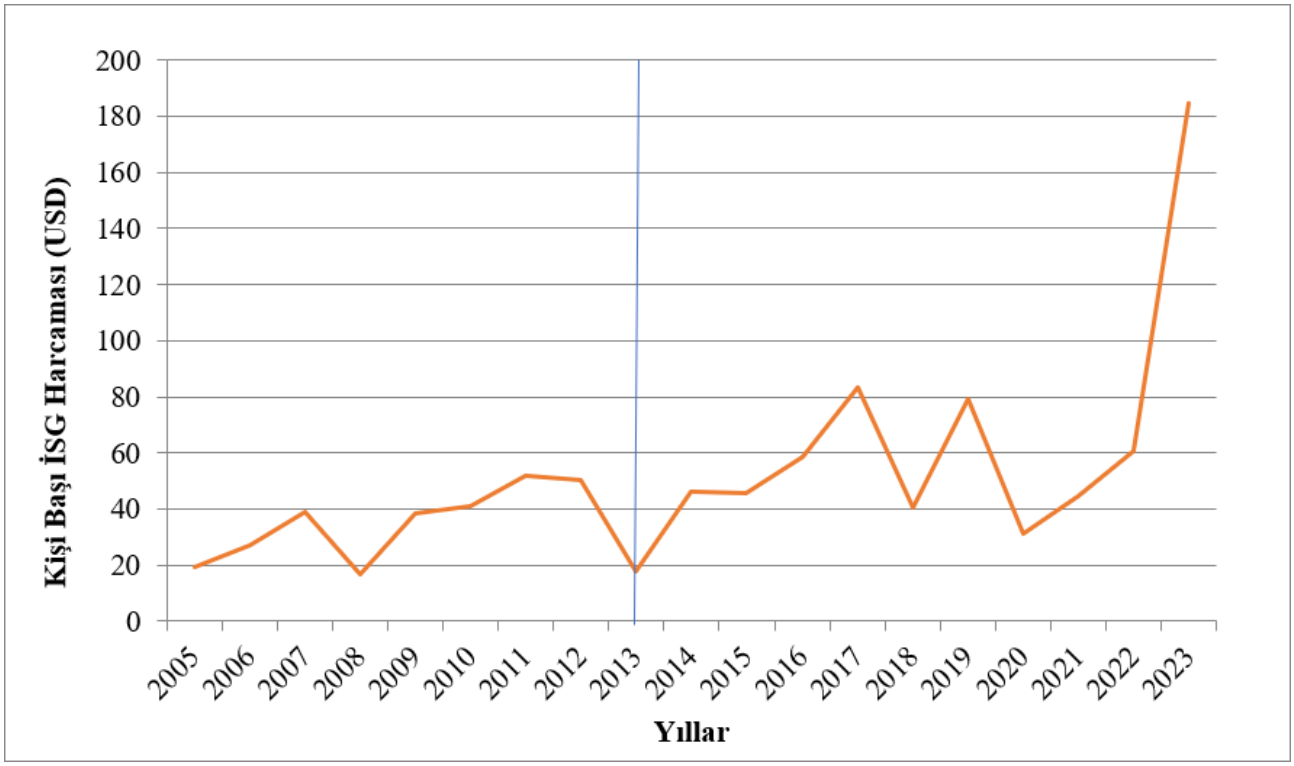


Şekil 5. 2005-2023 yılları için toplam İSG harcamaları

Çizelge 3, Şekil 5 ve 6'da temel olarak İSG harcamaları yıllık bazda karşılaştırma kolaylığı oluşturması USD cinsinden verilmiştir. Çalışma kapsamında ulaşılan yıllık harcama miktarları, yıllık ortalama kura göre değerlendirilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, Dönem I'de İSG harcamalarının dolar bazında sınırlı; fakat istikrarlı bir artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. 2005 yılında yaklaşık 219 bin USD düzeyinde olan toplam İSG harcaması, 2011–2012 döneminde yaklaşık 500–560 bin USD bandına ulaşmıştır. Aynı dönemde kişi başına düşen İSG harcaması 20 USD seviyesinden yaklaşık 50 USD seviyesine yükselmiştir.2013 öncesi dönemde İSG harcamaları, daha çok temel koruyucu donanım ve klasik güvenlik uygulamalarına dayalı bir gider kalemi niteliğindedir. Bu dönemde İSG'nin üretim maliyetleri üzerindeki etkisi sınırlı olup, maliyet yapısında belirleyici bir unsur oluşturmadığı söylenebilir. Dönem II'de toplam İSG harcamalarında belirgin bir artış eğilimi ortaya çıkmıştır. 2014 yılında yaklaşık 422 bin USD olan harcama tutarı, 2017 ve 2019 yıllarında 630 bin USD seviyelerine ulaşmış, 2023 yılında ise yaklaşık 1,3 milyon USD düzeyine yükselmiştir. 2023 yılındaki artış, kurda gerçekleşen keskin yükselişle ilgilidir. Bu artış özellikle son yıllarda daha belirgin hale gelmiştir.

Şekil 6'da yer alan kişi başı USD harcama eğilimi incelendiğinde, artışın daha çarpıcı olduğu görülmektedir. 2012 yılında yaklaşık 50 USD olan kişi başı İSG harcaması, 2023 yılında yaklaşık 185 USD seviyesine ulaşmıştır. Bu artışın aynı dönemde işçi sayısının azalmasına rağmen gerçekleşmesi dikkat çekicidir. 2005 yılında 11249 olan çalışan sayısı, 2023 yılında 7056'ya gerilemiştir. İşçi sayısındaki azalma toplam İSG giderlerini aynı oranda düşürmemiş; aksine kişi başına düşen maliyet artmıştır. Bu

durum, İSG harcamalarının sabit veya yarı sabit maliyet karakteri taşıdığını göstermektedir. İş güvenliği uzmanı istihdamı, teknik ölçüm hizmetleri, eğitim programları ve sistem yatırımları gibi gider kalemleri üretim hacmi veya çalışan sayısındaki azalmaya paralel olarak düşmemektedir. Dolayısıyla birim üretim maliyetleri üzerinde yukarı yönlü baskı oluşmaktadır.



Şekil 6. 2005-2023 yılları için kişi başı İSG harcamaları

Bu gelişmeler sonucunda, İSG giderleri üretim maliyetleri içinde daha görünür ve hesaplanabilir bir kalem haline gelmiştir. Dönem I'de ikincil bir gider kalemi niteliğinde olan İSG harcamaları, Dönem II'de stratejik ve yapısal bir maliyet unsuru haline dönüşmüştür. Kısa vadede bu artış, üretim başına maliyetlerin yükselmesine neden olmaktadır. Ancak uzun vadeli perspektifte değerlendirildiğinde; iş kazalarının azalması, üretim kayıplarının önlenmesi, tazminat ve hukuki yaptırımların azaltılması gibi dolaylı ekonomik kazanımlar söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle İSG harcamalarının yalnızca maliyet artırıcı bir unsur olarak değerlendirilmesi eksik bir yaklaşım olacaktır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye Taşkömürü Kurumu'nda (TTK) 2003–2023 yılları arasında meydana gelen iş kazaları, üretim miktarları, işgücü ve İSG maliyet verileri kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Bu veriler ışığında, 6331 sayılı kanunun yeraltı taşkömürü madenciliği üzerindeki etkileri kanun öncesi ve sonrası dönemler açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, 6331 sayılı kanunun yürürlüğe girmesiyle birlikte TTK'da iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının daha sistematik ve kurumsal bir çerçeveye kavuştuğunu göstermesine karşın, toplam kaza sayıları ve bin işçi başına düşen kaza oranları birlikte değerlendirildiğinde, kanun sonrası dönemde iş kazalarında kalıcı ve sürdürülebilir bir düşüş eğiliminin sağlanamadığı görülmektedir. Özellikle 2012–2016 yılları arasında kaza oranlarında görece bir iyileşme gözlenmişken, 2016 sonrasında oranların yeniden artış eğilimine girmesi dikkat çekicidir. Bu bulgu, yasal düzenlemelerin kısa vadede olumlu etkiler yaratabildiğini; ancak uzun vadede yapısal ve organizasyonel sorunlar çözülmediği sürece iş sağlığı ve güvenliği performansında kalıcı bir iyileşme sağlanamadığını göstermektedir.

İşçi sayılarındaki uzun dönemli azalma, iş kazaları üzerinde belirleyici olan en önemli faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. 2003–2023 döneminde TTK bünyesindeki işçi sayısının önemli ölçüde azalmasına karşın, üretimin tamamen durdurulması mümkün olmadığından kalan işgücünün üzerindeki iş yükü artmıştır. Şöyle ki 2003-2023 yılları arasında kanun öncesi ve sonrası dönemlerde ortalama üretim, işçi sayısı ve işçi başına düşen yıllık üretime bakıldığında üretimin yaklaşık %47, işçi sayısının %29 ve işçi başına düşen yıllık üretimin de %27 azaldığı görülmektedir. Bu veriler değerlendirildiğinde, üretimin işçi sayısından çok daha fazla gerilemesi, işçilerin daha az ve verimsiz çalıştığından değil; artan ocak derinlikleriyle birlikte azalan personelin üzerindeki ocakta yapılması gereken sabit sorumlulukların, birim üretim için gerçekleştirilen diğer iş kalemlerinin yükünün arttığını ortaya koyar.İş yükünün ve sorumluluk alanının genişlemesi, yorgunluk, dikkat dağınıklığı ve risk alma davranışlarını artırarak iş kazası olasılığını yükseltmiştir. Bu durum, bin işçi başına düşen kaza oranlarının bazı yıllarda neden artış gösterdiğini açıklayan temel yapısal nedenlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Bu bağlamda, işçi alım politikalarının iş kazaları üzerindeki etkisi de dikkate alınmalıdır. TTK'da uzun yıllar boyunca sınırlı düzeyde gerçekleştirilen işçi alımları, mevcut işgücünün üzerindeki yükün artmasına neden olmuş ve bu durum dolaylı olarak iş kazası riskini yükseltmiştir. Öte yandan, belirli dönemlerde gerçekleştirilen toplu işçi alımlarının kısa vadede kaza oranlarında geçici artışlara yol açabildiği, bunun temel nedeninin yeni işe başlayan işçilerin yeraltı madenciliğine özgü çalışma koşullarına uyum süreci ve deneyim eksikliği olduğu değerlendirilmektedir. Ancak, orta ve uzun vadede, yeterli eğitim, gözetim ve deneyimli işçilerle birlikte çalışma olanakları sağlandığında, işçi alımlarının iş yükünü dengeleyerek iş kazalarının azaltılmasında önemli bir potansiyel taşıdığı söylenebilir. Ayrıca, işe alım politikasında belli bir standart oluşturulması önemlidir.

Üretim verileri incelendiğinde, 6331 sayılı Kanun sonrasında üretim miktarlarında daha belirgin bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Bu düşüş çoğu zaman iş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin üretimi yavaşlattığı şeklinde yorumlanmakla birlikte, elde edilen bulgular üretimdeki gerilemenin tek başına mevzuat kaynaklı olmadığını ortaya koymaktadır. Üretim düşüşü; sınırlı yeni işçi istihdamı, mekanizasyon yetersizliği, eskiyen altyapı, yatırım eksikliği ve kurumun uzun süredir devam eden yapısal

küçülme süreciyle daha yakından ilişkilidir. Dolayısıyla, üretim kayıplarının yalnızca iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarına bağlanması, bu uygulamalara yönelik yanlış bir algının oluşmasına neden olabilmektedir.

6331 sayılı kanunun yürürlüğe girdiği 2013 yılı, TTK'da İSG harcamaları açısından yapısal bir kırılma noktasıdır. Dönem I, daha sınırlı ve geleneksel güvenlik uygulamalarının hâkim olduğu, İSG giderlerinin maliyet yapısı içinde görece düşük paya sahip olduğu bir süreci ifade etmektedir. Buna karşılık Dönem II, İSG'nin kurumsallaştığı, yasal zorunluluk temelli ve maliyet açısından daha belirleyici hale geldiği bir dönemi temsil etmektedir. 2013 sonrası artan İSG harcamaları kısa vadede maliyetleri artırıcı etki yaratmış olmakla birlikte, uzun vadede sürdürülebilir üretim, risk yönetimi ve kurumsal güvenlik kültürünün güçlendirilmesi açısından stratejik yatırım niteliği taşımaktadır. Bu bağlamda İSG harcamaları, salt bir gider kalemi değil; kurumsal dayanıklılığı ve üretim güvenliğini artıran yapısal bir yatırım unsuru olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, yeraltı taşkömürü madenciliği gibi yüksek riskli bir sektörde iş sağlığı ve güvenliği yalnızca yasal yükümlülükler çerçevesinde ele alınmamalı; üretim politikaları, insan kaynağı yönetimi, işçi alım stratejileri ve teknik altyapı yatırımlarıyla bütünleşik bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir. TTK özelinde sürdürülebilir bir iyileşme için aşağıdaki politika başlıkları kritik önem taşımaktadır:

- Vardiya ekip büyüklüklerinin standardizasyonu ve iş yükü dengesi
- Mekanize sistemlerde planlı bakım döngülerinin üretim programıyla uyumlaştırılması
- Yeni çalışanlar için mentorluk sisteminin zorunlu hale getirilmesi
- Kaza kayıtlarının dijital analizinin düzenli yapılması ve kök neden analizlerinin kurum geneline yayılması
- Denetim odaklı değil, davranış odaklı proaktif güvenlik kültürünün geliştirilmesi

Bu çalışma, 6331 sayılı kanunun TTK'daki iş kazaları üzerindeki etkilerini uzun dönemli veriler ışığında ortaya koyarak, iş sağlığı ve güvenliği alanında sürdürülebilir iyileşme sağlanabilmesi için mevzuatın ötesine geçen yapısal ve kurumsal düzenlemelere duyulan gereksinimi açık biçimde ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Aktaş, Ö. 2019. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'na Göre İdari Para Cezalarının Caydırıcılığı Sorunu, Yüksek Lisans Tezi, AnkaraHacı Bayram Veli Üniversitesi, Ankara, 204s.

Bahadır, O. 2026. Yeraltı Taşkömürü Madenciliğinde 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 78 s.

Çalışkan, S. 2016. Yöneticilerin 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile Getirilen Uygulamalara Yönelik Algı ve Beklentilerinin Analizi: Marmara Bölgesi Örneği, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 368s.

Doğu, D.C. 2019. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu Kapsamında İşçinin Çalışmaktan Kaçınma Hakkı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Medipol Üniversitesi, İstanbul, 120s.
Korkmaz, O. 2011. İş Kazaları ile Verimlilik Arasındaki İlişki: Türkiye Taşkömürü Kurumu Örneği, Journal of Yasar University, 23, 6, s. 3805-3813.
Korkusuz, T.N. 2017. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve İş Güvenliği Kanunu'na Göre İşverenin Genel Yükümlülükleri, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi,İstanbul, 146s.
Özer, T. 2018. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunun İş Kazalarına Etkisi: 2012 Yılı 2016 Yılı İstatiksel Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi,İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul, 73s.
Şahin, S. 2017. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununa Göre İşyeri Hekimliği ve İş Güvenliği Uzmanlığı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 246s.
TTK 2025. TTK Genel Müdürlüğü Faaliyet Raporu, 108 s. (https://www.taskomuru.gov.tr/ttk/2025-faaliyet-raporu/)

YERALTI KÖMÜR İŞLETMELERİNDE ARAMA KURTARMA FAALİYETLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

EVALUATION OF SEARCH AND RESCUE OPERATIONS IN UNDERGROUND COAL MINES AND RECOMMENDATIONS FOR IMPROVEMENT

Rahmi Kocaman*, Birsen Kocaman

MAPEG, Destek Hizmetleri Dairesi*, Doğaltaş Dairesi, Ankara

Serdar Yılmaz, Alaaddin Çakır

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZET Yeraltı kömür madenciliği, enerji üretimi, sanayi faaliyetleri ve ekonomik kalkınma açısından stratejik öneme sahip olmakla birlikte, yüksek risk düzeyi nedeniyle kapsamlı iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarını gerektiren bir sektördür. Kömürün yeraltından üretilmesi sırasında metan (grizu) patlamaları, kömür ve taş tozu patlamaları, ocak yangınları, göçükler ve su baskınları gibi tehlikeler ciddi can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir. Bu çalışmada, yeraltı kömür madenciliğinde meydana gelebilecek acil durumlara yönelik riskler değerlendirilmiş; bu risklerin önlenmesi, etkilerinin azaltılması ve acil durumlara hazırlıklı olunması amacıyla uygulanması gereken tedbirler incelenmiştir. Acil durum planları, eğitim faaliyetleri, tatbikatlar ve maden kurtarma yarışmalarının arama-kurtarma kapasitesinin geliştirilmesine sağladığı katkılar ele alınmıştır. Ayrıca Soma, Ermenek ve Amasra kömür madeni kazalarında yürütülen arama-kurtarma faaliyetleri değerlendirilerek elde edilen deneyim ve çıkarımlar aktarılmıştır. Çalışmada, tahlisiye ekiplerinin önemi, ekiplerde görev alacak personelin sahip olması gereken nitelikler ve mevcut uygulamalardaki eksiklikler incelenmiş; yeraltı kömür madenciliğinde arama-kurtarma faaliyetlerinin geliştirilmesine yönelik öneriler sunulmuştur.

ABSTRACT Underground coal mining has strategic importance for energy production, industrial activities, and economic development. However, due to its high level of risk, it requires comprehensive occupational health and safety practices. During underground coal extraction, hazards such as methane (firedamp) explosions, coal and rock dust explosions, mine fires, roof falls, and water inrushes may cause serious loss of life and property. In this study, the risks related to possible emergencies in underground coal mines were evaluated, and the measures required to prevent these risks, reduce their impacts, and ensure emergency preparedness were examined. The contributions of emergency plans, training activities, drills, and mine rescue competitions to improving search and rescue capacity were discussed. In addition, the search and rescue operations carried out after the Soma, Ermenek, and Amasra coal mine accidents were evaluated, and the experience and lessons learned from these events were presented. The study also examined the importance of mine rescue teams, the qualifications required for team members, and the shortcomings of current practices. Finally, recommendations were provided to improve search and rescue operations in underground coal mines.

1. GİRİŞ

Yeraltı kömür işletmeciliği; sahip olduğu dinamik ve sürekli değişen üretim yapısı, yeraltındaki derinliğe bağlı olarak artan jeoteknik ve atmosferik parametreleri ve dar çalışma alanları nedeniyle endüstriyel sektörler arasında iş kazası ve kitlesel kayıp riski en yüksek iş kolu olarak kabul edilmektedir. Sektörün doğasında barındırdığı bu yapısal tehlikeler; yeraltı kömür ocaklarına özgü grizu (metan) ve kömür tozu patlamaları, kömürlerin kendiliğinden yanmasından kaynaklanan ocak yangınları, göçükler, ani gaz degajları ve su baskınları gibi büyük maden facialara zemin hazırlamaktadır. Literatürde ve saha uygulamalarında gerçekleştirilen kök neden analizleri; söz konusu kömür madeni kazalarının büyük ölçüde havalandırma sistemlerindeki yetersizlikler, hatalı tahkimat tasarımı ve seçimi, üretim planlaması esnasında yapılan mühendislik hataları, mekanik-elektriksel arızalar ve insan faktörünün (operasyonel hatalar) birleşik bir sonucu olarak ortaya çıktığını göstermektedir. Bu doğrultuda, yeraltı kömür madenciliği faaliyetlerinde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) yaklaşımının, planlama, arama ve fizibilite aşamasından başlayarak üretim, nakliyat ve zenginleştirme süreçlerinin tamamını kapsayacak şekilde proaktif bir düşünce tarzına dayandırılması ve bütüncül risk azaltma çalışmalarının yürütülmesi bir zorunluluktur.

Maden acil durum yönetimi döngüsünün en kritik ve operasyonel safhasını, yeraltı kömür ocaklarında yürütülen arama ve kurtarma (tahlisiye) faaliyetleri oluşturmaktadır. Yeraltında mahsur kalan personelin tespiti, güvenli tahliyesi ve acil tıbbi müdahale süreçlerini içeren bu faaliyetler; kısıtlı görüş, ikincil göçük/patlama riskleri, karbon monoksit ve metan gibi toksik ve patlayıcı gaz birikimleri ile yoğun zaman baskısı altında yürütülen, yüksek teknik uzmanlık gerektiren süreçlerdir. Tahlisiye faaliyetleri yönetiminde temel kural, riski azaltma esas olan "önce güvenlik, sonra kurtarma" ilkesidir. Dolayısıyla kurtarma faaliyetlerinin etkinliği; sadece teknolojik altyapıya değil, erken uyarı ve gaz izleme sistemlerinin entegrasyonuna, standart koruyucu donanım ve ferdi oksijen maskesi uyumuna, disiplinli bir komuta-kontrol (kriz yönetimi) yapısına bağlıdır. Bu bağlamda, küçük ölçekli ocaklar dâhil olmak üzere tüm yeraltı kömür işletmelerinin sahaya özgü acil eylem planları hazırlaması, en az altı ayda bir senaryolu tatbikatlar gerçekleştirmesi ve mevzuatın öngördüğü coğrafi sınırlar dâhilinde (maksimum 50 km) tahlisiye hizmet altyapısını güvence altına alması gerekmektedir.

Teknik ve lojistik gereksinimlerin yanı sıra, yeraltı kömür işletmelerindeki arama-kurtarma faaliyetlerinin göz ardı edilmemesi gereken bir diğer boyutu da psikososyal süreçlerdir. Uzun süreli kapalı alan maruziyeti ve grizu patlaması gibi zorlu olaylara doğrudan tanıklık gerek kazazedeler gerekse tahlisiye personeli üzerinde yüksek düzeyde stres, anksiyete ve tükenmişlik sendromuna yol açarak operasyonel sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Türkiye'nin kömür madenciliği tarihinde derin izler bırakan Soma (301 can kaybı), Ermenek (18 can kaybı) ve Amasra (42 can kaybı) maden facialarını; kriz yönetiminde kamu ve özel sektör tahlisiye ekiplerinin koordinasyon yeteneğinin, kurumlar arası iş birliğinin ve operasyonel hazırlıklarının düzeyinin önemini elem bir şekilde gözler önüne sermiştir.

Bu çalışma; yeraltı kömür işletmelerinde meydana gelen kazaların sınıflandırılması ve kök nedenlerini inceleyerek, acil durum hazırlıklarının evresi ile arama-kurtarma operasyonlarının etkinliğini artıracak stratejik yaklaşımları ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu çerçevede, geçmiş kömür madeni kazalarından elde edilen çıkarımlar doğrultusunda, teknik, yasal ve psikososyal bileşenleri içeren iyileştirme önerilerinde bulunulmaktadır.

2. YERALTI KÖMÜR İŞLETMELERİNDE KAZA SEBEPLERİ

2.1. Maden Ocaklarında Kaza Sebepleri

Yeraltı kömür madenciliği, yüksek risk düzeyi nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği açısından en tehlikeli çalışma alanlarından biridir. Maden işletmelerinde meydana gelen kazaların başlıca nedenleri; ocak yangınları, grizu ve kömür tozu patlamaları, göçükler, taş-kavlak düşmeleri, yeraltı suyu baskınları ile planlama ve insan kaynaklı hatalardır. Bu olaylar yalnızca can kayıplarına neden olmamakta; aynı zamanda üretimin durmasına, rezerv kayıplarına, çevresel etkilerin oluşmasına ve işletmelerin ekonomik açıdan büyük zararlar görmesine yol açmaktadır. Bu nedenle modern madencilik anlayışında risklerin önceden belirlenmesi, mühendislik kontrollerinin etkin uygulanması ve acil durum yönetiminin bütünleşik şekilde yürütülmesi temel güvenlik yaklaşımı olarak kabul edilmektedir.

Şekil 1. Soma maden kazası sonrası galeri girişinden karbonmonoksit çıkışı (kişisel arşiv)

2.1.1. Ocak Yangınları ve Kömürün Kendiliğinden Yanması

Yeraltı kömür madenciliğinde karşılaşılan en önemli tehlikelerden biri ocak yangınlarıdır. Yangınlar; elektrik arızaları, mekanik sürtünmeler, patlatma faaliyetleri ve dış ateşleme kaynakları gibi nedenlerle oluşabileceği gibi, kömürün düşük sıcaklıklarda oksijen ile reaksiyona girmesi sonucu meydana gelen kendiliğinden yanma mekanizması ile de gelişebilmektedir. Özellikle kömürün oksijen adsorpsiyonu sonucu başlayan ekzotermik oksidasyon reaksiyonları sırasında açığa çıkan ısının ortamdan yeterince uzaklaştırılamaması, sıcaklığın giderek artmasına ve sonunda açık

alevli yanmaya dönüşmesine neden olmaktadır. Bu süreç, yeraltı kömür madenciliğinde en önemli yangın mekanizmalarından biri olarak kabul edilmektedir.

Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler genel olarak iç ve dış faktörler olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir. İç faktörler; kömürün rankı, petrografik yapısı, nem ve pirit içeriği, yüzey alanı ile kimyasal bileşiminden oluşurken; dış faktörler ise jeolojik yapı, damar özellikleri, üretim yöntemi, havalandırma sistemi, eski çalışma alanları ve işletme uygulamalarıdır. Bu faktörlerin birlikte değerlendirilmesi, yangın risk analizlerinin temelini oluşturmaktadır. Yangınların erken tespit edilememesi durumunda karbonmonoksit başta olmak üzere toksik gazların oluşması, grizu patlamalarının tetiklenmesi ve zincirleme kazaların meydana gelmesi söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle gaz izleme sistemleri, termal izleme yöntemleri, uygun havalandırma ve yangın önleme uygulamaları yeraltı işletmelerinde kritik öneme sahiptir.

Şekil 2. Soma maden kazası yeraltı ocağı kaza yeri yangın bölgesi (kişisel arşiv)

2.1.2 Grizu Patlamaları

Yeraltı kömür madenciliğinde en fazla can kaybına neden olan kazaların başında grizu patlamaları gelmektedir. Grizu, metan gazının hava ile patlayıcı konsantrasyonda karışması sonucu oluşan yanıcı gaz karışımıdır. Metan konsantrasyonunun yaklaşık %4–15 aralığında bulunması, oksijen oranının yeterli seviyede olması ve uygun bir ateşleme kaynağının bulunması halinde patlama meydana gelmektedir. Patlama sonucunda oluşan yüksek sıcaklık ve basınç dalgaları yalnızca doğrudan etki oluşturmakla kalmayıp, kömür tozlarını havaya kaldırarak ikincil patlamaların oluşmasına da neden olabilmektedir. Bu durum grizu patlamalarını yeraltı madenciliğinin en yıkıcı afetlerinden biri hâline getirmektedir.

Grizu riskinin azaltılmasında temel yaklaşım; metan birikiminin önlenmesi, ateşleme kaynaklarının ortadan kaldırılması ve olası patlamaların yayılımının sınırlandırılmasıdır. Bu kapsamda etkin mekanik havalandırma sistemleri, gaz drenaj uygulamaları, sürekli gaz izleme sistemleri, merkezi sensör ağları, alev sızdırmaz elektrik ekipmanları ve patlama barajları kullanılmaktadır. Ayrıca yürürlükte bulunan

mevzuat kapsamında metan konsantrasyonunun sürekli izlenmesi, belirlenen sınır değerlerin aşılması durumunda üretimin durdurulması ve çalışanların güvenli şekilde tahliye edilmesi zorunlu tutulmaktadır. Bu uygulamalar, grizu kaynaklı kazaların önlenmesinde temel mühendislik ve yönetimsel tedbirleri oluşturmaktadır.

2.1.3 Göçük ve Taş-Kavlak Düşmeleri

Göçükler ile taş-kavlak düşmeleri yeraltı madenciliğinde en yaygın karşılaşılan iş kazaları arasında yer almaktadır. Göçük, tahkimat sistemlerinin yetersizliği veya kaya kütlesinin dayanımını kaybetmesi sonucu tavanın çökmesi olarak tanımlanırken, taş-kavlak düşmesi ise çatlaklı kaya bloklarının ana kayaçtan ayrılarak çalışma alanına düşmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Bu tür olaylar yalnızca jeolojik özelliklerden değil; tahkimat tasarımı, kazı yöntemi, gerilme dağılımı, patlatma uygulamaları ve işletme yönetiminden de etkilenmektedir.

2.1.4 Yeraltı Suyu Problemleri

Yeraltı suyu, yeraltı madenciliğinde hem üretim sürekliliğini hem de çalışan güvenliğini etkileyen önemli tehlikelerden biridir. Yeraltı kazıları sırasında hidrojeolojik koşullara bağlı olarak önemli miktarda su girişleri meydana gelebilmekte, bu durum ani su baskınlarına, tahkimat sistemlerinin zayıflamasına, drenaj sistemlerinin yetersiz kalmasına ve üretimin durmasına neden olabilmektedir. Ayrıca yüksek nem, sıcaklık değişimleri ve çözünmüş mineraller çalışma ortamının olumsuzlaşmasına, ekipman performansının düşmesine ve işletme maliyetlerinin artmasına yol açmaktadır. Yeraltı suyu risklerinin yönetilebilmesi için işletme öncesinde ayrıntılı hidrojeolojik etütlerin yapılması, su giriş potansiyellerinin belirlenmesi, uygun drenaj sistemlerinin projelendirilmesi ve yeterli pompa kapasitesinin oluşturulması gerekmektedir. Eski çalışma alanlarından gelebilecek ani su girişlerine karşı kontrol sondajları, koruyucu bariyerler ve su barajları uygulanmalıdır. Geçmişte yaşanan Yozgat Sorgun (Madsan) ve Karaman Ermenek (Cenne) maden kazaları, hidrojeolojik planlamanın ve etkin su yönetiminin yeraltı madenciliğinde hayati öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

2.1.5 Diğer Sebepler

2.1.5.1 Planlama Hataları

Yeraltı maden işletmelerinde güvenli üretim için havza bazlı ve bütüncül planlama yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir. Geçmiş üretim faaliyetlerine ait imalat haritalarının merkezi bir sistemde kayıt altına alınması ve işletmelere erişime açılması, eski çalışma alanlarından kaynaklanabilecek risklerin azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Üretim öncesinde bölgenin jeolojik yapısı, önceki imalatlar ve diğer teknik veriler birlikte değerlendirilerek planlama yapılmalıdır. Üretime başlanılmadan önce fay haritalarının ve gerilmelerin (stres) haritalarının da yapılmaması planlama hatalarına sebep olmaktadır.

2.1.5.2 Doğal Afetler

Doğal ve biyolojik afetler, yeraltı madenciliğinde üretim sürekliliği ve çalışan güvenliği üzerinde önemli riskler oluşturmaktadır. Özellikle sel olaylarında yetersiz planlanan kuyu ve galeri girişleri nedeniyle maden ocaklarının su altında kalması ciddi tehlikelere yol açabilmektedir. Ayrıca salgın hastalıklar iş gücü kaybı ve operasyonel aksamalara neden olarak acil durum yönetimini zorlaştırmaktadır.

2.1.5.3 İnsan Hataları

İnsan hataları, madencilikte iş kazalarının başlıca nedenlerinden biridir ve tehlikeli davranışlar ile tehlikeli çalışma koşullarından kaynaklanmaktadır. Bilgi ve deneyim eksikliği, dikkatsizlik, kurallara uyulmaması ve kişisel koruyucu donanım kullanılmaması gibi davranışlar; yetersiz ekipman, düzensiz çalışma ortamı ve güvensiz altyapı gibi çevresel faktörlerle birleştiğinde kaza riskini artırmaktadır. Bu nedenle, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu kapsamında verilen İSG eğitimleri ve mesleki yeterlilik uygulamaları insan hatalarının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte, insan hatalarının tamamen ortadan kaldırılamayacağı dikkate alınarak, hata toleranslı sistemlerin geliştirilmesi ve güvenli davranış kültürünün yaygınlaştırılması gerekmektedir (Oral & Özer, 2018).

Sonuç olarak; ocak yangınları, grizu patlamaları, göçükler ve yeraltı suyu problemleri, planlama hataları, doğal afetler, insan hataları yeraltı madenciliğinde karşılaşılan temel tehlike gruplarını oluşturmaktadır. Bu risklerin etkin şekilde yönetilebilmesi için mühendislik tasarımının, jeoteknik ve hidrojeolojik analizlerin, sürekli izleme sistemlerinin, mevzuata uygun güvenlik uygulamalarının ve nitelikli insan kaynağının bütüncül bir güvenlik yönetim sistemi içerisinde ele alınması gerekmektedir. Bunun yanında dijital izleme teknolojileri, gerçek zamanlı sensör sistemleri, yapay zekâ destekli erken uyarı mekanizmaları ve düzenli acil durum tatbikatları, gelecekte maden güvenliğinin geliştirilmesinde önemli katkılar sağlayacaktır.

3. YERALTI KÖMÜR OCAKLARINDA MADEN KAZALARININ ÖNLENMESİ VE ARAMA-KURTARMA ORGANİZASYONU

Yeraltı kömür madenciliği; metan gazı, kömür tozu, kendiliğinden yanma, göçük ve su baskını gibi birçok tehlikeyi aynı anda barındıran yüksek riskli madencilik faaliyetidir. Bu nedenle güvenli üretim yalnızca teknik tedbirlerle değil, risk azaltma çalışmaları, eğitim, acil durum planlaması, etkin arama-kurtarma organizasyonu ve sürekli iyileştirme yaklaşımıyla sağlanabilmektedir. Özellikle Soma (2014). Ermenek (2014) ve Amasra (2022) maden kazaları, kazaların önlenmesinde yalnızca mühendislik önlemlerinin değil, organizasyonel hazırlığın ve profesyonel kurtarma kapasitesinin de kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir.

3.1 Maden Kazalarının Önlenmesine Yönelik Uygulamalar

3.1.1 Risk Azaltma Çalışmaları

Yeraltı kömür madenciliğinde güvenli üretimin temel amacı, kazalar meydana gelmeden önce riskleri kabul edilebilir seviyeye indirmektir. Bu kapsamda risk azaltma çalışmaları; jeolojik değerlendirmeler, havalandırma tasarımı, gaz drenajı, merkezi gaz izleme sistemleri, degaj sondajları, kömür tozu kontrolü ve düzenli risk değerlendirmelerini kapsamaktadır. Yeraltı kömür işletmelerinde en büyük risk grizu ve kömür tozu patlamalarıdır. Metan gazının patlayıcı konsantrasyona ulaşmasının önlenmesi için yeterli havalandırma sağlanmalı, otomatik gaz izleme sistemleri sürekli çalıştırılmalı ve tüm elektrikli ekipmanlar patlamaya dayanıklı özellikte seçilmelidir. Kömür tozu patlamalarının önlenmesinde ise taş tozu barajları uygulamaları, su bariyerleri, toz bastırma sistemleri ve düzenli temizlik çalışmaları temel mühendislik uygulamalarıdır. Bunun yanında yangın riski bulunan damarlarda kendiliğinden yanmanın erken belirlenebilmesi amacıyla sürekli sıcaklık ve gaz izleme sistemleri kullanılmalı, elde edilen veriler dijital olarak değerlendirilerek erken uyarı mekanizmaları oluşturulmalıdır.

3.1.2 Eğitim ve Güvenlik Kültürü

Madencilik sektöründe meydana gelen kazaların önemli bir bölümü insan faktörüyle ilişkilidir. Bu nedenle güvenlik kültürünün oluşturulması yalnızca mevzuat gerekliliği değil, işletme güvenliğinin temel bileşenidir. 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu kapsamında çok tehlikeli işyerlerinde çalışanlara temel iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri verilmesi zorunludur. Ancak kömür madenciliğinde teorik eğitimlerin uygulamalı eğitimlerle desteklenmesi gerekmektedir. Özellikle gaz ölçüm teknikleri, havalandırma uygulamaları, yangınla müdahale, göçük açma, ilk yardım, tahliye ve kapalı devre solunum cihazlarının kullanımı belirli periyotlarla tekrar edilmelidir. Sürekli eğitim yaklaşımı çalışanların risk algısını artırmakta, tehlikeli davranışları azaltmakta ve güvenlik kültürünün gelişmesine önemli katkı sağlamaktadır.

3.1.3 Acil Durum Planlaması

Yeraltı kömür madenlerinde hazırlanacak acil durum planları işletmenin tüm üretim sistemini kapsayacak şekilde hazırlanmalıdır. Planlarda kaçış yolları, havalandırma sistemi, eski üretim alanları, haberleşme altyapısı, ekip görevleri, kriz yönetimi, tahliye prosedürleri ve olası senaryolar ayrıntılı olarak yer almalıdır. Acil durum planları yalnızca yasal zorunluluk olarak görülmemeli, üretim yöntemindeki değişiklikler, yeni çalışma alanları ve yeni riskler doğrultusunda sürekli güncellenmelidir.

3.1.4 Tatbikatlar

Tatbikatlar acil durum planlarının uygulanabilirliğini test eden en önemli hazırlık faaliyetidir. Yeraltı kömür madenlerinde gerçekleştirilecek tatbikatların mümkün

olduğunca gerçek olay senaryolarına uygun hazırlanması gerekmektedir. Özellikle grizu patlaması, kömür tozu patlaması, yangın, göçük ve karbonmonoksit yayılımı senaryoları üzerinden gerçekleştirilen tam ölçekli tatbikatlar; kurtarma ekiplerinin koordinasyonunu, haberleşme sistemlerini, kriz yönetimini ve müdahale sürelerini değerlendirme imkânı sağlamaktadır. Tatbikat sonrasında gerçekleştirilecek değerlendirme toplantıları ile eksiklikler belirlenmeli, düzeltici faaliyetler planlanmalı ve elde edilen deneyimler acil durum planlarına yansıtılmalıdır.

3.2 Yeraltı Kömür Madenlerinde Arama ve Kurtarma Organizasyonu

3.2.1 Tahlisiye Organizasyonu

Yeraltı kömür madenlerinde meydana gelen grizu patlaması, yangın, göçük, su baskını ve zehirli gaz yayılımı gibi olaylarda yürütülen tüm müdahale faaliyetleri tahlisiye olarak tanımlanmaktadır. Modern tahlisiye organizasyonları yalnızca kurtarma operasyonlarından ibaret olmayıp risk değerlendirmesi, hazırlık faaliyetleri, ekipman yönetimi, eğitim, tatbikat ve sürekli iyileştirme çalışmalarını da kapsamaktadır.

Şekil 1. TTK Tahlisiye ekibi kapalı devre cihazı hazırlanma ve operasyondan görünüm

3.2.2 Kurtarma Ekipleri ve Teknik Donanım

Kurtarma ekipleri fiziksel yeterlilik, psikolojik dayanıklılık ve teknik bilgi bakımından özel olarak seçilmiş personelden oluşmaktadır. Operasyonlarda kapalı devre solunum cihazları, çoklu gaz ölçüm cihazları, termal kameralar, haberleşme sistemleri, ilk yardım ekipmanları ve tahkimat malzemeleri kullanılmaktadır. Kurtarma ekiplerinin bu ekipmanları etkin kullanabilmesi için düzenli eğitim almaları ve belirli aralıklarla performans değerlendirmelerine tabi tutulmaları gerekmektedir.

3.2.3 Kriz Yönetimi ve Kurumsal Koordinasyon

Büyük maden kazalarında başarılı müdahalenin temelini etkin kriz yönetimi oluşturmaktadır. Kriz merkezleri işletme yönetimi ile saha ekipleri arasında

koordinasyonu sağlayarak bilgi akışını yönetmekte, kaynakları planlamakta ve karar alma süreçlerini hızlandırmaktadır.

AFAD, MAPEG, sağlık kuruluşları, kolluk kuvvetleri ve diğer paydaş kurumlarla kurulacak koordinasyon mekanizması müdahale süresini önemli ölçüde azaltmaktadır.

3.2.4 Uluslararası İyi Uygulamalar

Gelişmiş madencilik ülkelerinde kurtarma organizasyonları sürekli hazır bekleyen profesyonel ekipler, ileri teknoloji ekipmanlar ve düzenli tam ölçekli tatbikatlar üzerine kurulmuştur. Özellikle Polonya, Almanya ve Avusturya'da uygulanan sistemlerde olay komuta sistemi, disiplinler arası koordinasyon ve ortak eğitim anlayışı ön plana çıkmaktadır. Bu uygulamaların Türkiye'deki kömür madenciliğine uyarlanması, arama-kurtarma kapasitesinin geliştirilmesine önemli katkı sağlayacaktır.

3.3 Genel Değerlendirme

Yeraltı kömür madenciliğinde güvenli üretim, risk azaltma, eğitim, acil durum planlaması ve profesyonel arama-kurtarma organizasyonlarının birlikte yürütülmesini gerektirmektedir. Özellikle grizu patlamaları, kömür tozu patlamaları, yangın ve göçük gibi yüksek riskli olaylarda can kayıplarının azaltılması; önleyici mühendislik uygulamaları, etkin kriz yönetimi ve sürekli geliştirilen tahlisiye kapasitesi ile mümkün olabilmektedir. Bu nedenle sürdürülebilir madencilik anlayışında arama-kurtarma faaliyetleri yalnızca kaza sonrası müdahale olarak değil, iş sağlığı ve güvenliği yönetim sisteminin ayrılmaz bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir.

4. MEVZUAT İNCELEMESİ

4.1. Yeraltı Kömür Madenciliğinde Arama ve Kurtarma Faaliyetlerinin Mevzuat Açısından Değerlendirilmesi

Yeraltı kömür madenciliği; grizu patlamaları, kömür tozu patlamaları, kendiliğinden yanma, göçük ve su baskını gibi yüksek riskli tehlikeleri nedeniyle diğer madencilik faaliyetlerinden farklı bir iş sağlığı ve güvenliği yaklaşımı gerektirmektedir. Bu nedenle arama ve kurtarma faaliyetlerinin yalnızca kaza sonrası müdahale olarak değil, risk yönetimi ve acil durum hazırlık süreçlerinin ayrılmaz bir parçası olarak ele alınması büyük önem taşımaktadır. Türkiye'de yeraltı kömür madenlerinde iş sağlığı ve güvenliğine ilişkin temel yasal çerçeve; 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 3213 sayılı Maden Kanunu, Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği ile İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik tarafından oluşturulmaktadır. Bu düzenlemeler, işverenlere risk değerlendirmesi yapılması, acil durum planlarının hazırlanması, çalışanların eğitilmesi, düzenli tatbikatların gerçekleştirilmesi ve yeterli sayıda arama-kurtarma ekibinin oluşturulması yükümlülüğünü getirmektedir. Mevcut mevzuat, yeraltı kömür madenlerinde acil durum yönetiminin temel esaslarını belirlemekle birlikte, arama ve kurtarma organizasyonunun teknik standartları

konusunda sınırlı hükümler içermektedir. Özellikle tahlisiye ekiplerinin personel sayısı, eğitim içerikleri, yeterlilik kriterleri, ekipman standartları, müdahale yöntemleri ve performans değerlendirme esasları ayrıntılı olarak tanımlanmamıştır. Bu durum, farklı işletmeler arasında uygulama farklılıklarına neden olabilmekte ve acil durumlara müdahale kapasitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Soma (2014), Ermenek (2014) ve Amasra (2022) maden kazalarından elde edilen deneyimler, yalnızca teknik önlemlerin yeterli olmadığını; etkin kriz yönetimi, kurumlar arası koordinasyon, düzenli tatbikatlar ve profesyonel arama-kurtarma organizasyonlarının da can kayıplarının azaltılmasında belirleyici olduğunu göstermiştir. Özellikle metan gazı ve kömür tozu patlamalarının görüldüğü yeraltı kömür işletmelerinde, kurtarma ekiplerinin kapalı devre solunum cihazları, gaz ölçüm sistemleri ve yangınla mücadele konularında ulusal standartlara uygun olarak eğitilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu kapsamda, mevcut mevzuatın uluslararası uygulamalar doğrultusunda geliştirilerek yeraltı kömür madenciliğine özgü "Maden Arama ve Kurtarma Yönetmeliği" ile desteklenmesi gerekmektedir. Böyle bir düzenlemede tahlisiye ekiplerinin kuruluş esasları, eğitim ve sertifikasyon sistemi, teknik donanım standartları, tatbikat kriterleri, olay komuta sistemi ve kurumlar arası koordinasyon mekanizmalarının ayrıntılı olarak tanımlanması, arama ve kurtarma faaliyetlerinin etkinliğini artıracaktır. Böylece yeraltı kömür madenlerinde meydana gelebilecek büyük kazalara karşı daha hazırlıklı bir müdahale sistemi oluşturularak çalışanların yaşam güvenliğinin güçlendirilmesi mümkün olacaktır.

5. SOMA, ERMENEK VE AMASRA MADEN KAZALARI

5.1. Soma, Ermenek ve Amasra Maden Kazalarında Arama ve Kurtarma Faaliyetlerinin Değerlendirilmesi

Türkiye'de meydana gelen Soma (2014), Ermenek (2014) ve Amasra (2022) maden kazaları, yeraltı kömür madenciliğinde arama ve kurtarma faaliyetlerinin teknik yeterlilik, organizasyonel yapı ve kriz yönetimi açısından yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Her üç olay farklı nedenlerle meydana gelmiş olsa da, ortak nokta; olayın ilk anından itibaren hızlı, koordineli ve güvenli müdahalenin hayati önem taşımasıdır. Bu kazalar, yalnızca arama-kurtarma ekiplerinin teknik kapasitesini değil, acil durum planlarının uygulanabilirliğini, kurumlar arası koordinasyonu ve olay yönetim sisteminin etkinliğini de test etmiştir.

5.1.1. Soma Maden Kazası

13 Mayıs 2014 tarihinde Manisa'nın Soma ilçesinde meydana gelen ve 301 madencinin yaşamını yitirdiği facia, Cumhuriyet tarihinin en büyük maden kazasıdır. Kazanın ardından Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK), Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ), AFAD, UMKE, itfaiye ekipleri ve çeşitli kamu kurumlarından çok sayıda uzman bölgeye sevk edilmiştir. Arama-kurtarma faaliyetleri, yüksek karbonmonoksit konsantrasyonu, yoğun duman, sıcaklık artışı ve yeniden yangın çıkma riski nedeniyle

son derece güç koşullar altında yürütülmüştür. Kurtarma ekipleri kapalı devre solunum cihazları kullanarak ocakta gaz ölçümleri gerçekleştirmiş, güvenli çalışma bölgeleri oluşturmuş ve ilerlemeyi kontrollü şekilde sürdürmüştür. Ancak yangının kontrol altına alınmasının uzun sürmesi, havalandırma sisteminin zarar görmesi ve karbonmonoksit seviyelerinin yüksek olması müdahale sürecini önemli ölçüde zorlaştırmıştır. Soma kazası, büyük ölçekli yeraltı kömür madeni kazalarında profesyonel tahlisiye ekiplerinin sürekli hazır bulundurulmasının, olay komuta sisteminin etkin işletilmesinin ve gerçekçi tatbikatların kritik önemini ortaya koymuştur.

Şekil 4. Soma Maden Kazası arama kurtarma faaliyetleri (kişisel arşiv)

5.1.2. Ermenek Maden Kazası

28 Ekim 2014 tarihinde Karaman'ın Ermenek ilçesinde meydana gelen kazada, terk edilmiş eski üretim panolarında biriken suyun aktif çalışma alanına ani şekilde dolması sonucunda 18 madenci yaşamını yitirmiştir. Bu olay, yeraltı kömür madenciliğinde su baskınlarının arama-kurtarma faaliyetlerini en fazla zorlaştıran afetlerden biri olduğunu göstermiştir. Kurtarma çalışmalarının temel amacı öncelikle galerilerdeki suyun tahliye edilmesi olmuştur. Yüksek debili pompalarla yürütülen tahliye çalışmaları günlerce devam etmiş, su seviyesinin düşürülmesinin ardından arama faaliyetlerine başlanabilmiştir. Dar galeriler, çamur birikintileri, bozulan tahkimatlar ve görüş mesafesini azaltan koşullar ilerlemeyi önemli ölçüde yavaşlatmıştır. Ermenek kazası, eski imalat haritalarının eksiksiz tutulmasının, hidrojeolojik risk analizlerinin üretim öncesinde ayrıntılı olarak yapılmasının ve su baskını senaryolarına yönelik özel kurtarma planlarının hazırlanmasının gerekliliğini açık biçimde ortaya koymuştur.

5.1.3. Amasra Maden Kazası

14 Ekim 2022 tarihinde Bartın'ın Amasra Taşkömürü İşletmesi'nde meydana gelen grizu patlamasında 42 madenci yaşamını yitirmiştir. Patlamanın ardından TTK Merkez Tahlisiye İstasyonu başta olmak üzere bölgesel tahlisiye ekipleri, AFAD, UMKE ve sağlık ekipleri kısa sürede olay yerine ulaşmıştır. Kurtarma faaliyetleri, metan gazı, karbonmonoksit, patlama sonrası oluşan göçükler ve ikincil patlama riski nedeniyle kontrollü olarak yürütülmüştür. Operasyon boyunca gaz ölçümleri kesintisiz sürdürülmüş, güvenli giriş bölgeleri belirlenmiş ve kapalı devre solunum cihazları kullanılarak sistematik arama yapılmıştır. Olay komuta merkezinin oluşturulması ve

kurumlar arası koordinasyonun sağlanması müdahalenin etkinliğini artıran önemli unsurlar olmuştur. Bununla birlikte Amasra kazası, gaz izleme sistemlerinin etkinliği, havalandırma güvenliği, risk değerlendirmesi ve acil durum hazırlıklarının geliştirilmesi gerektiğini bir kez daha göstermiştir.

Şekil 5. Amasra Maden kazası arama kurtarma çalışmaları (kişisel arşiv)

5.2 Arama ve Kurtarma Faaliyetlerinden Elde Edilen Temel Bulgular

Soma, Ermenek ve Amasra kazaları birlikte değerlendirildiğinde, arama ve kurtarma faaliyetlerinin başarısının yalnızca ekiplerin teknik yeterliliğine bağlı olmadığı görülmektedir. Müdahalenin etkinliği; güncel acil durum planları, eğitimli tahlisiye ekipleri, uygun teknik donanım, güvenilir haberleşme sistemleri ve kurumlar arası koordinasyonun birlikte işletilmesine bağlıdır. Ayrıca her kazanın farklı bir tehlike mekanizmasından kaynaklanması (yangın, su baskını ve grizu patlaması), yeraltı kömür madenlerinde tehlikeye özgü kurtarma senaryolarının hazırlanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Uluslararası uygulamalarda olduğu gibi, profesyonel maden kurtarma ekiplerinin sürekli eğitim alması, tam ölçekli tatbikatların düzenli olarak gerçekleştirilmesi, olay komuta sisteminin standartlaştırılması ve yeni teknolojilerin (gerçek zamanlı gaz izleme, termal görüntüleme, robotik sistemler ve sayısal haberleşme altyapıları) kurtarma operasyonlarına entegre edilmesi müdahale başarısını önemli ölçüde artırmaktadır. Sonuç olarak, Soma, Ermenek ve Amasra maden kazaları, yeraltı kömür madenciliğinde arama ve kurtarma faaliyetlerinin yalnızca kaza sonrası yürütülen operasyonlar olmadığını; risk yönetimi, hazırlık, eğitim, tatbikat ve kriz yönetimini kapsayan bütünleşik bir acil durum yönetim sisteminin temel unsuru olduğunu göstermektedir. Bu deneyimler doğrultusunda, yeraltı kömür madenlerinde ulusal standartlara dayalı eğitim ve sertifikasyon sisteminin geliştirilmesi, teknik donanımın güçlendirilmesi ve kurumlar arası koordinasyonun iyileştirilmesi, gelecekte benzer kazalarda can kayıplarının azaltılmasına önemli katkı sağlayacaktır.

6. SONUÇ VE İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

Bu çalışmada yeraltı kömür madenciliğinde arama ve kurtarma faaliyetleri; iş sağlığı ve güvenliği mevzuatı, ulusal ve uluslararası uygulamalar ile Soma, Ermenek ve Amasra maden kazalarından elde edilen deneyimler doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Çalışma sonucunda, yeraltı kömür madenlerinde meydana gelen grizu patlamaları, kömür tozu patlamaları, yangın, göçük ve su baskını gibi olaylarda müdahalenin başarısının yalnızca teknik donanıma değil; etkin risk yönetimi, güncel acil durum planları, nitelikli tahlisiye ekipleri, düzenli eğitim ve tatbikatlar ile kurumlar arası koordinasyona bağlı olduğu belirlenmiştir.
Mevcut mevzuatın acil durum yönetimi için genel bir çerçeve oluşturduğu, ancak yeraltı kömür madenciliğine özgü arama ve kurtarma faaliyetlerinde eğitim, sertifikasyon, teknik donanım, müdahale standartları ve olay komuta sistemine ilişkin ayrıntılı düzenlemelere ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Ayrıca teknolojik gelişmelerin arama ve kurtarma faaliyetlerine entegrasyonu ile sürekli mesleki gelişimin desteklenmesinin müdahale kapasitesini artıracağı değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, yeraltı kömür madenciliğinde güvenli üretimin sürdürülebilirliği; önleyici mühendislik uygulamaları, güçlü bir mevzuat altyapısı ve profesyonel arama-kurtarma organizasyonlarının bütünleşik olarak yönetilmesine bağlıdır.

Bu çalışma kapsamında aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Yeraltı kömür madenciliğine özgü "Maden Arama ve Kurtarma Yönetmeliği" hazırlanmalı, tahlisiye ekiplerinin kuruluşu, görevleri, eğitimleri, sertifikasyonu ve teknik donanım standartları ayrıntılı olarak düzenlenmelidir.
- Ulusal bir eğitim ve sertifikasyon sistemi oluşturulmalı, tahlisiye personelinin eğitimleri Bakanlık koordinasyonunda akredite merkezlerde yürütülmeli ve periyodik yeterlilik değerlendirmeleri yapılmalıdır.
- Bölgesel profesyonel tahlisiye istasyonları yaygınlaştırılmalı, istasyonların teknik donanımı standart hale getirilmeli ve müdahale sürelerini azaltacak şekilde konumlandırılmalıdır.
- Acil durum planları işletmeye özgü hazırlanmalı, güncel üretim haritaları, risk analizleri ve olası senaryoları kapsayacak şekilde dijital ortamda sürekli güncellenmelidir.
- Gerçekçi senaryolara dayalı tatbikatlar zorunlu hale getirilmeli, tatbikatlara ilgili kamu kurumları ile diğer maden işletmeleri de katılmalı ve sonuçları performans kriterleri doğrultusunda değerlendirilmelidir.
- Arama ve kurtarma eğitimleri sürekli mesleki gelişim anlayışıyla yürütülmeli, üniversitelerin maden mühendisliği programları ile mesleki eğitim kurumlarında arama ve kurtarma dersleri müfredata dâhil edilmelidir.
- Yeni teknolojilerin kullanımı teşvik edilmelidir. Gerçek zamanlı gaz izleme sistemleri, termal görüntüleme cihazları, robotik platformlar, dijital haberleşme altyapıları ve yapay zekâ destekli erken uyarı sistemlerinin arama ve kurtarma faaliyetlerine entegrasyonu sağlanmalıdır.
- Kurumlar arası koordinasyon güçlendirilmelidir. AFAD, MAPEG, TTK, üniversiteler ve diğer ilgili kuruluşların katılımıyla ortak eğitim, tatbikat ve bilgi paylaşımını sağlayacak ulusal bir koordinasyon mekanizması oluşturulmalıdır.

- Bilimsel araştırmalar ve uluslararası iş birlikleri desteklenmelidir. Ulusal ve uluslararası maden arama ve kurtarma kongreleri, yarışmaları ve ortak Ar-Ge projeleri teşvik edilerek sektörde bilgi paylaşımı ve teknolojik gelişim artırılmalıdır.

Bir avuç kömür için canını verenlerin anısına saygılarımızla

Şekil 6. Zonguldak taşkömürü anıtı (kişisel arşiv)

KAYNAKLAR

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2014). *Soma maden kazası ön değerlendirme raporu*. AFAD.

Aydın, M., & Karakurt, S. (2021). Yeraltı maden işletmelerinde hidrojeolojik riskler ve su atım sistemlerinin optimizasyonu. *Madencilik Bilimleri Dergisi, 14*(2), 112–125.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2012). *6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu*. Resmî Gazete (Sayı: 28339).

Direk, C. (2016). Yeraltı kömür madenciliğinde tavan kontrolü, göçük mekanizmaları ve emniyet kültürü ilişkisi. *Jeoteknik Kongresi Bildiriler Kitabı*, 45–58.

International Labour Organization. (2006). *Safety and health in underground coal mines (ILO Code of Practice).* International Labour Office.

ISO 31000:2018. *Risk management—Guidelines.* (Risk yönetimi)

ISO 45001:2018. *Occupational health and safety management systems.* (İSG yönetim sistemi)

Kaymakçı, E. (1998). *Kömürlerin kendiliğinden yanma mekanizmaları ve ısıl sürüklenmenin modellenmesi* (Doktora tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi.

Kaymakçı, E., & Bilen, M. (2023). Maden ocaklarında endojen yangınlar ve erken tespit sistemleri. *Akademik Madencilik Literatürü Yayınları*, 89–104.

Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği. (2013). Resmî Gazete (Sayı: 28770).

Mine Safety and Health Administration. (2023). *Mine rescue procedures manual*. U.S. Department of Labor.

Reason, J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents.* Ashgate. (İnsan faktörü ve güvenlik kültürü)

TBMM. (2014). *Manisa ili Soma ilçesinde meydana gelen maden faciasının araştırılması amacıyla kurulan Meclis Araştırması Komisyonu Raporu*. Türkiye Büyük Millet Meclisi.

TBMM. (2023). *Bartın Amasra Taşkömürü İşletmesinde meydana gelen maden kazasının araştırılması amacıyla kurulan Meclis Araştırması Komisyonu Raporu*. Türkiye Büyük Millet Meclisi.

TMMOB Maden Mühendisleri Odası. (2020). *Madencilikte iş sağlığı ve güvenliği raporu*. TMMOB Maden Mühendisleri Odası.

Türkiye Taşkömürü Kurumu. (2023). *Merkez Tahlisiye İstasyonu tanıtım ve eğitim dokümanları*. Türkiye Taşkömürü Kurumu.

U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration. (2023). *Mine rescue procedures manual*. U.S. Department of Labor.

Yin, K., vd. (2024). *A review of coal spontaneous combustion prevention technologies*. *ACS Omega*. (Kendiliğinden yanma ve önleme teknolojileri)

BETON TEKNOLOJİSİNDE KÖMÜR YIKAMA ATIK SUYUNUN KULLANIMI: MEVCUT DURUM, YAPISAL UYGULAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

COAL WASHING WASTEWATER IN SUSTAINABLE CONCRETE PRODUCTION LITERATURE REVIEW AND FUTURE PERSPECTIVES

Gülden Çağın Ulubeyli*, Murat Çavuşlu, Tuna Ülger, Hüseyin Zekeriya Doğan

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZET Kömür madenciliği ve zenginleştirme faaliyetleri, yüksek su tüketimi ve ağır metal ile askıda katı madde içeren atık sular nedeniyle önemli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle, kömür yıkama atık suyunun (Coal Washing Wastewater, CWW) yeniden kullanımı, su kaynaklarının korunması ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından sürdürülebilir bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bu derleme çalışmasında, CWW'nin çimento esaslı malzemelerde kullanımına ilişkin mevcut literatür; mekanik performans, hidratasyon mekanizmaları, dayanıklılık, mikroyapısal gelişim ve yapısal uygulamalar açısından sistematik olarak incelenmiştir. Ayrıca, mevcut çalışmaların kapsamı ve bilgi boşlukları değerlendirilerek gelecekteki araştırma gereksinimleri tartışılmıştır. Literatür, çalışmaların büyük ölçüde çimento hamuru, harç ve beton düzeyinde yoğunlaştığını, tam ölçekli yapısal uygulamaların ise sınırlı kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, CWW içerisindeki ince partiküllerin mikro-dolgu etkisiyle matris yoğunluğunu artırarak mekanik ve yapısal performansa olumlu katkılar sağlayabildiği rapor edilmiştir. Bu çalışma, CWW'nin beton teknolojisindeki kullanım potansiyelini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır.

ABSTRACT Coal mining and beneficiation activities generate significant environmental problems due to high water consumption and the production of wastewater containing heavy metals and suspended solids. Reusing coal washing wastewater (CWW) has therefore emerged as a sustainable approach for conserving water resources and improving resource efficiency. This review systematically examines the current literature on the use of CWW in cementitious materials, focusing on mechanical performance, hydration mechanisms, durability, microstructural development, and structural applications. The scope of existing studies and current knowledge gaps are also evaluated to identify future research needs. The reviewed literature shows that most studies have focused on cement paste, mortar, and concrete, while full-scale structural applications remain limited. Nevertheless, the fine particles in CWW have been reported to enhance matrix densification through a micro-filler effect, improving mechanical and structural performance. Overall, this review highlights the potential of CWW as an alternative water source for sustainable concrete production.

* *cagin.ulubeyli@beun.edu.tr*

1. GİRİŞ

Beton endüstrisi, küresel ölçekte su kaynakları üzerinde muazzam bir baskı oluşturan ve en yoğun su tüketen sektörlerden biridir(K.N. ve ark., 2025). İnşaat sektörü, dünya genelindeki tatlı su kaynaklarının yaklaşık altıda birini tüketmekte olup, sadece beton üretimi için her yıl yaklaşık bir milyar ton su kullanılmaktadır (Asadi ve ark 2015). Araştırmalar, bir metreküp betonun hazırlanması için 150 ila 210 litre arasında karma suyu gerektiğini, buna ek olarak trans mikser ve tesis ekipmanlarının temizliği için de metreküp başına 150-300 galon civarında ek su tüketildiğini göstermektedir (Ali B ve ark 2021). Artan kentleşme ve altyapı talepleriyle birlikte bu tüketimin 2030 yılına kadar yıllık 900 milyar litreye ulaşacağı öngörülmektedir (K.N. ve ark., 2025). Bu devasa tüketim oranları, kısıtlı temiz su kaynaklarının korunmasını inşaat sektörü için kaçınılmaz bir sürdürülebilirlik hedefi haline getirmektedir. Bu noktada, geleneksel tatlı su kaynaklarına bağımlılığı azaltmak ve döngüsel ekonomiye katkı sağlamak amacıyla endüstriyel atık suların beton üretiminde geri kazanılması hem çevresel kirliliğin önlenmesi hem de doğal kaynakların korunması adına hayati bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Kömür madenciliği ve zenginleştirme operasyonlarında, ham kömürün safsızlıklardan arındırılması ve kalitesinin artırılması amacıyla uygulanan kömür yıkama prosesi, her yıl milyonlarca metreküp taze su tüketilmesine ve buna bağlı olarak devasa miktarlarda kömür yıkama atık suyu (CWW) oluşumuna yol açmaktadır (Han ve ark 2024). "Kara su" olarak da adlandırılan bu atık sular; askıda kalan ince kömür partikülleri, yüksek kül içeriği, mineral safsızlıkları, flotasyon kimyasalları ve arsenik, kurşun, cıva, krom gibi toksik ağır metaller içermesi nedeniyle ciddi bir çevresel problem teşkil etmektedir (Kısa ve ark., 2025; Yan ve ark., 2012). CWW'nin arıtılmadan doğrudan su yollarına ve araziye deşarj edilmesi, suyun türbiditesini (bulanıklığını) aşırı artırarak ışık geçirgenliğini kısıtlamakta, bu durum sucul ekosistemlerde fotosentezi ve oksijen seviyelerini düşürerek biyo çeşitliliğe zarar vermektedir (Kısa ve ark., 2025). Ayrıca, bu suların toprağa sızması kimyasal dengeyi bozarak tarımsal verimliliği düşürmekte ve yeraltı su havzalarına ulaşarak içme suyu kaynaklarını kirletmektedir (Kısa ve ark., 2025; Ulubeyli ve ark., 2026). Atık su içindeki çok ince partiküllerin (<75 μm) yerçekimi ile kolayca çökelmemesi ve kimyasal olarak kararlı süspansiyonlar oluşturması, bu atığın geleneksel yöntemlerle yönetilmesini teknik ve ekonomik açıdan son derece zorlu bir süreç haline getirmektedir (Yan ve ark., 2012).

Kömür yıkama işlemlerinden kaynaklanan atık suların (CWW) ekosistem üzerindeki çok boyutlu ve yıkıcı etkileri Şekil 1'de şematik olarak sunulmuştur. Şekilde gösterildiği üzere, maden zenginleştirme tesislerinden tahliye edilen yüksek türbiditeye sahip "kara su"; bünyesinde barındırdığı ince kömür partikülleri, flotasyon kimyasalları ve arsenik, kurşun, cıva gibi toksik ağır metaller ile doğrudan bir kirletici kaynağıdır [8].Bu sular sadece bulanık olmayıp, aynı zamanda deşarj limitlerinin çok üzerinde organik ve inorganik kirletici (metal iyonları) içermektedir.

Şekil 1. Kaynaktan ekosisteme kömür yıkama atık suyunun (CWW) çevresel kirlilik döngüsü ve etkileri. Kaynak: İncelenen literatür sentezlenerek yazarlar tarafından hazırlanmıştır.

Bu atıkların arıtılmadan su yollarına deşarj edilmesi, ışık geçirgenliğini kısıtlayarak fotosentezi ve oksijen seviyelerini düşürmekte, bu durum sucul biyo çeşitliliğe ağır hasar vermektedir (Haibin & Zhenling, 2010). Şemada vurgulanan bir diğer kritik nokta, atık suların toprağa sızarak kimyasal dengeyi bozması, tarımsal verimliliği düşürmesi ve perkolasyon yoluyla yeraltı su havzalarına ulaşarak içme suyu güvenliğini tehdit etmesidir (Fadli ve ark., 2024b). Ayrıca, atık barajlarında biriken bu maddelerin atmosferik koşullarda oksitlenmesi sonucu oluşan asit maden drenajı (AMD), kirlilik döngüsünü ekosistemin derinliklerine yaymaktadır (Soltaninejad ve ark., 2021). Bu bağlamda, şemada önerilen sürdürülebilir döngü, bu atık akışının inşaat sektörüne hammadde olarak entegre edilmesini ve böylece çevresel yükün ekonomik bir değere dönüştürülmesini hedeflemektedir(Kısa ve ark., 2025; Ulubeyli ve ark., 2026; Zhu ve ark., 2023).

Bu kapsamda, kömür yıkama atık suyunun karışım suyu olarak değerlendirilmesi, hem endüstriyel atıkların yeniden kullanımını sağlaması hem de temiz su tüketimini azaltması açısından dikkat çeken sürdürülebilir yaklaşımlardan biridir. Literatürde yer alan çalışmalar, uygun koşullarda temiz suyun CWW ile tamamen veya kısmen değiştirilmesinin betonun mekanik performansını olumsuz etkilemediğini; hatta CWW içerisindeki ince partiküllerin oluşturduğu mikro-dolgu etkisi sayesinde beton matrisinin yoğunlaşmasına, bazı durumlarda ise yük taşıma kapasitesi ve sünekliğin iyileşmesine katkı sağlayabildiğini göstermektedir (Kısa ve ark., 2025; Ulubeyli ve ark., 2026). Bu yönüyle CWW'nin beton üretiminde yeniden kullanımı hem doğal su kaynaklarının korunmasına hem de madencilik kaynaklı atıkların çevresel etkilerinin

azaltılmasına katkı sağlayan döngüsel ekonomi temelli sürdürülebilir bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Bu derleme çalışmasının amacı, kömür yıkama atık suyunun beton teknolojisinde yeniden kullanımına ilişkin mevcut literatürü kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir. Bu kapsamda, mevcut çalışmalar mekanik performans, hidratasyon mekanizmaları, dayanıklılık özellikleri, mikroyapısal gelişim ve yapısal uygulamalar açısından eleştirel bir bakış açısıyla incelenmiştir. Ayrıca, literatürde yer alan bilgi boşlukları ortaya konularak CWW'nin beton teknolojisinde sürdürülebilir kullanımını destekleyecek gelecekteki araştırma alanları değerlendirilmiştir. Bunun yanında, literatürde son yıllarda malzeme ölçeğindeki araştırmalardan tam ölçekli yapısal uygulamalara doğru önemli bir yönelim gözlenmektedir. Bu doğrultuda, betonarme taşıyıcı elemanlarda CWW kullanımını inceleyen güncel bir çalışma, mevcut literatür çerçevesinde değerlendirilerek malzeme ölçeğinden yapısal uygulamalara geçiş sürecini temsil eden örnek bir vaka olarak ele alınmıştır.

2. KÖMÜR YIKAMA ATIK SUYUNUN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ

Kömür yıkama atık suyu (CWW), ham kömürün safsızlıklardan arındırılması ve kalitesinin artırılması amacıyla uygulanan zenginleştirme (yıkama) işlemleri sırasında ortaya çıkan temel bir yan üründür (Moradikhou ve ark., 2023; Yan ve ark., 2012). Bu atık akışı, maden çıkarma ve beneficiation (zenginleştirme) süreçlerinde kullanılan kısıtlı taze su kaynaklarının kömür tozları, mineral safsızlıkları ve kil parçacıkları ile karışmasıyla oluşur (Ulubeyli ve ark., 2026). CWW'nin katı fazını oluşturan şlam (sludge) içeriği incelendiğinde; baskın olarak silis (SiO_2) ve alümin (Al_2O_3) temelli kil mineralleri ile karbon içeriğinin bulunduğu görülmektedir [8-9]. Ayrıca bileşiminde, üretim sürecinde kullanılan flotasyon ajanları ve işleme kimyasallarının yanı sıra kömürün yapısından gelen arsenik, kurşun ve cıva gibi toksik maddeler de yer alabilmektedir (Kısa ve ark., 2025).

Fiziksel açıdan CWW, genellikle koyu siyah rengi ve kendine has kokusuyla karakterize edilen, yüksek türbiditeye (bulanıklığa) sahip bir süspansiyondur (Kısa ve ark., 2025; Yan ve ark., 2012). Atık su içerisindeki partiküllerin boyutu oldukça ince olup, toplam katı içeriğinin yaklaşık %70'ini 75 µm'den küçük parçacıklar oluşturmaktadır (Yan ve ark., 2012). Bu küçük partikül boyutu ve parçacıkların yüzey yükleri, yerçekimi ile çökelmeyi engelleyen kararlı kolloidal süspansiyonlar meydana getirmekte ve atık suyun geleneksel yöntemlerle temizlenmesini zorlaştırmaktadır (Shen ve ark., 2023; Yan ve ark., 2012). CWW'nin fiziksel profilinde öne çıkan diğer parametreler arasında, tatlı suya kıyasla daha yüksek olan yoğunluk (yaklaşık 1.138 g/cm^3), değişken iletkenlik değerleri ve negatif karakterli zeta potansiyeli bulunmaktadır (Kısa ve ark., 2025; Yan ve ark., 2012).

CWW'nin kimyasal karakteri hem organik hem de inorganik kirleticiler açısından oldukça yüklüdür; özellikle Kimyasal Oksijen İhtiyacı (COD) ve Askıda Katı Madde (SS) değerleri standart deşarj limitlerinin çok üzerindedir (Yan ve ark., 2012). Atık

suyun pH değeri maden sahasına göre değişmekle birlikte genellikle hafif alkali (pH ~8.9) bir yapı sergilemektedir (Kısa ve ark., 2025; Ulubeyli ve ark., 2026). Kimyasal analizler, CWW'nin standartların çok üzerinde amonyum (NH_4^+) ve sodyum (Na^+) iyon yüküne sahip olduğunu, bu durumun hem ekosistem için risk oluşturduğunu hem de beton üretiminde kullanıldığında dayanıklılık parametrelerini etkileyebileceğini göstermektedir (Ulubeyli ve ark., 2026). Ayrıca suyun içeriğinde bulunan sülfatlar, kalsiyum ve magnezyum iyonları ile fenol ve aromatik hidrokarbonlar gibi kompleks bileşikler kimyasal profilin temelini oluşturur (Yan ve ark., 2012).

3. KÖMÜR YIKAMA ATIK SUYUNUN ÇİMENTO ESASLI MALZEMELERDE KULLANIMI

Kömür kökenli atıkların ve kömür yıkama atık suyunun çimento esaslı malzemelerde kullanımına yönelik çalışmalar son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir. Bununla birlikte, kullanılan atık türü, karışım tasarımı, deney ölçeği ve değerlendirilen performans kriterleri bakımından çalışmalar arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Araştırmaların büyük bölümü kömür gangı, uçucu kül ve kömür şlamı gibi katı atıkların değerlendirilmesine odaklanırken(Han ve ark., 2024; Qin ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2022; Zhao ve ark., 2024; Zommer ve ark., 2021), CWW'nin doğrudan karışım suyu olarak kullanımını inceleyen çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır (Shen ve ark., 2022; Ulubeyli ve ark., 2026). Bu nedenle, mevcut çalışmaların yalnızca elde edilen sonuçlar açısından değil, aynı zamanda uygulama kapsamı ve literatüre sağladıkları katkılar bakımından da bütüncül olarak değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Çizelge 1 genel olarak değerlendirildiğinde, ilk çalışmaların ağırlıklı olarak kömür kökenli katı atıkların puzolanik özelliklerinden yararlanılarak çimento tüketiminin azaltılması ve bu atıkların katma değerli yapı malzemelerine dönüştürülmesi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir (Zommer ve ark., 2021). Daha sonraki araştırmalarda ise geopolimer bağlayıcılar, köpük betonlar ve maden dolgu malzemeleri gibi alternatif çimento esaslı sistemler geliştirilmiş; bu sistemlerde kömür kökenli atıkların hidratasyon ürünlerinin oluşumunu desteklediği, gözenek yapısını iyileştirdiği ve mekanik performansa olumlu katkılar sağladığı rapor edilmiştir (Han ve ark., 2024; Qin ve ark., 2024; Shen ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2022; Zhao ve ark., 2024).

Mevcut çalışmalar, kömür kökenli ince tanelerin oluşturduğu mikro-dolgu etkisinin matris yoğunluğunu artırarak C–S–H ve C–A–S–H jel oluşumunu desteklediğini ve uzun dönem dayanım gelişimine katkı sağladığını göstermektedir (Shen ve ark., 2022; Zhao ve ark., 2024). Buna karşın, eğilme davranışı, enerji yutma kapasitesi, süneklik, çatlak kontrolü ve servis performansı gibi yapısal davranışı doğrudan etkileyen kriterleri inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca araştırmaların büyük çoğunluğu harç (Zhang ve ark., 2022), köpük beton(Han ve ark., 2024) veya geopolimer [18], (Qin ve ark., 2024) gibi laboratuvar ölçeğindeki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş; tam ölçekli betonarme taşıyıcı elemanların davranışını değerlendiren çalışmalar ise oldukça az sayıda kalmıştır.

Çizelge 1. Kömür Kökenli Atıkların ve Kömür Yıkama Atık Suyunun Çimento Esaslı Malzemelerde Kullanımına Yönelik Literatürün Karşılaştırmalı Analizi ve Araştırma Boşlukları

Çalışma	Kullanılan Atık Malzeme ve Karışım Tasarımı	Deney Ölçeği / Yapı Elemanı	Temel Bulgular	Bilimsel Katkısı
(Zommer ve ark., 2021)	Kömür atık su şlamından elde edilen uçucu kül, ağır beton üretiminde ince katkı malzemesi olarak kullanılmış; Portland çimentosu kısmen ikame edilirken hedef dayanım sınıfı korunmuştur.	Standart beton küpleri; ağır beton (inşaat ve endüstriyel uygulamalar)	Üretilen beton, kontrol karışımıyla benzer basınç dayanımı sınıfına (B20) ulaşmış ve Portland çimentosu tüketiminde yaklaşık %20 tasarruf sağlamıştır.	Kömür kökenli yanma kalıntılarının basınç dayanımında önemli bir kayıp oluşturmadan geleneksel betonlarda güvenle kullanılabileceğini göstermiş; ekonomik ve çevresel açıdan önemli avantajlar sunmuştur.
(Shen ve ark., 2023)	Kömür şlam suyu karışım suyu olarak, kömür gangı ise çimento esaslı dolgu malzemesinin ana katı bileşeni olarak kullanılmıştır.	Donatısız maden dolgu numuneleri; tek eksenli basınç dayanımı ve mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir.	Maden dolgu uygulamaları için yeterli tek eksenli basınç dayanımı (yaklaşık 1–2 MPa) elde edilmiş; kömür şlam suyu ve kömür gangı içeren karışımlarda yoğun C–S–H ve etrenjit oluşumu ile daha sıkı bir gözenek yapısı gözlenmiştir.	İki farklı madencilik atığının birlikte değerlendirilmesine yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmuş; atık kaynaklı iyonların ve ince tanelerin hidratasyon reaksiyonlarını destekleyerek dayanım gelişimine katkı sağlayabileceğini mikro yapısal analizlerle ortaya koymuştur.
(Zhang ve ark., 2022)	Kömür gangı, düşük yoğunluklu köpük beton üretiminde katı atık olarak kullanılmıştır (yoğunluk ≈ 600–800 kg/m	Küçük ölçekli köpük beton numuneleri; basınç dayanımı ve mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir.	Yaklaşık 2–3 MPa basınç dayanımı elde edilmiş, yüksek gözenekliliğe rağmen kömür gangı ilavesi iskelet yapısının sürekliliğini artırarak dayanımın korunmasına katkı sağlamıştır.	Kömür gangının hafif ve ısı yalıtım özelliğine sahip köpük betonlarda başarıyla kullanılabileceğini göstermiş; düşük yoğunluk ile mekanik performans arasında uygun bir denge sağlanabileceğini ortaya koymuştur.
(Han ve ark., 2024)	Kömür gangı, kömür şlamı ve uçucu kül kullanılarak seramsit esaslı köpük beton üretilmiş; çoklu katı atık içeren köpük beton sistemi geliştirilmiştir.	Hafif köpük beton numuneleri; ağırlıklı olarak basınç dayanımı, ısıl özellikler ve dayanıklılık deneyleri gerçekleştirilmiştir.	Optimum karışımlarda dayanım–yoğunluk dengesi iyileştirilmiş, gözenek yapısı daha rafine hale getirilmiş ve kömür kökenli katı atıkların yüksek oranda değerlendirilebileceği gösterilmiştir.	Çoklu atık kullanımına dayalı seramsit köpük betonların optimize edilmesine yönelik sistematik bir yaklaşım sunmuş ve kömür kökenli atıkların geleneksel köpük betonlara kıyasla daha verimli hafif beton üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Çalışma	Kullanılan Atık Malzeme ve Karışım Tasarımı	Deney Ölçeği / Yapı Elemanı	Temel Bulgular	Bilimsel Katkısı
(Zhao ve ark., 2024)	Kömür gangı ve cüruf kullanılarak, yüksek alkali aktivatör ve köpük oluşturucu katkı içeren alkali aktive geopolimer köpük beton üretilmiştir.	Prizmatik köpük beton numuneleri; basınç dayanımı, yoğunluk ve mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir.	Yoğun C–(A)–S–H ve N–A–S–H jel oluşumu ile rafine gözenek yapısı sayesinde geopolimer köpük betonlarda yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.	Kömür kökenli katı atıkların kullanımıyla yüksek dayanımlı ve hafif geopolimer köpük betonların üretilebileceğini göstermiş; kapsamlı mikro yapı analizleriyle mekanik performansın oluşum mekanizmasını ortaya koymuştur.
(Qin ve ark., 2024)	Kömür şlamı, cüruf tozu ve uçucu kül kullanılarak Portland çimentosu içermeyen geopolimer bağlayıcılar üretilmiştir.	Yol kaplama plakaları/blokları üzerinde mekanik ve dayanıklılık deneyleri gerçekleştirilmiştir.	Yol kaplama uygulamaları için yeterli basınç ve eğilme dayanımı ile iyi dayanıklılık performansı elde edilmiş; çoklu madencilik atıklarının etkin bir şekilde değerlendirilebileceği gösterilmiştir.	Kömür şlamı ve diğer madencilik atıklarının dayanıklı geopolimer yol kaplama malzemelerinin üretiminde başarıyla kullanılabileceğini ortaya koymuş; klinker tüketiminin azaltılmasına ve atıkların katma değerli ürünlere dönüştürülmesine katkı sağlamıştır.
(Ulubeyli ve ark., 2026)	Portland çimentosunun %50'si NaOH ile aktive edilmiş seramik atığı ile ikame edilmiş; bir seride ise karışım suyunun tamamı işlenmemiş kömür yıkama atık suyu (CWW) ile değiştirilmiştir. Çalışmada üç betonarme kiriş serisi (kontrol, seramik atığı, seramik atığı + CWW) değerlendirilmiştir.	Tam ölçekli betonarme kirişler üzerinde üç noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiş; buna ek olarak küp numunelerde mekanik deneyler ile XRD, FTIR ve SEM analizleri kullanılarak mikro yapısal incelemeler yapılmıştır.	Kontrol betonuna göre 28 günlük basınç dayanımında yalnızca yaklaşık %5–9 oranında azalma görülmesine rağmen, eğilme taşıma kapasitesi büyük ölçüde korunmuştur (yaklaşık %6 fark). Seramik atığı ve CWW içeren betonarme kirişlerde süneklik ve enerji yutma kapasitesi artmış, servis yükleri altında çatlak genişlikleri azalmıştır.	Kömür yıkama atık suyunun ve alkali aktive seramik atıklarının birlikte kullanıldığı ilk tam ölçekli betonarme kiriş çalışmalarından biri olup, yüksek klinker ikamesine rağmen yapısal performansın korunabileceğini göstermiştir. XRD, FTIR ve SEM analizleri ile hidratasyon ürünlerinin oluşumu doğrulanmış; CWW'nin beton matrisinde olumsuz bir etki oluşturmadığı ve sürdürülebilir beton üretimi açısından önemli bir potansiyel taşıdığı ortaya konulmuştur.

Bu doğrultuda gerçekleştirilen güncel çalışmalardan birinde [9], Portland çimentosu ile alkali aktive edilmiş seramik atıklarından oluşan hibrit bağlayıcı sistemine sahip betonarme kirişlerde CWW'nin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, yüksek oranda klinker ikamesi ve karışım suyunun tamamen CWW ile değiştirilmesine rağmen eğilme taşıma kapasitesinin büyük ölçüde korunduğu; sünekliğin ve enerji yutma kapasitesinin arttığı, servis yükleri altında ise çatlak genişliklerinin azaldığı belirlenmiştir. XRD, FTIR ve SEM analizleri, CWW'nin hidratasyon ürünlerinin oluşumunu olumsuz etkilemediğini, aksine içerdiği ince partiküllerin oluşturduğu mikro-dolgu etkisi sayesinde matrisin daha yoğun bir yapı kazandığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, CWW'nin yalnızca malzeme ölçeğinde değil, hibrit bağlayıcı sistemine sahip yapısal beton uygulamalarında da sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte, mevcut literatür değerlendirildiğinde CWW'nin uzun dönem dayanıklılık performansı, donatı korozyonuna etkisi, farklı kömür yıkama tesislerinden elde edilen atık suların kimyasal bileşimindeki değişkenliğin beton davranışına yansıması ve gerçek saha uygulamalarındaki performansına ilişkin çalışmaların halen yetersiz olduğu görülmektedir. Ayrıca, CWW'nin beton teknolojisindeki kullanım potansiyelinin daha kapsamlı ortaya konulabilmesi için uzun dönem dayanıklılık, farklı kömür yıkama atık sularının beton davranışına etkisi ve tam ölçekli yapısal uygulamalara yönelik araştırmaların artırılması gerekmektedir. Bu bilgi boşluklarının giderilmesi, CWW'nin çevresel bir atık olmaktan çıkarılarak sürdürülebilir beton üretiminde güvenilir bir alternatif su kaynağı olarak kullanılmasına önemli katkı sağlayacaktır.

4. SONUÇLAR

Bu derleme çalışmasında, kömür yıkama atık suyunun çimento esaslı malzemelerde yeniden kullanımına yönelik mevcut literatür; kullanılan atık türleri, karışım tasarımları, mekanik performans, mikro yapısal gelişim ve yapısal uygulamalar açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Literatür incelendiğinde, kömür kökenli atıkların beton teknolojisinde kullanımına yönelik çalışmaların son yıllarda önemli ölçüde arttığı, ancak bu çalışmaların büyük bölümünün kömür gangı, uçucu kül ve kömür şlamı gibi katı atıkların değerlendirilmesine odaklandığı görülmektedir. Buna karşın, CWW'nin doğrudan karışım suyu olarak kullanımını ele alan araştırmaların sayısı oldukça sınırlıdır.

Mevcut çalışmalar, CWW ve diğer kömür kökenli atıkların uygun karışım tasarımı ile kullanılması durumunda hidratasyon mekanizmalarını olumsuz etkilemediğini, ince partiküllerin oluşturduğu mikro-dolgu etkisi sayesinde matris yoğunluğunu artırabildiğini ve mekanik performansa olumlu katkılar sağlayabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, araştırmaların büyük çoğunluğu laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmiş olup, tam ölçekli betonarme taşıyıcı elemanların davranışını inceleyen çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır.

Son yıllarda gerçekleştirilen yapısal ölçekli araştırmalar, CWW'nin hibrit bağlayıcı sistemlerinde yüksek klinker ikamesine rağmen yapısal performansı koruyabildiğini göstermektedir. Bu durum, CWW'nin sürdürülebilir beton üretiminde alternatif bir su kaynağı olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.
Sonuç olarak, CWW'nin beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılabilmesi için farklı atık su karakteristiklerinin beton davranışına etkisi, uzun dönem dayanıklılık ve tam ölçekli yapısal uygulamalara yönelik kapsamlı araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu bilgi boşluklarının giderilmesi, su kaynaklarının korunmasına ve madencilik kaynaklı atıkların sürdürülebilir beton üretiminde etkin bir şekilde değerlendirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Ali, B., Kurda, R., Brito, J. de, & Alyousef, R. (2021). A Review on the Performance of Concrete Containing Non-Potable Water. *Applied Sciences*, *11*(15), 6729. https://doi.org/10.3390/app11156729

Asadollahfardi, G., Asadi, M., Jafari, H., Moradi, A., & Asadollahfardi, R. (2015). Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, *98*, 305–314. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.053

Fadli, M. I., Bustan, M. D., & Haryati, S. (2024a). Reducing Pollutants in Coal Wastewater with <i>Moringa oleifera</i> and Natural Biocoagulants Combination. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, *25*(8), 232–244. https://doi.org/10.12912/27197050/189806

Fadli, M. I., Bustan, M. D., & Haryati, S. (2024b). Reducing Pollutants in Coal Wastewater with <i>Moringa oleifera</i> and Natural Biocoagulants Combination. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, *25*(8), 232–244. https://doi.org/10.12912/27197050/189806

Haibin, L., & Zhenling, L. (2010). Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. *Resources, Conservation and Recycling*, *54*(12), 1331–1340. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.05.005

Han, Y., Zhou, M., Wang, J., Tian, Y., & Wang, X. (2024). Optimization of coal-based solid waste ceramsite foam concrete mix proportions and performance study. *Construction and Building Materials*, *416*, 135226. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135226

Kısa, K. O., Ülger, T., & Cavuslu, M. (2025). Utilization of coal mining wastewater in concrete production: Experimental and finite element simulation of flexural performance in reinforced concrete beams. *Structures*, *80*, 109941. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109941

K.N., R., Y., R. R., Kumar G, S., & HK, R. (2025). Predictive modelling of mechanical properties of concrete using machine learning with secondary treated waste water and fly ash. *Cleaner Waste Systems*, *11*, 100296. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100296

Moradikhou, A. B., Safehian, M., & Golafshani, E. M. (2023). High-strength geopolymer concrete based on coal washing waste. *Construction and Building Materials*, *362*, 129675. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129675

Pawar, N. D., Harris, S., Mitko, K., & Korevaar, G. (2022). Valorization of coal mine effluents — Challenges and economic opportunities. *Water Resources and Industry*, *28*, 100179. https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100179

Qin, Z., Yuan, Y., Chen, Z., Li, Y., & Xia, Y. (2024). Combined preparation and application of geopolymer pavement materials from coal slurry-slag powder-fly ash mining solid waste: A case study. *Construction and Building Materials*, *441*, 137510. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137510

Shen, L., Lai, W., Zhang, J., Sun, Z., Li, M., & Zhou, N. (2023). Mechanical properties and micro characterization of coal slime water-based cementitious material-gangue filling: A novel method for co-treatment of mining waste. *Construction and Building Materials*, *408*, 133747. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133747

Shen, L., Zhang, J., Lai, W., Li, M., & Huo, B. (2022). Microstructure and mechanical behaviors of coal gangue - Coal slime water backfill cementitious materials. *Journal of Materials Research and Technology*, *20*, 3772–3783. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.089

Soltaninejad, M., Soltaninejad, M., Moshizi, M. K., Sadeghi, V., Saberi.K, F., & Jahanbakhsh, P. (2021). *Environmental-Friendly Mortar Produced with Treated and Untreated Coal Wastes as Cement Replacement Materials*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-233737/v1

Ulubeyli, G. Ç., Cavuslu, M., Dogan, Z., & ÜLGER, T. (2026). Sustainable concrete using waste ceramic powder and coal-washed water: Experimental investigations and 3D numerical modelling of full-scale RC beams. *Construction and Building Materials*, *507*, 145082. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.145082

Yan, L., Wang, Y., Ma, H., Han, Z., Zhang, Q., & Chen, Y. (2012). Feasibility of fly ash-based composite coagulant for coal washing wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, *203–204*, 221–228. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.004

Zhang, X., Feng, X., Wang, Z., Jian, J., Chen, S., Luo, W., & Zhang, C. (2022). Experimental study on the physico-mechanical properties and microstructure of foam concrete mixed with coal gangue. *Construction and Building Materials*, *359*, 129428. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129428

Zhao, Z., Qu, X., Li, Z., He, T., & Li, F. (2024). Preparation and characterization of geopolymer foamed concrete based on coal gangue and slag. *Construction and Building Materials*, *455*, 139187. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139187

Zhu, J., Kang, J., & Liu, Z. (2023). Resource recycling and carbon sequestration by carbonizing concrete washing wastewater of ready-mix concrete plant. *Construction and Building Materials*, *392*, 131916. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131916

Zommer, T. V., Tkach, E. V., Chernyshev, S. N., & Zommer, V. L. (2021). Disposal of fly ash in the production of ash-concrete within the coal-watercoal cluster. *E3S Web of Conferences*, *263*, 01007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301007

DENİZLİ-MUĞLA LİNYİTLERİNDE ÇEVRECİ ÇÖZÜM: YERALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMASI

A GREEN SOLUTION FOR DENİZLİ-MUĞLA LIGNITES: UNDERGROUND COAL GASIFICATION

Ertuğrul Karakaplan*

Pamukkale Üniversitesi Kale Meslek Yüksekokulu Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Denizli

ÖZET Denizli ve Muğla havzalarındaki linyitler, ağırlıklı olarak açık ocak işletmeciliğiyle üretilip termik santrallerde yakılmaktadır. Ancak bu klasik yöntemler; devasa dekapaj operasyonları, orman tahribatı, yüksek kül ve emisyon gibi sürdürülemez ekolojik ve ekonomik krizlere yol açmaktadır. Bu çalışmada, işletilemeyen kömürü yeryüzüne çıkarmadan yerinde (in-situ) sentez gazına dönüştüren Yeraltı Kömür Gazlaştırması (YKG) teknolojisinin bölge için uygulanabilirliği araştırılmıştır. Güncel literatür değerlendirmeleri, YKG'nin; orman örtüsünü koruması, kül bertarafını yeraltında çözmesi ve madencilik maliyetlerini düşürmesiyle geleneksel tekniklere üstünlüğünü kanıtlamaktadır. Kontrollü Geri Çekilebilir Enjeksiyon Noktası (CRIP) ve Temiz Kavite (Clean Cavern) gibi ileri yöntemler, yüksek verimlilik ve yeraltı suyunun korunmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) ile entegre edilen YKG teknolojisinin, Türkiye'nin temiz enerji hedefleri doğrultusunda stratejik ve ekolojik bir kurtuluş modeli sunduğu değerlendirilmiştir.

ABSTRACT Lignite seams in the Denizli and Muğla basins are primarily extracted via open-pit mining and combusted in thermal power plants. These traditional methods cause unsustainable ecological and economic crises, including massive stripping operations, forest destruction, high ash content, and emissions. This study investigates the applicability of Underground Coal Gasification (UCG) technology, which converts unmineable coal in-situ into syngas without surface extraction. Literature evaluations demonstrate the superiority of UCG over conventional techniques by preserving forest cover, resolving ash disposal underground, and reducing capital and operational costs. Advanced methods like the Controlled Retracting Injection Point (CRIP) and the Clean Cavern concept ensure operational efficiency and groundwater protection. Consequently, UCG technology integrated with Carbon Capture and Sequestration (CCS) presents a strategic and ecological rescue model for the region, aligning with Türkiye's clean energy objectives.

* *ekarakaplan@pau.edu.tr*

1. INTRODUCTION

Lignite reserves are of strategic importance for energy supply security in Türkiye. However, the low calorific value, high moisture, and high ash contents of the lignites in the Denizli and Muğla basins in Western Anatolia make it increasingly difficult to exploit these resources using traditional methods. Currently, the majority of the coal in these basins is extracted via open-pit mining due to the high geomechanical risks and costs associated with underground mining, and is burned directly in lignite-fired thermal power plants.

The massive stripping (overburden excavation) ratios reached by open-pit mining cause irreversible damage to regional ecosystems. Complete excavation of the surface topography to reach the coal leads to the destruction of forest lands and fertile agricultural areas. Even rational cost-reduction strategies, such as switching from diesel machinery to electrically driven excavators due to fluctuations in fuel prices, fail to fundamentally resolve the increasing per-ton production costs and environmental devastation. In the Muğla basin, the intense emissions and ash disposal problems caused by thermal power plants and open pits directly threaten local olive cultivation and beekeeping activities (Kantarcı, 2015). Additionally, the cancellation of the planned thermal power plant project in the Denizli Tavas-Avdan basin due to ecological sensitivities and social objections clearly indicates that classical coal mining has reached the limits of its social license to operate.

Against these multidimensional crises, Underground Coal Gasification (UCG), one of the most important pillars of clean coal technologies, offers an economically and ecologically sustainable alternative. UCG is based on the principle of converting coal in-situ within the seam into a clean synthesis gas (syngas) without being extracted to the surface (Bhutto et al., 2013). UCG increases the exploitable coal deposits by utilizing deep, low-grade, or thin seams that are unmineable using conventional methods (Burton et al., 2006). Lignite and sub-bituminous coals are highly desirable for UCG because they tend to shrink and crack upon heating, which naturally facilitates product gas flow within the underground reactor (Ghose and Paul, 2007). This study aims to analyze the operational, economic, and environmental dead-ends caused by open-pit mining and direct combustion processes in the Denizli and Muğla lignite basins in the light of current literature, and to evaluate the regional applicability of UCG technology.

The study area encompasses the Denizli and Muğla lignite basins located in Western Anatolia (Figure 1). The Denizli graben system hosts fragmented coal formations spread across a large portion of the province.

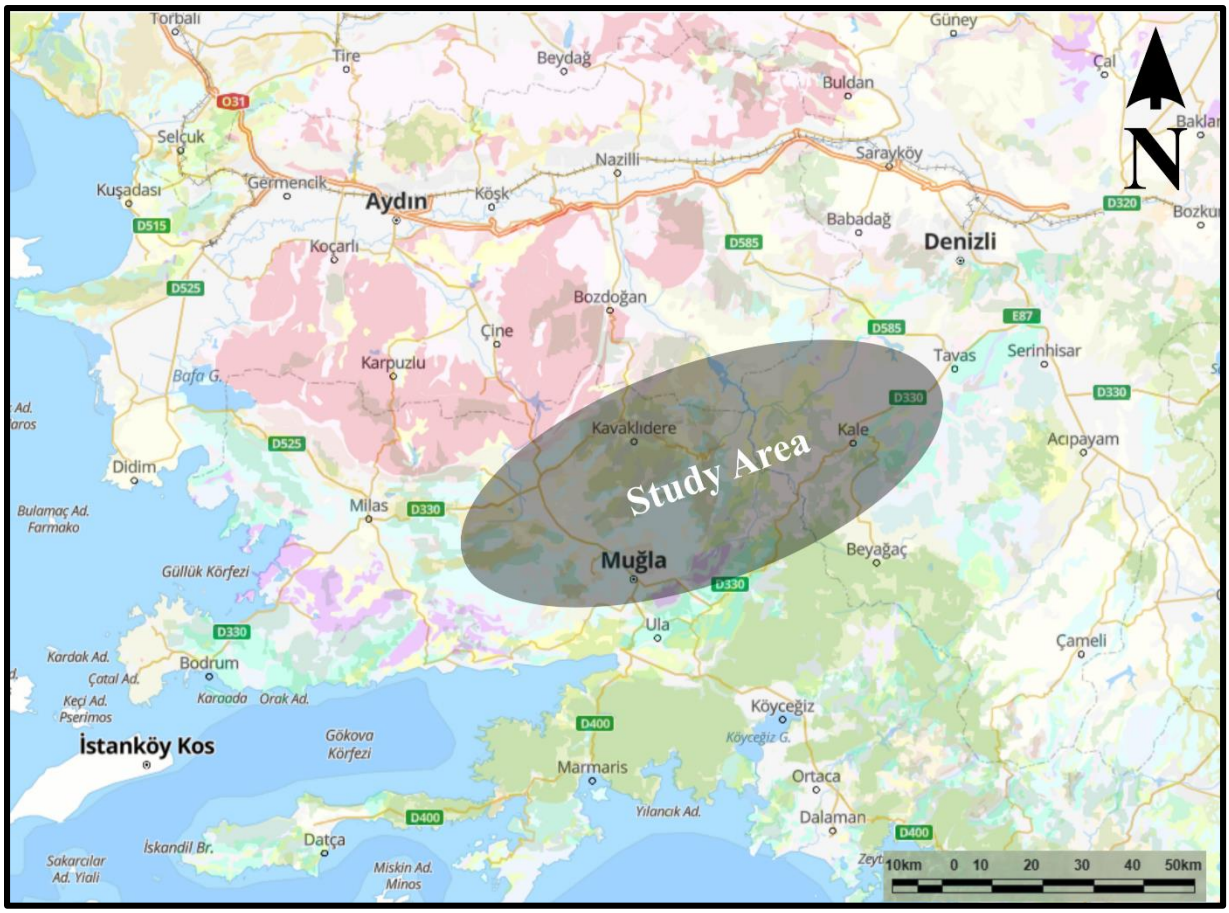


Figure 1. Location map of the study area encompassing the Denizli and Muğla lignite basins in Western Anatolia (Base map adapted from MTA, 2026).

2. METHODOLOGY AND LITERATURE REVIEW

Underground Coal Gasification (UCG) is the process of converting coal seams into syngas (comprising mainly hydrogen, carbon monoxide, and methane) by controlled in-situ combustion through production and injection wells without bringing the coal to the surface (Bhutto et al., 2013). The literature emphasizes the superiority of UCG technology in bringing low-calorie, deep, or traditionally high-risk lignite seams into the economy (Burton et al., 2006; Ghose and Paul, 2007).

Past field experiences have shown that in older UCG operations utilizing vertical injection wells, heat losses increased and the calorific value of the produced gas decreased over time as the rock at the reactor roof collapsed into the cavity (Camp, 2017). The Controlled Retracting Injection Point (CRIP) technology, which radically solves this operational problem, uses a horizontal injection well drilled along the coal seam instead of a vertical one (Figure 2) (Camp, 2017). The CRIP method allows the operator to retract the injection point to fresh coal, maintaining high gas quality and reducing heat loss to the overburden (Bhutto et al., 2013; Burton et al., 2006).

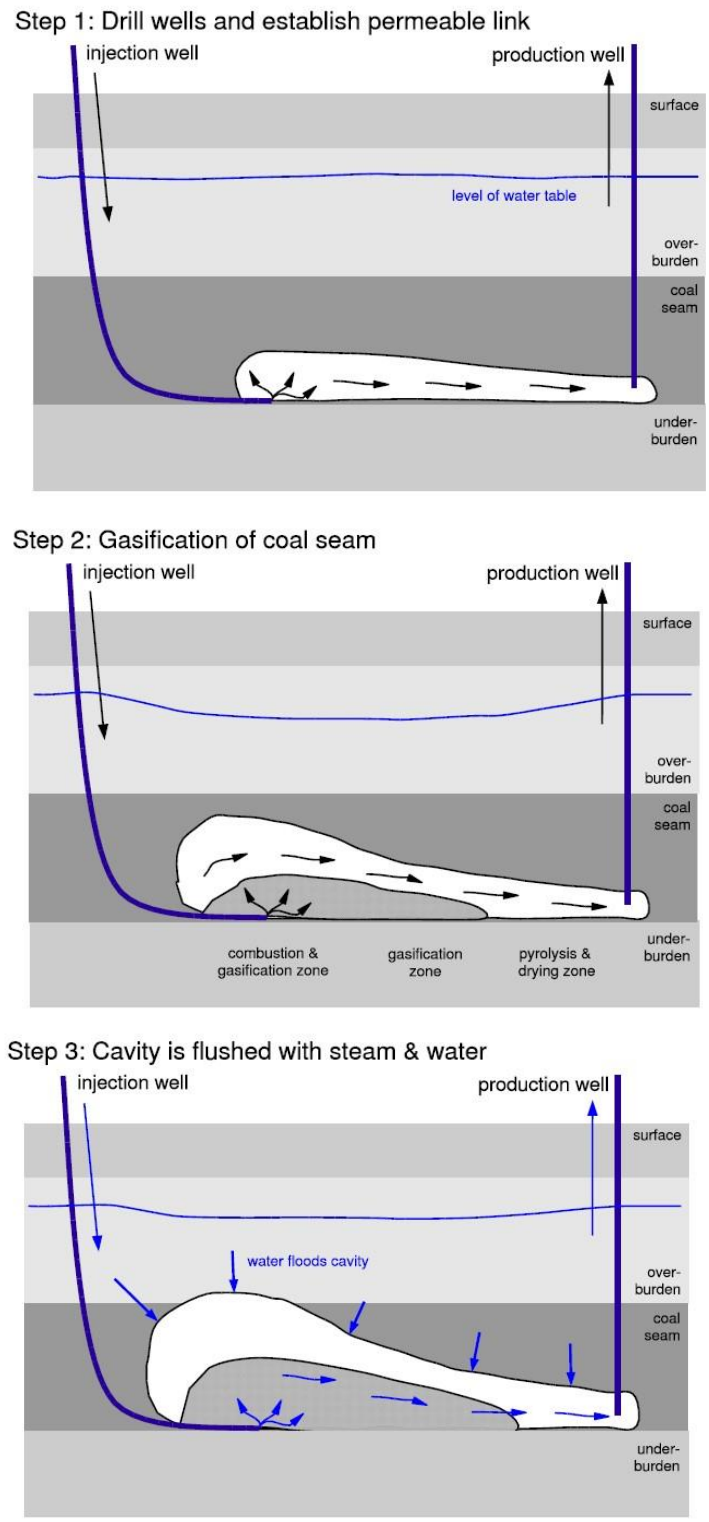


Figure 2. The sequence of UCG operations: (1) well drilling and link establishment via directional drilling, (2) coal seam ignition and controlled gasification, and (3) post-burn site clean-up by flushing the cavity with steam and water to remove potential contaminants (Adapted from Perkins, 2005).

The Denizli graben system hosts fragmented coal formations spread over a large part of the provincial borders. Studies conducted in the Mortuma formation in the Kale basin determined that coal seams reach depths of 426 m to 780 m (Elçi and Altay, 2020). These depths, which mean high rock pressure and support costs for classical

underground mining, are ideal operating conditions for UCG reactors as they provide high hydrostatic pressure that prevents gas leakage to the surface (Burton et al., 2006). Deeper coals also offer the opportunity to maintain much higher pressures in the reactor, resulting in higher methane content and a higher heating value gas (Burton et al., 2006). Furthermore, while the multi-seam structure modeled for the Avdan field (Türkmen, 2018) increases sterile rock excavation and quality dilution in open pits, UCG allows direct gasification of the coal without targeting the interburdens, particularly by utilizing directional drilling and the CRIP technology (Bhutto et al., 2013).

In the Muğla basin, the fundamental problem is the environmental destruction caused by the lignites. Ecological research stated that the intense dust emissions spreading from the open coal pits and thermal power plants in Muğla have brought olive cultivation and beekeeping activities in the region to a standstill (Kantarcı, 2015). Additionally, hydrogeological studies proved the leachate pollution caused by massive ash dams in the Yatağan region (Baba, 2001). As supported by UCG feasibility analyses (Ekim, 2011), when the gasification process takes place underground, most of the ash and non-combustible inorganic materials remain trapped in the reactor cavity (Burton et al., 2006; Ghose and Paul, 2007).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The conceptual findings obtained in this study show that traditional mining methods in the Denizli and Muğla lignite basins have reached their sustainability limits, making UCG technology a strategic necessity for the region. The integration of the UCG system offers advantages on two main axes: operational and environmental.

3.1. Operational Advantages and Cost Optimization

Stripping operations, which are the largest cost item of traditional open-pit mining, are completely eliminated with UCG technology (Burton et al., 2006). According to past Turkish Coal Enterprises (TKİ) data (Yıldırım, 1988), stripping ratios reaching up to 8.56 m^3/ton in the Muğla basin (Tınaz sector) push the operable limits in terms of mining economics. Although enterprises opting for electrically driven excavators instead of diesel machinery against global fluctuations in fuel costs is a rational risk management strategy, it does not fundamentally solve the excavation and transportation requirements. Because the UCG system reaches the coal seams via directional drilling from the surface, it eliminates capital investments for specialized coal mining, processing, and transportation (Burton et al., 2006).

As proven in the Rocky Mountain 1 field tests in the USA, CRIP-based UCG modules offer efficiency metrics and high gas quality that can compete with surface gasifiers (Camp, 2017). A comprehensive comparison of operational and environmental parameters between open-pit mining and UCG technology is presented in Table 1.

Table 1. Comparison of operational and environmental parameters between conventional open-pit mining and UCG technology.

Parameter	Conventional Open-Pit Mining (Muğla/Denizli)	UCG Technology (Proposed Model)
Overburden Excavation (Stripping)	Extremely high (e.g., 8.56 m^3/ton in Tınaz sector)	Zero stripping (Requires only directional well drilling)
Surface Ecosystem	Complete destruction of forest and agricultural (olive) lands	Surface topography and agricultural lands are fully preserved
Ash and Solid Waste	Requires massive surface ash storage dams	Non-combustible inorganics (ash/slag) remain trapped underground
Water Pollution Risk	Heavy metal leachate from surface ash dams threatens groundwater	Minimal risk as no surface ash disposal is required (Clean Cavern concept)
Air Quality	Intense dust emissions from excavation and transportation	No dust emissions; closed-system syngas production
Multi-Seam Structure Compatibility	Sterile interburdens cause quality dilution (calorific drop)	Targets only coal seams; zero sterile rock excavation and no dilution

3.2. Environmental Gains and Social License

The environmental crises created by coal production and consumption in the Muğla and Denizli basins irreversibly threaten the regional ecosystem. With the application of UCG technology, intense dust emissions originating from open-pit slopes and thermal power plant stacks will be prevented; the pressure on olive cultivation and beekeeping, which are the most critical livelihoods of Southwestern Anatolia, will be eliminated. Furthermore, since the heavy metals and non-combustible inorganic materials (ash) contained in the lignite are not brought to the surface but left in the underground reactor cavity, there will be no need for massive ash dams that poison groundwater in regions like Yatağan (Burton et al., 2006).

However, UCG carries potential risks of groundwater contamination and surface subsidence if not managed properly (Burton et al., 2006; Camp, 2017). The lack of "social license to operate", one of the biggest obstacles to realizing modern mining projects, was clearly seen in the cancellation of the Denizli Tavas-Avdan project due to ecological sensitivities. To mitigate groundwater risks, the "Clean Cavern" concept must be employed, which involves maintaining cavity pressures below the surrounding hydrologic confining pressures to ensure an inward flow gradient, followed by post-burn venting and steam flushing to remove contaminants (Camp, 2017).
Furthermore, UCG technology offers perfect integration with Carbon Capture and Sequestration (CCS) systems (Figure 3) (Bhutto et al., 2013; Burton et al., 2006; Ghose and Paul, 2007). When the syngas reaches the surface, the separated CO_2 can be injected back into the depleted UCG cavities or deep unmineable coal seams for safe

storage (Bhutto et al., 2013; Burton et al., 2006; Ghose and Paul, 2007). This in-situ approach, combined with CCS, is a conflict-free and sustainable paradigm shift that brings together environmental concerns and national energy supply security goals at the same table.

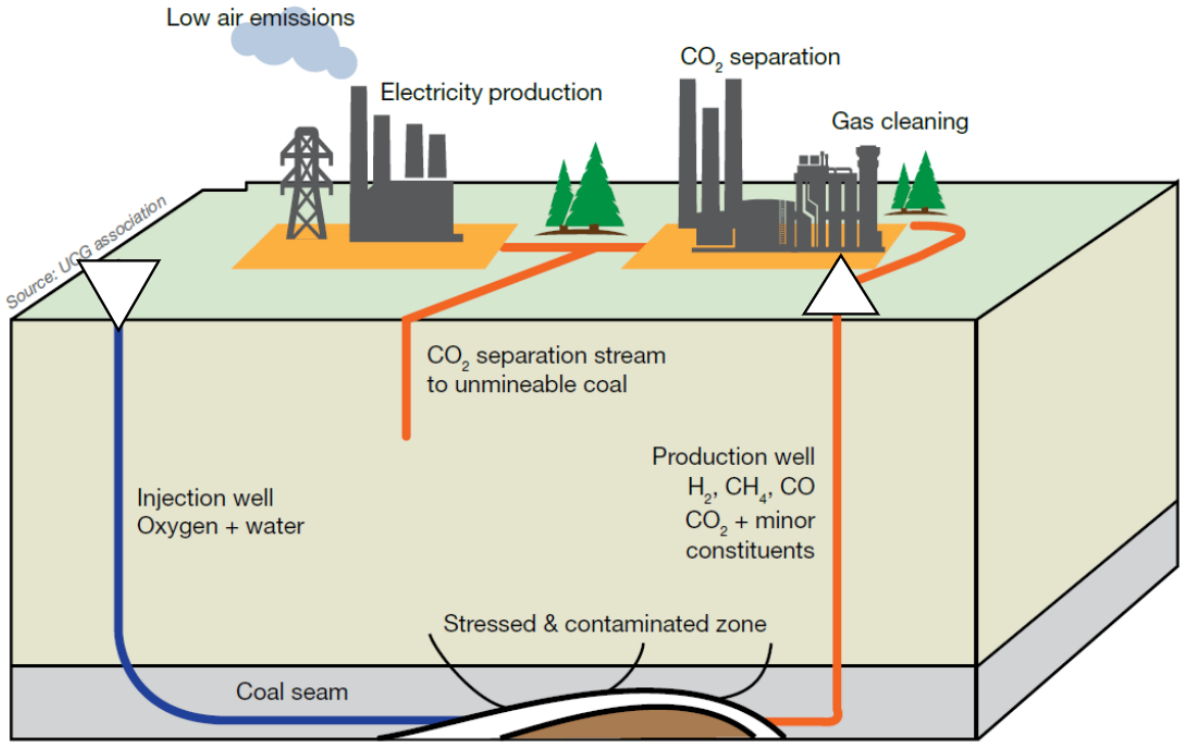


Figure 3. Schematic representation of the UCG-CCS process demonstrating low air emissions and safe underground CO_2 storage within the unmineable coal seams (Adapted from Sarhosis et al., 2015).

4. CONCLUSIONS

This conceptual study on the operational and environmental dynamics of the Western Anatolian lignite basins (Denizli and Muğla) clearly reveals that traditional open-pit mining and direct combustion processes have reached their sustainability limits. The main conclusions obtained around the vision of integrating Underground Coal Gasification (UCG) technology into the region are summarized below:

- **Prevention of Environmental Destruction and Social Crises:** Social license to operate crises, which resulted in the cancellation of the thermal power plant project in the Denizli-Avdan example, can be overcome with the in-situ production logic of UCG technology. Not extracting the coal to the surface will completely prevent forest destruction, the loss of agricultural lands, and intense dust emissions.

- **Clean Cavern and Water Protection:** The combustion of high-ash lignites in classical thermal power plants leads to massive ash dams. Since the non-combustible inorganic content of the coal is trapped in the underground gasification cavity in the UCG system, the ash disposal problem is solved at the

source. Adopting the Clean Cavern operational practice ensures that groundwater is protected from volatile organics and leachate.

- **Cost Optimization, Difficult Reserves, and CCS Synergy:** Stripping operations that threaten mining economics are completely reset with UCG. The deep (426-780 m) and multi-seam lignite structures in the region offer operational efficiency advantages for UCG reactors via the CRIP method. Moreover, integrating UCG with Carbon Capture and Sequestration (CCS) provides a viable mechanism to mitigate greenhouse gas emissions effectively by storing CO_2 underground.

In conclusion, UCG technology for the Denizli and Muğla lignite basins is not only an innovative mining method but also a mandatory paradigm shift that protects the ecosystem and fully complies with "Clean Coal" strategies. For this theoretical infrastructure to turn into practical application, it is recommended to urgently initiate pilot UCG reactor tests suitable for the geological and hydrogeological characteristics of the region.

REFERENCES

Baba, A. 2001. Yatağan Muğla Termik Santralı Atık Depolama Sahasının Yeraltı Sularına Etkisi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 25, 1, s. 1-12 [Turkish].

Bhutto, A.W., Bazmi, A.A., Zahedi, G. 2013. Underground coal gasification: From fundamentals to applications, Progress in Energy and Combustion Science, 39, pp. 189-214.

Burton, E., Friedmann, J., Upadhye, R. 2006. Best Practices in Underground Coal Gasification, Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL-TR-225331.

Camp, D.W. 2017. A Review of Underground Coal Gasification Research and Development in the United States, Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL-TR-733952.

Ekim, R. 2011. Yer altı Kömür Gazlaştırma Prosesinin Türk Kömür Yataklarına Uygulanabilirliği ve Maliyet Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 142 s. [Turkish].

Elçi, D., Altay, T. 2020. Kale Havzasındaki (Denizli, GB-Türkiye) Kömür İçeren Mortuma Formasyonunun Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20, 1, s. 110-125 [Turkish].

Ghose, M.K., Paul, B. 2007. Underground coal gasification: a neglected option, International Journal of Environmental Studies, 64, 6, pp. 777-783.

Kantarcı, M. D. 2015. Güneybatı Anadolu'da (Muğla) Açık Kömür Ocakları ve Termik Santrallardan Atmosfere Salınan Tozların Arıcılık ve Zeytinciliğe Etkisi, MUÇEP Teknik Raporu, Muğla, 24 s. [Turkish].

MTA, 2026. Yerbilimleri Harita Görüntüleyici, http://yerbilimleri.mta.gov.tr (Temmuz 2026) [Turkish].

Perkins, G. M. P. 2005. Mathematical modelling of underground coal gasification, Ph.D. Thesis, UNSW, Sydney.

Sarhosis, V., Koj, A., Nowak, D., Kapusta, K., Stanczyk, K., Thomas, H. R. 2015. Underground coal gasification: Moving towards commercialisation, From Fundamentals to Applications in Geotechnics, pp. 753-760.

Türkmen, Y. 2018. Avdan Kömür Sahası Özelinde Çok Damarlı Kömür Kaynaklarının Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 115 s. [Turkish].

Yıldırım, N. 1988. GELİ Müessesesinde Linyit Üretim Faaliyetleri, Madencilik Dergisi, 27, 3, s. 11-18 [Turkish].

ÖĞÜTMEDE DOĞAL TANE BOYUT DAĞILIMINI TEMSİL EDEN BİR ORTAMDA NÜFUS DENGE MODELİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK YENİ BİR DENEYSEL YAKLAŞIM

A NEW EXPERIMENTAL APPROACH FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A POPULATION BALANCE MODEL IN A MEDIUM REPRESENTING THE NATURAL PARTICLE SIZE DISTRIBUTION DURING GRINDING

Barış Akkaya*

Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak 67100, Türkiye

ÖZET Nüfus denge modelinde öğütme parametreleri, genellikle tek boyut grupları üzerinde gerçekleştirilen kesikli öğütme deneyleri ile belirlenmektedir. Buna karşın endüstriyel öğütme işlemi malzemenin doğal tane boyut dağılımı içinde gerçekleşmektedir. Bu çalışma, öğütme davranışı incelenecek malzemenin, endüstriyel öğütme işleminde olduğu gibi, laboratuvar ölçekte de doğal tane boyut dağılımında öğütülmesi durumunda, gerçek öğütme koşullarını daha iyi temsil edebilecek nüfus denge parametrelerinin elde edilebileceği hipotezi üzerine kurulmuştur. Çalışma, bu hipotez doğrultusunda, mevcut nüfus denge modelinin matematiksel altyapısını koruyan yeni bir deneysel yaklaşım önermektedir.

Burada, öğütme davranışı modellenecek esas malzeme olarak kuvars malzemesi seçilmiştir. Kuvarsın doğal tane boyut dağılımındaki öğütme ortamını temsil etmek amacıyla kullanılan yardımcı malzeme olarak ise kömür kullanılmıştır. Bu çalışmada, deneysel yöntem henüz tanıtım aşamasında olduğundan, yalnızca en büyük kuvars boyut grubu için öğütme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu boyut grubunun alt kömür boyut gruplarına dağılımı, öğütme sonrasında oluşan yeni boyut gruplarının kül analizleri yardımıyla belirlenmiş; böylece önerilen hesaplama yaklaşımının ilk kuvars boyutu üzerindeki uygulanabilirliği gösterilmiştir.

ABSTRACT Population balance model (PBM) parameters are generally determined from batch grinding tests performed on single-size particle classes. In contrast, industrial grinding processes take place under the natural particle size distribution of the material. This study is based on the hypothesis that, if the material whose grinding behavior is to be characterized is ground in the laboratory under its natural particle size distribution, as in industrial grinding, the resulting PBM parameters may better represent actual grinding conditions. Based on this hypothesis, a new experimental approach is proposed while preserving the mathematical framework of the conventional population balance model.

In the proposed method, quartz was selected as the material whose grinding behavior was to be modeled, whereas coal was used as an auxiliary material to represent the natural particle size distribution of the grinding environment. Since the experimental method is introduced only at the proof-of-concept stage in this study, grinding tests were carried out only for the coarsest quartz size fraction. The distribution of this quartz fraction into the underlying coal size fractions was determined through ash analyses of the newly formed size fractions after grinding. Consequently, the applicability of the proposed calculation procedure was demonstrated for the first quartz size fraction.

* *barisakkaya2010@gmail.com*

1. GİRİŞ

Öğütme işlemi, insanlığın bugün geldiği medeniyet seviyesinin başlıca mimarı olan fiziksel bir boyut küçültme işlemlerinden biridir. Gıdalardaki unun elde edilmesinden, elektronik cihazlar içindeki nadir toprak elementlerinin serbestleştirilmesine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Öğütme işlemi çok enerji tüketen, aynı zamanda da verimsiz bir işlemdir. Dünyamızda üretilen toplam enerjinin önemli bir bölümü kırma ve öğütme işlemlerinde tüketilmektedir (Napier-Munn vd., 1996). Bunun sadece % 5 -10'luk bir kısmının doğrudan boyut küçültmede kullanıldığı tahmin edilmektedir (Austin vd., 1984). Geriye kalan enerji ise ısı, ses ve sürtünme gibi farklı mekanizmalarla kaybolmaktadır (Austin vd., 1984).Geri kalan enerjinin çok büyük bir kısmı da (yaklaşık % 95-98) doğrudan boyut küçültme enerjisi dışında, boş değirmeni çalıştırmak için harcanır ve artık enerji (ısı, ışık, ses sürtünme ile kaybedilen enerji) olarak kaybolur (Austin vd., 1984). Bu nedenle, öğütme işleminin istenen tane boyut dağılımını, istenen miktarda sağlanabilmesi için değirmenlerin belli bir büyüklükte tasarlanması gereklidir.

Değirmen tasarımında tarihsel sıralamaya göre dört temel yaklaşım vardır. Bunlardan ilki; küresel üretim kapasitesi yöntemidir, ikincisi; özgül enerji yöntemi, üçüncüsü; Bond ve Charles yöntemleri ve dördüncüsü ve en etkili olanı Nüfus-denge modeli yöntemidir (Population balance method). Nüfus denge modeli, öğütme davranışını tanımlamak için geliştirilen en yaygın matematiksel yaklaşımlardan biridir (Austin vd., 1984; King, 2001). Bu modeldeki öğütme testlerine, tek boyut grubu için kesikli öğütme testleri denir. Bu mevcut yaklaşım matematiksel olarak sade olmakla beraber, dar bir boyut grubunda hazırlanmış bir ortam için ölçülen ufalanma özelliklerinin gerçek öğütme işlemlerinde oluşan ortamı dolaylı olarak temsil ettiği hipotezine dayalıdır. Ancak, gerçek öğütme koşullarında taneler dar bir boyut grubunda değil, değirmen içinde doğal tane boyut dağılımlarında ve birbiriyle sürekli bir etkileşim halinde ufalanmaktadır. Bu gerçek koşullar, mevcut nüfus denge modelinde yeniden değerlendirilmesi gereken, bu çalışmanın da temelini oluşturan yeni bir varsayımı meydana getirir. Bu varsayıma göre öğütme davranışı incelenen malzeme laboratuvar ölçeğinde gerçek öğütme şartlarındaki doğal tane boyutu ile öğütme testine tabi tutulmalıdır. Her ne kadar, nüfus denge modeli öğütme işleminin tasarımında mevcut en iyi model olsa da, enerji tüketiminin büyüklüğü ve hassasiyeti düşünüldüğün de belirtilen varsayım ile gerçek tane boyut dağılımları ile gerçek öğütme koşullarının hassas tahminin araştırılması, üzerinde durulması gereken bir konudur.

Bu çalışma, öğütme davranışı incelenen malzemenin eleme ile ayrılmış boyut gruplarının, doğal boyut dağılımını temsil eden yapay bir ortamda birlikte öğütülmesine dayanan yeni bir deneysel yaklaşım önermektedir. Burada önerilen deneysel yöntemin amacı, nüfus denge modeli parametrelerinin gerçek öğütme koşullarını daha doğru temsil edecek şekilde belirlenmesine katkı sağlamaktır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada kuvars öğütme davranışı incelenen malzemeyken, yardımcı malzeme olarak kömür örneği kullanılmıştır. Kuvars ve kömür örneklerinin tamamı ayrı ayrı önce bir merdaneli kırıcı, ya da el merdanesi ile kademeli olarak 1.180 mm altına kırılır. Her iki örnekte sırası ile 0.850, 0.600, 0.425, 0.300, 0.180 ve 0.106 mm'lik elekler ile boyut gruplarına ayırılırlar. Elde edilen boyut grupları sırasıyla, -1.180+0.850, -0.850+0.600, -0.600+0.425, -0.425+0.300, -0.300+0.180, -0.180+0.106 ve -0.106 mm (en alt elek tavasındaki malzeme) boyut aralıklarında olmak üzere 7 adettir.

Orjinal boyut gruplarına eleme sonucu ayrılan kuvars tartılmış ve orijinal boyut dağılımı belirlenmiştir. Ayrıca yardımcı kömür örneği de aynı boyut aralıklarına ayrılmışlardır. Kesikli öğütme işleminde kullanılacak değirmen olarak 16x20 cm'lik laboratuvar ölçekli bir bilyeli değirmen kullanılmıştır. Değirmen içindeki bilya şarj oranı %20, Malzeme/Bilya oranı yaklaşık 1/10'dur (4984 g. çelik bilya). Öğütme testleri kuru öğütme şeklinde uygulanmıştır. Bu değirmen içinde her bir seferde öğütülecek malzeme miktarına (yaklaşık 500 g.) ve kuvarsın orijinal boyut dağılımındaki miktar oranlarına bağlı olarak kuvars ve kömür boyut grupları hazırlanır. Hem kuvarsın hem de kömürün ayırılan boyut gruplarına ayrı ayrı kül analizleri uygulanır. Esas kuvars örneği olarak Limak tarafından üretilen CEN standart kumu kullanılmıştır. Çalışmada, CEN standart kumunun kuvars esaslı bir malzeme olduğu kabul edilmiştir. Yardımcı kömür örneği ise Zonguldak bölgesinden temin edilmiştir.

Daha sonra yöntemdeki öğütme testlerine geçilir. İki tür öğütme testi gerçekleştirilir. İlk tür öğütme testleri esas öğütme testleri, diğer öğütme testleri ise yardımcı öğütme testleri olarak isimlendirilmiştir.

Esas öğütme testlerinde kuvars boyut grubu, aynı boyut grubundaki kömür boyut grubu ile yer değiştirilir. Her bir tek seferde, iriden inceye doğru sadece biri kuvars ve diğerleri kömür boyut grupları (6 adet) olmak üzere tüm boyut grupları karıştırılarak 30 s'lik kesikli öğütme işlemine tabii tutulur. Öğütme işleminin ardından ürün değirmenden dikkatlice çıkarılır ve eleme işlemi ile aynı boyut gruplarına ayrılır. Her bir yeni boyut grubundan (7 boyut grubu) hassas bir şekilde kademeli olarak alınan 0.5 g'lık numuneler kül analizlerine tabii tutulur. Bu işlem sonucunda -1.180+0.850 mm boyutlu kuvars grubunun bundan ince olan kömür boyut gruplarına ne kadar ufalandığı başlangıçtaki kül oranlarındaki değişime göre hesaplanır.

Daha sonra sadece kömürün öğütüldüğü yardımcı öğütme testlerine geçilmiştir. Kömür boyut grupları ayrı bir şekilde yine yaklaşık 500'er g'lık miktarlarda, değirmende sırasıyla 30, 60 ve 90 s. süreyle öğütülürler. Bu öğütme işlemi ardından, her bir kömür boyut grubunun kendinden alt boyut gruplarına geçen kısımlarının kül analizleri yapıldıktan sonra kömüre bağlı kül içeriği dağılımı da hesaplanabilir. Bunun önemini bu noktada belirtmek faydalı olacaktır. Esas örnek olan kuvars, kül analizlerinde neredeyse hiçbir yanma kaybı göstermez ve geçtiği alt boyutlarda doğrudan bir kül içeriği artışına neden olur. Ancak bunun kesin olarak saptanması için, kömür boyut

gruplarının kendi aralarındaki alt boyut gruplarına geçen kül içeriğinin de, yardımcı öğütme testlerinin ardından yapılan boyut ve kül analizleri ile saptanması gerekir.

Esas öğütme testleri her bir kuvars boyut grubu için üç farklı sürede tamamlanır. İlk 30 s.'lik öğütme testinden sonra, kül analizi için gerekli örneklerin alındığı boyut grupları tekrar birleştirildikten sonra 30'ar s. iki defa daha sırayla değirmende öğütülür. Böylece toplamda 60 ve 90 s'lik ayrı ayrı öğütme işlemi ürünleri elde edilir. Aynı eleme, gruplandırma ve numune alma işlemleri bu farklı öğütme ürünlerine de uygulanır ve yeni kuvars boyut grubu dağılımı sonuçları elde edilir.

Tüm bu işlemler deneyin geri kalan kısımlarında boyut sırasına göre -0.850+0.600, -0.600+0.425, -0.425+0.300, -0.300+0.180 ve -0.180+0.106 mm'lik kuvars boyut grupları için tekrarlanır. Böylece, burada önerilen yönteme göre, elek tavasına geçmeyen 0.106 mm'den iri her bir kuvars boyut grubundaki (toplam 6 adet boyut grubu) malzeme (+0.106 mm.) için üç farklı sürede (30, 60 ve 90 s) toplam 18 öğütme testi yapılabilir.

Üç farklı öğütme süresine göre yapılan esas öğütme testlerinde, kuvars boyut grubu her seferinde değirmene tekrar gireceği için değirmen içindeki malzeme miktarı kadar (Yaklaşık 500 g) kuvars örneği toplamda bu 18 öğütme testi için teorik olarak yeterli olabilir. Ancak iriden inceye doğru 6 farklı kuvars boyut grubu incelenirken, diğer kömür boyut grupları, her bir kuvars boyut grubu için yeniden hazırlanmalıdır. Bu nedenle, esas öğütme deneylerinde kömür örneği miktarı teorik olarak kuvars miktarından daha fazla olmalıdır.

2.1. Boyut-Kütle Dengesi Teorik Alt Yapı

Mevcut nüfus denge modeli yaklaşımında, öğütme özellikleri incelenen malzeme boyut gruplarına ayırılır. Her bir boyut grubu değirmen içine belirli bir miktarda beslenir ve ardışık öğütme sürelerinde öğütüldükten sonra değirmen içi boşaltılır. Böylece farklı sürelerde kesikli öğütme işlemleri gerçekleştirilmiş olur. Öğütme işlemlerinden sonra değirmenden çıkarılan boyut grubu ürünü eleme işlemleri tekrar boyut gruplarına ayırılır (Austin, 1971; King, 2001). Burada yapılacak eleme işleminin ilgili boyut grubundan daha ince eleklerle yapılması gerektiğine dikkat edilmelidir. Öğütme ve ardından gelen eleme işlemlerinin ardından malzemeyle ilgili iki temel fonksiyon ve tesis için gerekli çalışma parametreleri elde edilir.

Temel fonksiyonlardan biri; Seçilim fonksiyonudur. Bu fonksiyon, ilgili boyut grubunun alt boyut gruplarına hangi sürede toplamda hangi oranda geçtiğini tanımlayan bir hız fonksiyonudur. S_iW_i ile sembolize edilir. Buradaki i alt indisi işleme giren boyut grubunun sıra numarasıdır. W ise i. boyut grubunun toplam örnek içindeki miktar oranıdır (%). Örneğin S_1W_1 birinci ve en büyük boyut grubunun kırılma hızı ya da seçilim fonksiyonunu temsil eder.

Diğer temel fonksiyon ise birikimli dağılım fonksiyonudur. Bu fonksiyon, ilgili boyut grubuna daha iri taneli boyut gruplarından kesikli öğütme sonucu toplu ve ayrı ayrı hangi oranlarda malzemenin ufalandığını gösterir. Birden fazla iri boyut grubundan birikimli olarak ilgili boyut grubuna ufalanarak gelen malzeme oranı B_{ij} ifadesi ile gösterilirken, tek tek iri boyut gruplarından gelen oranlar b_{ij} ifadesi ile gösterilir. Burada i alt indisi yine ilgili boyut grubunun numarasıdır. J alt indisi ise ilgili boyut grubuna öğütme işlemi ile ufalanarak malzemenin geldiği daha iri boyut gruplarını sembolize eder. Herhangi bir boyut grubundaki malzeme miktarının değişimi aşağıdaki Eşitlik 1'deki diferansiyel denklem ile ifade edilir (Austin ve Luckie, 1972; King, 2001).

$$dW_i/dt = -S_iW_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}\, S_jW_j \qquad (1)$$

Örneğin en büyük boyut grubundan (1. Boyut grubu) daha büyük boyut grubu olmayacağı için bu boyut grubundaki malzeme miktarının (W_1) zaman ile değişimini veren diferansiyel denklem Eşitlik 2'deki gibi gösterilir.

$$dW_1/dt = -S_1W_1 + 0 \qquad (2)$$

Ancak bir alttaki boyut grubu için durum daha farklıdır. Burada i indisi 2, j indisi ise 1'dir. Bunun için ilgili diferansiyel denklem de Eşitlik 3'de gösterilmiştir.

$$\frac{dW_2}{dt} = -S_2W_2 + b_{21}S_1W_1 \qquad (3)$$

Daha alt boyut grupları içinde S_i ve b_{ij} oranları boyut gruplarının kesikli öğütme testleri ile belirlenir. S_i değerleri *i*. Boyut grubundan farklı süredeki kesikli öğütmeler sonucunda, o grubun altına geçen tüm malzeme oranına göre belirlenir.

S_i, b_{ij} ve B_{ij} parametrelerine göre malzemeye özel bazı eğriler elde edilir. Bu eğrilerin eğimleri ve bazı özel durumlarına göre malzemeye ait karakteristik değişkenler bulunur. Bunlar ölçek büyütme için gerekli ampirik yaklaşımlar ve geçmişe dönük tecrübeler ile birleştirilerek ölçek büyütme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2 Yöntem

Önerilen yöntem, kuvars ve kömürün kül içerikleri arasındaki farktan yararlanmaktadır. Kuvars neredeyse tamamen kül olarak kalırken, kömür yalnızca kendi kül oranı kadar artık bırakmaktadır. Bu kül dengesi kullanılarak kuvarsın alt boyut gruplarına dağılımı ve buna bağlı olarak seçilim (S_i) ile kırılma dağılımı (b_{ij}, B_{ij}) fonksiyonları hesaplanabilmektedir."

Kuvarsın kendinden alt boyut gruplarına ne kadar ufalandığının belirlenmesi için kuvars ve kömür malzemesi arasındaki bir farktan yararlanma kurgusu

oluşturulmuştur. Bu fark, bu iki malzemenin kül içeriğidir. Farklı boyut gruplarındaki malzemelerin kül analizlerinde kuvarsın tamamı (99.58 %) kül olarak kalırken, kömür kül oranı (36 %) nispetinde yanmadan kalır. Bu çalışmadaki yöntem uyarınca, bu kül içeriği değişimindeki denge incelenerek, kuvarsın farklı boyut gruplarının kendinden ince boyut gruplarına toplamda ne kadar ufalandığı (seçilim fonksiyonları temsili) ve yine kendinden ince boyut gruplarına ayrı ayrı hangi birim oranda ufalandığının (birkimli dağılım fonksiyonları temsili) basit matematiksel işlemler ile nasıl hesap edilebileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada sadece bu hesaplama gösterileceğinden, mevcut yöntemdeki gibi tüm boyut grupları ayrı ayrı işleme konmamıştır. Sadece esas öğütme deneylerinde birinci kuvars boyut grubu, alt kömür boyut grupları ile karıştırılıp farklı üç sürede öğütülmüştür. Ayrıca bu ilk kuvars boyut grubunun ikinci kömür boyut grubuna hangi oranda kesin olarak geçtiğinin tespiti için ikinci kömür boyut grubunun yine üç farklı süre için kesikli öğütüldüğü yardımcı öğütme deneyleri yapılmıştır.

Daha önceki teorik bölümdeki Eşitlik 1 için gerekli parametrelerin oluşturulması tüm boyut gruplarının gerekli kesikli öğütmelerinin gerçekleştirilmesine bağlıdır. Bu çalışmada bu eşitliğin boyut grupları arasındaki malzeme miktarı dengesine göre yapılmadığı görülmelidir. Bu denge, boyut grupları arasındaki kül içeriği dengesine göre yapılmıştır. Kullanılan miktarlarında, tüm kuvars örneği miktarına ve boyut dağılımına göre hesaplanmış % birimler olarak ifade edildiğine dikkat edilmelidir.

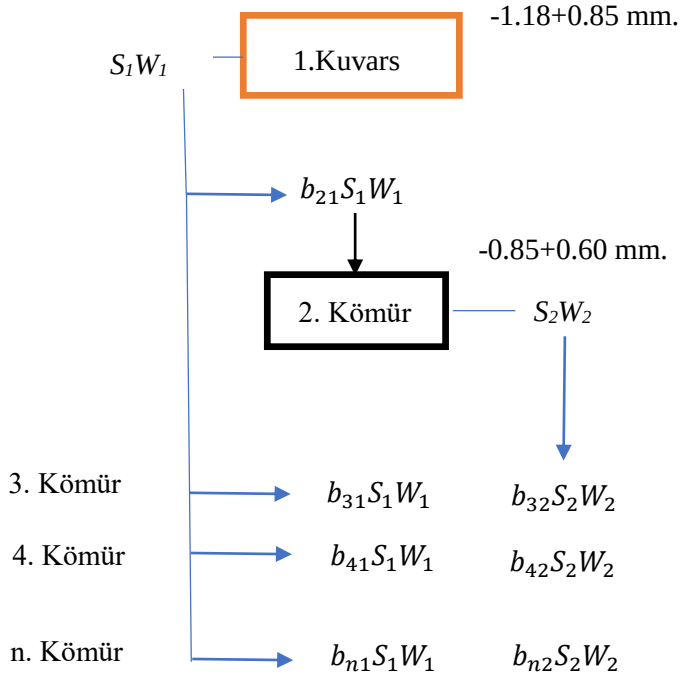
Sadece bu ilk iki boyut grubu için bu kül dengesi incelendiğinden Eşitlik 1'in bu çalışmadaki tanıtıma göre özelleştirilmesinde fayda olacaktır. Bu özelleştirmede kullanılacak formülün Eşitlik 1'deki karşılıklarıyla verilmesi yöntemin ve bu çalışmadaki sınırlı tanıtımının daha basit ifade edilmesini sağlayacaktır. Buna göre, herhangi bir boyut grubundaki başlangıçtaki kül içeriğine; besleme, bu boyut grubundan alt boyut gruplarına ufalanan kül içeriğine; kırılan (S_iW_i), bu boyut grubuna üst boyutlardan ufalanarak gelen malzemeye; gelen ($b_{ij}S_iW_i$), zamanla değişen miktar (dW_i/dt) son kül içeriği olarak kalan ve beslemedeki kül içeriği arasındaki fark benzetmesi yapılarak aşağıdaki Eşitlik 4 yazılabilir.

$$Besleme - kırılan + gelen = kalan \qquad (4)$$

Bu eşitlik Eşitlik 1'in özel bir durumunu ifade etmektedir. Bu çalışmadaki birinci ve ikinci boyut grubundaki kül içeriğinin değişiminin hesabı için özel olarak kullanılacaktır.

Deneysel çalışmalar kısmındaki ilgili çizelgeler yardımıyla, ilk kuvars boyut grubunun Eşitlik 1'deki karşılığı olan seçilim fonksiyonları (S_1W_1) için gerekli olan birim oranın hesabı gösterilecektir. Sonra ikinci boyut grubunun Eşitlik 1'deki karşılığı olan seçilim fonksiyonu (S_2W_2) için gerekli birim oranın hesabı gösterilecektir. Son olarak da bu iki seçilim fonksiyonu yardımıyla gerekli geri hesaplama yapılarak, ilk boyut grubunun yine Eşitlik 1 deki karşılığı olan birikimli dağılım fonksiyonu için ($b_{21}S_1W_1$) gerekli

birim oranın hesabı yapılacaktır. Bu hesaplamalar yapılırken Eşitlik 1'in özel hali olan Eşitlik 4 kullanılacaktır. Şekil 1'deki şemada, birinci ve ikinci boyut grubundaki kül içeriği dengesinin Eşitlik 1'deki karşılıkları görülmektedir. Tüm deneyler tamamlandığında esas kuvars malzemesinin diğer üçüncü ve daha ince boyutlar için istenen nüfus denge modeli öğütme değişkenleri elde edilebilir.



Şekil 1. Hesaplama Yöntemine Özel Kül İçeriği Değişimi Şematik Gösterimi.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalara geçmeden önce yöntemin uygulanmasına ilişkin ön deneyler verilmiştir. Bu yöntem temel olarak esas öğütme davranışı incelenecek olan kuvarsın orijinal boyut dağılımına ihtiyaç duyar. Ancak, birlikte değirmene girecek bu iki örneğin boyut dağılımlarını karşılaştırmak hem yöntemin genel prensibi hem de deneysel çalışmalarda ne kadar malzemenin gerekeceğini ön görmek için faydalı olacaktır. Aynı ön kırma işlemi ile 1.18 mm altına kırılan kuvars ve kömür örneklerinin boyut dağılımları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Esas ve Yardımcı Örneklerin Elek Analizi Sonuçları.

Boyut	Kuvars		Kömür	
(mm.)	%	%Σ Elek altı	%	%Σ Elek altı
-1.180 + 0.850	39.34	100.00	32.39	100.00
-0.850 + 0.600	17.31	60.66	15.03	67.61
-0.600 + 0.425	13.89	43.35	12.35	52.58
-0.425 + 0.300	6.12	29.46	8.14	40.23
-0.300 + 0.180	7.98	23.34	15.08	32.09
-0.180 + 0.106	6.43	15.36	6.53	17.51
-0.106	8.93	8.93	10.48	10.48
	100.00		100.00	

Çizelge 1'de görüldüğü gibi aynı şartlarda 1.18 mm altına ufalanmış her iki örnek de birbirine yakın bir boyut dağılımına sahiptir. Bu benzerlik bilinçli bir seçimden ziyade deneysel bir rastlantı olarak değerlendirilmelidir.

Değirmen içinde yaklaşık 500 g.'lık bir malzeme öğütüleceğinden, esas kuvars örneğinde bu yaklaşık miktarın % 39.34'lük oranına karşılık yine yaklaşık olarak 196.7 g'lık miktarı temsili ve teorik olarak alınmalıdır. Boyut grubu numune miktarlarının temsili olarak hazırlanmasında mümkün olduğunca bu oranlara bağlı kalınmaya çalışılmalıdır. Buna göre, ilk değirmen beslemesinin -1.180 + 0.850 mm'lik birinci boyut grubu hazırlanmıştır.

Esas öğütme deneylerinde değirmene beslenecek diğer boyut grupları da kömür boyut gruplarıdır. Onlarda kuvarsın orijinal boyut dağılımına göre önceden ayırılmış olan kömür boyut gruplarından temsili olarak alınıp tartılmış ve kuvars boyut grubu ile karıştırılmıştır. Çizelge 2'de Esas öğütme deneylerinde değirmene beslenen ilk boyut karışımındaki malzeme miktarı, yüzde oranı ve boyut gruplarının kül oranları belirtilmiştir. Karışımdaki boyut grupları oranlarının esas kuvars örneği boyut dağılımına birebir uyması mümkün değildir. Ancak mümkün olabildiğince bu oran gerçek öğütme koşulları için korunmaya çalışılmalıdır.

Çizelge 2. Esas Öğütme Deneylerinde Değirmene Beslenen Malzeme Özellikleri.

Sıra	**Malzeme**	**Boyut (mm.)**	**g.**	**%**	**Σ%**	**Kül %**	**Kül İç**	**ΣKül**
1.	Kuvars	-1.180 + 0.850	199.7	39.58	100.00	99.57	39.41	61.03
2.	Kömür	-0.850 + 0.600	87.9	17.42	60.42	36.68	6.39	21.62
3.	Kömür	-0.600 + 0.425	69.5	13.77	43.00	39.40	5.43	15.23
4.	Kömür	-0.425 + 0.300	30.7	6.08	29.23	34.17	2.08	9.80
5.	Kömür	-0.300 + 0.180	39.9	7.91	23.15	33.82	2.68	7.72
6.	Kömür	-0.180 + 0.106	32.2	6.38	15.24	32.86	2.10	5.04
7.	Kömür	-0.106	44.7	8.86	8.86	33.20	2.94	2.94
			504.6	100.00			61.03	

Çizelge 2'den de görülebileceği gibi, kuvarsın tamamı kül analizlerinde yanmadan kaldığı için tamamıyla küle eş değer kabul edilebilir. Bu durum, bu çalışmadaki yöntemin dayandığı temel noktalardan biridir. Bu ilk değirmen besleme örneği karışımı 30 s süre ile bilyeli değirmende kesikli olarak öğütüldükten sonra, değirmen ürünü boşaltılarak yeniden ilgili boyut gruplarına ayırılmış ve kül analizleri yapılmıştır. Bu işlemin ardından boyut grupları tekrar birleştirilmiş ve aynı işlem iki ayrı 30'ar s'lik ardışık öğütme ile iki defa daha tekrarlanmıştır. Böylece sırasıyla toplamda 60 ve 90 s sonundaki öğütme ürünlerin de boyut analizleri ve kül oranları belirlenmiştir. Farklı sürelerde öğütme sonucu elde edilen veriler ve bunların besleme karışımı ile karşılaştırılması Çizelge 3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. Boyut gruplarındaki miktar kül oranlarındaki değişim.

		Besleme		30 s.		60 s.		90 s.	
Sıra	**Malzeme**	**%**	**Kül**	**%**	**Kül**	**%**	**Kül**	**%**	**Kül**
1.	**Kuvars**	**39.58**	**99.57**	**28.45**	**98.79**	**21.34**	**98.71**	**15.65**	**98.64**
2.	Kömür	17.42	36.68	16.25	62.89	14.85	69.08	12.93	79.64
3.	Kömür	13.77	39.40	14.58	44.90	15.19	57.27	15.33	65.18
4.	Kömür	6.08	34.17	8.77	43.64	10.63	52.97	12.42	55.54
5.	Kömür	7.91	33.82	12.99	41.43	15.91	47.45	18.16	51.03
6.	Kömür	6.38	32.86	7.14	41.12	8.49	43.01	9.75	45.71
7.	Kömür	8.86	33.20	11.82	37.16	13.57	39.42	15.76	41.60
		100.00		**100.00**		**100.00**		**100.00**	

Yöntem bölümünde de belirtildiği gibi burada tamamıyla değirmen içindeki kül içeriğinin değişimi üzerine kurulan bir nüfus denge modeli kullanılmaktadır. Birinci boyut grubu olan kuvarsın (kül olarak değerlendirilir) hangi oranda alt kömür boyutlarına geçtiğini görmek için Çizelge 3'deki kül oranlarının toplam kütle içindeki oranlarının başka bir deyişle, içeriklerinin ayrıca hesaplanması gereklidir. Bu nedenle, her bir boyut grubundaki kül içeriğinin değişimi de Çizelge 4'de belirtilmiştir. Çizelge 4'de ayrıca öğütme süresine göre boyut gruplarındaki kül içeriklerinin farklı sürelerde kesikli öğütme işlemi ile ne kadar değiştiği de ΣΔKül% ifadesi ile gösterilmiştir.

Çizelge 4. Boyut Gruplarındaki Kül İçeriklerinin Değişimi.

		Besleme	30 s.		60 s.		90 s.	
Sıra	**Malzeme**	**Kül iç.**	**ΣΔKül%**	**%**	**ΣΔKül%**	**%**	**ΣΔKül%**	**%**
1.	Kuvars	**39.41**	-11.3	28.11	-18.35	21.06	-23.98	15.43
2.	Kül	6.39	+3.83	10.22	+3.87	10.26	+3.91	10.30
3.	Kül	5.43	+1.12	6.55	+3.27	8.70	+4.56	9.99
4.	Kül	2.08	+1.75	3.83	+3.55	5.63	+4.82	6.90
5.	Kül	2.68	+2.70	5.38	+4.87	7.55	+6.59	9.27
6.	Kül	2.10	+0.84	2.94	+1.55	3.65	+2.36	4.46
7.	Kül	2.94	+1.45	4.39	+2.41	5.35	+3.62	6.56
		61.03	+0.39	61.42	+1.17	62.20	+1.88	62.91

Burada birinci ve ikinci boyut gruplarının renkli işaretlendiğine ve sadece 1. Boyut grubunun kuvars, onun altındaki diğer boyut gruplarının ise kül olarak isimlendirildiğine dikkat edilmelidir.

Bu çalışmada önerilen orijinal yöntemde, ilk kuvars boyutunun seçilim fonksiyonu (S_1W_1) için bu boyuttan toplamda ne kadar alt boyut gruplarına geçtiği Çizelge 4'den kolayca bulunur. İlk kuvars boyutundan farklı öğütme sürelerinde, alt boyut gruplarına sadece b_{21} oranı için gerekli hesaplamalar yapılacaktır. Bu nedenle, kömürün kül içeriğinin değişimi için ayrı kesikli öğütme deneyleri yapılmıştır.

Bu noktada ikinci boyut grubundaki kül içeriğinin tamamının kuvars boyut grubundan ufalanarak gelmediği dikkate alınmalıdır. Öğütme öncesinde bu boyutta bulunan külün bir kısmı da öğütme sonrasında aynı boyutta kalabilmektedir.

Çizelge 5'de Kömürün ikinci Boyut grubunun (-0.850+0.600 mm.) kesikli öğütme testleri sonucu alt boyut gruplarına geçen miktarları ve kül oranları verilmiştir. Bu kül oranları, birinci boyut grubundaki kuvarsın gerçekte hangi oranlarda (Eşitlik 1'deki $b_{21}S_1W_1$ temsili) ikinci boyut grubuna geçtiğini belirlemedeki geri hesaplamalarda çok önemlidir.

Çizelge 5. İkinci Kömür Boyut Grubunun Kesikli Öğütme Sonucu Kül Oranları.

	30 s.			**60 s.**			**90 s.**		
Sıra	**M%**	**Kül%**	**İçerik%**	**M%**	**Kül%**	**İçerik%**	**M%**	**Kül%**	**İçerik%**
2.	48.0	32.9	15.8	33.0	31.1	10.3	28.0	30.9	8.7
3.	20.0	33.2	6.6	15.0	34.2	5.1	14.0	31.5	4.4
4.	16.0	35.1	5.6	18.0	33.9	6.1	15.0	34.1	5.1
5.	8.0	37.2	3.0	17.0	36.1	6.1	20.0	35.8	7.2
6.	5.0	36.4	1.8	16.0	35.7	5.7	10.0	36.7	3.7
7.	3.0	35.9	1.1	11.0	35.5	3.9	13.0	35.8	4.7
			33.9			37.2			33.8

Çizelge 5'de de görüleceği gibi ikinci boyut grubundaki kül içeriğinin (6.39 br.) bir kısmı farklı öğütme süreleri sonunda yine bu boyutta kalmış ama bir kısmı da (S_2W_2 temsili) üçüncü ve diğer alt boyutlara kırılmıştır. Bu boyutlara ufalanarak geçmiş kısımların kül analizleri ile kül içeriğinin değişimi ayrı ayrı ve birikimli olarak hesaplanabilir. Bu çalışmamızda hesaplama yönteminin tanıtımı amacıyla, sadece ilk iki boyut grubundaki kül içeriği değişimi gösterileceğinden, bu boyut grubundaki kül içeriği değişiminin birikimli olarak hesaplanması yeterlidir.

Çizelge 6'da kül içeriklerinin değişimi gösterilmiştir. İkinci boyut grubundan hangi orandaki kül içeriğinin (S_2W_2 temsili) birikimli olarak alt boyut gruplarına geçtiği bilinirse ilk boyut grubundaki kuvarsın gerçekte ne kadarının ($b_{21}S_1W_1$ temsili) ikinci boyut grubuna geçtiği gerekli geri hesaplama ile net bir şekilde bulunabilir.

Çizelge 6 İkinci Kömür Boyut Grubu Kül İçeriğinin Alt Boyut Gruplarına Dağılımı.

	30 s.			**60 s.**			**90 s.**		
Sıra									
2.	15.8	46.6	100.0	10.3	27.7	100.0	8.7	25.7	100.0
3.	6.6	19.5	53.4	5.1	13.7	72.3	4.4	13.0	74.3
4.	5.6	16.5	33.9	6.1	16.4	58.6	5.1	15.1	61.3
5.	3,0	8.9	17.4	6.1	16.4	42.2	7.2	21.3	46.2
6.	1.8	5.3	8.5	5.7	15.3	25.8	3.7	11.0	24.9
7.	1.1	3.2	3.2	3.9	10.5	10.5	4.7	13.9	13.9
	33.9	100.0		37.2			33.8		

4. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

İlk olarak yöntem bölümünde belirtilen Eşitlik 4'deki bu çalışmaya özel kül içeriği dengesi ile Eşitlik 1'deki genel diferansiyel denklemi arasındaki benzetişimi burada Eşitlik 5'te göstermekte fayda vardır.

$$\frac{dW_1}{dt}("kalan - besleme") = -S_1W_1("kırılan") + b_{21}S_1W_1\,("gelen") \quad (5)$$

Çizelge 4'e göre kuvars boyut grubundan 39.41 br (%) 30, 60 ve 90 s'de sırasıyla 11.3 br, 18.35 br ve 23.98 br. oranlarda ufalanma olmuştur. Bu değerler Eşitlik 1 genel diferansiyel denkleminde $-S_1W_1$ ifadesini temsil etmektedir. Böylece seçilim fonksiyonunun hesaplanması için gerekli ilk bileşen elde edilmiştir. Birinci kuvars boyut grubu için istenilen denklem Eşitlik 6'daki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dW_1}{dt}("kalan - besleme") = -S_1W_1("kırılan") \quad (6)$$

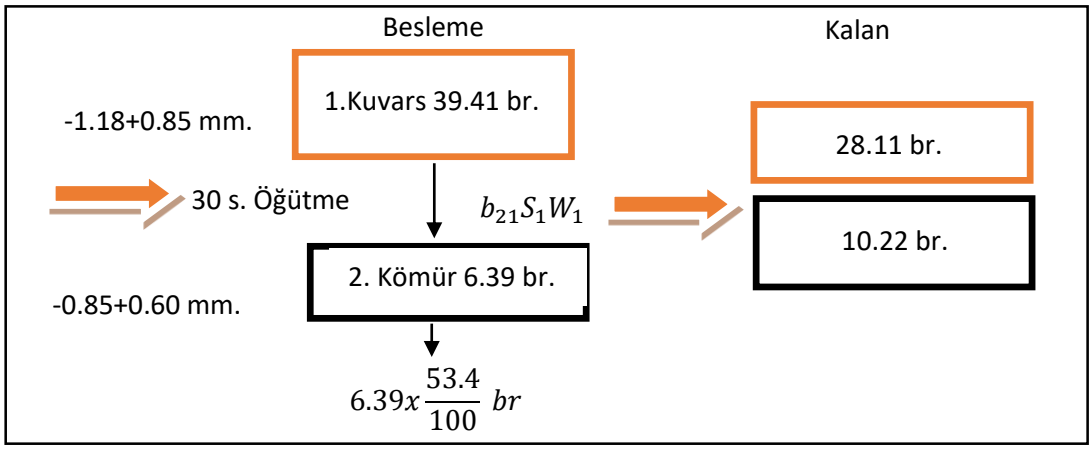
Bu eşitliğin özel durumu ise Eşitlik 7,8 ve 9'da verilmiştir.

$$28.11 - 39.41 = -11.30 \quad (7)$$

$$21.06 - 39.41 = -18.35 \quad (8)$$

$$15.43 - 39.41 = -23.98 \quad (9)$$

Eşitlik 5'deki matematiksel kül içeriği dengesi kurularak ikinci boyut grubuna, kuvars boyut grubundan hangi birim oranda ($b_{21}S_1W_1$ temsili) malzeme ufalandığı geri hesaplanabilir. Bunun için, ikinci kömür boyutundaki kül içeriğindeki artış (kalan-besleme) ile beraber bu boyut grubundan ne kadarlık (S_2W_2 temsili) bir kül içeriğinin daha ince boyut gruplarına geçtiğini bilmemiz gereklidir. Bunun için de yardımcı kömür öğütme testlerindeki kül içeriklerinin değişimini incelememiz gereklidir. Ancak, bu hesaplamaya geçmeden önce, bu durumu sadeleştirmek için sürecin sadece 30 s'lik öğütme için basit bir şeması Şekil 2'de belirtilmiştir.



Şekil 2. Birinci ve ikinci Grupların Kül İçeriği Değişiminin Şematik Gösterimi.

Burada Çizelge 6'da ikinci boyut grubundaki kömürün yardımcı kesikli öğütme deneylerinde alt boyut gruplarına geçen kül içeriği oranının farklı öğütme süreleri (30, 60 ve 90 s.) için sırasıyla 53.4, 72.3 ve 74.3 % olduğu saptanmıştır. Bu oranların, Eşitlik 1'deki $-S_2W_2$'nin ve özel Eşitlik 4'deki de kırılan ifadesinin bir temsili olduğu kurgusu ile Eşitlik 10'da ikinci boyut grubunun kül içeriği dengesi kurulmuştur.

$$b_{21}S_1W_{1(\text{gelen})} + 6.39_{(\text{besleme})} - 6.39 * \frac{53.4}{100}_{(kırılan)} = 10.22\ br_{(kalan)} \quad (10)$$

Bu eşitlik çözülürse $b_{21}S_1W_1$ değeri 7.24 birime karşılık gelir. Bu durum şunu gösterir kuvarsın ilk boyut grubunun (- 1.180 + 0.850 mm.) kül içeriğinin (39.41 br) 11.30 birimi 30 s'de 0.850 mm'lik eleğin altına geçmiş. Bu 11.30 birimin de 7.24 birimi de ikinci kömür boyutu (- 0.850 + 0.600 mm.) içine ufalanıp orada kalmıştır. Burada b_{21} oranı 7.24 birimin 11.30 birime oranıdır. Bu oran 64.1 % dir. Bu hesaplamalar 60 ve 90 s için de tekrarlanmıştır ve sırasıyla Eşitlik 11 ve 12'de gösterilmiştir.

$$b_{21}S_1W_{1(\text{gelen})} + 6.39_{(\text{besleme})} - 6.39 * \frac{72.3}{100}_{(kırılan)} = 10.26\ br_{(kalan)} \quad (11)$$

$$b_{21}S_1W_{1(\text{gelen})} + 6.39_{(\text{besleme})} - 6.39 * \frac{74.3}{100}_{(kırılan)} = 10.30\ br_{(kalan)} \quad (12)$$

60 ve 90 s.' İçin $b_{21}S_1W_1$ temsili değerleri sırasıyla 8.49 br ve 8.66 br'dir. Bu sonuca göre, ilerleyen sürelerde kuvarsın kül içeriğinin (39.41 br) sırasıyla 18.35 ve 23.98 birimi alt boyut gruplarına geçmiş. Bunların da sırasıyla 8.49 ve 8.66 birimi ikinci boyutta kalmıştır. Buna göre 60 ve 90 s'lik öğütme testleri sonucu sırasıyla 46.27 % ve 36.11 %'lik b_{21} oranları elde edilmiştir.

4.1 TARTIŞMA

Bu çalışmadaki temel tartışma, mevcut yöntemlerde her bir kuvars boyutunun ayrı ayrı kesikli öğütme testlerine tabi tutulmasıdır. Gerçek öğütme şartlarında ise, bu boyut grupları birlikte değirmene beslenmektedir. Bu çalışma, deneysel çalışmalarda da incelenen esas malzemenin, doğal tane boyut dağılımını temsil eden yardımcı bir malzeme ortamında öğütülmesinin, gerçek öğütme şartlarını taklit etmede yeni ve önemli bir adım olabileceği iddiası üzerine kurulmuştur.

Literatürde buna benzer bir yaklaşım olarak Kelsall yöntemi gösterilebilir. Austin vd. (1984)'te aktarıldığı üzere, Kelsal, Reid ve Restarick'in 1967 ve Kelsall ve Reid'in 1965 yılındaki çalışmasında sürekli çalışan bir kalsit değirmeni içine kuvars örneği eklenmiş ve farklı süreler sonunda değirmen çıkışı ürün örneğinden kalsitin çözündürülmesiyle zamanın bir fonksiyonu olarak kuvarsın boyut dağılımı

belirlenmiştir. Bu yöntemin yoğun işçilik gerektirmesi ve değirmenden sabit doluluk koşullarında örnek alınamaması gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Austin vd. (1984)'te aktarıldığı üzere, Gardner ve Sukanjnajtee 1973 ve Gardner, Rogers ve Verghese 1980 yılında sürekli çalışan değirmendeki kırılma ve değirmen içindeki kalma süresini izlemek için radyoaktif izleme malzemeleri kullanmışlardır. Snow ve Meloy büyük ölçekli değirmenlerde izleme tekniklerini kullanmışlardır. Ancak bu girişimler sınırlı başarılar elde etmiştir. Günümüzde en yaygın yaklaşım, tek boyut grupları üzerinde gerçekleştirilen kesikli öğütme testlerine dayanan nüfus denge modelidir (Austin vd., 1984).

Bu çalışmada önerilen yöntem de temelinde bir izleme tekniği olmakla birlikte tek boyutun grubunun kesikli öğütme testi metodunun bir modifikasyonudur. Kuvarsın yardımcı bir kömür malzemesi içindeki izlenmesi kurgusuna dayalıdır. Kuvars ile yardımcı kömür örneğinin sırasıyla yer değiştirdiği esas öğütme testleri (doğal tane boyut dağılımını temsil eden yardımcı malzeme ile gerçekleştirilen deneyler), bu çalışmadaki yöntemin özgün deneysel kısmıdır. Yardımcı kömür örneğinin öğütme testleri ise, kül analizlerinin eklenmesi dışında mevcut tek boyut grubu kesikli öğütme testleri ile aynıdır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, endüstriyel öğütme işleminin daha gerçekçi temsil edilmesine yönelik, mevcut deneysel yöntemlerin temel prensiplerinden de yararlanarak yeni bir deneysel yöntem önerisi getirmektedir.
Buradaki çalışma, mevcut tek boyut grubunun kesikli öğütülmesinin endüstriyel öğütme ortamını temsil etmede yetersiz kalabileceği hipotezine dayanmaktadır. Bu hipoteze göre tek boyut grupları, endüstriyel ölçekte hangi oranda değirmen içerisinde bulunuyor ise o oranda laboratuvar ölçekli kesikli öğütmeye tabi tutulmalıdır. Buradaki hipotezin gelecekte deneysel olarak doğrulanması, son derece enerji yoğun bir faaliyet olan öğütme işleminde başta işletmelere, sonrada uzun vadede tüm gezegene önemli faydalar sağlayabilir.

Şimdilik, yöntem sadece ilk kuvars boyut grubu üzerinden gösterildiğinden, mevcut yaklaşımlara sağlayabileceği olası katkılar nicel olarak değerlendirilememektedir. Ancak, deneysel çalışmalarda sunulan veriler kullanılarak, kül içeriği dengesine dayanan bu yönteme göre, esas ve yardımcı öğütme testlerinin sırasıyla diğer kuvars boyut grupları ve yardımcı kömür boyut grupları için tamamlanması ile gerekli öğütme fonksiyonları rahatça hesaplanabilir. Böylece, mevcut nüfus denge modelleri ile gerekli kıyaslamalar da yapılabilir.

Burada, sadece gerçek öğütme şartlarını ön görme işlemlerinde yeni bir yaklaşımın kapısının aralanmaya çalışıldığı fark edilmelidir. Buna göre, tanıtılan yöntemin nihai bir sonucu göstermediği ve seçilen esas ve yardımcı malzemelerin seçiminin nihai bir karar olmadığı da vurgulanmalıdır. Örneğin; yardımcı malzeme olarak çok daha düşük

küllü bir kömür kullanılarak yöntemin matematiksel hassasiyeti arttırılabilir. Ancak bu durumda esas örnek ile yardımcı örnek arasındaki öğütülebilirlik/ ve boyut dağılımlarının da farklılaşabileceği durumları dikkate alınmalıdır.

Bu yaklaşım, mevcut tek boyut grubu kesikli öğütme testlerinin matematiksel temelini değiştirmeden nüfus denge modeli parametrelerinin gerçek öğütme ortamını daha iyi temsil eden deneysel koşullar altında belirlenmesine yönelik yeni bir deneysel çerçeve önermektedir.

KAYNAKLAR

Austin, L.G. (1971). "A Review Introduction to the Mathematical Description of Grinding as a Rate Process." Powder Technology, 5(1). 1-17.

Austin, L.G., Klimpel, R.R. & Luckie, P.T. (1984). *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*. Society of Mining Engineers of AIME, New York, 561 s.

Austin, L.G. & Luckie, P.T. (1972). "Methods for Determination of Breakage Distribution Parameters." Powder Technology, 5(4) 215-222.

King, R.P. (2001). *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D. & Kojovic, T. (1996). *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland.

EXTRACTION OF CARBON FIBER PITCH PRECURSORS FROM KISRAKDERE COAL USING SOLVENT-ASSISTED SUPERCRITICAL CO_2 LIQUEFACTION

Berkan SÖZEN[1], Ahmet Efe AYGÜN[1], Ensar Eray METE[1], Kerim ÇELIK[1], Yunus Emre ÇAVDAR[1], M. Fatih Can[2], Feridun BOYLU[1], Emel Muşdu[3], Suat Çağan Uğur[3], Nesli Küçüktepe[3], Mehmet Sabri ÇELİK[1]*

[1] Istanbul Technical University, Mineral Processing Engineering Dept., Istanbul, Türkiye
[2]Afyon Kocatepe University, Mining Engineering Dept., Afyon, Türkiye
[3] TKİ Genel Müdürlüğü, Ar-Ge ve Yeni Teknoloji Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

ABSTRACT Carbon fiber production is dominated globally by polyacrylonitrile-based precursors, motivating the search for lower-cost feedstocks derived from abundant low-rank coals. In this work, the liquefaction of Soma-Kısrakdere lignite/semi-bituminous coal was investigated as a route to pitch precursors suitable for melt spinning. The coal was characterized by proximate, ultimate, and Fourier-transform infrared analysis, confirming its high aromaticity and low ash content as favorable properties for pitch precursor development. Liquefaction was performed in a supercritical carbon dioxide extraction system at 400–450 °C and 100 bar, employing tetralin, toluene, and their mixtures as co-solvents, with cooking times of up to two hours and, in selected experiments, pyridine as a swelling agent. Liquid products recovered from two sequential separators were distilled by rotary evaporation. Coal dissolution yields of approximately 50%, 30%, and 40% were obtained with tetralin, toluene, and a tetralin–toluene mixture, respectively, whereas carbon dioxide alone exhibited limited solvency. In a limited set of experiments, the addition of pyridine increased dissolution to 53.4%, consistent with a swelling index of 1.74, suggesting a preliminary link between swelling and dissolution that warrants further investigation. Elevated temperature preferentially directed higher-molecular-weight compounds toward the first separator, which consistently yielded approximately 16.5% of high-molecular-weight extract. These findings indicate that solvent-assisted supercritical extraction enables selective, molecular-weight-based fractionation of Kısrakdere coal-derived liquids, offering a promising, though not yet fully characterized basis for the potential development of isotropic and mesophase pitch precursors.

*mcelik@itu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Carbon fiber is a next-generation fibrous material containing at least 92% carbon by mass, distinguished by its low density, biocompatibility, superior mechanical properties, and thermal and electrical conductivity. Fibers exceeding 99% carbon are classified as graphitized or graphite fibers. Worldwide, approximately 90% of carbon fiber is produced from polyacrylonitrile (PAN) polymer, while the remainder is derived from coal- and petroleum-based feedstocks. Global carbon fiber production reached roughly 200,000 tonnes in 2023.

Because PAN-based precursors are costly, considerable attention has been directed toward pitch precursors obtained from abundant low-rank coals. Coal tar and coal-tar pitch are presently produced mainly as by-products of metallurgical coking; however, this route is increasingly constrained by the cost of high-quality coking coals, contracting market demand, and stricter environmental regulation (J. Shi et al., 2019; D. Choi et al., 2019). Tar produced from low-rank coals by pyrolysis, gasification, or coking typically exhibits low tar yield (approximately 5–10 wt%), low carbon content, and high ash and oxygen content, rendering it unsuitable as a mesophase-pitch feedstock without extensive refining (B. Apicella et al., 2017; J. Kim et al., 2016). Consequently, the direct liquefaction of coal under temperature and pressure in the presence of a solvent or carbon dioxide has attracted growing interest as an alternative route to pitch precursors.

Solvolysis is a thermochemical process in which the carbonaceous macromolecules of coal are dissolved under heat (250–450 °C) and pressure (up to 300 bar) using a solvent and a hydrogen source, separating the organic fraction from inorganic ash-forming constituents. Subsequent liquefaction reactions trigger hydrogenation and convert approximately 40–95 wt% of the raw coal into desired chemical products (W. Wang et al., 2023). Under mild liquefaction conditions, the products exhibit a narrower molecular-weight distribution, constituting roughly 20–60 wt% of the liquefaction output.

The ultimate objective of this study is the production of isotropic and mesophase liquids suitable for fiber spinning. The molecular weight of commonly used mesophase pitch ranges from approximately 300 to 1200 Da and comprises polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), approximately 3.5 times that of a typical isotropic pitch, with a volatile content of 15–20%, a density of 1.4–1.6 g/cm^3, and a hydrogen-to-carbon atomic ratio of 0.35–0.50 (M. Wang et al., 2023). Isotropic pitch yields a cheaper, lower-strength general-purpose carbon fiber (GPCF), whereas mesophase pitch yields a more expensive, high-performance carbon fiber (HPCF).

Previous studies on coal-derived pitch precursors have primarily relied on conventional pyrolysis, direct hydrogenation, or single-solvent extraction, typically yielding a broad, poorly resolved molecular-weight distribution that requires extensive downstream refining. In contrast, the approach adopted here combines supercritical CO_2 extraction

with co-solvent selection (tetralin, toluene, and their mixtures) and pyridine-assisted swelling, coupled with a dual-separator configuration that fractionates the liquefaction products directly by molecular weight during recovery. This combined strategy, applied specifically to Kısrakdere lignite/semi-bituminous coal, has not been reported previously, and offers a more selective, potentially less energy-intensive alternative to conventional pitch-precursor production routes.

In the present work, coal liquefaction was investigated by supercritical carbon dioxide extraction (SCE) technique in the presence of tetralin and/or toluene as co-solvents at relatively low temperatures of 350–450 °C and moderate pressures of 50–200 bar. The aim was to produce a coal-derived liquid amenable to purification into high-molecular-weight aromatic PAH compounds with a carbon content of over 90%, thereby establishing a domestic, coal-based route to carbon fiber precursors.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Coal Sample and Characterization

Soma-Kısrakdere semi-bituminous coal was selected for the extraction studies and subjected to crushing, screening, and representative sampling. Proximate and ultimate analyses were performed on the sample. Ultimate analysis (C, H, N, S) was carried out using a LECO CHNS-932 analyzer, in which organic matter is combusted at 950–1300 °C in a pure-oxygen environment; carbon, hydrogen, and sulfur were determined by infrared absorption detection and nitrogen by thermal-conductivity detection, with oxygen obtained by difference. Proximate and ultimate analysis results are summarized in Table 1.

Table 1. Results of the proximate and ultimate analysis of the Kısrakdere coal sample used in the experimental studies, on a dry, ash-free basis.

Coal	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	S (%)	Gross Calorific Value (kcal/kg)	ASTM Coal Classification	General Classification
Kısrakdere	48.39	51.61	2.40	6815	Bituminous - High Volatile C	Sub-bituminous

As a reference procedure, the coal was pyrolyzed at 850 °C in an oxygen-free environment, and the resulting tar, together with its tetrahydrofuran-insoluble (THF Ins) fraction, was examined by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy and ultimate analysis to assess its major compounds and aromaticity qualitatively. The coal's high aromatic character, low ash content, and semi-bituminous classification supported its suitability for further supercritical extraction studies.

2.2. Supercritical CO_2 Extraction System

Supercritical fluid extraction exploits the solvent power of a compressed fluid near its critical point, where the substance possesses both gas-like and liquid-like properties. Supercritical fluids exhibit lower density and viscosity and higher diffusivity than

liquids, improving mass transfer and enabling molecular-weight-based fractionation during extraction. Carbon dioxide is the most widely used supercritical medium, with a critical temperature of 31.1 °C and a critical pressure of 7.4 MPa; it is non-flammable, non-toxic, inexpensive, and environmentally benign.

Experiments were conducted in a supercritical extraction apparatus capable of operating at temperatures up to 500 °C and pressures up to 200 bar, equipped with a 1 L reactor, two sequential heated separators (Separator 1, up to 140 °C; Separator 2, ambient, 30–40 °C), independent CO_2 and co-solvent pressurization pumps, and a touch-panel data-logging control system. The two-separator configuration was designed to recover two liquid fractions of differing mean molecular weight, with the higher-molecular-weight fractions condensing preferentially in Separator 1.

2.3. Liquefaction Procedure

Kısrakdere coal was prepared to a nominal size of −3.0+0.5 mm by controlled crushing and screening and dried at 105 °C to a constant weight. In a typical run, 100 g of coal was charged to the reactor with 200 ml of solvent (coal/solvent ratio of 1/2), and the system was purged with low-pressure CO_2 to remove oxygen. The reactor was heated to the set temperature (typically reaching 400 °C in approximately 60 min); CO_2 was then admitted until the target pressure of 100 bar was attained, after which a defined cooking time (commonly 60 min) was maintained under regulated pressure. Sweeping was subsequently initiated with CO_2 (50 ml/min), and liquid samples were withdrawn from Separators 1 and 2 at successive intervals. The residual coal (char) was recovered, weighed, and stored for analysis. The principal variables investigated were temperature (400–450 °C), cooking time (0–2 h), solvent type (tetralin, toluene, and mixtures), coal/solvent ratio, and the presence of pyridine as a swelling agent.

2.4. Product Separation and Swelling Measurement

Liquids recovered from each separator were distilled on a rotary evaporator to quantify the transported solvent and the residual extract. Toluene was removed under full vacuum at a 90 °C oil-bath temperature and tetralin at 160 °C; the residue was then treated with tetrahydrofuran (1/5 ratio) to separate THF-soluble and THF-insoluble fractions, which were dried for subsequent analysis. The swelling index was determined by comparing the bulk density of untreated −3.0+0.5 mm coal with that of the treated (reactor-residue) coal, each measured in triplicate after standardized tapping.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. FTIR and Elemental Characterization

FTIR spectra of the raw Kısrakdere coal in Fig. 1 became substantially more resolved following tar and THF-insoluble processing. While the vibration peaks corresponding

to aliphatic and aromatic groups were not very distinct in the raw coal, they became much more pronounced in the tar and THF-insoluble products. Aromatic C–H stretching bands appeared as intense broad peaks near 3070–3190 cm^{-1}, and broad hydroxyl-bond peaks corresponding to hydrogen-bonded –OH structures were observed in the 3250–3350 cm^{-1} region.

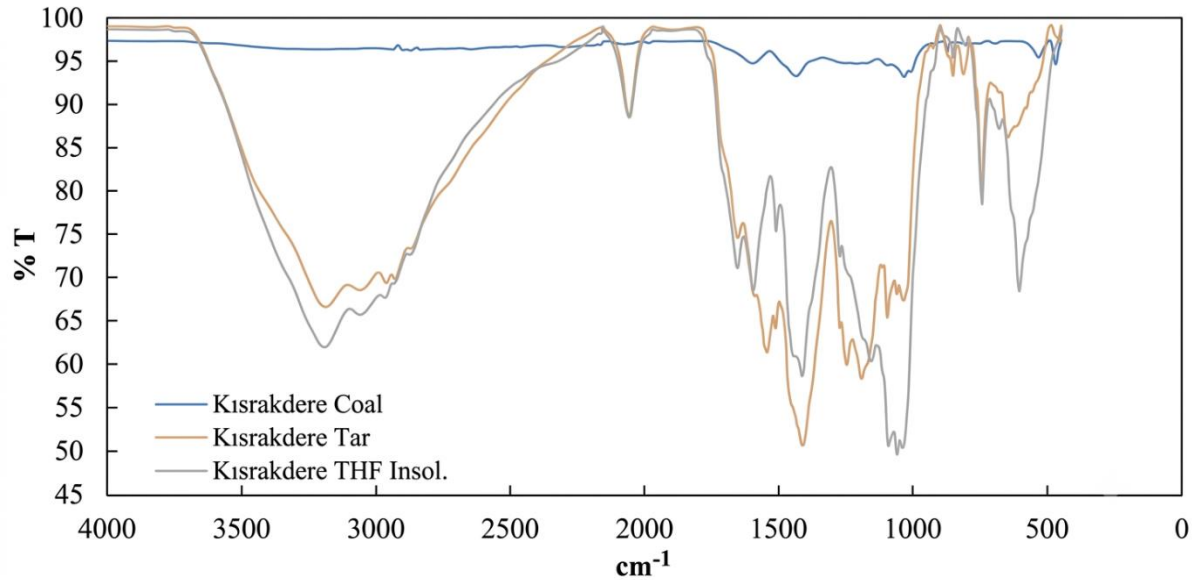


Fig. 1. FTIR spectra of pyrolyzed Kısrakdere coal at 850 ºC; original coal, tar and THF-insoluble fraction of tar.

In the aliphatic carbon region (2850–2960 cm^{-1}), the raw coal exhibited pronounced asymmetric and symmetric C–H stretching peaks, indicating that alkyl side chains and aliphatic bridges (such as methylene bridges) were still well preserved within the structure, a feature typical of a high-quality lignite such as Kısrakdere (Ibarra et al., 1996). In the tar and THF-insoluble samples, by contrast, aliphatic C–H stretching bands were markedly less dominant, consistent with the loss of aliphatic character during pyrolysis and extraction. Both the tar and THF-insoluble samples exhibited absorption bands near 1450 and 1600 cm^{-1} corresponding to aromatic ring C=C stretching, a C=O absorption peak near 1650 cm^{-1}, and a broad C–heteroatom (O or N) stretching band between 1190 and 1250 cm^{-1}. Low-intensity peaks corresponding to substituted and adjacent aromatic hydrogen vibrations were observed at 850, 775, and 750 cm^{-1} in both samples, suggesting a relatively low degree of aromatic ring substitution.

In the OH stretching region (3200–3600 cm^{-1}), the raw coal showed a peak depth of moderate intensity, indicating that it does not carry the excessive carboxylic/phenolic oxygen load typical of lower-quality lignites, consistent with effective moisture and heteroatom removal during processing. The presence of aromatic C–H out-of-plane bending peaks in the 700–900 cm^{-1} region further indicates the availability of hydrogens for substitution around the polycyclic aromatic rings.

Overall, Kısrakdere coal exhibited a pronounced aromatic character relative to its aliphatic bands, together with relatively few substituted aromatic groups. These qualitative features, together with its low ash content and character, supported the suitability of Kısrakdere coal for the extraction studies. The similarity between the tar-phase and THF-insoluble spectra further suggests that the molecular-weight distribution of the tar obtained from Kısrakdere coal may not be very broad, potentially

comprising components of relatively close structure; confirmation of this trend, however, would require direct molecular-weight characterization (e.g., gel permeation chromatography). While this spectral similarity is a favorable qualitative indicator, further characterization would be needed before concluding on the material's suitability for homogenization into a spinnable pitch. Ultimate analysis confirmed the marked enrichment of carbon and hydrogen upon conversion of the raw coal to tar and THF-insoluble fractions.

3.2. Effect of Cooking Time and Temperature

For tetralin at 400 °C and 100 bar, the coal dissolution yield increased from approximately 36.2% at 30 min to 48.7% at 60 min, after which it remained essentially constant (48.5%) with further increases in residence time to 120 min. This early-stage kinetic behavior is consistent with the rapid depolymerization of labile bonds within the coal macromolecular network, principally ether linkages and weaker aliphatic bridges, during the initial heating period, followed by a plateau once the more thermally stable, cross-linked fraction of the coal matrix is reached. The absence of a subsequent decline in dissolution yield over the extended cooking period suggests that retrograde (repolymerization) reactions, commonly reported to reduce liquid yield during prolonged coal liquefaction, were not significant under these conditions, likely owing to the hydrogen-donor capacity of tetralin, which stabilizes reactive free-radical fragments generated during bond cleavage and suppresses their recombination into insoluble char.

With increasing cooking time, the liquid fraction recovered in Separator 1 increased progressively (from 13.4% at 30 min to 82.4% at 120 min) while that in Separator 2 correspondingly decreased (from 86.6% to 17.7%). This redistribution is consistent with the relatively high boiling point and critical parameters of tetralin, which favor the co-transport of higher-molecular-weight, less volatile compounds toward the first (higher-temperature) separator rather than allowing them to condense downstream. As cooking proceeds, the accumulation of these heavier species in Separator 1 indicates a progressive enrichment in polycyclic aromatic structures of the type required for subsequent pitch precursor development.

Raising the extraction temperature from 400 to 450 °C produced a modest but reproducible decrease in overall dissolution yield, from 48.7% to approximately 43.0%. This reduction may be attributed to the onset of secondary thermal cracking and partial recondensation reactions at the higher temperature, which can convert a portion of the initially solubilized material into insoluble char or gas-phase products, thereby lowering the net liquid yield despite the more severe thermal environment. Notably, however, the higher temperature further shifted the distribution of recovered liquid toward Separator 1, indicating that the average molecular weight of the extracted fraction increased even as the total yield declined. This trade-off, a modest loss in overall dissolution yield in exchange for a liquid product enriched in higher-molecular-weight aromatic species, is favorable from the standpoint of pitch precursor

development, since the target application prioritizes molecular weight and aromaticity over maximum liquid recovery (Fig. 2).

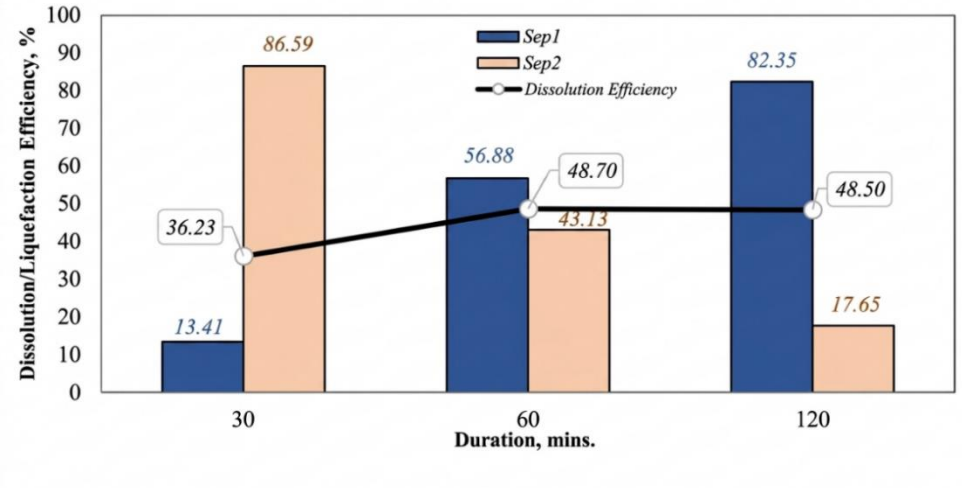


Fig. 2. Percentage dissolution and separator liquefaction yields for Kısrakdere coal with tetralin (coal/solvent 1/2) at 400 °C and 100 bar as a function of cooking time.

3.3. Effect of Solvent Type

Extraction of Kısrakdere coal in the presence of carbon dioxide alone (without tetralin) exhibited a limited capacity to dissolve Kısrakdere coal: at 425 °C and 52 bar, the dissolution yield was only 25.3%. This reflects the non-polar, low hydrogen-donor character of supercritical CO_2, which lacks the ability to stabilize free radicals formed during thermal bond cleavage, favoring char formation over dissolution.

Tetralin, a strong hydrogen donor, achieved the highest single-solvent dissolution yield among the pure co-solvents tested, reaching 48.7% at 400 °C and decreasing somewhat at higher temperatures (44.6% at 425 °C; 43.3% at 450 °C). Its effectiveness stems from its ability to donate hydrogen atoms that stabilize reactive free radicals, preventing their recombination into insoluble structures. Toluene, a weaker hydrogen donor but an effective physical solubilizer, yielded a lower dissolution of approximately 24–31%, rising from 23.8% to 30.9% as temperature increased from 400 to 450 °C, reflecting improved diffusion and swelling at higher temperatures.

The highest overall dissolution yield, 53.4%, was obtained with the 30:70 tetralin–toluene mixture in the presence of pyridine, exceeding that of any single co-solvent tested. This indicates that the combined hydrogen-donor capacity of tetralin, the physical solubilizing action of toluene, and the swelling-promoting effect of pyridine act synergistically rather than any single mechanism dominating. The 30:70 tetralin–toluene mixture alone (without pyridine) gave an intermediate yield of 40.4%, consistent with tetralin stabilizing radicals and toluene improving medium homogeneity and mass transfer; the addition of pyridine raised this yield by a further 3.4%, underscoring the significance of coal swelling as a rate-enhancing step prior to dissolution.

Reducing the coal/solvent ratio from 1/2 to 1/3 (with tetralin) lowered the dissolution yield from 30.4% to 25.6%, confirming the importance of an adequate liquid-to-solid ratio at 100 bar and 450 °C (Table 2). Overall, dissolution yield in the Kısrakdere system depends on both the hydrogen-donor strength of the solvent and its ability to

penetrate and swell the coal structure, with the best performance achieved when all three factors, hydrogen donation, physical solubilization, and swelling, are combined.

Table 2. Dissolution Yields of Kısrakdere Coal by Supercritical CO_2 Extraction System

Solvent System	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Dissolution Yield (%)
CO_2	425	52	25.3
Tetralin, 400 °C	400	100	48.7
Tetralin, 425 °C	400	100	44.6
Tetralin, 450 °C	400	100	43.3
Toluene, 400 °C	400	100	23.8
Toluene, 450 °C	450	100	30.9
Tetralin:Toluene (30:70)	450	100	40.4
Tetralin:Toluene (30:70) + Pyridine	450	100	53.4
Mixed solvent, Coal/Solvent ½	450	100	30.4
Mixed solvent, Coal/Solvent 1/3	450	100	25.6

3.4. Swelling Behavior and the Role of Pyridine

Swelling of the coal matrix by solvent uptake was identified as a precondition for fragmentation and subsequent dissolution of the organic constituents. Measured swelling indices ranged from 1.00 to 1.74. The maximum value, 1.74, obtained in the presence of pyridine, corresponded to the maximum dissolution yield of 53.4%, indicating a positive association between swelling and dissolution.

This association is consistent with swelling acting as a physical prerequisite for solvent penetration: greater expansion of the coal matrix increases accessibility of internal reactive sites, allowing solvent molecules to reach and cleave cross-linked bonds that would otherwise remain inaccessible. Pyridine, as a strong hydrogen-bond acceptor, is inferred to disrupt hydrogen bonding within the coal structure and promote cracking of the coal chain network, facilitating extraction and transport of shorter-chain species. However, its toxicity and strong odor limit its practical use at larger scale.

Given the limited number of pyridine-assisted trials conducted in this study, the swelling–dissolution relationship summarized in Table 3 should be regarded as a preliminary trend rather than a confirmed correlation, and warrants verification through more systematic experimentation across a broader range of pyridine loadings and coal samples.

Table 3. Measurements of bulk density and swelling index values for untreated and treated (solid coal remaining in the reactor) samples.

Experiment No.	Untreated – 3.0+0.5 mm Sample Bulk Density (g/mL)	Bulk Density of the Treated Sample (g/mL)	Swelling Index
D17	0.68	0.68	1
D20	0.68	0.67	1.02
D18	0.68	0.64	1.07
D19	0.68	0.63	1.08
D23	0.65 (for coal of -0.5+0.25 mm)	0.57	1.13
D12	0.68	0.5	1.37
D1	0.68	0.46	1.49
D22	0.68	0.44	1.56
D21	0.68	0.42	1.64
D25	0.68	0.39	1.74

3.5. Molecular-Weight-Based Fractionation

Distillation of the separator liquids confirmed, as shown in Table 4, that the sequential-separator configuration achieved molecular-weight-based fractionation of the Kısrakdere-derived liquids. Toluene alone (Experiment D19) gave the lowest overall liquefaction yield, 27.5%, and produced no distinct high-molecular-weight residue in Separator 1. In contrast, the 70:30 toluene–tetralin mixture (Experiment D21) yielded an overall liquefaction yield of 28.6% and generated a high-molecular-weight residue corresponding to 16.6% of the coal feed in Separator 1, indicating that the presence of tetralin was necessary to mobilize and transport heavier species to the first-stage separator.

Across the mixed-solvent experiments (D21, D22, D23), the Separator 1 fraction consistently accounted for approximately 16.4–16.7% of the coal feed (mean ≈ 16.5%), despite substantial differences in overall liquefaction yield (28.6–53.8%) driven by pyridine addition and particle size. This consistency indicates that the mass reporting to Separator 1 is governed primarily by the coal's intrinsic content of high-molecular-weight, less-volatile species rather than by the total dissolution efficiency, and represents one of the more robust and repeatable findings of the study. Given its elevated molecular weight and aromatic character, this fraction is regarded as a promising candidate for downstream purification into isotropic and mesophase pitches, pending the direct characterization discussed in Section 3.1.

It is noted that the SCE Process Liquid Recovery Yield exceeded 100% in two of the mixed-solvent experiments (D22: 100.7%; D23: 121.6%), a result that cannot be explained by simple mass conservation of the added solvent alone. A plausible explanation is that, under the reaction conditions employed here (450 °C), tetralin undergoes partial thermal dehydrogenation to naphthalene, a transformation reported to occur even in the absence of coal at temperatures as low as 350–400 °C, and to proceed to a substantial extent (35–85% conversion) in the presence of coal at 380–420 °C (Hooper et al., 1979; Chang et al., 2019). This dehydrogenation, together with light compounds released from the coal and mobilized by CO_2, may co-distill with the recovered solvent and inflate the apparent liquid mass relative to the solvent charged. This interpretation remains a plausible mechanism rather than a confirmed explanation for the present system, and would benefit from compositional analysis of the recovered liquid (e.g., GC-MS) to quantify the extent of tetralin-to-naphthalene conversion under these specific extraction conditions.

Table 4. Distribution of various fractions of tar in different solvents and coal yields.

Experiment No.	Sep 1	Sep 2	Sample Mass Before Distillation (g)	Toluene	Tetralin	THF	Sample Mass Remaining After Distillation (g)	Dissolution (wt% of liquid)	Dissolution (wt% of coal)	Liquefaction Yield (Sep1+Sep2, %)	SC Process Liquid Recovery Yield (%)
D19, Toluene, 450 °C	X	-	43.6	40	-	-	-	-	-	27.5	-
	-	X	48.4	18.5	-	-	27.5	29.9	27.5		
D21, 450 °C, 70% TL + 30% TN	X	-	73.9	21.2	25.3	-	16.6	-	16.6	28.6	70.8
	-	X	79.2	48	11	-	12	15.2	12.0		
D22, 450 °C, PYR + 70% TL + 30% TN	X	-	69.8	34	14.8	-	16.41	23.5	16.4	53.8	100.7
	-	X	105.06	43.8	15.3	-	37.4	35.6	37.4		
D23, 450 °C, 70% TL + 30% TN, 0.5 mm	X	-	49.6	17	12.5	35.9	16.74	33.8	16.7	52.3	121.6
	-	X	97.7	51	8.7	55	35.6	36.4	35.6		

3. CONCLUSIONS

In this study, the solvent-assisted supercritical carbon dioxide liquefaction of Soma-Kısrakdere coal was investigated to develop a procedure to obtain pitch precursors for carbon fiber production. Proximate, ultimate, and FTIR characterization confirmed that the Kısrakdere coal is of high aromatic character, low ash content, and coal rank which supports its suitability for extraction studies. FTIR analysis of the raw coal, tar, and THF-insoluble fractions further revealed preservation of aliphatic bridging structures in the raw coal alongside a pronounced aromatic character upon extraction; the close spectral similarity between the tar and THF-insoluble phases suggests a relatively narrow molecular-weight distribution, a favorable qualitative indicator for downstream homogenization into a spinnable pitch, though direct molecular-weight characterization is still required to confirm this.

Liquefaction experiments conducted at 400–450 °C and 100 bar demonstrated that dissolution yield is governed jointly by the hydrogen-donor strength and physical solvency of the extraction medium. Tetralin, toluene, and a 30:70 tetralin–toluene mixture produced coal dissolution yields of approximately 49%, 24–31%, and 40%, respectively, while carbon dioxide alone proved a weak solvent, yielding only 25.3% under comparable conditions. The highest overall dissolution yield, 53.4%, was obtained when pyridine was added to the 30:70 tetralin–toluene mixture, consistent with the combined hydrogen-donor, physical-solubilizing, and swelling-promoting actions of the three components acting synergistically. Swelling measurements support a role for solvent-induced swelling in this behavior: the addition of pyridine raised the swelling index to its highest measured value, 1.74, coinciding with the highest dissolution yield observed. Given the limited number of pyridine-assisted trials conducted, this swelling–dissolution relationship should be regarded as a preliminary trend rather than a confirmed correlation.

The dual-separator configuration further enabled selective, molecular-weight-based fractionation of the coal-derived liquids. Across the mixed-solvent experiments, the first separator consistently yielded approximately 16.5% high-molecular-weight extract per 100 g of feed coal, independent of the overall dissolution yield — one of the more robust and repeatable results of this study. Given its elevated molecular weight and aromatic character, this fraction is regarded as a promising candidate for subsequent purification into isotropic and mesophase pitch precursors, pending the direct characterization (softening point, molecular-weight distribution, optical anisotropy) needed to confirm this suitability.

Collectively, these findings indicate that the governing mechanism of Kısrakdere coal liquefaction proceeds through solvent-induced swelling, followed by fragmentation and dissolution of the coal macromolecular network, with the dual-separator supercritical system providing effective molecular-weight-based separation of the resulting liquid products. Future work will focus on optimizing dissolution and liquefaction yields, further elucidating solvent-transport and swelling mechanisms through a broader set of pyridine-assisted trials, refining the purification stage, confirming the mass-balance behavior noted in Section 3.5 through compositional analysis of recovered solvent, and initiating preliminary melt-spinning trials to evaluate the fiber-forming behavior of the recovered high-molecular-weight fraction. It should be noted that the yields reported here are preliminary, and confirmatory elemental, spectroscopic, and molecular-weight-distribution analyses are ongoing.

ACKNOWLEDGMENTS

The financial support of Turkish Coal Enterprise (TKİ) with a project entitled "Production of Carbon Fiber from Turkish Coals", is greatly acknowledged.

REFERENCES

Shi, J., Ma, C. 2019. Preparation and characterization of spinnable mesophase pitches: A review, New Carbon Materials, 34, 211–219.

Choi, D., Kil, H.S., Lee, S. 2019. Fabrication of low-cost carbon fibers using economical precursors and advanced processing technologies, Carbon, 142, 610–649.

Ibarra, J.V., Muñoz, E., Moliner, R. 1996. FTIR study of the evolution of coal structure during the coalification process, Organic Geochemistry, 24 (6–7), 725–735.

Apicella, B., Tregrossi, A., Stanzione, F., Ciajolo, A., Russo, C. 2017. Analysis of petroleum and coal tar pitches as large PAH, Chemical Engineering Transactions, 57, 1–6.

Kim, J. et al. 2016. Pitch-based carbon fibers from coal tar or petroleum residue under the same processing condition, Carbon Letters, 19, 72–78.

Wang, W., Nelson, M.G., Jolley, K., Preciado, I., Eddings, E. 2023. Efficient mesophase pitch precursor production from low-rank Utah Sufco coal via mild solvolysis liquefaction, SSRN.

Wang, M. et al. 2023. Research progress in the preparation of mesophase pitch from fluid catalytic cracking slurry, RSC Advances, 13, 18676.

Hill, C.S. 2022. Coal to Carbon Fiber—A Novel Supercritical CO_2 Solvated Process, Final Technical Report DE-FE0031800, Ramaco Carbon / U.S. DOE-NETL.

Atkins, C.A., Targett, M. 2022. Supercritical CO_2, Solvated Process to Convert Coal to Carbon Fibers, U.S. Patent 11,525,091 B2.

Hutchenson, K.W., Roebers, J.R., Thies, M.C. 1991. Fractionation of petroleum pitch by supercritical fluid extraction, Carbon, 29 (2), 215–223.

Sangon, S., Ratanavaraha, S., Ngamprasertsith, S., Prasassarakich, P. 2006. Coal liquefaction using supercritical toluene–tetralin mixture in a semi-continuous reactor, Fuel Processing Technology, 87, 201–207.

Wang, Z. et al. 2018. Study on the thermal liquefaction of Xilinguole lignite in solvent at high temperature, Fuel Processing Technology, 176, 167–173.

Li, X.-R. et al. 2021. Effect of tetralin on the reaction behavior of volatiles from pyrolysis of Naomaohu coal, Journal of Fuel Chemistry and Technology, 49 (5), 617–625.

Niu, H., Zuo, P., Shen, W., Qu, S. 2021. A comprehensive investigation on the chemical structure character of spinnable pitch for improving and optimizing the oxidative stabilization of coal tar pitch-based fiber, Polymer, 224, 123737.

Kim, B. et al. 2016. Enhancing the tensile strength of isotropic pitch-based carbon fibers by improving the stabilization and carbonization properties of precursor pitch, Carbon, 99, 649–657.

Yang, J., Nakabayashi, K., Miyawaki, J., Yoon, S.H. 2016. Preparation of pitch-based carbon fibers using Hyper-coal as a raw material, Carbon, 106, 28–36.

Lee, S.H. et al. 2019. Preparation and characterization of high-spinnability isotropic pitch from 1-methylnaphthalene-extracted low-rank coal by co-carbonization with petroleum residue, Carbon, 155, 186–194.

Cho, J.H., Kim, M., Sun, J. 2021. Study of the molecular-weight distribution of binder pitches for carbon blocks, ACS Omega, 6, 10180–10186.

Apak, E., Yardım, M.F., Ekinci, E. 2002. Preparation of carbon fibre precursors from the pyrolysis and copyrolysis of Avgamasya asphaltite and Göynük oil shale, Carbon, 40 (8), 1331–1337.

Laboureur, L., Ollero, M., Touboul, D. 2015. Lipidomics by supercritical fluid chromatography, International Journal of Molecular Sciences, 16, 13868–13884.

Hooper, R.J., Battaerd, H.A.J., Evans, D.G. 1979. Thermal dissociation of tetralin between 300 and 450 °C, Fuel, 58 (2), 132–138.
Chang, H., Li, J., Du, S., Shen, K., Yang, Q., Yi, H., Zhang, J. 2019. Transformation characteristics of hydrogen-donor solvent tetralin in the process of direct coal liquefaction, Frontiers in Chemistry, 7, 737.

FARKLI KÖMÜR HAVZALARINA AİT KÖMÜRLERİN MİKROYAPISAL VE ELEMENTEL HETEROJENLİĞİNİN KARŞILAŞTIRMALI FE-SEM/EDS ANALİZİ

COMPARATİVE FE-SEM/EDS ANALYSİS OF THE MİCROSTRUCTURAL AND ELEMENTAL HETEROGENEİTY OF COALS FROM DİFFERENT BASİNS

Ercan Şahinoğlu[a], Yunus İskender[a*], Kadir Karaman[a], Davood Fereeidoni[b,a], Ferdi Cihangir[a], Mert Bektaş[a]

a. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon
b. School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Semnan, IRAN

ÖZET Bu çalışmada; Kozlu, Üzülmez ve Zara havzalarından alınan kömür numunelerinin mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Karakterizasyon çalışmalarında *alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM*) ve *enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS)* teknikleri karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. Farklı mikro alanlardan elde edilen veriler, organik kömür matrisi ile inorganik gang minerallerinin dağılımında bölgesel değişkenlikler olduğunu göstermektedir. Kozlu kömüründe mikro ölçekte geniş bir elementel değişkenlik gözlenmiştir. Bazı mikro bölgelerde belirlenen %21,1 oranındaki kalsiyum (Ca) varlığı, yerel karbonat mineralizasyonuna işaret etmektedir. Üzülmez kömürü ise yüksek karbon (%67,0) ve tespit edilebilir limitlerin altındaki kükürt (%0,0 S) oranlarıyla öne çıkmaktadır. Bu numune, inorganik mineral yükü nispeten düşük bir karakter sergilemektedir. Zara kömürü, yüksek kükürt (%7,4 S) ve demir (%4,1 Fe) içerikleriyle diğer örneklere kıyasla daha karmaşık bir yapı sunmaktadır. *Bu alanda* demir sülfür fazlarının ve alüminosilikat (kil) gruplarının yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca element haritalarında C ve S sinyallerinin uzaysal olarak çakışma eğilimi, Zara kömüründe fiziksel yöntemlerle uzaklaştırılması güç olabilecek organik sülfür varlığını düşündürmektedir. Elde edilen sonuçlar, kömürlerin mikro ölçekteki heterojenliklerinin zenginleştirme verimi ve yanma davranışı üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Bu mikro yapılar ayrıca kül ergimesi ve çevresel performans üzerinde de doğrudan belirleyici rol oynayabilir. Bu bakımdan FE-SEM/EDS analizleri, kömürün bütüncül karakterizasyonunda tamamlayıcı bir öneme sahiptir.

Anahtar kelimeler: Kömür heterojenliği, FE-SEM/EDS, Mineralojik bileşim

ABSTRACT In this study, the microstructural characteristics of coal samples obtained from the Kozlu, Üzülmez, and Zara basins were investigated. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) techniques were used comparatively in the characterization studies. Data obtained from different micro-areas indicate regional variations in the distribution of the organic coal matrix and inorganic gang minerals. A wide elemental variability was observed at the microscale in Kozlu coal. The presence of 21.1% calcium (Ca) determined in some micro-regions points to local carbonate mineralization. On the other hand, Üzülmez coal stands out with high carbon (67.0%) and sulfur (%0.0 S) ratios below detectable limits. This sample exhibits a relatively low inorganic mineral load character. Zara coal presents a more complex structure compared to the other samples, with high sulfur (7.4% S) and iron (4.1% Fe) contents. In this area, iron sulfur phases and aluminosilicate (clay) groups are observed to concentrate. Furthermore, the tendency of spatial overlapping of C and S signals in elemental mapping suggests the presence of organic sulfur, which may be difficult to remove by physical methods in Zara coal. The obtained results show that the microscale heterogeneities of coals can be effective on enrichment yield and

combustion behavior. These microstructures may also play a direct decisive role in ash fusion and environmental performance. In this respect, FE-SEM/EDS analyses have a complementary importance in the holistic characterization of coal.

Key words: Coal heterogeneity, FE-SEM/EDS, Mineralogical composition

1. GİRİŞ

Kömür, maseraller, mineraller ve bunlarla ilişkili inorganik elementlerin yanı sıra bünyesinde barındırdığı sıvı ve gaz fazlarıyla birlikte kömürleşme süreci sonucunda oluşmuş son derece karmaşık bir yapıdır (Hower vd., 2022). Bu yapı esas olarak organik madde ve mineral maddelerden oluşmaktadır (Finkelman vd., 2019). Maseral grupları temel olarak vitrinit, inertinit ve liptinit olarak sınıflandırılabilir (Huang vd., 2025). İnorganik kısmı oluşturan mineral bileşenler ise, başta kaolinit, illit, montmorillonit ve kuvars gibi silikatlar olmak üzere, pirit gibi sülfürler, kalsit ve dolomit gibi karbonat fazları ile jips gibi sülfat minerallerinden meydana gelen heterojen bir topluluktur. Kömürlerde ana mineral fazını oluşturan alüminosilikatlar, genellikle kömür matrisi içerisine hapsolmuş ince taneli dağılımlar şeklinde bulunabilir (Xing vd., 2026). Öte yandan, kil mineralleri, karbonat mineralleri ve pirit, kömür damarlarının tavanında, tabanında veya ara katmanlarında yaygın olarak bulunurlar (Finkelman vd., 2019; Xia vd., 2025).

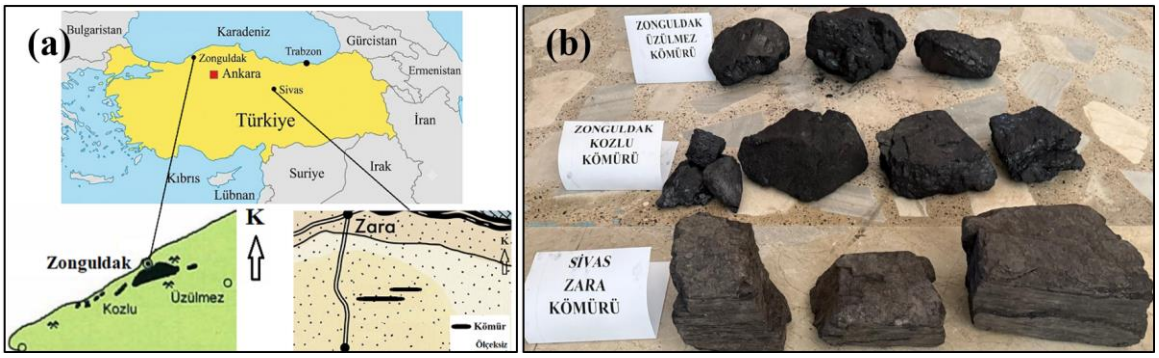
Kömürün bu karmaşık, heterojen ve mikro/nano ölçekteki organik-inorganik matris yapısının ayrıntılı olarak ortaya konulabilmesi, gelişmiş karakterizasyon tekniklerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu ile enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (FE-SEM/EDS), kömürün mikroyapısal özellikleri ile elementel dağılımının yüksek çözünürlükte karakterize edilmesini sağlayan gelişmiş bir karakterizasyon tekniğidir (Chaisaenrith vd., 2024). FE-SEM, geleneksel ışık mikroskoplarından farklı olarak görüntü oluşturmak için alan emisyon kaynağından yayılan elektronları kullanır. Elektron demetinin numune yüzeyini taraması sayesinde düşük hızlandırma voltajlarında ve kısa çalışma mesafelerinde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir. Mineraloji, seramik, polimer, metalurji, elektronik, kimya ve fizik gibi birçok alanda kullanılan FE-SEM, yüksek alan derinliği sayesinde yüzey topografisinin ayrıntılı olarak incelenmesine ve nano boyuttaki yapıların karakterizasyonuna olanak sağlar. Geleneksel SEM sistemlerine göre daha yüksek uzaysal çözünürlük sunan FE-SEM, özellikle yalıtkan malzemelerin yüzey morfolojisinin incelenmesinde önemli avantaj sağlar. Ancak kömür gibi düşük iletkenliğe sahip organik-inorganik matrislerde, EDS analizleri ve elementel haritalama sırasında yüzey yüklenmesi oluşabilir. Bu nedenle, yüzey yüklenmesini azaltmak, kararlı sinyal elde etmek ve güvenilir nicel analizler gerçekleştirmek amacıyla numune yüzeyleri çoğunlukla ince bir iletken katmanla kaplanır. (Prabhu vd., 2021). FE-SEM/EDS, mikroyapısal görüntüleme ile elementel analizi bir arada sunan tahribatsız bir karakterizasyon yöntemidir. Bu teknik, numunelerin elementel bileşimini noktasal olarak belirlemenin yanı sıra, elementlerin yüzeydeki dağılımını haritalama yoluyla görselleştirebilir. Elde edilen elementel

dağılım haritaları, mikroyapı ile kimyasal bileşim arasındaki ilişkilerin ayrıntılı olarak değerlendirilmesine olanak sağlar (Hellmy ve Azida, 2023).

Bu çalışmanın temel amacı, farklı havzalara ait Kozlu, Üzülmez ve Zara kömür örneklerinin mikroyapısal özelliklerini ve elementel heterojenliklerini FE-SEM/EDS tekniğiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Araştırma çerçevesinde, kömürlerin organik matris bileşenleri ile yapıya eşlik eden inorganik gang minerallerinin (karbonat, sülfür ve kil fazları) mikro ölçekteki ilişkileri, mekânsal dağılımları ve morfolojik yapıları incelenmiştir. Böylece, havzalar arasındaki mikroyapısal ve elementel farklılıkların ortaya konulmasıyla bu içsel heterojenliğin, kömürlerin endüstriyel kullanım potansiyelleri ve yıkanabilirlik davranışları üzerindeki olası etkilerine dair öngörülerde bulunulması amaçlanmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan kömür numuneleri, Türkiye'nin farklı kömür havzalarından seçilmiştir. Çalışma kapsamında, Zonguldak Havzası'nda bulunan Kozlu ve Üzülmez müesseselerine ait kömür ocakları ile Sivas ili Zara bölgesinden temin edilen kömür örnekleri kullanılmıştır (Şekil 1). Temin edilen kömür örneklerinden makro boyutta analiz numuneleri hazırlanmıştır. Numune hazırlama aşamasında, analiz sonuçlarını etkileyebilecek yüzey kirleticilerinin giderilmesine özen gösterilmiş ve FE-SEM/EDS analizleri için uygun yüzeyler elde edilmiştir.



Şekil 1. Çalışma sahalarını gösteren basitleştirilmiş yer bulduru haritaları (a) ve kömür örnekleri (b)

Hazırlanan numunelerin morfolojik ve elementel karakterizasyonunu belirlemek amacıyla FE-SEM/EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. FE-SEM analizleri ile kömür örneklerinin yüzey morfolojisi ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. EDS analizleri kapsamında ise kömürün organik matrisinin temel bileşeni olan karbon (C) ile birlikte, kömürlerde yaygın olarak bulunan kuvars, kil mineralleri, karbonatlar, sülfür mineralleri ve diğer inorganik fazların göstergesi olan oksijen (O), silisyum (Si), alüminyum (Al), demir (Fe), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K) ve kükürt (S) elementlerinin kömür yüzeyindeki varlığı ve dağılımı belirlenmiştir. Kömür numunelerinde yüzey yüklenmesini azaltmak ve yüksek hızlandırma voltajında gerçekleştirilen EDS analizleri ile elementel haritalama

işlemlerinde kararlı sinyal elde etmek amacıyla, analiz öncesinde numune yüzeyleri ince bir altın (Au) tabakasıyla kaplanmıştır.

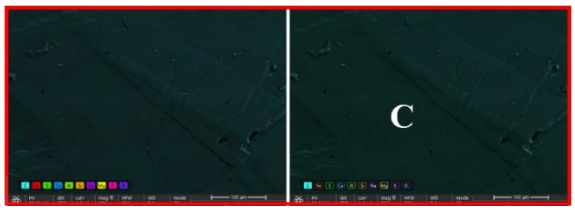
Her bir kömür havzası için 20 olmak kaydıyla toplam 60 adet görüntü alanı incelenmiştir. Analizler, her bir kömür numunesinin aynı makro örneği üzerinde belirlenen farklı yüzey alanlarından seçilen temsil edici analiz bölgelerinde gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde numunelerin yapısal heterojenliği değerlendirilmiş, organik kömür matrisi ile mineral fazların numune içerisindeki mekânsal dağılımı ve elementel bileşimlerindeki yerel değişimler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Temsil edici analiz bölgeleri belirlenirken belirli kriterler dikkate alınmıştır. Organik kömür matrisi ile inorganik mineral fazların birlikte gözlendiği mikro alanlar tercih edilmiştir. Ayrıca, belirgin elementel yoğunlaşmaların bulunduğu bölgeler seçilmiştir. Farklı fazlar arasındaki mekânsal ilişkilerin açıkça izlenebildiği alanlar da analize dahil edilmiştir. Bu seçim yaklaşımı ile aynı makro numune içerisindeki mikroyapısal ve elementel heterojenliğin ortaya konulması amaçlanmıştır. Farklı analiz bölgelerinden elde edilen FE-SEM görüntüleri ve EDS sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek kömür örneklerinin karakteristik mikroyapısal ve elementel özellikleri ortaya konulmuştur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

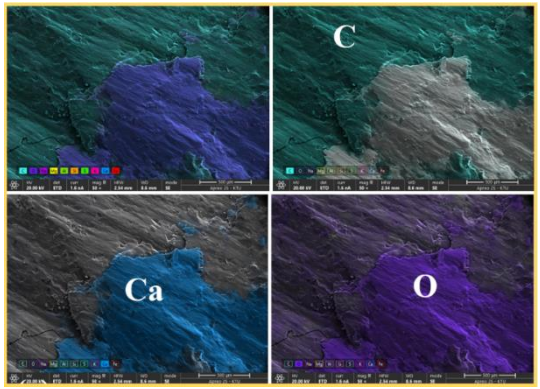
3.1. Kozlu Kömürüne ait FE-SEM/EDS Bulgularının Değerlendirilmesi

Kozlu Kömür Ocağı'ndan alınan kömür örneklerinin FE-SEM/EDS analizleri, kimyasal bileşim ve mineral dağılımının mikrometre ölçeğinde heterojen olduğunu göstermiştir. Analiz sonuçları, organik matris ile inorganik mineral fazların kömür yapısı içerisinde düzensiz dağıldığını ortaya koymaktadır. Bazı bölgelerde karbonca zengin organik yapı baskınken, bazı alanlarda mineral fazların yoğunlaştığı belirlenmiştir. Kömür numunelerine ait mikroyapısal görüntüler, element dağılım haritaları ve EDS spektrumları sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur. Bu analizler, kömür matrisinin mikroskobik yapısını ve element dağılımlarını detaylı olarak ortaya koymaktadır. Şekil 2a (yüzey-1), organik kömür matrisinin genel bir element dağılım haritasını ve bu alandaki baskın karbon (C) elementinin dağılımını yan yana göstermektedir. Bu haritalar, farklı elementlerin aynı alandaki göreceli yoğunluklarını ve birbirleriyle olan ilişkilerini renk kodlaması aracılığıyla görselleştirmektedir. Bahsi geçen renkler, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi sonuçlarına göre otomatik olarak atanmakta olup, her bir rengin hangi elementi temsil ettiği görüntülerin sol alt kısmında yer alan renkli lejant şeritlerinde belirtilmiştir. Şekil 2a'nın sağ panelinde yer alan element haritası ise, mikro yapının neredeyse tamamen karbon (C) elementinden oluştuğunu ve temiz bir organik matrisi temsil ettiğini göstermektedir. FE-SEM/EDS analizinden elde edilen yüzey-1'e ait yarı-kantitatif elementel kompozisyon verileri Çizelge 1'de, bu sonuçları destekleyen EDS spektrumu ise Şekil 3a (Yüzey-1 Spektrumu) kısmında sunulmuştur. Yapılan analiz neticesinde, bu mikro alanda karbonun ağırlıkça %80,5 oranı ile baskın element olduğu ve temiz bir organik matrisi temsil ettiği belirlenmiştir. Yapıda oksijen %16,4 oranında yer alırken; silisyum

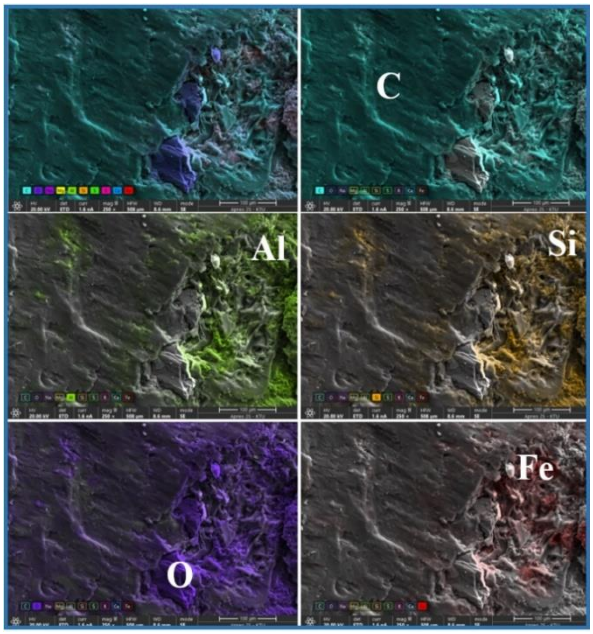
(%1,1), demir (%1,0), alüminyum (%0,5), kalsiyum (%0,3) ve magnezyum (%0,1) gibi elementlerin yalnızca eser miktarlarda bulunduğu tespit edilmiştir. Bu elementel dağılım, incelenen bölgenin büyük ölçüde saf organik bileşenlerden oluştuğunu ve inorganik gang mineral içeriğinin oldukça düşük seviyede kaldığını kanıtlamaktadır. Özellikle silisyum ve alüminyum değerlerinin düşüklüğü alüminosilikat/kil grubu minerallerinin; kalsiyum ve magnezyumun ihmal edilebilir seviyede olması ise karbonat grubu minerallerinin bu mikro alanda neredeyse hiç bulunmadığına işaret etmektedir. Kozlu kömürü yüzey-2 üzerinde gerçekleştirilen FE-SEM/EDS analizlerinde, yüzey-1'e kıyasla kimyasal ve yapısal açıdan farklılıklar gözlenmiştir (Şekil 2b). Şekil 2b'de yer alan mikroyapı görünümü ve ilgili mikro alana ait element haritaları; Karbon (C), Kalsiyum (Ca) ve Oksijen (O) elementlerinin uzaysal dağılımlarını sergilemektedir. Bu analizlere ait yarı-kantitatif elementel kompozisyon sonuçları Çizelge 1 (Yüzey-2) kısmında verilirken, bu verileri destekleyen EDS spektrumu ise Şekil 3b'de sunulmaktadır. Yapılan analizde, yüzey-1'e kıyasla karbon oranının %41,8'e düştüğü, oksijen oranının ise %34,9'a yükseldiği görülmektedir. Bu bölgedeki belirgin değişim kalsiyum içeriğinde gözlenmiş olup, ağırlıkça %21,1 değerine ulaşmıştır. Karbon içeriğindeki azalmaya paralel olarak kalsiyum ve oksijen miktarlarındaki bu artış, analiz edilen mikro alanda kalsit benzeri karbonat karakterli inorganik mineral fazlarının yerel olarak yoğunlaşmış olabileceğine işaret etmektedir. Yapıda tespit edilen demir (%0,7), silisyum (%0,7) ve alüminyum (%0,5) ise ikincil düzeydeki kil ve sülfür bazlı mineral izlerini temsil etmektedir.



a) Kozlu kömürü yüzey-1



b) Kozlu kömürü yüzey-2



c) Kozlu kömürü yüzey-3

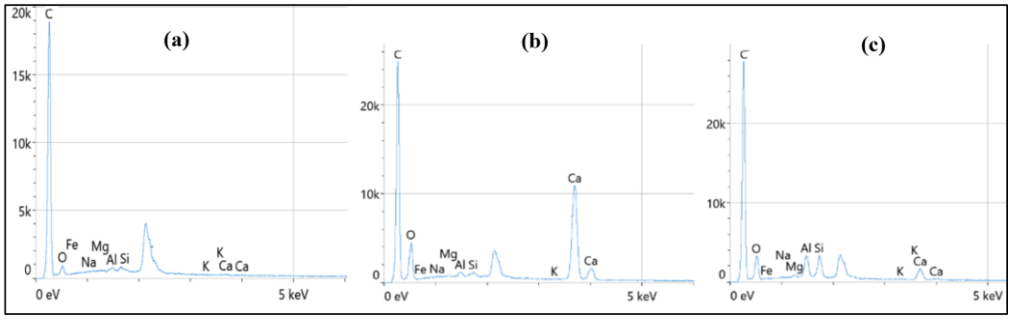
Şekil 2. Kozlu kömür numunesine ait FE-SEM görüntüleri ve ilgili mikro alanın EDS element dağılım haritaları. Karbon (C), Alüminyum (Al), Silisyum (Si), Oksijen (O) ve Demir (Fe) elementlerinin dağılımı.

Kozlu kömürü yüzey-3 üzerinde gerçekleştirilen FE-SEM/EDS analizleri, numunenin mikroyapısında heterojenlik ve inorganik mineral fazı kümelenmesi olabileceğine dair veriler sunmaktadır (Şekil 2c). Şekil 2c'de yer alan genel mikroyapı görünümü ve bunu takip eden element haritaları; Karbon (C), Alüminyum (Al), Silisyum (Si), Oksijen (O)

ve Demir (Fe) elementlerinin mikro alan üzerindeki uzaysal dağılımlarını sergilemektedir. Bu incelemelere ait yarı-kantitatif elementel kompozisyon sonuçları Çizelge 1 (Yüzey-3) kısmında verilirken, bu verileri destekleyen EDS spektrumu ise Şekil 3c'de sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen bu mikro alanda karbon oranı %62,4 ve oksijen oranı %23,9 düzeyindedir. Temel elementlerin yanı sıra demir %3,8, silisyum %3,6 ve alüminyum %3,0 oranlarında tespit edilmiştir. Bu element içeriklerindeki eş zamanlı artış, alüminosilikat bileşimli kil mineral fazlarının söz konusu yüzeyde yerel olarak yoğunlaşmış olabileceğine işaret etmektedir. Alanda kalsiyumun %2,8 oranında bulunması ise kalsit benzeri karbonat minerallerinin daha sınırlı düzeyde bir varlığa sahip olduğunu düşündürmektedir.

Çizelge 1. Kozlu kömürün FE-SEM/EDS analizine ait yarı-kantitatif elementel kompozisyonu

Element	C	Fe	S	Ca	Al	Si	Na	Mg	K	O
Ağırlık % Yüzey-1	80.5	1.0	0.0	0.3	0.5	1.1	0.0	0.1	0.0	16.4
Ağırlık % Yüzey-2	41.8	0.7	0.0	21.1	0.5	0.7	0.1	0.1	0.0	34.9
Ağırlık % Yüzey-3	62.4	3.8	0.0	2.8	3.0	3.6	0.0	0.3	0.1	23.9



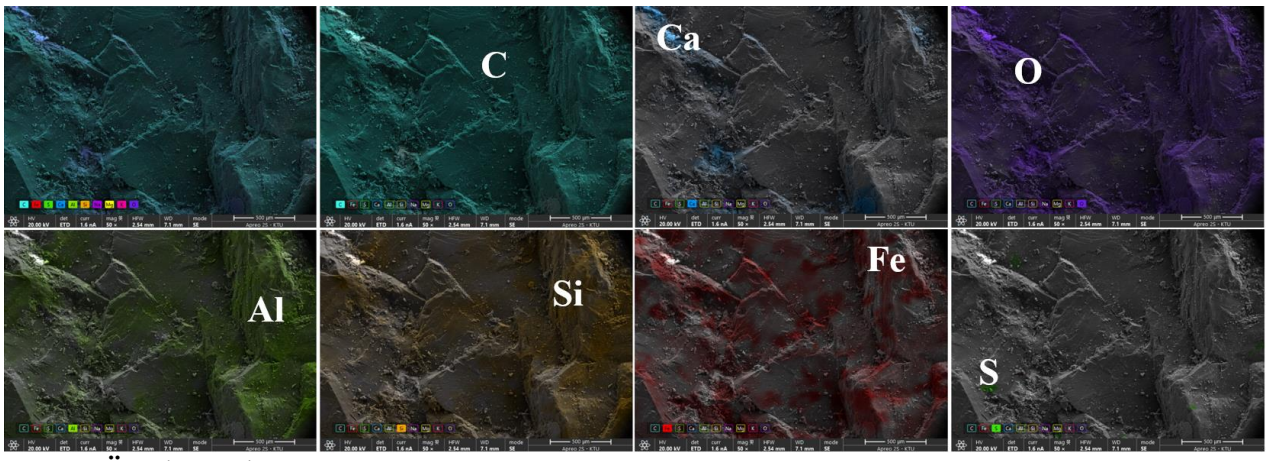
Şekil 3. Kozlu kömürünün FE-SEM/EDS spektrumları; a: yüzey-1, b: yüzey-2 ve c: yüzey-3

Genel olarak değerlendirildiğinde, aynı makro kömür numunesi üzerindeki farklı mikro alanlardan elde edilen sonuçlar, elementel bileşimde geniş bir değişkenlik olabileceğine işaret etmektedir. Karbon içeriğinin %41,8 ile %80,5 arasında farklılık gösterdiği, kalsiyum içeriğinin ise %0,3 ile %21,1 arasında değişen bir dağılım sergilediği görülmektedir. Benzer şekilde silisyum, alüminyum ve demir içerikleri de bölgesel bazda farklılıklar sunmaktadır. Bu durum, kömür matrisi içerisinde organik ve inorganik fazların mikrometre ölçeğinde homojen bir dağılım sergilemediğini ve mikro boyutta yapısal bir heterojenliğin varlığını düşündürmektedir. Elde edilen bulgular, Kozlu kömüründe bazı mikro alanların yüksek organik karbon içeriğine sahip temiz bölgelerden oluştuğuna, bazı alanların ise karbonat mineralleri bakımından zenginleştiğine işaret etmektedir. Bunun yanı sıra, alüminosilikat ve demir içeren mineral fazların da yerel olarak yoğunlaştığı bölgeler bulunmaktadır. Mikro boyuttaki bu heterojen yapının, kömürün oluşum sürecindeki sedimanter katkılar, mineral

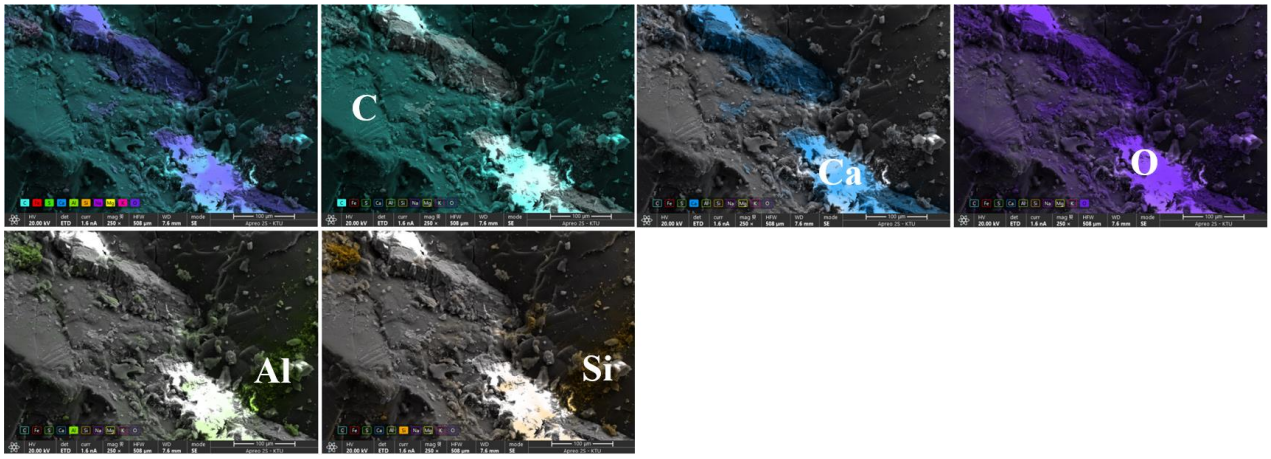
taşınımı ve diyajenetik faktörlerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Özellikle karbonat ve alüminosilikat bileşimli mineral fazların yerel olarak gözlenmesi, kömürleşme süreci boyunca gerçekleşen ikincil mineralizasyon etkilerinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

3.2. Üzülmez Kömürünün FE-SEM/EDS Bulgularının Değerlendirilmesi

Zonguldak ili Üzülmez bölgesindeki kömür ocağından temin edilen kömür örneğinin FE-SEM/EDS analiz sonuçları Şekil 4a ve Şekil 5a'da sunulmuştur. Şekil 4a'da (yüzey-1) yer alan mikroyapı görünümü ve element haritaları, organik kömür matrisinin baskın karakter sergilediği ve inorganik mineral girdilerinin nispeten sınırlı kaldığı bir bölgeyi işaret etmektedir.



a) Üzülmez kömürü yüzey-1



b) Üzülmez kömürü yüzey-2

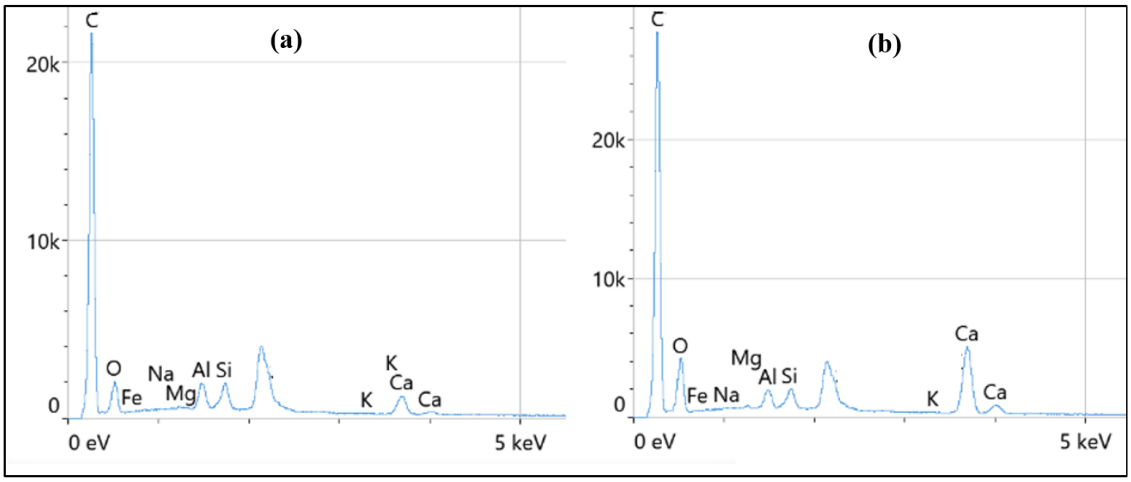
Şekil 4. Üzülmez kömür numunesine ait FE-SEM görüntüleri ve ilgili mikro alanın EDS element dağılım haritaları. Karbon (C), Alüminyum (Al), Silisyum (Si), Oksijen (O) ve Demir (Fe), Kükürt (S) elementlerinin dağılımı.

Bu analiz bölgesine ait yarı-kantitatif elementel kompozisyon sonuçları Çizelge 2 (Üzülmez Yüzey-1) kısmında verilerken, bu bulguları destekleyen EDS spektrumu ise Şekil 5a'da yer almaktadır. İlgili mikro alanda karbon oranı ağırlıkça %67,0 ile ana bileşen durumundayken, oksijen oranı %23,1 olarak tespit edilmiştir. Bölgedeki elementel dağılım incelendiğinde; kalsiyum (%3,3), silisyum (%3,0) ve alüminyum

(%2,3) içeriklerinin düşük-orta seviyelerde olduğu görülmektedir. Silisyum ve alüminyum varlığı, bu bölgede alüminosilikat grubu kil minerallerinin sınırlı miktarda bulunabileceğine işaret etmektedir. Kalsiyum oranı ise matris içerisinde kalsit benzeri karbonat karakterli fazların yerel izleri olabileceğini düşündürmektedir. Demir (%1,0), magnezyum (%0,2) ve potasyum (%0,1) gibi elementler oldukça düşük düzeylerde tespit edilirken, kükürt (S) sinyalinin %0,0 olması bu mikro alanda sülfürlü mineral fazlarının bulunmadığı varsayımını desteklemektedir.

Çizelge 2. Üzülmez kömürün FE-SEM/EDS analizine ait yarı-kantitatif elementel kompozisyonu

Element	C	Fe	S	Ca	Al	Si	Na	Mg	K	O
Ağırlık % Yüzey-1	67.0	1.0	0.0	3.3	2.3	3.0	0.0	0.2	0.1	23.1
Ağırlık % Yüzey-2	53.7	0.8	0.0	9.7	1.4	2.0	0.1	0.2	0.1	32.1



Şekil 5. Üzülmez kömürünün FE-SEM/EDS spektrumları; a: yüzey-1 ve b: yüzey-2

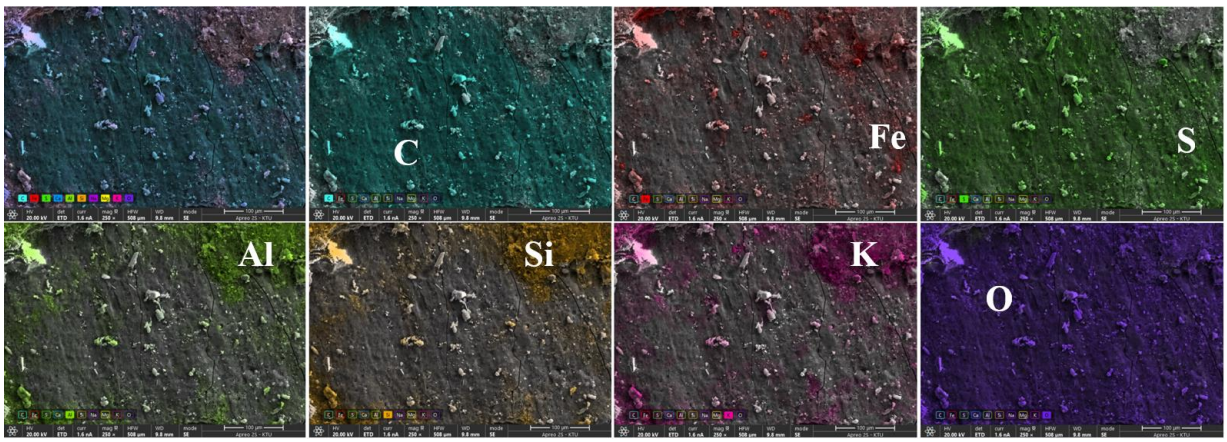
Üzülmez kömüründe, inorganik fazların yerel olarak yoğunlaştığı daha farklı bir mikroyapısal alan incelenmiştir (Şekil 4b). Bu ikinci mikro alana ait yarı-kantitatif elementel kompozisyon sonuçları Çizelge 2 (Üzülmez Yüzey-2) kısmında verilirken, bu verileri destekleyen EDS spektrumu ise Şekil 5b'de sunulmaktadır. Analiz edilen bu bölgede karbon oranının %53,7'ye gerilediği, oksijen oranının ise %32,1'e yükseldiği görülmektedir. Bu alandaki belirgin değişim kalsiyum içeriğinde gözlenmekte olup, kalsiyum oranı ağırlıkça %9,7 seviyesine ulaşmıştır. Karbon ve oksijen içeriklerinin birlikteliğiyle birlikte kalsiyumdaki bu artış, söz konusu mikro bölgede kalsit benzeri karbonat minerallerinin yerel olarak yoğunlaşmış olabileceğine işaret etmektedir. Karbonat fazlarına eşlik eden silisyum (%2,0) ve alüminyum (%1,4) içerikleri ise ikincil düzeyde alüminosilikat/kil grubu mineral bileşenlerinin varlığını düşündürmektedir. Demir (%0,8), magnezyum (%0,2), potasyum (%0,1) ve sodyum (%0,1) elementleri ise oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Bir önceki yüzeyde (yüzey-1) olduğu gibi bu bölgede de kükürt (S) oranının %0,0 olarak belirlenmesi,

sülfürlü mineral fazlarının bu alanda da yapıya etki etmediği varsayımını desteklemektedir.

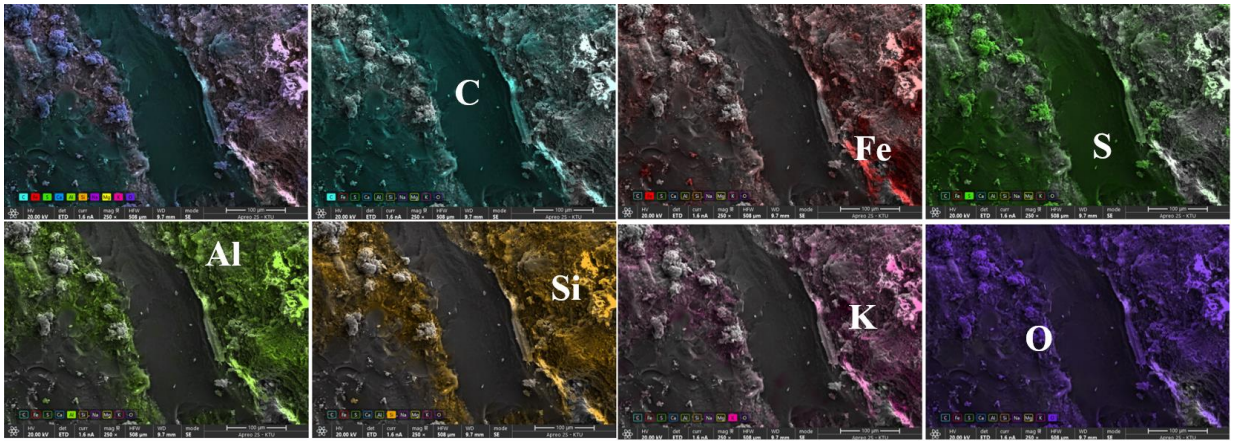
Üzülmez bölgesine ait farklı mikro alanları temsil eden Şekil 4a (Yüzey-1) ve Şekil 4b (Yüzey-2) verileri karşılaştırıldığında, inorganik gang minerallerinin dağılımında bölgesel değişkenliklerin olabileceği göze çarpmaktadır. Şekil 4a daha çok organik matrisin baskın olduğu temiz kömür alanlarına işaret ederken, Şekil 4b karbonat mineralizasyonunun (kalsit vb.) yerel olarak yoğunlaştığı bir matris yapısını sergilemektedir. Şekil 4b'de kalsiyum oranının Şekil 4a'ya kıyasla yaklaşık üç kat yüksek çıkması (%9,7), kömürleşme veya diyajenez süreçleri boyunca yarık ve çatlak dolgusu şeklinde gelişen ikincil karbonat oluşumlarının bölgesel etkisine işaret eden bir veri olarak değerlendirilebilir.

3.3. Zara Kömürü FE-SEM/EDS Bulgularının Değerlendirilmesi

Zara havzası kömür numunelerinin FE-SEM/EDS analizleri, mikrometre ölçeğinde yerel heterojenliklere ve karmaşık bir mineralojik birlikteliğe işaret etmektedir. Şekil 6a'da (yüzey-1) verilen element haritalama sonuçları, organik kömür matrisi ile inorganik sülfür ve silikat fazlarının birbiriyle yakın temas halinde olabileceği bir bölgeyi işaret etmektedir. Bu mikro alana ait yarı-kantitatif elementel kompozisyon verileri Çizelge 3 (Yüzey-1) kısmında verilerken, bu sonuçları destekleyen EDS spektrumu ise Şekil 7a'da sunulmaktadır. İlgili alanda karbon oranı ağırlıkça %36,5 seviyesinde kalırken, oksijen oranı %38,6 olarak tespit edilmiştir. Bölgedeki elementel dağılım incelendiğinde, kükürt (%7,4) ve demir (%4,1) içeriklerinin belirli seviyelere ulaştığı görülmektedir. Demir ve kükürt oranlarındaki bu birliktelik, söz konusu bölgede pirit veya markazit benzeri sülfür minerallerinin yerel olarak yoğunlaşmış olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, elementel haritalama incelemelerinde karbon (C) ve kükürt (S) sinyallerinin uzaysal olarak üst üste çakışma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Kükürt ve karbon sinyallerinin bu beraberliği, kömürleşme süreci boyunca organik matrisin yapısına dahil olmuş organik sülfür varlığı ile de ilişkilendirilebilir. Sülfür fazlarına eşlik eden silisyum (%7,1) ve alüminyum (%2,7) içerikleri ise bu alanda alüminosilikat grubu kil minerallerinin (örneğin kaolinit veya illit) bulunabileceğine işaret etmektedir. Kalsiyum (%1,2), magnezyum (%1,2) ve potasyum (%1,0) gibi elementlerin ise yapıya ikincil mineral izleri veya killerin katyon bileşenleri olarak dahil olduğu tahmin edilmektedir.



a) Zara kömürü yüzey-1

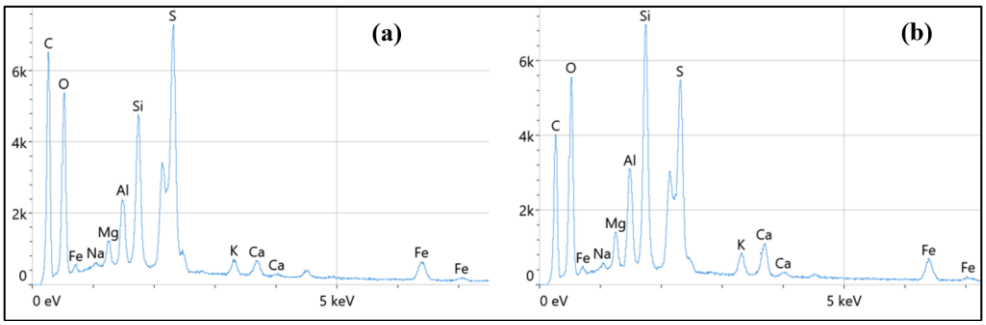


b) Zara kömürü yüzey-2

Şekil 6. Zara kömür numunesine ait FE-SEM görüntüleri ve ilgili mikro alanın EDS element dağılım haritaları. Karbon (C), Alüminyum (Al), Silisyum (Si), Oksijen (O) ve Demir (Fe), Kükürt (S) elementlerinin dağılımı.

Çizelge 3. Zara kömürün FE-SEM/EDS analizine ait yarı-kantitatif elementel kompozisyonu

Element	C	Fe	S	Ca	Al	Si	Na	Mg	K	O
Ağırlık % Yüzey-1	36.5	4.1	7.4	1.2	2.7	7.1	0.4	1.2	1.0	38.6
Ağırlık % Yüzey-2	27.8	4.6	5.7	2.4	4.2	11.6	0.5	1.8	1.5	40.0



Şekil 7. Zara kömürünün FE-SEM/EDS spektrumları; a: yüzey-1 ve b: yüzey-2

Şekil 6b’de (yüzey-2) analiz edilen bölgede ise elementel karaktere bağlı olarak farklı bir mineralojik eğilim gözlenmiştir. Bu alana ait yarı-kantitatif elementel kompozisyon verileri Çizelge 3 (Yüzey-2) kısmında sunulurken, bu bulguları destekleyen EDS spektrumu ise Şekil 7b'de yer almaktadır. Söz konusu mikro alanda karbon oranının %27,8’e gerilediği, oksijen oranının ise %40,0 seviyesine ulaştığı görülmektedir. Bölgenin temel elementel karakteristiği; silisyum içeriğinin %11,6 ve alüminyum içeriğinin %4,2 gibi değerlerde olmasıdır. Bu durum, incelenen bölgede alüminosilikat bazlı kil minerallerinin baskın gang fazı olarak matriste yer alabileceğine işaret etmektedir. Kil mineralizasyonunun yoğunlaştığı tahmin edilen bu alanda demir (%4,6) ve kükürt (%5,7) içeriklerinin varlığını koruması, sülfür minerallerinin kil mineral gruplarıyla da yakın bir fiziksel birliktelik sunabileceğini düşündürmektedir. Kalsiyum (%2,4), magnezyum (%1,8) ve potasyum (%1,5) oranları ise bu alanda kalsit benzeri karbonat minerallerinin ve potasyum/magnezyum içerikli kil mineral gruplarının (illit veya klorit gibi) yerel olarak bulunabileceği varsayımını desteklemektedir.

Aynı makro Zara kömürü numunesinin farklı mikro alanlarını temsil eden Şekil 6a (Yüzey-1) ve Şekil 6b (Yüzey-2) verileri karşılaştırıldığında, inorganik fazların dağılım morfolojisinde bölgesel değişkenlikler göze çarpmaktadır. Şekil 6a’da temel inorganik karakterin demir sülfür mineralleri ve organik sülfür kombinasyonundan etkilendiği tahmin edilirken, Şekil 6b’de bu yapının yerini ağırlıklı olarak alüminosilikat (kil) matrisine bıraktığı görülmektedir. Şekil 6b'de karbon oranının daha düşük (%27,8), silisyum (%11,6) ve kalsiyum (%2,4) oranlarının ise Şekil 6a’ya kıyasla daha yüksek olması, yerel mikrobölgelerde kil taşınımı ile ikincil karbonat mineralizasyonunun daha etkili olmuş olabileceğine işaret etmektedir.

Kükürt ve demir dağılımları, kömürün zenginleştirilmesi süreçleri açısından da veriler sunmaktadır. Şekil 6a'daki kükürt oranının (%7,4), demir oranları birbirine yakın olmasına rağmen Şekil 6b'ye (%5,7) göre daha yüksek olması, organik sülfür içeriğinden kaynaklanıyor olabilir. Şekil 6b'deki kil ve sülfür birlikteliğinin, uygun bir serbestleşme boyutunda fiziksel veya fizikokimyasal yöntemlerle (gravite, flotasyon vb.) uzaklaştırılması daha olası görünürken; Şekil 6a'daki matrise nüfuz etmiş organik sülfür yapısı fiziksel yöntemlere karşı direnç gösterebilir. Dolayısıyla bu mikroyapısal veriler, Zara kömürlerinin endüstriyel olarak kükürtsüzleştirilmesinde sadece serbest piritik formların değil, organik sülfür formlarının da dikkate alınması gerektiğini düşündürmektedir.

3.4. Üç Farklı Kömürün FE-SEM/EDS Bulgularının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Kozlu, Üzülmez ve Zara kömürlerinden elde edilen FE-SEM/EDS sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, her üç örneğin de mikro boyutta heterojen bir yapı sergilediği görülmektedir. Organik matris ile inorganik bileşenlerin dağılımı analiz bölgelerine göre farklılıklar göstermekte olup, bu durum kömürleşme süreçlerindeki sedimanter taşınım, çökelme ortamı ve diyajenetik faktörlerin etkisine işaret etmektedir.

Kozlu kömürü, incelenen bölgeler arasında geniş bir elementel değişkenlik sunmaktadır. Karbon içeriğinin %41,8–80,5 arasında değişmesi, aynı makro numune içerisinde organik maddece zengin alanlar ile inorganik fazların bir arada bulunabileceğini düşündürmektedir. Özellikle bazı mikro alanlarda kalsiyum oranının %21,1 seviyesine ulaşması, karbonat minerallerinin yerel olarak yoğunlaşmış olabileceğine dair bir veri olarak değerlendirilebilir.

Üzülmez kömürü, incelenen örnekler arasında inorganik bileşen çeşitliliğinin nispeten daha sınırlı olduğu bir yapı sergilemektedir. Analiz bölgelerinde organik karbon içeriğinin baskınlığı ve sülfürün tespit edilebilir limitlerin altında kalması, matrisin temiz karakterine işaret etmektedir. Bununla birlikte, lokal alanlardaki kalsiyum varlığı kalsit benzeri fazların yerel izleri olarak yorumlanırken; silisyum ve alüminyum değerlerinin düşüklüğü ise kil minerallerinin sınırlı miktarda bulunabileceğini düşündürmektedir.

Zara kömürü ise diğer iki örneğe kıyasla daha karmaşık bir mineralojik birliktelik sunmaktadır. Analiz edilen alanlarda demir ve kükürt içeriklerinin eş zamanlı varlığı, demir sülfür fazlarının yapıdaki yerini desteklemektedir. Ayrıca silisyum ve alüminyum oranlarının yüksekliği, alüminosilikat grubu kil minerallerinin yaygınlığına işaret etmektedir. Element haritalarında karbon (C) ve kükürt (S) sinyallerinin kısmen çakışma eğilimi göstermesi, sülfürün yalnızca inorganik fazlarda değil, organik matris yapısında da (organik sülfür) yer alabileceğini akla getirmektedir. Bu durum, Zara kömürünü diğer iki örnekten ayıran belirgin bir mikroyapısal özellik olarak göze çarpmaktadır.

Kozlu kömüründe yerel karbonat zenginleşmeleri ön plana çıkarken, Zara kömüründe sülfürlü mineraller ile alüminosilikat fazları daha ağırlıklı bir görünüm sunmaktadır. Üzülmez kömürü ise organik karakterin baskın, inorganik mineral yükünün ise nispeten daha düşük olduğu bir eğilim sergilemektedir. Bu durum, havzaların oluşum dönemlerindeki jeokimyasal koşulların farklılığından kaynaklanabilir.

3.5. FE-SEM/EDS Analizinin Kömür Karakterizasyonundaki Önemi

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen FE-SEM/EDS analizleri, kömürlerin ortalama kimyasal bileşimlerinin ötesinde, elementlerin mikrometre ölçeğindeki uzaysal dağılımlarının da incelenmesine olanak tanımıştır. Klasik kimyasal analiz yöntemleri numunenin genel ortalamasını sunarken; FE-SEM/EDS tekniği organik matris ile mineral fazların ilişkisini, mineral morfolojisini ve elementlerin yerel yoğunlaşmalarını doğrudan gözlemleme imkânı vermektedir. Element haritalama sonuçları, kömür yapılarının homojen olmadığını; ana ve ikincil elementlerin mikro boyutta heterojenlikler sergileyebileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle, sınırlı analiz alanından elde edilen verilerin tüm kömür numunesini temsil etmesi güç görünmektedir. Farklı mikro alanlarda gerçekleştirilen taramalar, kömürün mikroyapısal karakterinin daha dengeli ortaya konulabilmesi açısından önem

taşımaktadır. FE-SEM/EDS tekniklerinin bir diğer önemli avantajı, elementel analiz ile morfolojik incelemeyi eş zamanlı olarak gerçekleştirebilmesidir. Böylece karbonat, alüminosilikat, sülfürlü mineraller ile organik matris arasındaki fiziksel ilişkiler yüksek çözünürlükte incelenebilmektedir. Bu sayede mineral fazların serbestleşme veya matrise bağlı olma durumları değerlendirilebilmektedir. Elde edilen bu veriler; kömür zenginleştirme proseslerinin planlanması, serbestleşme boyutunun öngörülmesi, kül oluşumu, cüruflaşma eğilimi ve yanma performansının yorumlanması süreçlerine katkı sağlayabilir.

Üzülmez kömürü zenginleştirme ve endüstriyel kullanım açısından değerlendirildiğinde, incelenen analiz bölgelerinde sülfür içeriğinin tespit edilmemiş olması (%0,0), piritik veya organik sülfür kaynaklı olumsuz etkilerin bulunmadığına dair olumlu bir veri olarak yorumlanabilir. Temiz organik matris alanları fiziksel zenginleştirme süreçlerinde yüksek verim potansiyeline işaret ederken, numunedeki yerel karbonat yoğunlaşması ise kömürün kül miktarını etkileyebilecek bir faktör olarak görülmektedir. Karbonat mineralleri, killer gibi karmaşık silikat yapılarına kıyasla fiziksel veya kimyasal yöntemlerle matristen daha kolay uzaklaştırılabilir özelliktedir. Dolayısıyla bu mikroyapısal veriler, Üzülmez kömürlerinin endüstriyel değerlendirilmesinde sülfür problemlerinden ziyade, yerel karbonat ve sınırlı silikat dağılımlarının dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, yarı-kantitatif karakterdeki FE-SEM/EDS analizlerinin mineralojik tanımlamalarda tek başına yeterli olmayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, elde edilen verilerin XRD analizleriyle desteklenmesi ve petrografik incelemelerle maseral bileşenlerinin belirlenmesi yararlı görülmektedir. FE-SEM/EDS, XRD ve petrografi gibi yöntemlerin entegre kullanımı, kömürün organik ve inorganik yapısının çok ölçekli ve bütüncül olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bütünleşik yaklaşım, kömürlerin teknolojik davranışlarının ve endüstriyel potansiyellerinin daha güvenilir biçimde yorumlanmasını desteklemektedir. FE-SEM/EDS verileri Kozlu, Üzülmez ve Zara kömürlerinin her birinin kendine özgü mikroyapısal ve elementel eğilimlere sahip olduğunu düşündürmektedir. Kozlu kömürünün karbonat oluşumları, Zara kömürünün sülfürlü ve alüminosilikat birliktelikleri, Üzülmez kömürünün ise organik matris baskın yapısıyla farklılaştığı görülmektedir. Havzaların oluşum koşullarını yansıtan bu çeşitlilikler; zenginleştirme verimi, yanma davranışı ve çevresel performans üzerinde etkili olabileceğinden, FE-SEM/EDS analizleri kömür karakterizasyonunda tamamlayıcı bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında Kozlu, Üzülmez ve Zara havzalarından alınan kömür numuneleri üzerinde karşılaştırmalı FE-SEM/EDS analizleri yürütülmüştür. Elde edilen bulgular, kömürlerin mikrometre ölçeğinde yerel heterojenlikler barındırabileceğini göstermektedir. Bu mikro boyuttaki yapısal çeşitlilik nedeniyle, numunelerin tek bir ortalama kimyasal bileşimle temsil edilmesinin güç olduğu işaret edilmektedir.

Kozlu kömürü, incelenen bölgeler arasında geniş bir elementel değişkenlik (%41,8–80,5 C) sunmaktadır. Mikro alanlarda belirlenen %21,1 oranındaki yüksek kalsiyum (Ca) varlığı, kalsit benzeri ikincil karbonat mineralizasyonuna işaret etmektedir. Üzülmez kömürü ise en belirgin organik matris yapısına sahip örnek olarak öne çıkmaktadır. Bu numunede kükürt (S) sinyalinin tespit edilememesi (%0,0), endüstriyel kullanım ve zenginleştirme süreçleri açısından önemli bir çevresel avantajı düşündürmektedir. Diğer örneklere kıyasla inorganik faz yoğunluğunun daha yüksek olduğu Zara kömüründe, baskın kil matrisine eşlik eden demir (%4,1–4,6) ve kükürt (%5,7–7,4) birlikteliği demir sülfür mineralizasyonunu desteklemektedir. Element haritalarında karbon ve kükürt sinyallerinin uzaysal olarak çakışması, yapıda serbest piritik formların yanı sıra fiziksel yöntemlerle uzaklaştırılması zor olan organik sülfür bağlarının da etkili olabileceğini göstermektedir. Bu durum, Zara kömürünü diğer örneklerden ayıran belirgin bir mikroyapısal özelliktir. Mevcut element haritalaması sonuçları bağlamında ortaya çıkan bu durumun doğrulanması amacıyla ileri düzey karakterizasyon yöntemlerine başvurulmalıdır.

Mikro ölçekteki bu mineralojik farklılıkların kömürlerin teknolojik performansını etkileyebileceği tahmin edilmektedir. Zara kömüründeki yüksek demir ve sülfür içeriğinin yanma sistemlerinde cüruflaşma riskini artırabileceği, Kozlu kömüründeki karbonatların ise kül ergime davranışını değiştirebileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, kömürlerin endüstriyel potansiyellerinin belirlenmesinde, klasik makro analizlerin yanı sıra elementlerin dağılımını ve morfolojik özelliklerini ortaya koyan FE-SEM/EDS tekniğinin tamamlayıcı bir karakterizasyon aracı olduğu görülmektedir.

Elde edilen mikroyapısal ve elementel bulgular, kömür hazırlama süreçlerinin planlanmasına katkı sağlayabilir. Mineral fazların dağılımı, mineral-matris ilişkileri ve olası serbestleşme davranışlarının belirlenmesi, uygun zenginleştirme yöntemlerinin seçilmesine yardımcı olabilir. Özellikle sülfür ve mineral madde bakımından heterojen yapı gösteren kömürlerde, temiz kömür teknolojileri kapsamında kükürt giderme ve mineral madde azaltımına yönelik proseslerin planlanmasında FE-SEM/EDS bulgularından yararlanılabilir. Bu analizler, kömürlerin endüstriyel kullanım öncesi karakterizasyonuna da katkı sağlamaktadır. Ayrıca, uygulanacak proses koşullarının belirlenmesinde diğer kimyasal, mineralojik ve teknolojik analizleri destekleyici bir araç olarak değerlendirilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından FSI-2025-16535 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, destek olan KTÜ BAP Koordinasyon Birimi, Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) ve bu bildiriyi değerlendiren ve katkılarını sunan hakemlere teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

Chaisaenrith, P., Chobpattana, V., O-charoen, N., Srisawat, N., Pecharapa, W., Pavasupree, S. 2024. “Enhancement of an intumescent fire shield paint from the nanotube rutile mineral for the fire performance of steel structures”. Case Studies in Construction Materials, 21, e03974.

Finkelman, R. B., Dai, S., French, D., 2019. The importance of minerals in coal as the hosts of chemical elements: A review. International Journal of Coal Geology, 212, 103251. https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103251

Hellmy, M., Azida, N. 2023. “Selective visualization techniques for elemental mapping analysis of granite stones by field emission scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy (FESEM-EDXS)”. Materials Today: Proceedings, 75, 173-180.

Hower, J. C., Finkelman, R. B., Eble, C. F., Arnold, B. J., 2022. Understanding coal quality and the critical importance of comprehensive coal analyses. International Journal of Coal Geology, 263, 104120. https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.104120

Huang, Q., Shen, J., Qin, Y., Li, X., Li, Y., Yang, S., Wei, B., He, J., 2025. Kinetics and structural evolution mechanism of bio-gasification in low-rank coals with different macerals. Energy, 340, 139321. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.139321

Prabhu, RS., Priyanka, R., Vijay, M., Vikashini, GRK. 2021. “Field emission scanning electron microscopy (Fesem) with a very big future in pharmaceutical research”. International Journal of Pharmacy and Biological Sciences, 11 (2), 183-187.

Xia, D., Lv, H., Jian, K., Huang, D., Wang, Y., Wei, G., Chen, L., 2025. Mechanisms of biogas production under synergistic catalysis between coal and various minerals. Journal of Environmental Chemical Engineering, 13 (5), 117725. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117725

Xing, D., Ma, S., Deng, J., Liu, M., Zhang, H., Yin, H., Gao, Y., Wang, X., Ding, Q., Huang, C., 2026. Enhancing aqueous solubility of mineral components in coal through thermal activation. Fuel, 407, 137254. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.137254

HYDROGEOCHEMICAL AND ELEMENTAL SIGNATURES OF PABDANA COAL AREA, IRAN

HamidReza Nassery*Ali Saeidi Rashk Olya, Farshad Alijani

Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

This study evaluates the hydrogeochemical and elemental characteristics of water resources in the Pabdana coal mining area, Kerman Province, Iran, to assess relationships among water chemistry, regional geology, and coal-bearing units. Water samples from springs, wells, qanats, and mine-related water bodies were analyzed for physicochemical parameters, major ions, and trace elements. Piper results indicate dominant sodium–bicarbonate and calcium–bicarbonate facies, while hydrochemical clustering classified the samples into five groups controlled by water origin, water–rock interaction, evaporation, alluvial deposits, and coal-bearing formations. Elemental comparison between water and coal-bearing rock samples shows geochemical correspondence for Ca, Mg, S, Sr, Sb, and Mo. However, this correspondence reflects both lithological sources and hydrogeochemical processes rather than a direct transfer from rock composition. HCA and heatmap visualization grouped the water samples into three clusters and the elements into four geochemical groups. This integrated framework supports geochemical-pattern recognition and exploration-oriented interpretation in coal-bearing mining environments.

1. INTRODUCTION

Geochemical investigations are widely used in mineral exploration to identify anomalies in rocks, soils, stream sediments, surface water, and groundwater. Among these media, water resources are important because their chemical composition can be influenced by host rocks, mineralized zones, groundwater flow paths, and hydrogeochemical processes. In mining areas, water chemistry is commonly controlled by water–rock interaction, mineral dissolution, evaporation, ion exchange, redox conditions, mixing processes, and the release of elements from mineralized geological units. Therefore, hydrogeochemical studies can help interpret water chemistry and identify geochemical indicators for exploration.

In mineralized and coal-bearing environments, elemental anomalies may be reflected in surface water and groundwater. Pathfinder elements such as Mo, Cu, S, U, As, Sb, and Hg are commonly associated with different deposit types. In coal-bearing areas, the mobility of S, Sr, Sb, U, As, Pb, Cr, and other trace elements can be influenced by coal-bearing strata, clay minerals, carbonate rocks, sulfide minerals, organic matter, and redox-sensitive processes. In addition to geogenic sources, mining and industrial activities may affect water chemistry; therefore, distinguishing geological and anthropogenic contributions is important.

*h-nassery@sbu.ac.ir

The interpretation of hydrogeochemical and geochemical datasets commonly requires graphical and multivariate statistical methods. Piper and Gibbs diagrams are used to identify water facies and dominant hydrochemical processes, while bivariate diagrams such as Na–Cl can help evaluate salinity sources, water–rock interaction, evaporation, and ion exchange. Hierarchical cluster analysis and related multivariate methods are useful for identifying similarities among samples, grouping variables, and recognizing factors controlling geochemical datasets (Kim et al., 2005; Ayenew et al., 2009; Belkhiri et al., 2011). Heatmap visualization can further reveal elemental associations and hidden patterns within complex datasets.

Previous studies have shown that mining activities, mineralized zones, evaporitic units, groundwater flow paths, faults, and mine drainage can influence surface-water and groundwater chemistry and increase the concentration of sulfate, As, Fe, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn, and other elements (Valinia et al., 2020; Seifi and Riahi, 2019; Kusimi and Kusimi, 2012; Qin et al., 2019; Zhou et al., 2020; Guo et al., 2024). Recent studies in coal-mining areas have similarly shown that acid mine drainage and mining-induced changes in aquifer connectivity, water–rock interaction, mineral dissolution, groundwater mixing, and seasonal conditions can alter groundwater and surface-water hydrochemistry (Kumar et al., 2024; Zeng et al., 2024; Ju et al., 2025).

This study aims to investigate the hydrogeochemical characteristics and elemental distribution patterns of Pabdana water resources using major-ion chemistry, trace-element data, hydrochemical diagrams, elemental comparison between water and coal-bearing rock samples, hierarchical cluster analysis, and heatmap visualization to support exploration-oriented interpretation in a coal-bearing mining environment.

2. STUDY AREA

The study area is located in the Pabdana coal mining district, near Zarand city in Kerman Province, southeastern Iran. The region has a mild desert climate, with an average annual precipitation of about 200 mm and a mean annual temperature of 15–17 °C. Precipitation mainly occurs as rainfall, although snowfall may occasionally occur during the cold season.

Structurally, the Pabdana coal mining area lies within the Central Iran Zone. The dominant lithological units are mainly Mesozoic sedimentary rocks. Based on Huckriede et al. (1962), the exposed rock units, from older to younger, include the Shotori, Nayband, Ab-Haji, Badamu, and Hojedk formations. The coal-bearing deposits are mainly Jurassic in age and include several coal-bearing zones, such as Bab-Nizu, Khomrud, Dasht-e Khak, Hojedk, Bidu, and other related units (Moeinossadat and Razavi, 1993). These zones contain coal seams with variable thicknesses. Due to active tectonic deformation, the dip of coal-bearing layers varies considerably, from nearly horizontal to almost vertical, approximately 0°–90° (Hosseini, 2004).The geological map showing lithological units and water sampling locations is presented in Figure 1.

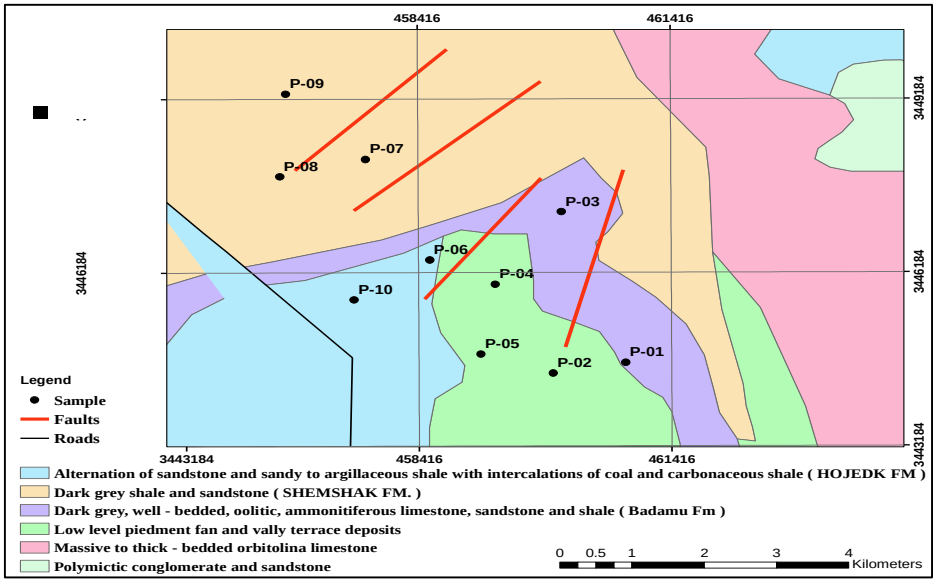


Figure 1. Geological map of the Pabdana coal mining area

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Sampling and Analytical Data

The sampling campaign was conducted in May 2024 across the Pabdana coal mining area, including springs, wells, qanats, and mine-related water sources. Physicochemical parameters, including pH, electrical conductivity, and temperature, were measured in situ using portable instruments. Major ions, including Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4, and HCO_3, were determined in 10 water samples. In addition, 8 selected water samples and three coal-bearing rock samples were analyzed to evaluate trace-element distribution patterns and possible relationships between water chemistry and geological units. The samples were then transferred to accredited laboratories for chemical analysis. The quality of the major-ion data was assessed using charge balance error (Appelo and Postma, 2005; Clark, 2015; APHA, 2017). The physicochemical parameters and major-ion composition of the water samples are presented in Table 1. The trace-element data of the selected water samples and the chemical composition of the coal-bearing rock samples are presented in Tables 2a–b and 3a–b, respectively.

3.2. Methodology

The chemical facies of the water samples were determined using the Piper diagram (Piper, 1944). The main processes controlling water chemistry, including water–rock interaction, evaporation, and ion exchange, were evaluated using Gibbs and Na–Cl diagrams (Gibbs, 1970; Drever, 1997). Major-ion calculations, charge balance error, and comparative plots were performed in Microsoft Excel, while hydrochemical diagrams were prepared using RockWorks 2025. Dendrograms and heatmaps were produced using OriginLab 2021.

For elemental comparison, zero values were considered below-detection-limit values and replaced by half of the corresponding detection limit. For heatmap visualization, elemental concentrations were transformed using log(1 + concentration). Hierarchical cluster analysis was applied to classify water samples and identify elemental associations (Kim et al., 2005; Ayenew et al., 2009; Belkhiri et al., 2011). Finally, the hydrochemical diagrams, water–rock comparison, dendrograms, and heatmaps were integrated to interpret the main geological and hydrogeochemical controls on water chemistry.

Table 1. Physicochemical and major-ion data for Pabdana water samples, May 2024

Sampling location	Sample ID	TDS (mg/L)	EC (µS/cm)	pH	HCO_3 (mg/L)	Cl (mg/L)	SO_4 (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)
Khomrud-e Bala spring	PW-01	1368.8	2360	7.78	186.05	466.1	178.9	86.09	42.64	276	7.24
Khomrud-e Paeen spring	PW-02	363	725	7.63	320	15	70	58.6	16	47	44
Mohammad Amin spring	PW-03	724.4	1249	7.66	172.63	179.27	144	48.66	34.53	138	8.14
Khomrud open-pit lake	PW-04	5649.2	9740	7.6	179.34	1885.05	1893.1	344	362.4	1037.3	50.07
Abandoned Khomrud mine well	PW-05	482.9	878	7.89	321.47	63.07	56.96	42	26.2	96.14	4.88
Khomrud underground mine	PW-06	718.85	1307	7.29	328.18	89.46	79.17	52.68	30.13	97.75	5.62
Begashtuyeh spring	PW-07	380.05	691	8.1	254.37	25.83	37.22	28.76	12.34	82.57	5.38
Banan artesian well	PW-08	318	635	7.33	200	21	80	23.4	24.2	40	26
Moressi spring	PW-09	451	903	7.69	265	21	132	54	33	48	14
Banan spring	PW-10	556.6	1012	7.6	349.53	30.95	72	74	18	61.64	5.28

Table 2a. Element concentrations in Pabdana water samples, May 2024 (Al–Na)

Element	DL	PW-06	PW-07	PW-08	PW-09	PW-10	PW-04	PW-05	PW-02
Al	100	10	320	90	60	10	52	83	60
As	0.5	2.47	0	0	1.56	2.7	4	0	2
Ba	1	23.69	12	42.87	29.09	53	33	11	31
Ca	100	60800	27800	23400	83200	96900	66500	22800	78600
Ce	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Co	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	1	34.2	24.29	33.36	49.35	33.33	44	37	48
Cs	0.5	0	0	0	1.47	0	0	0	1
Cu	1	0	0	0	5.87	0	0	0	0
Dy	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Eu	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	100	0	40	0	0	0	0	0	0
Gd	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
K	100	4990	2480	3770	9800	3510	5490	3870	10000
La	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Li	1	54.72	16.23	31.46	44.26	31.61	80	33	45
Mg	100	39520	11590	34240	65460	45910	45520	33240	63460
Mn	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	0.5	1.7	2.16	0	13.08	1.97	2.4	0	13.08
Na	100	236400	154000	126800	170000	118100	436400	106800	183200

Table 2b. Element concentrations in Pabdana water samples, May 2024 (Nb–Zn)

Element	DL	PW-06	PW-07	PW-08	PW-09	PW-10	PW-04	PW-05	PW-02
Nb	1	0.54	0.67	0.29	0.15	0.48	0.54	0.29	0.15
Nd	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	1	0	0	0	4.93	3.89	0	0	4.93
P	10	30	0	0	0	10	30	0	0
Pb	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Pr	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
Rb	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S	50	98000	35610	64400	139900	83400	110000	61400	126000
Sb	0.5	8.08	0	0	3.89	0	8	0	2
Sc	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Se	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Sm	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Sr	1	3300	590	4520	2300	1570	2960	5100	2510
Ta	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Te	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Th	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	10	0	0	0	0	0	0	0	0

Element	DL	PW-06	PW-07	PW-08	PW-09	PW-10	PW-04	PW-05	PW-02
Tl	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
U	0.1	0	0	0	0	3.24	0	0	0
V	1	1.89	0	1.27	0	0	5	2	0
Y	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Yb	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
Zn	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Note: DL = detection limit; concentrations are in ppm; method: MMS-01. Sample IDs: PW-06 = Khomrud underground mine; PW-07 = Bageshtouyeh spring; PW-08 = Benan artesian well; PW-09 = Morthi spring; PW-10 = Benan spring; PW-04 = Khomrud open-pit lake; PW-05 = Abandoned Khomrud mine well; PW-02 = Lower Khomrud spring.

Table 3a. Element concentrations in Pabdana coal-bearing rocks, May 2024 (Al–Na)

Element	DL	P-R-1	P-R-2	P-R-3
Al	100	39925	40010	40925
As	0.5	100	111	120
Ba	1	255	261	265
Ca	100	33634	34362	35626
Ce	0.5	27	29	32
Co	1	7.3	7.6	8
Cr	1	91	96	100
Cs	0.5	1.2	1.3	1.5
Cu	1	160	172	190
Dy	0.1	4.6	5	6
Eu	0.1	1.74	1.8	2
Fe	100	100000	100000	100000
Gd	0.05	4.75	5.1	7
K	100	492	511	520
La	1	16	12	23
Li	1	109	112	128
Mg	100	12111	13452	14015
Mn	5	737	800	865
Mo	0.5	3.6	3.8	4
Na	100	497	501	621

Table 3b. Element concentrations in Pabdana coal-bearing rocks, May 2024 (Nb–Zn)

Element	DL	P-R-1	P-R-2	P-R-3
Nb	1	9.4	10	10.1
Nd	0.5	21.4	21.4	21.4
Ni	1	25	26	25
P	10	29	29	23
Pb	1	700	690	652
Pr	0.05	5.31	5.5	6
Rb	1	31	29	25
S	50	30000	30000	30000
Sb	0.5	1.8	2	2.3
Sc	0.5	16.4	17	18
Se	0.5	0	0	0
Sm	0.1	6.4	7	8
Sn	0.1	0.6	1	2
Sr	1	1491.5	1752	2010
Ta	0.1	0.4	0.6	0.9
Te	0.5	0	0	0
Th	0.1	9.6	10	11
Ti	10	1315	1390	1420
Tl	0.1	0.8	0.6	0.6
U	0.1	1.7	1.8	2
V	1	49	50	56
Y	0.5	22.1	21	18
Yb	0.05	1.49	1.3	1
Zn	1	230	209	105

Note: DL = detection limit; concentrations are in ppm; method: MMS-01. Sample IDs: P-R-1 = Pabdana coal-bearing rock sample 1; P-R-2 = Pabdana coal-bearing rock sample 2; P-R-3 = Pabdana coal-bearing rock sample 3.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Piper Diagram and Hydrochemical Facies

The Piper diagram was used to determine the hydrochemical facies of water resources in the Pabdana coal mining area based on the milliequivalent percentages of major cations and anions (Fig. 2). Most samples plot within the bicarbonate-water field. Samples PW-02, PW-05, PW-06, and PW-07 show a sodium–bicarbonate to mixed-cation bicarbonate tendency, whereas PW-09 and PW-10 are characterized by

calcium–bicarbonate to calcium–magnesium bicarbonate compositions. In contrast, PW-01, PW-03, and PW-04 deviate from the dominant bicarbonate group. PW-01 shows a sodium–chloride tendency, PW-03 represents a mixed composition with considerable Na, Cl, and SO_4 contributions, and PW-04 falls within a chloride–sulfate facies with mixed cationic composition due to the high relative contribution of Cl and SO_4 in the anion field. Overall, the Piper diagram shows that bicarbonate facies are dominant in the Pabdana water resources, while PW-01, PW-03, and particularly PW-04 indicate ionic heterogeneity and localized salinity effects in the study area.

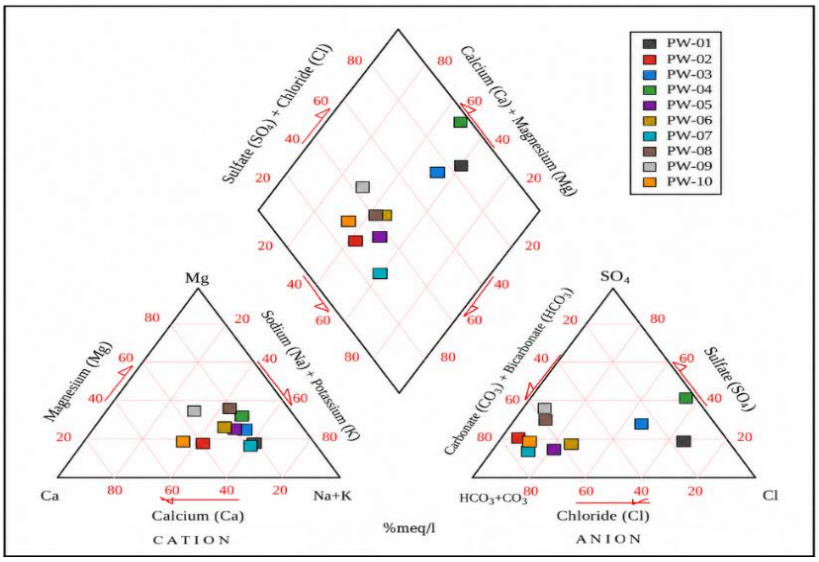


Figure 2. Piper diagram of water samples from the Pabdana coal mining area

4.2. Gibbs Diagram

The Gibbs diagram (Fig. 3), based on Na/(Na+Ca) and Cl/(Cl+HCO_3) ratios against TDS, was used to identify the dominant processes controlling water chemistry. Most Pabdana water samples fall within the rock-dominance field, indicating that lithology, mineral dissolution, and water–rock interaction are the main controls on water chemistry. In contrast, PW-01, PW-03, and particularly PW-04 tend toward the evaporation-dominance field. This pattern is consistent with the enrichment of Cl, SO_4, and TDS in these samples and may reflect evaporation and possible dissolution of evaporitic salts. Therefore, water–rock interaction is dominant in most samples, whereas PW-04 and other saline samples have been influenced by evaporation and increased salinity.

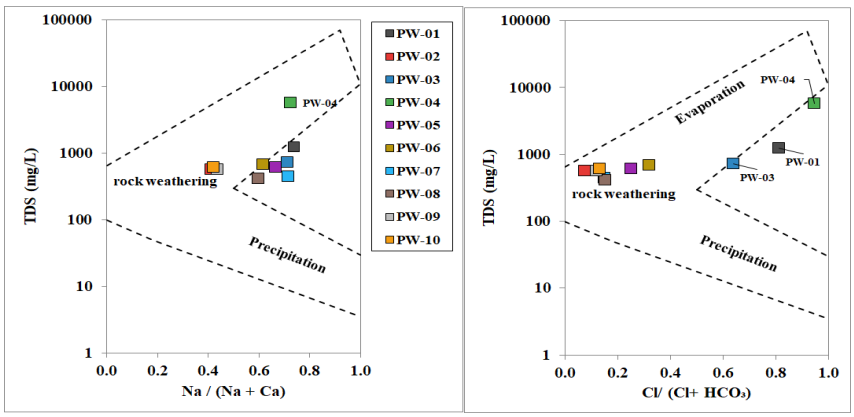


Figure 3. Gibbs diagram for Pabdana water samples

4.3. Na–Cl Relationship and Cation Exchange

The Na–Cl bivariate diagram was used to evaluate the possible origin of sodium and chloride and the roles of halite dissolution and cation exchange (Fig. 4). Samples close to the 1:1 line may indicate a common source for Na and Cl, mainly related to halite dissolution, whereas deviation from this line suggests additional hydrogeochemical processes. PW-04 and, to a lesser extent, PW-01 plot below the 1:1 line and show relative enrichment of Cl compared with Na, which may be associated with reverse cation exchange. In contrast, PW-02, PW-03, PW-05, PW-06, PW-07, PW-08, PW-09, and PW-10 plot above the 1:1 line and show relative Na enrichment, indicating normal cation exchange or sodium input from sources other than halite.

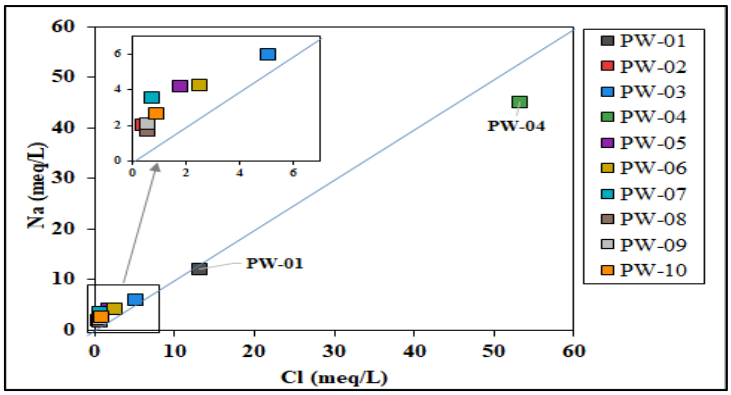


Figure 4. Na–Cl diagram for Pabdana water samples

4.4. Hydrochemical Clustering

Hierarchical cluster analysis was applied to classify the water samples based on the hydrochemical similarity of major ions (Fig. 5). The dendrogram divided the Pabdana water samples into five main clusters. Cluster 1 includes only PW-04, which shows the greatest distance from the other samples and represents the most distinct ionic composition. Cluster 2 consists of PW-05, PW-06, and PW-10, while Cluster 3 includes only PW-02. Cluster 4 consists of PW-07, PW-09, and PW-08, and Cluster 5 includes PW-01 and PW-03. This classification indicates that the major-ion

composition of the water resources is not uniform and that the samples are grouped according to their hydrochemical similarities.

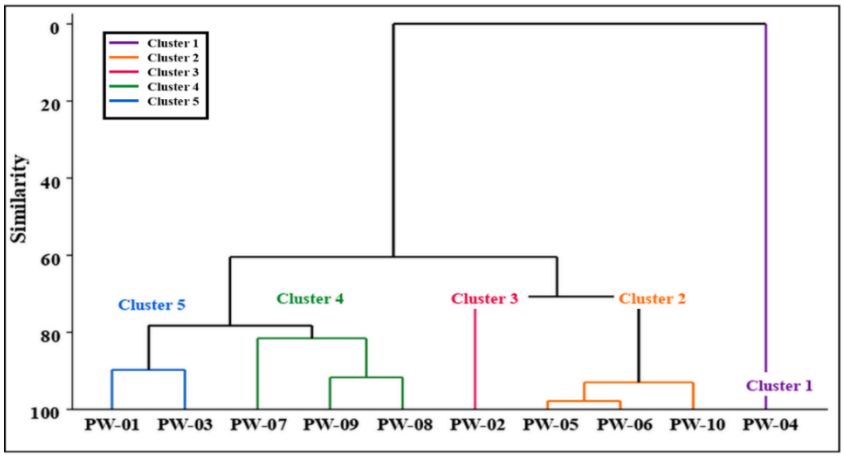


Figure 5. Hydrochemical dendrogram for Pabdana water samples

4.5. Elemental Distribution Patterns

The elemental distribution patterns of water samples and coal-bearing rock samples were compared to evaluate their geochemical correspondence (Fig. 6). Because of the wide concentration range of the elements, the diagram is presented on a logarithmic scale. Na, S, Ca, and Mg show the highest values in the water samples, whereas Al, Ca, S, and Mg occur at higher levels in the coal-bearing rock samples. Elements such as Ca, Mg, S, Sr, Sb, and Mo show relatively similar trends in both sample groups, suggesting a geochemical link between the water resources and the coal-bearing units and associated lithologies. In contrast, Al, As, Ba, Cr, Cs, Cu, Li, Nb, Ni, P, U, and V are more enriched in the rock samples than in the water samples. These differences indicate that the elemental composition of Pabdana water resources is not a direct reflection of rock composition alone, but is also controlled by lithology, mineral dissolution, and element-specific mobility in the aqueous environment.

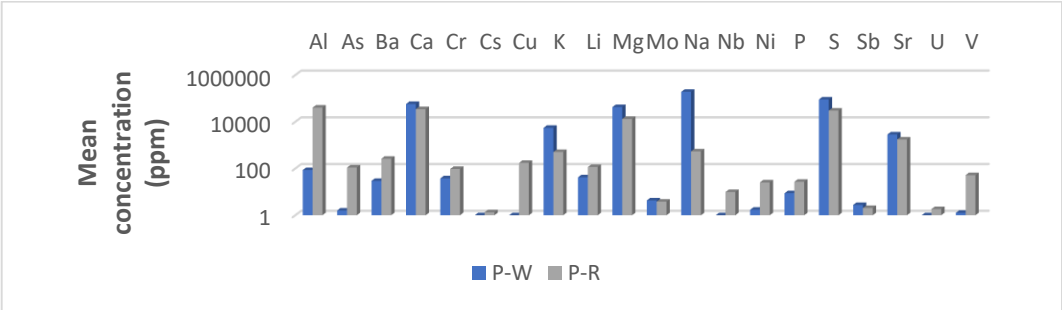


Figure 6. Log-scale elemental patterns in Pabdana water samples (P-W) and coal-bearing rock samples (P-R)

4.6. Hierarchical Cluster Analysis and Heatmap of Elements

Hierarchical cluster analysis (HCA) combined with a heatmap was applied to the elemental concentration data of eight water samples to evaluate elemental distribution patterns and identify geochemical similarities among the samples (Fig. 7). Based on the sample dendrogram, three main clusters can be distinguished. Cluster 1 includes only PW-07, which shows a more distinct pattern compared with the other samples. Cluster 2 consists of PW-10, PW-06, and PW-04, while Cluster 3 includes PW-08, PW-05, PW-09, and PW-02. The grouping of samples within the same cluster indicates closer similarity in their elemental distribution patterns and geochemical signatures.

The element dendrogram separates the elements into four main clusters. Cluster 1 includes K and Sr; Cluster 2 includes Na, S, Ca, and Mg; Cluster 3 includes Al, Ba, Cr, and Li; and Cluster 4 includes P, Fe, Mo, Ni, Cs, Cu, Nb, U, V, As, and Sb. The association of elements within the same cluster indicates relatively similar geochemical behavior and may reflect common sources, mobility, or controlling processes in the aqueous environment. Overall, the HCA and heatmap results show that the elemental distribution patterns of Pabdana water samples are not uniform, and both samples and elements can be classified into distinct groups based on their geochemical similarities.

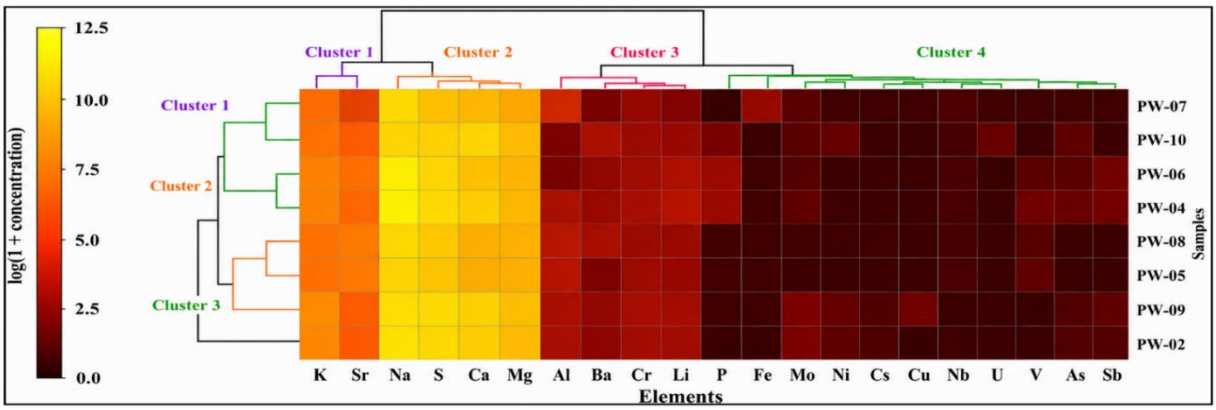


Figure 7. Hierarchical cluster analysis (HCA) heatmap of elemental data for Pabdana water samples.

4.7. Integrated Discussion and Exploration Implications

The integration of hydrochemical diagrams, elemental distribution patterns, and hierarchical cluster analysis (HCA) shows that the Pabdana water resources are not uniform in terms of major-ion chemistry and trace-element behavior. Piper results indicate dominant bicarbonate facies, mainly sodium–bicarbonate and calcium–bicarbonate waters, whereas PW-01, PW-03, and especially PW-04 show ionic heterogeneity and localized salinity effects. Gibbs and Na–Cl diagrams indicate that water–rock interaction is dominant in most samples, while evaporation, increased dissolved salts, cation exchange, and different Na and Cl sources influence the more

distinct samples. These interpretations are consistent with previous hydrochemical studies in mining-affected areas, where Piper, Gibbs, and Na–Cl diagrams have been used to evaluate water facies, water–rock interaction, evaporation, mineral dissolution, salinity sources, and ion-exchange processes (Hounslow, 1995; Tiwari et al., 2016; Ahmed et al., 2022). Hydrochemical clustering further supports sample non-uniformity by separating the samples into five groups: PW-04; PW-05, PW-06, and PW-10; PW-02; PW-07, PW-09, and PW-08; and PW-01 and PW-03, reflecting differences in water origin, flow path, carbonate interaction, alluvial deposits, coal-bearing strata, and mine-related environments.

The comparison of elemental patterns between water and coal-bearing rock samples indicates that water chemistry is not a direct reflection of rock composition alone, but is controlled by element mobility, mineral dissolution, lithology, and hydrogeochemical conditions. Ca and Mg enrichment is mainly related to carbonate dissolution, while elevated Na is consistent with sodium–bicarbonate facies, cation exchange, and possible non-chloride sodium sources. Elements such as S, Sr, Sb, and Mo show geochemical correspondence between water and coal-bearing rock samples, suggesting a possible relationship with coal-bearing strata and associated sedimentary units. For As, U, and Sb, the available data do not allow a definitive distinction between geogenic and anthropogenic sources, although their occurrence may be linked to coal-bearing units, sulfide minerals, organic matter, and local redox conditions. Similar controls on element transport have been reported in mining areas affected by geological sources, groundwater flow paths, redox conditions, mineral dissolution, and mining activities (Qin et al., 2019; Zhou et al., 2020; Guo et al., 2024).

From an exploration perspective, Mo, Sb, and Sr may serve as complementary reconnaissance indicators rather than as stand-alone pathfinders. Mo is redox-sensitive and may be released as mobile molybdate during weathering of coal- or sulfide-bearing strata (Finkelman et al., 2018; Smedley and Kinniburgh, 2017). Sb enrichment may reflect sulfide mineralization or epigenetic inputs, although its mobility depends on redox conditions and sorption onto Fe-(oxyhydr) oxides (Sia and Abdullah, 2012; Borčinová Radková et al., 2023). Sr mainly traces the dissolution of carbonate, sulfate, and silicate minerals and related ion-exchange processes (Malov, 2024). Therefore, their combined behavior may help identify areas influenced by coal-bearing strata, although further sampling and mineralogical evidence are required.

The HCA heatmap classifies the eight water samples into three elemental groups and the elements into four geochemical groups. PW-07 forms a separate cluster with relatively higher Al and Fe contents, possibly reflecting interaction with Al- and Fe-

bearing lithological units or weathered horizons. The other sample clusters, PW-10–PW-06–PW-04 and PW-08–PW-05–PW-09–PW-02, indicate similar geochemical signatures and comparable geological or hydrogeochemical controls. Element clustering identifies K–Sr; Na–S–Ca–Mg; Al–Ba–Cr–Li; and P–Fe–Mo–Ni–Cs–Cu–Nb–U–V–As–Sb groups, which may reflect the influence of silicate and clay minerals, carbonate and sulfate dissolution, coal-bearing strata, detrital material, redox conditions, Fe–Mn adsorption phases, organic matter, and minerals associated with coal-bearing sediments. Overall, interpretation based on a single element is not sufficient; a combined evaluation of major ions, trace elements, pathfinder elements, water–rock comparison, and multivariate statistical methods can reduce uncertainty and improve exploration-oriented interpretation in coal-bearing mining environments (Kim et al., 2005; Ayenew et al., 2009; Belkhiri et al., 2011).

5. CONCLUSIONS

This study investigated the hydrogeochemical characteristics and elemental distribution patterns of water resources in the Pabdana coal mining area using hydrochemical diagrams, elemental comparison, hierarchical cluster analysis, and heatmap visualization. The results show that the water resources are not uniform in terms of major-ion composition and elemental behavior, and are mainly controlled by water–rock interaction, evaporation, ion exchange, carbonate rocks, alluvial deposits, and coal-bearing units.

Piper results indicate dominant sodium–bicarbonate and calcium–bicarbonate facies, whereas PW-01, PW-03, and particularly PW-04 show distinct hydrochemical behavior. Gibbs and Na–Cl diagrams show that water–rock interaction is dominant in most samples, while evaporation, salinity effects, cation exchange, and different Na and Cl sources influence the more saline or distinct samples. Hydrochemical clustering classified the samples into five groups, reflecting differences in water origin, flow path, and interaction with carbonate, alluvial, coal-bearing, and mine-related environments. Elemental comparison between water and coal-bearing rock samples shows that Ca, Mg, S, Sr, Sb, and Mo may indicate geochemical relationships between water resources and coal-bearing units. In particular, Mo, Sb, and Sr may serve as complementary reconnaissance indicators when interpreted together; however, their distributions also reflect hydrogeochemical processes rather than a direct transfer from rock composition. The HCA heatmap classified the eight water samples into three clusters and the elements into four geochemical groups, indicating similarities among samples and related elemental behavior. Overall, the integration of hydrochemical data, elemental distribution patterns, water–rock comparison, and multivariate statistical methods

provides an effective approach for identifying geochemical patterns and supporting exploration-oriented interpretation in coal-bearing mining environments. Considering the limited number of samples and the single sampling period, future studies should include wet- and dry-season sampling, more water and coal-bearing rock samples, and complementary mineralogical, isotopic, and geochemical analyses to better distinguish element sources and controlling processes.

REFERENCES

Ahmed, S.I., Sonkar, A.K., Kishore, N., Varshney, R., Jhariya, D. 2022. Hydrogeochemical Characterization and Qualitative Assessment of Groundwater in Jampali Coal Mining Area, Chhattisgarh, India, Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 103, 4, pp. 1109-1125.

APHA/AWWA/WEF. 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed., American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, DC.

Appelo, C.A.J., Postma, D. 2005. Geochemistry, Groundwater and Pollution, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton.

Ayenew, T., Fikre, S., Wisotzky, F., Demlie, M., Wohnlich, S. 2009. Hierarchical Cluster Analysis of Hydrochemical Data as a Tool for Assessing the Evolution and Dynamics of Groundwater Across the Ethiopian Rift, International Journal of Physical Sciences, 4, 2, pp. 76-90.

Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L. 2011. A Multivariate Statistical Analysis of Groundwater Chemistry Data, International Journal of Environmental Research, 5, 2, pp. 537-544.

Clark, I. 2015. Groundwater Geochemistry and Isotopes, CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton.

Drever, J.I. 1997. The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments, 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, 436 p.

Finkelman, R.B., Palmer, C.A., Wang, P. 2018. Quantification of the Modes of Occurrence of 42 Elements in Coal, International Journal of Coal Geology, 185, pp. 138-160.

Gibbs, R.J. 1970. Mechanisms Controlling World Water Chemistry, Science, 170, 3962, pp. 1088-1090.

Guo, M., Xiao, Y., Zhang, J., Wei, L., Wei, W., Xiao, L., Fan, R., Zhang, T., Zhang, G. 2024. Insights into the Pattern of the Persistent Heavy Metal Pollution in Soil from a Six-Decade Historical Small-Scale Lead-Zinc Mine in Guangxi, China, Processes, 12, 8, 1745.

Hosseini, A. 2004. Coal: From Formation to Consumption, Imam Khomeini International University Press, 267 p. [in Persian].

Hounslow, A.W. 1995. Water Quality Data: Analysis and Interpretation, Lewis Publishers, Boca Raton.

Huckriede, R., Kürsten, M., Venzlaff, H. 1962. Zur Geologie des Gebietes zwischen Kerman und Sagand, Iran, Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, 51, pp. 1-197.

Ju, Q., Hu, Y., Liu, Q. 2025. Hydrogeochemical Impacts of Coal Mining on Multi-Aquifer Systems: A Case Study in the Linhuan Mining District, China, Ecotoxicology and Environmental Safety, 308, 119492.

Kim, J.H., Kim, R.H., Lee, J.H., Cheong, T.J., Yum, B.W., Chang, H.W. 2005. Multivariate Statistical Analysis to Identify the Major Factors Governing Groundwater Quality in the Coastal Area of Kimje, South Korea, Hydrological Processes, 19, 6, pp. 1261-1276.

Kumar, V., Paul, D., Kumar, S. 2024. Acid Mine Drainage from Coal Mines in the Eastern Himalayan Sub-Region: Hydrogeochemical Processes, Seasonal Variations and Insights from Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes, Environmental Research, 252, 119086.

Kusimi, J.M., Kusimi, B.A. 2012. The Hydrochemistry of Water Resources in Selected Mining Communities in Tarkwa, Journal of Geochemical Exploration, 112, pp. 252-261.

Malov, A.I. 2024. The Conditions for the Formation of Strontium in the Water of Ancient Silicate Deposits Near the Arctic Coast of Russia, Water, 16, 17, 2369.

Moeinossadat, H., Razavi Armaghani, B. 1993. Coal, Geological Survey of Iran, Tehran, 212 p. [in Persian].

Piper, A.M. 1944. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses, Transactions, American Geophysical Union, 25, 6, pp. 914-928.

Qin, W., Han, D., Song, X., Engesgaard, P. 2019. Effects of an Abandoned Pb-Zn Mine on a Karstic Groundwater Reservoir, Journal of Geochemical Exploration, 200, pp. 221-233.

Radková, A.B., Jamieson, H.E., Campbell, K.M., Hudson-Edwards, K.A. 2023. Antimony in Mine Wastes: Geochemistry, Mineralogy, and Microbiology, Economic Geology, 118, 3, pp. 621-637.

Seifi, H., Riahi, M. 2019. Assessment of Heavy-Metal Pollution Indices in Surface Waters of the Sarcheshmeh Copper Mine Using Multivariate Statistical Methods and GIS, Iranian Journal of Soil and Water Research, 50, pp. 161-176. [in Persian].

Sia, S.G., Abdullah, W.H. 2012. Enrichment of Arsenic, Lead, and Antimony in Balingian Coal from Sarawak, Malaysia: Modes of Occurrence, Origin, and Partitioning Behaviour during Coal Combustion, International Journal of Coal Geology, 101, pp. 1-15.

Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G. 2017. Molybdenum in Natural Waters: A Review of Occurrence, Distributions and Controls, Applied Geochemistry, 84, pp. 387-432.

Tiwari, A.K., De Maio, M., Singh, P.K., Singh, A.K. 2016. Hydrogeochemical Characterization and Groundwater Quality Assessment in a Coal Mining Area, India, Arabian Journal of Geosciences, 9, 3, 177.

Valinia, H., Bayat, N., Nassery, H.R. 2020. Assessment of the Impacts of Mining Activities at Sarcheshmeh Copper Mine on Downstream Water and Soil Resources, Proceedings of the 39th National and 4th International Geosciences Congress, Iran. [in Persian].

Zeng, Y.F., Wu, Q., Mei, A.S., Wang, L., Yin, W.B., Yang, L., Zhao, D., Meng, S.H., Gao, H.F. 2024. Hydrogeochemical Process and Coal Mining-Motivated Effect on the Hydrochemistry for the Groundwater System in Mining Area of Western China, Journal of Geochemical Exploration, 263, 107516.

Zhou, M., Li, X., Zhang, M., Liu, B., Zhang, Y., Gao, Y., Ullah, H., Peng, L., He, A., Yu, H. 2020. Water Quality in a Worldwide Coal Mining City: A Scenario in Water Chemistry and Health Risks Exploration, Journal of Geochemical Exploration, 213, 106513.

KÖMÜR ATIK SAHALARINDAN YANABİLİR MADDE GERİ KAZANIM POTANSİYELİ

RECOVERY POTENTIAL OF COMBUSTIBLE MATTER FROM COAL WASTE DUMPS

Gökhan Sarıhan*
Türkiye Taşkömürü Kurumu, Zonguldak

Sait Kızgut
Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak

Ayhan Ali Sirkeci
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ÖZET Kömür madenciliği ve kömür hazırlama işlemleri sonucunda oluşan atık sahaları, geri kazanılabilir önemli miktarda yanabilir madde içermektedir. Bu çalışmada, Zonguldak Kömür Havzası'nda bulunan Alacaağzı şist atık sahasının yanabilir madde geri kazanım potansiyeli elek analizleri ve yüzdürme-batırma deneyleri kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar, ince fraksiyonlarda kömürce zenginleşme nedeniyle tane boyutu küçüldükçe kalorifik değerlerin arttığını göstermiştir. Boyut dağılımı, 0–18 mm fraksiyonunun toplam malzemenin %76,45'ini, 18–100 mm fraksiyonunun ise %23,55'ini oluşturduğunu göstermiş; yüzdürme-batırma analizleri ince fraksiyonun geri kazanılabilir temiz kömür içerdiğini ortaya koymuştur. 1,60–1,90 g/cm³ yoğunluk aralığında yüzebilen ürünlerde kalorifik değerlerin 5354 cal/g seviyesine ulaştığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, eleme ve yoğunluk esaslı ayırma yöntemlerinin eski kömür atık sahalarından ekonomik kömür geri kazanımı sağlayabileceğini göstermektedir.

ABSTRACT Coal waste dumps generated during mining and coal preparation operations contain considerable amounts of recoverable combustible matter. In this study, the recovery potential of combustible material from the Alacaağzı shale waste dump located in the Zonguldak Coal Basin was investigated using sieve analyses and float-and-sink experiments. The results demonstrated that calorific values increased with decreasing particle size due to the enrichment of coal particles within fine fractions. The size distribution showed that the 0–18 mm and 18–100 mm fractions constituted 76.45% and 23.55% of the total material, respectively; float-and-sink analyses indicated recoverable clean coal in the fine fraction. Products floating within the 1.60–1.90 g/cm³ density interval exhibited calorific values up to 5354 cal/g. The findings indicate that screening and density-based separation techniques may provide economically viable recovery of combustible matter from old coal waste dump materials.

* *gokhansarihan@windowslive.com*

1. GİRİŞ

Kömür madenciliği ve kömür hazırlama faaliyetleri sonucunda dünya genelinde büyük miktarlarda pasa, şist, iri lavvar artığı, ince kömür şlamı ve filtre keki oluşmaktadır. Cevher üretimi sırasında çıkarılan malzemenin önemli bir bölümü kömür hazırlama tesislerinde yan ürün veya atık olarak ayrılmakta; iri taneli artıklar atık yığınlarında, ince taneli artıklar ise çoğunlukla şlam havuzlarında depolanmaktadır. Uzun yıllar ekonomik değeri düşük kabul edilen bu malzemeler, günümüzde enerji maliyetlerindeki artış, birincil kaynakların korunması, sürdürülebilir madencilik ve çevresel yükümlülükler nedeniyle yeniden değerlendirilmektedir. İlk on büyük kömür üreticisi ülkede depolanan ince kömür ve kömür atığı miktarının yaklaşık 30 milyar tona ulaştığı ve her yıl yaklaşık 1 milyar ton yeni atık oluştuğu tahmin edilmektedir (Hanak, 2022).

Özellikle geçmiş dönemlerde kullanılan düşük ayırma verimine sahip kömür hazırlama teknolojileri, yetersiz tane serbestleşmesi, ince tanelerin etkin biçimde zenginleştirilememesi ve proses kontrolündeki sınırlılıklar nedeniyle atık sahalarında önemli miktarda yanabilir maddenin kaldığı bilinmektedir. Bu nedenle eski kömür atık sahaları, günümüzde yalnızca rehabilite edilmesi gereken çevresel sorun alanları değil, aynı zamanda yeniden işletilebilecek antropojenik yataklar veya ikincil enerji kaynakları olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte kömür atıkları tane boyutu, kül, nem, kükürt, mineral madde, oksidasyon derecesi ve kalorifik değer bakımından oldukça heterojendir. Dolayısıyla bir atık sahasının enerji kaynağı olarak değerlendirilebilirliği yalnızca toplam kömür içeriğine göre değil; atığın tane boyutu dağılımı, yanabilir maddenin farklı boyut ve yoğunluk fraksiyonlarındaki dağılımı, serbestleşme derecesi, zenginleştirme verimi ve elde edilen ürünün yakıt özellikleri birlikte dikkate alınarak belirlenmelidir.

Kömür atıklarının yeniden kazanılmasında uygulanacak proses, öncelikle atığın tane boyutuna ve kömür–mineral madde serbestleşmesine bağlıdır. İri ve orta boyutlu atıklarda eleme, jig, ağır ortam tamburu, ağır ortam siklonu ve kuru pnömatik ayırma yöntemleri kullanılabilirken; ince ve çok ince atıklarda hidrosiklon, spiral, gelişmiş gravite ayırıcıları, flotasyon ve yağ aglomerasyonu öne çıkmaktadır. Düşük nemli eski atık yığınlarında kuru eleme ve kuru zenginleştirme, su tüketimini ve susuzlandırma gereksinimini azaltması bakımından avantajlıdır. Stańczyk vd. (2021), ham taşkömürü deneylerinde negatif basınçlı pnömatik ayırma sonucunda ürünün kalorifik değerinin %5–40 oranında artırılabildiğini ve ürün veriminin %60'ın üzerinde tutulabildiğini bildirmiştir. Silezya'daki atık yığınlarından alınan numunelerde ise emilen hafif fraksiyonun kül içeriği beslemeye göre %10–25 oranında azaltılmıştır. Bununla birlikte atık numunelerinden elde edilen ürünün doğrudan yakıt standartlarını karşılamadığı ve daha hassas zenginleştirme işlemleri için ön konsantre olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir.

İnce kömür atıkları için gravite ve yüzey özelliklerine dayalı ayırma yöntemleri önemli bir geri kazanım potansiyeli sunmaktadır. Tunçbilek Kömür Hazırlama Tesisi'nden

alınan ve yaklaşık %66 kül içeren çok ince atıklar üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, hidrosiklonla ön zenginleştirme ve Falcon konsantratörünün birlikte uygulanması sonucunda yaklaşık %36 kül içeren bir ürün elde edilmiştir (Oruç vd., 2010). Bununla birlikte numunenin yaklaşık %82'sinin 20 µm'den ince olması, gravite esaslı ayırmanın etkinliğini sınırlandırmıştır. Bu sonuç, çok ince ve kil içeriği yüksek atıklarda tek bir ayırma yönteminin yeterli olmayabileceğini ve gravite ayırma–flotasyon gibi birleşik akım şemalarının değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Yağ aglomerasyonu da ince kömür tanelerinin hidrofobik özelliklerinden yararlanılarak mineral maddeden ayrılmasını sağlayan alternatif bir yöntemdir. Yaşar vd. (2018), Tunçbilek lavvar atıklarının ayçiçek yağı kullanılarak aglomerasyonunda optimum koşullarda kül uzaklaştırma oranını %84,1, kükürt uzaklaştırma oranını %57,6 ve yanabilir madde geri kazanımını %46,8 olarak belirlemiştir. Bu işlem sonucunda kül ve kükürt içerikleri sırasıyla %54,6 ve %3,0 olan atıktan, %29,9 kül ve %1,3 kükürt içeren bir ürün elde edilmiştir. Bu bulgular, ince kömür atıklarında kaybolan yanabilir maddenin enerji amaçlı geri kazanılabileceğini göstermektedir. Ancak reaktif tüketimi, ürünün susuzlandırılması, ince kil minerallerinin prosese etkisi ve geri kazanılan ürünün piyasa gerekliliklerini karşılayıp karşılamadığı teknik ve ekonomik değerlendirmelerde dikkate alınmalıdır.

Kömür atıklarından enerji elde edilmesinde ikinci yaklaşım, atığın kapsamlı bir zenginleştirme yapılmadan veya sınırlı bir ön zenginleştirme sonrasında uygun yakma sistemlerinde kullanılmasıdır. Yüksek kül ve düşük kalorifik değer nedeniyle bu tür malzemelerin geleneksel pulverize kömür kazanlarında doğrudan kullanılması çoğu zaman mümkün değildir. Buna karşılık dolaşımlı akışkan yataklı yakma sistemleri; düşük kaliteli yakıtları yakabilmesi, geniş bir yakıt esnekliği sağlaması ve kireçtaşı ilavesiyle kükürt dioksitin yatak içinde tutulmasına olanak vermesi nedeniyle kömür atıkları için uygun bir seçenek oluşturmaktadır. Avustralya'da lavvar artıklarının akışkan yatakta yakılmasına yönelik pilot çalışmalar, kömür yıkama sırasında kaybedilen enerjinin azaltılabileceğini ve atık depolamaya alternatif bir enerji geri kazanım modeli geliştirilebileceğini göstermiştir (Duffy vd., 1981).

Güney Afrika'daki kömür atıkları için yapılan teknik ve ekonomik değerlendirmede, 11–15 MJ/kg arasında kalorifik değere sahip yüksek küllü kömür artıklarının dolaşımlı akışkan yataklı kazanlarda değerlendirilebileceği belirtilmiştir. Çalışmada mevcut atık stokları ve güncel atık üretimi birlikte dikkate alındığında önemli bir elektrik üretim potansiyeli bulunduğu hesaplanmıştır. Ekonomik uygulanabilirliğin özellikle tesis sermaye maliyetine, atık kömür maliyetine, sorbent taşıma mesafesine ve elektrik satış değerine duyarlı olduğu; kömürün kükürt içeriği ile sorbent etkinliğinin de işletme maliyetlerini etkilediği vurgulanmıştır (North vd., 2015). Dolayısıyla kömür atıklarının ikincil yakıt olarak kullanılması, yalnızca atığın yanabilir madde içermesine bağlı olmayıp yakma teknolojisi ve saha–tesis lojistiğiyle birlikte değerlendirilmelidir.

İnce ve yüksek nemli kömür şlamlarının enerji amaçlı kullanımı için peletleme, briketleme, susuzlandırma ve kömür–su yakıtı hazırlama yöntemleri de

araştırılmaktadır. Peletleme veya briketleme, ince kömürün taşınmasını ve beslenmesini kolaylaştırırken düşük kalorili atıkların daha yüksek kaliteli kömür, biyokütle veya düşük nemli yakıtlarla harmanlanması yakıt özelliklerinin düzenlenmesini sağlayabilir. Hanak (2022) tarafından gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesinde, şlam havuzlarından geri kazanılarak peletlenen kömürün beşikten tesis kapısına kadar olan küresel ısınma etkisinin, geleneksel kömür üretimine göre %78,7 daha düşük olabileceği hesaplanmıştır. Ancak bu sonuç yakıtın yanma kaynaklı karbon emisyonlarının ortadan kalktığı anlamına gelmemekte; yeni kömür üretimi yerine mevcut bir atığın kullanılmasından kaynaklanan tedarik zinciri avantajını göstermektedir. Bu nedenle kömür atıkları yenilenebilir enerji kaynağı olarak değil, birincil kömür üretimini kısmen azaltabilecek geçiş niteliğinde ikincil bir fosil enerji kaynağı olarak tanımlanmalıdır.

Atık sahalarından kömür geri kazanılması, enerji üretiminin yanı sıra çevresel risklerin azaltılmasına da katkı sağlayabilir. Kömür ve pirit içeren atıklar atmosferik oksijen ve suyla temas ettiğinde oksidasyon, kendiliğinden ısınma, asit maden drenajı ve metal mobilizasyonu meydana gelebilmektedir. Silezya'daki kendiliğinden ısınan yedi kömür atık sahasından alınan gaz örnekleri, termal aktivitenin karbon oksitler, hidrokarbonlar ve diğer gazların oluşumuyla ilişkili karmaşık bir emisyon kaynağı oluşturduğunu göstermiştir (Fabiańska vd., 2019). Yanabilir maddenin kontrollü biçimde geri kazanılması, sahadaki oksitlenebilir organik madde miktarını azaltarak uzun dönemli yangın riskinin düşürülmesine yardımcı olabilir. Bununla birlikte atık sahasının kazılması sırasında oksijen girişinin artması, daha önce kapalı kalan sıcak bölgelerin açığa çıkması ve toz oluşması gibi riskler meydana gelebileceğinden kazı ve geri kazanım faaliyetleri termal izleme ve yangın kontrol planıyla birlikte yürütülmelidir.

Atık sahalarının yeniden kazılması, elenmesi ve taşınması sırasında oluşan toz emisyonları da önemli bir çevresel etkidir. Ghose (2007), kazı, yükleme, boşaltma ve taşıma faaliyetlerinden kaynaklanan toz emisyonlarının saha özelliklerine bağlı emisyon faktörleri kullanılarak nicel olarak tahmin edilebileceğini göstermiştir. Bu çalışma kapsamında, eski kömür atık sahalarının yeniden işletilmesinde yüzey nemlendirme, taşıma yollarının düzenlenmesi, kapalı konveyörler, rüzgâr yönünün dikkate alınması ve işlem alanlarının kademeli olarak rehabilite edilmesi önerilmektedir.

Kömür atıklarının sürdürülebilir değerlendirilmesinde yalnızca yanabilir ürünün geri kazanılması yeterli değildir. Zenginleştirme sonrasında oluşan yüksek küllü nihai artığın fiziksel ve jeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi ve bu malzemenin güvenli bir kullanım alanına yönlendirilmesi gerekir. Taha vd. (2017), kömür atıklarından flotasyonla yanabilir madde geri kazanımını, kalan mineral fraksiyonun çevre dostu tuğla üretiminde kullanılmasını içeren bütünleşik bir yaklaşımla değerlendirmiş; yüksek kalorifik değerli bir ürün elde edilirken mineral ağırlıklı kalıntının yapı malzemesine dönüştürülmesiyle depolanacak atık miktarının azaltılabileceğini göstermiştir. Benzer şekilde Güney Afrika kömür atıkları ile polisiloksan esaslı ön-

seramik polimer kullanılarak üretilen kompozitlerin bazı yapı malzemesi standartlarını karşılayabildiği bildirilmiştir (Eterigho-Ikelegbe vd., 2022). Bu yaklaşım, atık sahalarının "kömür geri kazanımı–ikincil hammadde üretimi–nihai rehabilitasyon" sıralamasıyla değerlendirilmesini desteklemektedir. Bununla birlikte her mineral artık doğrudan yapı veya rehabilitasyon malzemesi olarak kullanılamaz; sülfür, iz element, asit üretme ve kirletici sızdırma potansiyeli kullanım öncesinde belirlenmelidir (Lottermoser, 2010).

Kömür hazırlama tesisi atıklarının kaynak değeri yalnızca yanabilir maddeyle sınırlı değildir. Bu atıklar nadir toprak elementleri ve diğer kritik elementler bakımından da potansiyel ikincil kaynaklar olarak araştırılmaktadır. Honaker vd. (2018), Appalachian Havzası'ndaki iri kömür atıklarına ilişkin laboratuvar deneylerinden elde edilen verilere dayanarak fiziksel ayırma, pirit biyo-oksidasyonu, yığın liçi, seçici çöktürme ve solvent ekstraksiyonunu birleştiren kavramsal bir NTE geri kazanım akım şeması önermiştir. Zhang vd. (2017) ise Fire Clay kömür damarını işleyen bir tesisten alınan tikiner alt akımında kuru kül bazında yaklaşık 431 ppm olan toplam nadir toprak elementi içeriğini, çok kademeli flotasyonla yaklaşık 2300 ppm'e ve kolon flotasyonuyla yaklaşık 4700 ppm'e yükseltmiştir. Bu çalışmalar, kömür atıklarının enerji ve kritik hammadde geri kazanımının birlikte değerlendirilebileceği çok ürünlü kaynaklar olduğunu göstermektedir.

Türkiye'de kömür atık sahalarının yeniden değerlendirilmesi Zonguldak Kömür Havzası, Tunçbilek, Soma, Seyitömer ve Afşin–Elbistan gibi uzun süreli üretim yapılan bölgeler açısından önem taşımaktadır. Zonguldak Havzası'nda uzun yıllardır sürdürülen yeraltı madenciliği ve kömür hazırlama faaliyetleri sonucunda önemli miktarda pasa, şist ve lavvar atığı oluşmuştur. Karayiğit vd. (2018), Kozlu kömür sahasındaki damarların petrografik, mineralojik ve elementel özelliklerini inceleyerek kül, uçucu madde, mineral madde ve iz element bileşimlerinin damarlar arasında önemli değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuş; tektonik deformasyon, dolaşan çözeltiler ve andezitik dayklarla ilişkili hidrotermal etkilerin epijenetik mineral oluşumunu ve bazı kömür kalite özelliklerini etkileyebildiğini belirtmiştir. Bu bulgulardan hareketle, Zonguldak kömür atıklarının geri kazanımında bütün sahalara uygulanabilecek tek bir proses yerine sahaya özgü karakterizasyon ve zenginleştirme çalışmalarına gereksinim olduğu değerlendirilmektedir.

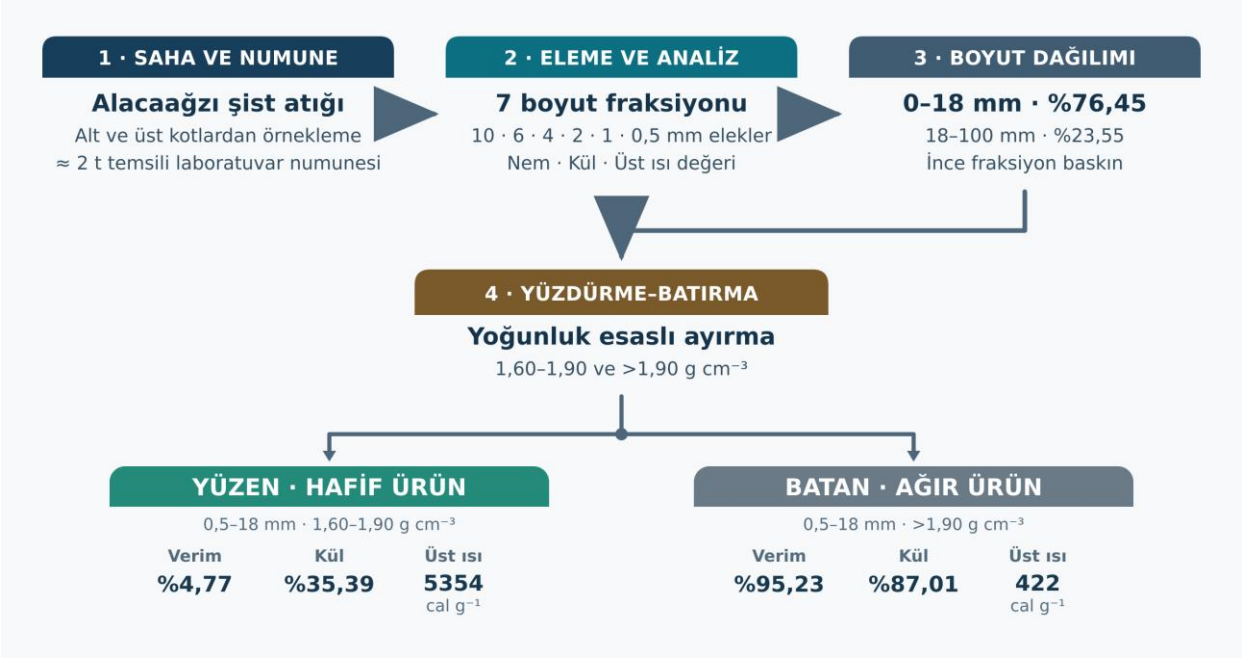
Bu kapsamda Alacaağzı şist atık sahası, geçmiş kömür hazırlama uygulamalarından kaynaklanan yanabilir madde kayıplarını içeren ve ikincil enerji kaynağı olarak değerlendirilme potansiyeli bulunan eski bir atık sahasıdır. Ancak sahadaki atığın ekonomik ve teknik olarak değerlendirilebilmesi için yanabilir maddenin hangi tane boyutlarında ve yoğunluk fraksiyonlarında yoğunlaştığının belirlenmesi gerekmektedir. Ürün külünün düşürülmesi tek başına yeterli bir başarı ölçütü değildir; ürün verimi, yanabilir madde geri kazanımı, kalorifik değer artışı, proses suyu ve enerji tüketimi, susuzlandırma gereksinimi, taşıma maliyeti ve nihai artığın çevresel güvenliği birlikte değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada Zonguldak Kömür Havzası'ndaki Alacaağzı şist atık sahasının kömür ve enerji geri kazanım potansiyeli araştırılmıştır. Atık sahasından alınan temsili numuneler üzerinde elek analizleri ve yüzdürme–batırma deneyleri gerçekleştirilmiş; farklı tane boyutu ve yoğunluk fraksiyonlarının ağırlık oranları, kül içerikleri ve kalorifik değerleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak yanabilir maddenin tane boyutuna ve yoğunluğa bağlı dağılımı değerlendirilmiş ve sahaya uygulanabilecek eleme–yoğunluk esaslı zenginleştirme yaklaşımının teknik uygulanabilirliği incelenmiştir. Çalışma ayrıca geri kazanılabilecek ürünün tek başına yakıt, kömür harmanlama bileşeni veya uygun yakma sistemleri için ikincil enerji hammaddesi olarak kullanılma potansiyelini ortaya koymayı; atık sahasında depolanan yanabilir madde miktarının azaltılması yoluyla kendiliğinden yanma, toz oluşumu ve uzun dönemli rehabilitasyon yüklerinin azaltılmasına bilimsel temel sağlamayı amaçlamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Numune Alma

Sahadan numune alma işlemi iş makinesi (kepçe) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Saha, alt ve üst kot olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. İş makinesinin arka kazıyıcısı kullanılarak 3–4 m yüksekliğindeki kesitlerden numuneler alınmış; saha temsilini artırmak amacıyla ulaşılabilen en yüksek ve en düşük kotlar örneklenmiştir. Daha sonra numuneler saha içerisinde harmanlanmış, yaklaşık 2 tona azaltılmış ve laboratuvara taşınmıştır. Çalışmada izlenen deneysel iş akışı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Alacaağzı şist atığından yanabilir madde geri kazanımının deneysel iş akışı.

2.2. Elek Analizi

Alınan numunelere yarılama işleminden sonra elek analizi uygulanmıştır. Elek açıklıkları 10, 6, 4, 2, 1 ve 0,5 mm olarak seçilmiş; numune 10–18, 6–10, 4–6, 2–4, 1–2, 0,5–1 ve 0–0,5 mm fraksiyonlarına ayrılmıştır. Nem ve kül analizleri sırasıyla ASTM D3173/D3173M-17a ve ASTM D3174-12(2018)e1 standartlarına; üst ısıl değer ölçümleri ASTM D5865/D5865M-19 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Elek analizi sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Alacaağzı şist atığı numunesinin elek analizi sonuçları.

Tane boyutu (mm)	Alt elek açıklığı (mm)	Miktar (g)	Miktar (%)
10-18	10,00	440,20	19,2
6-10	6,00	429,20	18,7
4-6	4,00	88,80	3,9
2-4	2,00	412,60	18,0
1-2	1,00	253,10	11,0
0,5-1	0,50	230,50	10,1
0-0,5	0,00	437,20	19,1
Toplam		2291,60	100,0

2.3. Yüzdürme–Batırma Analizi

Yüzdürme–batırma analizleri ASTM D4371/D4371M-06(2019)e1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerle atık malzeme içerisindeki yoğunluk fraksiyonları belirlenerek geri kazanılabilir yanabilir madde ve temiz kömür üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Tane boyutu ve yoğunluk fraksiyonlarına göre yüzdürme–batırma analizi sonuçları.

Boyut fraksiyonu (mm)	Yoğunluk (g cm^{-3})	Verim (%)	Kül (%)	Üst ısı değeri (cal g^{-1})
18–100	1,60–1,90	1,08	45,93	4172
18–100	>1,90	98,92	89,14	242
0,5–18	1,60–1,90	4,77	35,39	5354
0,5–18	>1,90	95,23	87,01	422
0–100	1,60–1,90	3,65	36,34	5248
0–100	>1,90	96,35	87,68	366

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Elek Analizi Sonuçları

Elek analizi sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. Tane boyutu küçüldükçe kalorifik değerin arttığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, kömürün şist ve taş malzemeye göre daha düşük sertliğe ve daha yüksek ufalanabilirliğe sahip olmasıdır. 0–0,5 mm fraksiyonunda kül içeriği %74,56 seviyesine düşerken üst ısı değeri 1710 cal/g olarak belirlenmiştir. Buna karşılık 10–18 mm fraksiyonunda kül içeriği %87,76 ve üst ısı değeri 325 cal/g'dır. Bu durum, ince boyutlu fraksiyonların kömürce zenginleştiğini ve geri kazanılabilir yanabilir madde içerdiğini göstermektedir.

Çizelge 3. Elek analizi fraksiyonlarının kümülatif miktar, kül ve kalorifik değerleri.

Tane boyutu (mm)	Alt elek (mm)	Miktar (g)	Miktar (%)	Σ miktar ↓ (%)	Σ miktar ↑ (%)	Kül (%)	Ort. kül ↑ (%)	Üst ısı (cal/g)	Ort. üst ısı ↑ (cal/g)
10-18	10,00	440,20	19,2	80,8	19,2	87,76	82,49	325	878
6-10	6,00	429,20	18,7	62,1	37,9	87,29	81,24	374	1009
4-6	4,00	88,80	3,9	58,2	41,8	85,70	79,41	542	1201
2-4	2,00	412,60	18,0	40,2	59,8	83,97	78,99	722	1245
1-2	1,00	253,10	11,0	29,1	70,9	80,16	76,76	1123	1479
0,5-1	0,50	230,50	10,1	19,1	80,9	77,19	75,47	1434	1614
0-0,5	0,00	437,20	19,1	0,0	100,0	74,56	74,56	1710	1710
Toplam		2291,6	100,0					878	

3.2. Yüzdürme–Batırma Sonuçları

Boyut dağılımına göre 0–18 mm fraksiyonu toplam malzemenin %76,45'ini, 18–100 mm fraksiyonu ise %23,55'ini oluşturmaktadır. 0,5–18 mm fraksiyonunun 1,60–1,90 g/cm³ yoğunluk aralığındaki hafif ürün verimi %4,77 olarak belirlenmiştir.

1.60–1.90 g/cm³ yoğunluk aralığında yüzebilir ürünlerin:

- kül içerikleri yaklaşık %35 seviyesine düşmüş,
- kalorifik değerleri ise 5354 cal/g seviyesine yükselmiştir.

Sonuçlar, yoğunluk esaslı zenginleştirme yöntemlerinin Alacaağzı atık sahasında uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

3.3. Kömür Geri Kazanım Potansiyeli

Atık yığınının büyüklüğü dikkate alındığında saha içerisinde önemli miktarda geri kazanılabilir temiz kömür bulunduğu anlaşılmaktadır. Özellikle ince boyutlu fraksiyonlarda gerçekleştirilecek eleme ve yoğunluk ayırma işlemleriyle ekonomik temiz kömür üretimi mümkün olabilecektir.

Düşük rutubet içeriği (%3–5) nedeniyle kuru eleme işlemlerinin uygulanabilir olduğu değerlendirilmiştir. Zenginleştirme sonrasında elde edilecek ürünün doğrudan santral yakıtı olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

3.4. Tartışma

Elde edilen sonuçlar, Alacaağzı şist atık sahasında yanabilir maddenin özellikle ince tane boyutlarında yoğunlaştığını göstermektedir. Tane boyutunun küçülmesiyle kül içeriğinin azalması ve kalorifik değerin artması, kömürün şist ve diğer gang minerallerine göre daha kolay ufalanmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu durum, ince fraksiyonların geri kazanım açısından daha uygun bir besleme oluşturduğunu göstermektedir.

Yüzdürme–batırma deneylerinde 0,5–18 mm fraksiyonunda 1,60–1,90 g/cm³ yoğunluk aralığında kül içeriğinin %35,39'a düşmesi ve kalorifik değerin 5354 cal/g'a yükselmesi, atık içerisinde yoğunluk farkına dayalı yöntemlerle geri kazanılabilecek kömür bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte temiz kömür veriminin yaklaşık %5 düzeyinde olması, malzemenin büyük ölçüde mineral maddeden oluştuğunu göstermektedir. Ancak atık sahasının toplam büyüklüğü dikkate alındığında bu oran, önemli miktarda geri kazanılabilir yakıt potansiyeline karşılık gelebilir.

Atığın düşük nem içeriği (%3–5), kuru eleme, ön sınıflandırma ve kuru zenginleştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Uygun tane boyutlarının eleme ile ayrılmasının ardından hava tablası, kuru jig veya benzeri yoğunluk farkına dayalı kuru ayırma sistemleri uygulanabilir. Ayrıca bu düşük nemli atık kömürün, kömür hazırlama tesislerinden çıkan yüksek nemli mikst ürünlerle belirli oranlarda harmanlanması, nihai ürünün nem içeriğinin düşürülmesine ve yakıt özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlayabilir. Böyle bir harmanlama yaklaşımı, santrale sevk edilebilir kömür miktarının artırılmasına ve mevcut atık kaynakların daha etkin değerlendirilmesine olanak sağlayabilir.

Sonuçlar, eski kömür atıklarının yalnızca çevresel bir yük değil, aynı zamanda yeniden değerlendirilebilecek ikincil bir enerji kaynağı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte mevcut çalışma laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Gelecekte pilot ölçekli kuru ve yaş zenginleştirme deneylerinin yanı sıra farklı mikst–atık kömür harman oranlarının nem, kül ve kalorifik değer üzerindeki etkilerinin araştırılması,

prosesin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğinin daha ayrıntılı olarak ortaya konulmasını sağlayacaktır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Alacaağzı şist atık sahasının kömür geri kazanım potansiyeli elek analizleri ve yüzdürme–batırma deneyleri ile araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki bulguları ortaya koymuştur:

- İnce boyutlu fraksiyonlarda kalorifik değerler artmaktadır.
- Tane boyutu küçüldükçe kül içerikleri azalmaktadır.
- 0–18 mm fraksiyonu toplam malzemenin %76,45'ini, 18–100 mm fraksiyonu ise %23,55'ini oluşturmaktadır.
- Yüzdürme–batırma analizleri temiz kömür geri kazanımının mümkün olduğunu göstermektedir.
- 1.60–1.90 g/cm³ yoğunluk aralığında yüksek kalorifik değerli ürünler elde edilmiştir.
- Atık sahası önemli miktarda geri kazanılabilir yanabilir madde içermektedir.
- Çalışma ayrıca kömür atıklarının döngüsel ekonomi yaklaşımı kapsamında yeniden değerlendirilmesine önemli katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Alacaağzı şist atık sahasının uygun kömür hazırlama yöntemleri kullanılarak ekonomik açıdan değerlendirilebilecek önemli bir ikincil enerji kaynağı olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

ASTM International. 2017. ASTM D3173/D3173M-17a: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D3173_D3173M-17A

ASTM International. 2018. ASTM D3174-12(2018)e1: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D3174-12R18E01

ASTM International. 2019. ASTM D4371/D4371M-06(2019)e1: Standard Test Method for Determining the Washability Characteristics of Coal. West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4371_D4371M-06R19E01

ASTM International. 2019. ASTM D5865/D5865M-19: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D5865_D5865M-19

Duffy, G.J., Lanauze, R.D. ve Kable, J.W. 1981. Reducing the environmental impact of coal-washing practice in Australia. Minerals and the Environment, 3, 103–110. https://doi.org/10.1007/BF02086669

Eterigho-Ikelegbe, O., Trammell, R. ve Bada, S.O. 2022. Novel ceramic composites produced from coal discards with potential application in the building and construction sectors. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 122(8), 421–428. https://doi.org/10.17159/2411-9717/2001/2022

Fabiańska, M.J., Ciesielczuk, J., Nádudvari, Á., Misz-Kennan, M., Kowalski, A. ve Kruszewski, Ł. 2019. Environmental influence of gaseous emissions from self-heating coal waste dumps in Silesia, Poland. Environmental Geochemistry and Health, 41(2), 575–601. https://doi.org/10.1007/s10653-018-0153-5

Ghose, M.K. 2007. Generation and quantification of hazardous dusts from coal mining in the Indian context. Environmental Monitoring and Assessment, 130(1–3), 35–45. https://doi.org/10.1007/s10661-006-9451-y

Hanak, D.P. 2022. Environmental life-cycle assessment of waste-coal pellets production. Clean Energy, 6(1), 1–14. https://doi.org/10.1093/ce/zkab050

Honaker, R.Q., Zhang, W., Yang, X. ve Rezaee, M. 2018. Conception of an integrated flowsheet for rare earth elements recovery from coal coarse refuse. Minerals Engineering, 122, 233–240. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.005

Karayiğit, A.İ., Mastalerz, M., Oskay, R.G. ve Gayer, R.A. 2018. Coal petrography, mineralogy, elemental compositions and palaeoenvironmental interpretation of Late Carboniferous coal seams in three wells from the Kozlu coalfield (Zonguldak Basin, NW Turkey). International Journal of Coal Geology, 187, 54–70. https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.12.007

Lottermoser, B.G. 2010. Introduction to mine wastes. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts içinde, 1–41. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8_1

North, B., Engelbrecht, A. ve Oboirien, B. 2015. Feasibility study of electricity generation from discard coal. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115(7), 573–580. https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n7a3

Oruç, F., Özgen, S. ve Sabah, E. 2010. An enhanced-gravity method to recover ultra-fine coal from tailings: Falcon concentrator. Fuel, 89(9), 2433–2437. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.04.009

Stańczyk, K., Bajerski, A. ve Łączny, M.J. 2021. Negative-pressure pneumatic separator: A new solution for hard-coal beneficiation. International Journal of Coal Science & Technology, 8, 103–123. https://doi.org/10.1007/s40789-020-00345-w

Taha, Y., Benzaazoua, M., Hakkou, R. ve Mansori, M. 2017. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production. Minerals Engineering, 107, 123–138. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.001

Yaşar, Ö., Uslu, T. ve Şahinoğlu, E. 2018. Fine coal recovery from washery tailings in Turkey by oil agglomeration. Powder Technology, 327, 29–42. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.042

Zhang, W., Honaker, R.Q. ve Groppo, J. 2017. Concentration of rare earth minerals from coal by froth flotation. Minerals & Metallurgical Processing, 34(3), 132–137. https://doi.org/10.19150/mmp.7613

KÖMÜR HAZIRLAMA TESİSLERİNDE KÜRESEL SORUNLAR VE OPTİMİZASYON

GLOBAL CHALLENGES AND OPTIMIZATION OF COAL PREPARATION PLANTS

Gökhan Sarıhan*
Türkiye Taşkömürü Kurumu, Zonguldak

Ayhan Ali Sirkeci
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Mehmet Bilen, Sait Kızgut
Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak

ÖZET Kömür hazırlama tesisleri, tüvenan kömürün kül ve mineral madde içeriğini azaltarak enerji ve metalurji sektörlerinin gereksinimlerine uygun temiz kömür üretiminde önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte, yüksek kül içeriği, ince kömür kayıpları, yakın yoğunluklu malzeme (NGM) oranının yüksek olması, besleme özelliklerindeki değişimler, su tüketimi, susuzlandırma güçlükleri ve ekipman aşınması tesislerin verimli ve kararlı biçimde işletilmesini güçleştirmektedir. Bu derleme çalışmasında Avustralya, Güney Afrika, Hindistan, Çin, ABD, Kanada, Türkiye, Polonya ve Moğolistan'daki kömür hazırlama tesislerinde karşılaşılan başlıca teknik ve işletme sorunları ile bunlara yönelik geliştirilen çözüm yaklaşımları incelenmiştir. Literatürde ağır ortam devrelerinin optimizasyonu, gelişmiş flotasyon ve gravite ayırma yöntemleri, ince kömür geri kazanımı, susuzlandırma ve su yönetimi ile çevrim içi ölçüm ve otomatik proses kontrolü üzerinde yoğunlaşıldığı görülmektedir. Son yıllarda veri tabanlı modelleme ve akıllı kontrol uygulamalarının da özellikle değişken besleme koşullarında ürün kalitesinin daha kararlı tutulması ve proses performansının iyileştirilmesi açısından önem kazandığı belirlenmiştir. Bu çalışma, farklı ülkelerdeki kömür hazırlama uygulamalarını ortak işletme sorunları ve geliştirilen çözümler üzerinden karşılaştırarak araştırmacılar ve sektör uygulayıcıları için güncel ve bütüncül bir değerlendirme sunmayı amaçlamaktadır.

ABSTRACT Coal preparation plants play an important role in producing clean coal that meets the quality requirements of the energy and metallurgical industries by reducing the ash and mineral matter content of run-of-mine coal. However, efficient and stable plant operation is often challenged by high ash content, fine coal losses, high proportions of near-gravity material (NGM), variations in feed characteristics, excessive water consumption, dewatering difficulties, and equipment wear. This review examines the major technical and operational challenges encountered in coal preparation plants in Australia, South Africa, India, China, the United States, Canada, Turkey, Poland, and Mongolia, together with the approaches developed to address these challenges. The reviewed literature indicates that considerable attention has been given to the optimization of dense-medium circuits, advanced flotation and gravity separation techniques, fine coal recovery, dewatering and water management, and online measurement and automated process control. In recent years, data-driven modelling and intelligent control systems have also gained increasing attention, particularly for maintaining consistent product quality under variable feed conditions and improving overall process performance. By comparing coal preparation practices across different countries in terms of common operational challenges and the solutions developed to overcome them, this review provides an up-to-date and integrated assessment for researchers and industry practitioners.

* *gokhansarihan@windowslive.com*

1. GİRİŞ

1.1 Kömürün Dünya Enerji Sistemindeki Önemi

Kömür, yenilenebilir enerji teknolojilerindeki hızlı gelişmelere rağmen küresel enerji arzında ve demir-çelik endüstrisinde stratejik önemini koruyan başlıca doğal kaynaklardan biridir. Günümüzde kömür, dünya elektrik üretiminin önemli bir bölümünü karşılamaya devam etmekte olup özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji güvenliğinin temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bunun yanında koklaşabilir taşkömürü, yüksek sabit karbon içeriği, uygun termoplastik özellikleri ve üstün koklaşma davranışı nedeniyle yüksek fırınlarda metalurjik kok üretiminin vazgeçilmez hammaddesidir (Arnold, 2023). Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA, 2025) güncel değerlendirmelerine göre küresel kömür tüketimi ve üretimi halen tarihsel olarak yüksek seviyelerini korumakta olup, kömür özellikle Çin, Hindistan, Avustralya, Endonezya, Amerika Birleşik Devletleri, Rusya ve Güney Afrika'da enerji üretimi ve çelik sanayisinin temel girdilerinden biri olmaya devam etmektedir. Bununla birlikte, farklı ülkelerdeki kömürlerin jeolojik oluşum ortamları, kömürleşme dereceleri, petrografik bileşimleri, mineral madde içerikleri ve yıkanabilirlik özellikleri önemli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar; kömür hazırlama tesislerinin akım şemalarının oluşturulmasını, ayırma teknolojilerinin seçimini, proses optimizasyonunu, ürün kalitesini ve işletme verimliliğini doğrudan etkilemektedir (Arnold, 2023; Falcon, 2013; Majumder & Barnwal, 2004; Mackinnon & Swanson, 2010).

1.2 Kömür Hazırlama Tesislerinin Önemi

Yenilenebilir enerji kapasitesindeki hızlı artışa rağmen kömür, elektrik üretimi ve demir-çelik sanayisi bakımından küresel ölçekte önemini korumaktadır. Uluslararası Enerji Ajansının 2025 değerlendirmesi, dünya kömür talebinin tarihsel olarak yüksek bir düzeyde seyrettiğini; üretim ve ticaretin ise ülkelere ve kömür türlerine göre farklı eğilimler gösterdiğini ortaya koymaktadır (International Energy Agency [IEA], 2025). Kömürün kullanımından önce mineral madde ve kükürt içeriğinin azaltılması, taşıma ve yanma verimliliğinin yükseltilmesi ve atık miktarının kontrol edilmesi açısından kömür hazırlama kritik bir aşamadır (Phengsaart et al., 2023).

Kömür hazırlamada tek ve her koşulda geçerli bir akım şeması yoktur. Uygun proses; tane boyutu dağılımı, yoğunluk fraksiyonları, serbestleşme derecesi, mineral madde türü, kömür rankı ve hedef ürünün kalite sınırları birlikte değerlendirilerek seçilir. İri ve orta boyutlarda ağır ortam ayırıcıları, ağır ortam siklonları ve jigler; daha ince fraksiyonlarda spiraller ve diğer gravite ayırıcıları; çok ince kömürlerde ise mekanik hücre, kolon ve yüksek yoğunluklu flotasyon sistemleri kullanılmaktadır (Gupta & Yan, 2016; Wills & Finch, 2015). Bu ekipmanların varlığı tek başına yüksek performans sağlamaz. Besleme bileşiminin değişmesi, ön şlam uzaklaştırmanın yetersiz kalması veya ürün devrelerinin birbirinden bağımsız işletilmesi, iyi tasarlanmış bir tesisin dahi kararsız çalışmasına neden olabilir.

1.3 Ortak işletme sorunları ve yeni yaklaşım

Farklı kömür havzalarında tesislerin karşılaştığı sorunlar ayrıntıda değişmekle birlikte benzer mekanizmalara dayanmaktadır. Besleme külünün ve tane boyutunun dalgalanması, yakın yoğunluklu malzeme oranının yükselmesi, kil ve ince şlamın devreye taşınması, ağır ortam süspansiyonunun yoğunluk ve reoloji bakımından kararsızlaşması, manyetit kaybı, ince kömürün artık akımına kaçması ve ürün neminin yüksek kalması bunların başında gelir. Bu sorunlar yalnızca ürün külünü değil, temiz kömür verimini, devre kapasitesini, su dengesini ve işletme maliyetini de etkiler (Blaschke et al., 2016; Gupta & Mohanty, 2006).
Güncel optimizasyon çalışmaları bu nedenle tek ekipman ayarından bütünleşik devre yönetimine doğru yönelmiştir. Çevrim içi ölçüm, süspansiyon yoğunluğunun kapalı çevrim kontrolü, ürün kalitesinin gerçek zamanlı tahmini ve veriye dayalı set değeri belirleme yaklaşımları, değişken besleme koşullarına daha hızlı yanıt verilmesini sağlamaktadır (Luttrell, 2023; Wang et al., 2015, 2026; Tong, 2025). Bununla birlikte otomasyonun etkisi, kullanılan sensörlerin güvenilirliği, numune alma düzeni ve proses modelinin tesis koşullarına uygunluğu ölçüsünde ortaya çıkar. Bu nedenle dijital kontrol, mekanik ve proses kaynaklı sorunların yerine geçen bağımsız bir çözüm değil, doğru kurulmuş bir akım şemasını daha kararlı işletmeye yarayan bir araç olarak ele alınmalıdır.

1.4 Çalışmanın amacı

Son yıllarda kömür hazırlama tesislerinde yalnızca ayırma ekipmanlarının geliştirilmesine değil, aynı zamanda proses modelleme, otomasyon ve optimizasyon tekniklerine de önemli yatırımlar yapılmıştır. Ağır ortam ayırma devrelerinin matematiksel modellenmesi, proses simülasyonu ve ürün spesifikasyonuna dayalı optimizasyon yaklaşımları sayesinde ayırma verimi artırılmış, ürün kalitesindeki dalgalanmalar azaltılmış ve tesislerin ekonomik performansı iyileştirilmiştir. Bunun yanı sıra, ince kömürlerin gelişmiş flotasyon teknolojileriyle değerlendirilmesi, orta ürünlerin yeniden zenginleştirilmesi, ağır ortam devrelerinin işletme parametrelerinin optimize edilmesi ve proses performansının sürekli izlenmesine yönelik kontrol sistemleri, temiz kömür geri kazanımını artıran başlıca teknolojik gelişmeler arasında yer almaktadır. Son yıllarda veri odaklı proses yönetimi ve dijital izleme uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte işletme kararlarının daha etkin şekilde alınması, enerji ve manyetit tüketiminin azaltılması ile ürün kalitesinin daha kararlı hâle getirilmesi mümkün olmuştur (Luttrell, 2023; Wang et al., 2015, 2026; Tong, 2025). Derleme kapsamında değerlendirilen başlıca kömür hazırlama bölgeleri, incelenen havzalar ve öne çıkan araştırma konuları Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Derlemede değerlendirilen başlıca ülke ve uygulama grupları

Ülke/bölge	Başlıca havza veya tesis	İncelenen odak	Temel kaynaklar
Avustralya	Bowen ve diğer üretim bölgeleri	Yıkanabilirliğe uygun akım şeması	Mackinnon & Swanson (2010)
Çin	Taiyuan, Datong ve Handan	DMC, besleme değişkenliği, otomasyon ve kuru ayırma	Niu (2019); Feng (2023); Liu et al. (2023); Zhao et al. (2014); Tong (2025)
Hindistan	Jharia ve West Bokaro	Yüksek küllü ince kömür ve flotasyon	Singh et al. (2015); Dhavala et al. (2019); Andavarapu et al. (2023)
ABD	Illinois Basin ve Appalachia	İnce kömür, tesis optimizasyonu ve kurutma	Honaker et al. (2000); Gupta et al. (2007); Wang (2012)
Kanada	Bullmoose	Tesis simülasyonu	Lind et al. (2003)
Polonya	Upper Silesian Coal Basin	Modernizasyon, su yönetimi ve atık	Blaschke et al. (2016); Makowska et al. (2019)
Moğolistan	Tavan Tolgoi, Nariinsukhait	Yıkanabilirlik ve kuru ayırma	Purevsuren et al. (2017); Zhou et al. (2014)
Türkiye	Zonguldak ve Soma	Ağır ortam, metalurjik kömür kaybı, su siklonu ve ince atık geri kazanımı	Özbayoğlu & Mamurekli (1994); Kızgut et al. (2004); Cebeci & Ulusoy (2013); Sabah & Koltka (2014); Çerik & Arslan (2022)
Güney Afrika	Ağır ortam siklonu tesisi	Pompa-depolama ve enerji optimizasyonu	Zhang et al. (2014)

2. YÖNTEM

Çalışma, kömür hazırlama tesislerindeki teknik ve işletme sorunlarını karşılaştırmalı biçimde ele alan yapılandırılmış bir anlatı derlemesi olarak hazırlanmıştır. Literatür taraması 20 Temmuz 2026 tarihinde güncellenmiş; 1994-2026 döneminde yayımlanan toplam 46 kaynak değerlendirme kapsamına alınmıştır. Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis, Wiley, OneMine ve Google Scholar üzerinden erişilebilen hakemli makaleler, kitap bölümleri, konferans bildirileri, tezler ve teknik raporlar incelenmiştir. Aramalarda “coal preparation”, “coal washing”, “dense medium cyclone”, “fine coal”, “flotation”, “enhanced gravity separation”, “dry coal beneficiation”, “dewatering”, “energy efficiency”, “plant optimization”, “process control” ve “intelligent control” ifadeleri tek başına ve ülke/tesis adlarıyla birlikte kullanılmıştır.

Kaynak seçimi yapılırken çalışmanın kömür hazırlama prosesine doğrudan katkı sunması, kullanılan yöntem veya tesis koşullarını açıklaması ve mümkün olduğunda nicel performans göstergeleri içermesi esas alınmıştır. Kaynakların yazar, yıl, başlık, dergi ve DOI bilgileri yayınevi sayfalarıyla karşılaştırılmış; metindeki sayısal bulgular ilgili çalışmanın deneysel veya tesis ölçekli sonuçlarının hemen ardından atıflandırılmıştır. Kömür jeolojisi, genel madencilik verimliliği, maden suyu yönetimi ve pasa depolama gibi kömür hazırlama tesisiyle doğrudan bağlantısı kurulamayan çalışmalar kapsam dışında bırakılmıştır. Seçilen yayınlar önce teknik temalara ayrılmış, ardından her temada sorun, uygulanan çözüm, raporlanan performans değişimi, ölçek ve endüstriyel uygulanabilirlik bakımından karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım bir meta-analiz veya PRISMA temelli sistematik derleme değildir; amacı farklı tesis deneyimlerini mühendislik açısından ortak bir değerlendirme çerçevesine yerleştirmektir. Derleme çalışmasının metodolojik yaklaşımı Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Derlemenin değerlendirme çerçevesi

Aşama	**Uygulama**
Kaynak türleri	46 kaynak: hakemli makale, kitap bölümü, konferans bildirisi, tez ve teknik rapor
Teknik temalar	Yıkanabilirlik; ağır ortam; ince kömür; su-susuzlandırma; enerji; kuru ayırma; otomatik kontrol
Dâhil etme ölçütü	Kömür hazırlama prosesine doğrudan katkı ve açıklanabilir yöntem/tesis verisi
Karşılaştırma ölçütleri	Ürün külü, temiz kömür verimi, yanabilir madde kazanımı, Ep, manyetit tüketimi, nem, su ve enerji kullanımı, proses kararlılığı ve maliyet
Analiz yaklaşımı	Sorun-çözüm-performans ilişkisine dayalı tematik ve karşılaştırmalı değerlendirme

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Besleme özellikleri ve yıkanabilirlik

Kömür hazırlama performansını belirleyen ilk unsur, beslemenin fiziksel ve mineralojik özellikleridir. Rank, maseral bileşimi, mineral maddelerin kömür dokusu içindeki dağılımı ve serbestleşme derecesi; kırma-eleme, gravite ayırma ve flotasyon davranışını birlikte etkiler (Falcon, 2013; Gupta & Yan, 2016). Aynı tesise farklı damar veya üretim bölgelerinden kömür beslenmesi, yoğunluk fraksiyonlarının ve ince malzeme oranının kısa sürede değişmesine yol açar. Bu değişkenlik dikkate

alınmadığında sabit ayırma yoğunluğuyla çalışan devrelerde ürün külü ve verim birlikte dalgalanabilir.
Hindistan'daki zor yıkanabilir kömürler bu ilişkinin belirgin örneklerinden biridir. Jharia havzasındaki çalışmalar, uygun ayırma yoğunluğunun yalnızca hedef kül değerine göre değil, yakın yoğunluklu malzeme dağılımıyla birlikte belirlenmesi gerektiğini göstermiştir (Singh et al., 2015). Aynı havzanın düşük uçuculu koklaşabilir ince kömürlerinde Multi-Gravity Separator uygulaması; besleme boyutu, tambur hızı, salınım ve yıkama suyu gibi değişkenlerin birlikte optimize edilmesiyle temiz kömür üretilebildiğini ortaya koymuştur (Andavarapu et al., 2023). Moğolistan'daki Tavan Tolgoi kömürlerinde ise yıkanabilirlik eğrileri, teorik temiz kömür verimi yüksek olsa bile ayırmanın kolay olmadığını göstermiştir (Zhou et al., 2014). Bu örnekler, tesis ayarlarının genel kömür sınıfına göre değil, döneme özgü yüzdürme-batırma ve tane boyutu verileriyle belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.
Yüzdürme-batırma verilerinin yalnızca yakın yoğunluklu malzeme yüzdesiyle özetlenmesi de yanıltıcı olabilir. Majumder ve Barnwal (2004), ayırma yoğunluğuna yakın fraksiyonlardaki kül dağılımını da hesaba katan yakın yoğunluklu malzeme indeksini (NGMI) geliştirmiştir. NGMI eğrileri, hedef temiz kömür külüne karşılık gelen optimum ayırma yoğunluğunun belirlenmesine ve benzer NGM oranına sahip iki beslemenin farklı yıkanabilirlik davranışlarının ayırt edilmesine olanak vermektedir. Bu yaklaşım, harmanlama kararlarında yalnız fraksiyon miktarının değil, o fraksiyondaki mineral madde dağılımının da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

3.2 Ağır ortam devrelerinin optimizasyonu

Ağır ortam devrelerinde performans; ayırma yoğunluğu, süspansiyonun kararlılığı, besleme basıncı, şlam yükü ve siklon geometrisinin ortak etkisi altında gelişir. Ön şlam uzaklaştırmanın yetersiz olması süspansiyonun viskozitesini artırabilir; drenaj ve yıkama eleklerindeki sorunlar ise manyetitin ürünlerle birlikte devreden çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle yalnızca yoğunluk set değerinin değiştirilmesi, şlam ve ortam devresi birlikte iyileştirilmediğinde kalıcı sonuç vermeyebilir (Gupta & Mohanty, 2006; Blaschke et al., 2016).
Taiyuan Kömür Hazırlama Tesisi'nde ön şlam uzaklaştırma, üç ürünlü ağır ortam siklonu, iri şlam ayırma ve flotasyon devrelerinin birlikte yeniden düzenlenmesi ağır ortam kapasitesini artırmış ve süspansiyon bölme akımının otomatik kontrolüne olanak sağlamıştır (Niu, 2019). Aynı tesiste farklı kaynaklardan gelen kömürlerin dönüşümlü yıkanmasıyla ortaya çıkan sorunları inceleyen Feng (2023), elek panelleri ve su püskürtme düzeninde yapılan değişiklikler sonucunda şlam uzaklaştırma veriminin %77'den %83'e yükseldiğini, ortam tüketiminin 0,88 kg/t'den 0,79 kg/t'ye düştüğünü ve toplam temiz kömür veriminin %68,67'den %70,86'ya çıktığını bildirmiştir. Bu sonuçlar, besleme değişkenliğinin ekipman kapasitesinden bağımsız düşünülemeyeceğini göstermektedir.

Siklon geometrisinin etkisini inceleyen Zhang et al. (2021), giriş ve çıkış yapıları, taşma borusu ve ikinci kademe koni açısında yapılan düzenlemelerin ayırma

keskinliğini geliştirdiğini raporlamıştır. Çalışmada birinci kademe muhtemel hata değeri 0,043'ten 0,027'ye düşmüş, ara üründeki 1,40 g/cm³'ten düşük yoğunluklu malzeme oranı %8,20'den %2,43'e gerilemiştir. Datong tesisi için geliştirilen ürün spesifikasyonu ve ekonomik fayda modeli ise farklı ürün hedefleri arasında yalnızca teknik değil, ekonomik bir optimizasyon yapılabileceğini göstermektedir (Liu et al., 2023). Bu bulgular, ağır ortam performansının yoğunluk, geometri, ürün hedefi ve ekonomi birlikte değerlendirilerek yönetilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

3.3 İnce kömür kazanımı ve flotasyon

İnce kömür devrelerinde temel sorun, serbestleşmenin artmasına karşılık tane hareketinin ve susuzlandırmanın güçleşmesidir. Honaker et al. (2000), 1000 × 44 µm boyut aralığındaki kömürleri geliştirilmiş gravite koşullarında yoğun ortam kullanarak ayırmış ve Illinois No. 6 kömüründe yalnız suyla yapılan ayırmaya göre temiz kömürün kütlesel veriminde sekiz yüzde puanlık artış elde etmiştir. Bu sonuç, ince kömürün klasik iri tane devrelerinin küçültülmüş bir kopyasıyla değil, tanelerin düşük çökelme hızına uygun yüksek gravite veya flotasyon sistemleriyle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çok değişkenli deney tasarımları, ince kömür ayırıcılarında tek parametreli denemelerin gözden kaçırdığı etkileşimleri belirleyebilmektedir. Aslan (2007), %36,1 kül içeren ve 500 µm altına öğütülen Yenicubuk linyitinde MGS tambur hızı, eğim açısı, yıkama suyu ve besleme katı oranını 30 deneylik merkezi kompozit tasarımla incelemiş; temiz kömür külü ve yanabilir madde kazanımı için geliştirilen modellerde sırasıyla 0,84 ve 0,93 R^2 değerleri elde etmiştir. Bu sonuç, MGS performansının yalnız tambur hızıyla değil, su ve katı yüküyle birlikte modellenmesi gerektiğini göstermektedir.

Soma kömürünü 1 mm altına kırarak su siklonunda inceleyen Çerik ve Arslan (2022), besleme katı oranı, giriş basıncı ve vortex finder çapını Box-Behnken tasarımıyla değerlendirmiştir. %10 katı oranı, 35 kPa giriş basıncı ve 6,5 cm vortex finder çapında temiz kömür külü %42,21'lik beslemeye göre %18,89'a düşürülmüş ve %38,62 verim elde edilmiştir. Kül üzerinde en etkili değişken besleme yoğunluğu, verim üzerinde ise vortex finder çapı olmuştur. Dolayısıyla su siklonu ayarları, kül ve verim hedefleri arasında açık bir ödünleşim kurularak seçilmelidir.

Tam ölçekli Jameson hücresi üzerinde yapılan tesis çalışmasında besleme külünün yaklaşık %30'dan %6 düzeyine düşürülebilmesi, uygun hidrodinamik ve hava-katı temasının ince kömür temizlemedeki önemini ortaya koymuştur (Mohanty, 2001). West Bokaro tesisindeki mekanik hücre, kolon ve Jameson hücresi karşılaştırmaları da özellikle 0,50-0,25 mm fraksiyonunda artık akımına geçen kömürün azaltılabileceğini göstermiştir (Dhavala et al., 2019). Darkov kömür şlamlarında kolon flotasyonuna ilişkin çalışma, bu yaklaşımın Orta Avrupa taşkömürleri için de uygulanabilir olduğunu göstermektedir (Fečko & Stanclová, 2006). Hindistan'daki tesis ölçekli optimizasyon çalışmaları, flotasyon ve gravite devrelerinin ayrı ayrı değil, toplam ürün verimi ve kül hedefi üzerinden birlikte değerlendirilmesini önermektedir (Patel et al., 2021; Venugopal et al., 2016).

Spiral ayırıcıların alt tane boyutu sınırını araştıran Honaker et al. (2007), 210 × 44 µm Coalberg kömüründe yaklaşık %12 katı oranı ve spiral başlangıcı başına 60 L/dak besleme debisini uygun işletme koşulları olarak belirlemiştir. Bu koşullarda kül %33,5'ten %11,71'e düşürülürken yanabilir maddenin %84'ü kazanılmış; kül oluşturan minerallerin %60'ı ve kükürdün %48'i uzaklaştırılmıştır. Bununla birlikte yaklaşık 1,8 ayırma yoğunluğunda Ep değerinin 0,20–0,25 aralığında kalması ve kapasitenin klasik spiral uygulamasına göre düşürülmesi gereği, laboratuvar kalitesi ile tesis kapasitesinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Yüksek NGM içeren 0,25 × 2 mm kömürlerde Reflux Classifier kullanımını inceleyen Kopparthi et al. (2020), yatak set değeri, besleme hızı ve akışkanlaştırma suyunu Box-Behnken tasarımıyla modellemiş; konsantre külü ve verimini tahmin eden modeller geliştirmiş ve verim tahminlerinin ortalama hatasını yaklaşık %5 olarak bildirmiştir. Bu bulgu, akışkan yataklı ayırıcılarda tek bir sabit set değeri yerine besleme debisi ve su hızını kapsayan çok değişkenli kontrolün gerekli olduğunu desteklemektedir.

Türkiye'deki ince atıkların geri kazanımına ilişkin önemli bir örnek Soma şlam havuzlarından alınan %59,08 küllü linyit atığıdır. Sabah ve Koltka (2014), 44 mm çaplı hidrosiklonla yapılan ön zenginleştirmede %37,67 verimle %42,60 kül, %0,71 toplam kükürt ve 3350 kcal/kg ısıl değere sahip bir ürün elde etmiş; hidrosiklon alt akımının Knelson ayırıcısında yeniden işlenmesiyle külü %30,51'e düşen ve ısıl değeri 4259 kcal/kg'a yükselen bir ürün üretmiştir. Çalışma, yüksek küllü ince atıklarda engelli çökelme koşullarının ve yaklaşık %40 katı oranında doğrudan beslemenin ayırma verimini belirgin biçimde etkilediğini göstermektedir.

Daha güncel bir çalışmada Lv et al. (2024), koklaşabilir kömür ara ürünlerini önce sıvı-katı akışkan yatakta, ardından öğütme ve flotasyonla değerlendirmiştir. Ön gravite aşamasında %49,62 temiz kömür verimi, %64,43 yanabilir madde kazanımı ve %15,89 kül elde edilmiştir. Ürünün 20 dakika öğütülmesi ve 2200 dev/dak karıştırma hızı, 2 kg/t kolektör, 200 g/t köpürtücü ve 40 g/L pülp yoğunluğunda flotasyonu sonucunda toplam temiz kömür verimi %38,82, kül %9,08 ve flotasyon yanabilir madde kazanımı %84,19 olmuştur. Sonuçlar, flotasyon besleme miktarının ön gravite ayırmayla azaltılmasının hem ürün kalitesini hem reaktif ekonomisini iyileştirebileceğini göstermektedir.

3.4 Su, susuzlandırma ve atık yönetimi

İnce kömür geri kazanımı arttıkça devrede dolaşan ince katı miktarı ve susuzlandırma yükü de artar. Yetersiz çöktürme ve filtrasyon; devridaim suyunun katı madde içeriğini yükselterek flotasyon kimyasını, süspansiyon reolojisini ve ürün nemini olumsuz etkileyebilir. Polonya'daki modernizasyon uygulamaları, su-şlam devrelerinin sadeleştirilmesi, çok ince kömürün mekanik susuzlandırılması ve çevrim içi kalite ölçümü arasında doğrudan bir işletme ilişkisi bulunduğunu göstermektedir (Blaschke et al., 2016). Darkov tesisindeki şlam yönetimi çalışması da koyulaştırma,

susuzlandırma ve proses suyunun geri kazanımının tek bir su dengesi içinde ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Jekielek, 2017).
Kömür kurutma deneyleri, düşük sıcaklıklarda dahi sıcaklık yükseldikçe kuruma hızının arttığını; ancak enerji tüketimi ile ürün kalitesi arasında denge kurulması gerektiğini göstermiştir (Wang, 2012). Hazırlama atıklarının çevresel davranışı da tesis optimizasyonunun dışında bırakılmamalıdır. Upper Silesian Coal Basin'deki yıkama atıklarında arsenik, kurşun ve talyumun büyük bölümünün düşük çözünürlüklü mineral fazlarla ilişkili olduğu belirlenmiştir (Makowska et al., 2019). Bu bulgu, atığın yalnız miktar bakımından değil, mineralojik ve kimyasal özellikleri bakımından da izlenmesi gerektiğini göstermektedir.

3.5 Enerji ve kaynak verimliliği

Kömür hazırlama tesislerinde enerji optimizasyonu yalnız ayırıcı ekipmanların motor gücüyle sınırlı değildir; ağır ortam pompaları, dolaşım hatları, susuzlandırma ve gereksiz geri devir birlikte değerlendirilmelidir. Güney Afrika'daki bir ağır ortam siklonu tesisini modelleyen Zhang et al. (2014), 160 m^3 depolama tankı içeren pompa-depolama sistemiyle enerji maliyetinin %50'den fazla azaltılabileceğini hesaplamıştır. Yaşam döngüsü analizinde seçilen senaryo için yıllık toplam tesis maliyetinde %38 azalma ve 2,68 yıllık geri ödeme süresi raporlanmıştır.
Bu sonuç tek bir tesisin pompa yapısı ve zamana bağlı elektrik tarifesine dayandığından doğrudan diğer tesislere aktarılmamalıdır. Pompa debisinin kontrolsüz azaltılması medium-to-coal oranını veya siklon giriş basıncını bozarak Ep değerini yükseltebilir. Bu nedenle enerji senaryoları; ürün külü, temiz kömür verimi, ortam debisi, basınç, manyetit kaybı ve duruş riski için eşzamanlı kısıtlar altında değerlendirilmelidir.

3.6 Otomasyon ve veriye dayalı proses kontrolü

Otomatik proses kontrolünün temel amacı, operatör deneyimini ortadan kaldırmak değil, değişken besleme koşullarında daha hızlı ve tekrarlanabilir karar üretmektir. Yoğunluk, basınç ve ürün kalite verilerini birlikte kullanan akıllı ağır ortam kontrol yaklaşımı, proses değişkenleri arasındaki ilişkinin çevrim içi olarak izlenebileceğini göstermiştir (Wang et al., 2015). Daha güncel bir çalışmada ridge regresyon ve düzenlileştirilmiş stokastik yapılandırma ağlarıyla optimum süspansiyon yoğunluğu set değerinin otonom olarak belirlenmesi araştırılmıştır (Wang et al., 2026).
Handan Kömür Hazırlama Tesisi'nde uygulanan üç katmanlı kontrol mimarisi, yoğunluk ölçer ve manyetik içerik analizörü verilerini yönetim katmanıyla birleştirmiştir. Uygulama sonrasında temiz kömürün ara ürüne kaçışı 0,5 yüzde puan, atığa kaçışı 1,6 yüzde puan ve ortam tüketimi 0,15 kg/t azalmış; süspansiyon yoğunluğu dalgalanması ±0,005 g/cm^3 sınırında tutulmuştur (Tong, 2025). Bu tür uygulamalar önemli bir potansiyel sunmakla birlikte, model sonuçlarının düzenli numune alma ve laboratuvar analizleriyle doğrulanması gerekir. Sensör sapması veya temsil gücü düşük numune verisi, gelişmiş bir algoritmanın dahi hatalı set değeri üretmesine neden olabilir (Luttrell, 2023).Yukarıda özetlenen uluslararası çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, farklı ülkelerde faaliyet gösteren kömür hazırlama

tesislerinde karşılaşılan başlıca işletme sorunları, bu sorunların proses performansına etkileri ve yaygın çözüm yaklaşımları Çizelge 3'te özetlenmiştir.

Çizelge 3. Başlıca teknik sorunlar ve kanıta dayalı çözüm yaklaşımları.

Sorun	Proses etkisi	Uygun yaklaşım	Temel kaynaklar
Besleme değişkenliği ve yüksek NGM	Ürün külü ve verimde dalgalanma	Dönemsel float-sink, harmanlama ve dinamik set değeri	Singh et al. (2015); Feng (2023); Tong (2025)
Şlam yüklü ağır ortam	Viskozite ve manyetit kaybında artış	Ön şlam uzaklaştırma ve ortam devresinin birlikte iyileştirilmesi	Niu (2019); Blaschke et al. (2016)
DMC geometri/yoğunluk uyumsuzluğu	Ep artışı ve yanabilir madde kaçışı	Geometri ve yoğunluğun birlikte optimizasyonu	Zhang et al. (2021); Liu et al. (2023)
İnce kömür kaybı	Temiz kömür veriminin düşmesi	EGS, MGS, kolon veya Jameson flotasyonu	Honaker et al. (2000); Mohanty (2001); Andavarapu et al. (2023); Dhavala et al. (2019)
Yüksek ürün nemi ve kirli devridaim suyu	Taşıma, ürün kalitesi ve flotasyon sorunları	Koyulaştırma, filtrasyon ve su dengesinin bütünleşik yönetimi	Jekielek (2017); Blaschke et al. (2016)
Gecikmeli proses müdahalesi	Kalite değişimi ve işletme kararsızlığı	Çevrim içi ölçüm, modelleme ve kapalı çevrim kontrol	Wang et al. (2015, 2026); Tong (2025)
Gereksiz ortam dolaşımı ve yüksek enerji tüketimi	Pompa maliyeti, aşınma ve dolaylı proses kararsızlığı	Hidrolik denetim, depolama ve kısıtlı pompa optimizasyonu	Zhang et al. (2014)
Su kısıtı ve yüksek devridaim yükü	Yaş proses kapasitesi ve su dengesi üzerinde baskı	Besleme nemine uygun kuru jig veya hava yoğun ortamlı ayırma	Zhao et al. (2014); Chen & Wei (2005)

3.7 Kuru zenginleştirme ve su kısıtlı tesisler

Su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde kuru ayırma; hava yoğun ortamlı akışkan yatak, titreşimli yatak, kuru jig, bileşik kuru ayırma ve triboelektrostatik ayırma seçeneklerini kapsamaktadır. Zhao et al. (2014), bu teknolojilerin yoğunluk, tane şekli, sürtünme, elektriksel yüklenme ve manyetik özellikler gibi farklı ayırma mekanizmalarına dayandığını; dolayısıyla tek bir kuru yöntemin bütün tane boyutlarına uygulanamayacağını göstermiştir. Aynı derlemede, 50–6 mm kömür için geliştirilen modüler endüstriyel hava yoğun ortamlı akışkan yatak sisteminin 40–60 t/saat kapasitede çalıştığı ve 0,05–0,07 Ep değerleri sağladığı bildirilmiştir.

Chen ve Wei'nin (2005) hava yoğun ortamlı akışkan yatak uygulamasında ilk endüstriyel tesis için 320.000 t/yıl kapasite ve yaklaşık 0,05 Ep bildirilmiştir. Ayrıca 6–0,5 mm ince kömürün titreşimli hava yoğun ortamlı yatakta ayrılmasıyla kül %16,57'den %8,35'e düşürülmüş; %80,20 ürün verimi ve yaklaşık 0,065 Ep elde edilmiştir. Bununla birlikte besleme nemi, çok ince fraksiyon miktarı, toz kontrolü ve tane şekli kuru ayırmanın seçiciliğini sınırlayabilir. Purevsuren et al. (2017), Moğolistan'ın Güney Gobi bölgesindeki Nariinsukhait kömürünün 0,5–5 mm fraksiyonunu laboratuvar ölçekli bir hava jiginde incelemiş ve su kısıtlı bölgelerde kuru ayırmanın uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Bu yaklaşım su tasarrufu potansiyeli taşımakla birlikte, endüstriyel ürün kalitesinin yüzdürme-batırma verileri ve değişen besleme nemi koşulları altında ayrıca doğrulanması gerekmektedir.

3.8 Uluslararası uygulamalardan ortak çıkarımlar

Ülke örnekleri tematik bulgularla birlikte değerlendirildiğinde üç ortak sonuç ortaya çıkmaktadır. Birincisi, tesis akım şeması kömürün güncel yıkanabilirlik verilerine göre işletilmediğinde ekipman kapasitesi tek başına yüksek verim sağlayamamaktadır. Avustralya'da farklı kömürlerin yıkanabilirlik özelliklerine uygun akım şemalarının seçilmesi (Mackinnon & Swanson, 2010) ve Moğolistan'ın su kısıtlı Güney Gobi bölgesi için laboratuvar ölçekli kuru jig uygulamasının değerlendirilmesi (Purevsuren et al., 2017), bu gerekliliğin farklı koşullardaki iki örneğini oluşturmaktadır.

İkincisi, yerel devre optimizasyonu ile tesis bütününün ekonomik optimumu aynı değildir. Bir devrede külün düşürülmesi, başka bir devrede verim kaybı veya yüksek su ve reaktif tüketimi yaratabilir. Galatia Kömür Hazırlama Tesisi'nin gerçek işletme verilerini kullanan Gupta ve Mohanty (2006), ağır ortam teknesi, ağır ortam siklonu, spiral ve flotasyon devrelerinin çoklu ürün kalite kısıtları altında birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Aynı tesiste Gupta et al. (2007) tarafından uygulanan genetik algoritma yaklaşımı; temiz kömür verimi, ürün külü, ısıl değer, SO_2 emisyon potansiyeli ve toplam geliri tek bir amaç fonksiyonu içinde birlikte değerlendirmiştir.

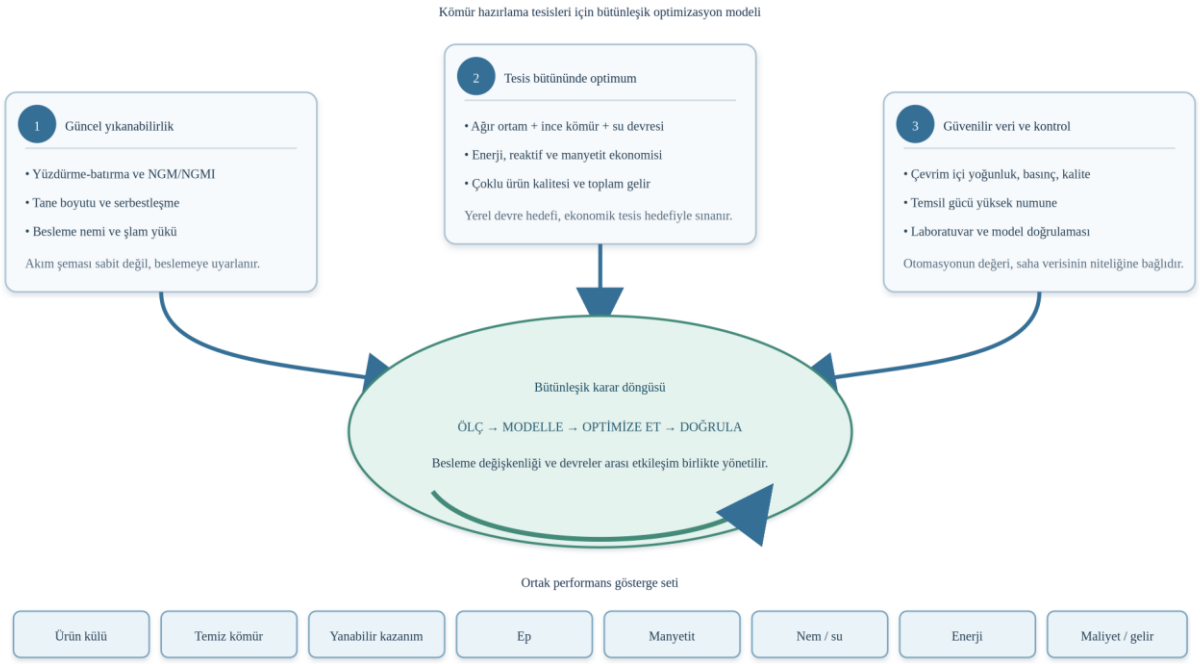
Üçüncüsü, simülasyon ve otomasyonun değeri saha verisinin niteliğine bağlıdır. Bullmoose Kömür Hazırlama Tesisi için geliştirilen ve gerçek tesis verileriyle doğrulanan bütünleşik simülasyon modeli, ağır ortam siklonu, spiral ve flotasyon devrelerinin birbirine bağlı performansını incelemeye olanak sağlamıştır (Lind et al., 2003). Polonya'daki modernizasyon deneyimleri ise teknik yenilemenin yalnız ekipman değişiminden ibaret olmadığını; kalite ölçümü, su-şlam devresi ve personel karar süreçleriyle birlikte yürütülmesi gerektiğini göstermektedir (Blaschke & Nycz, 2003; Blaschke et al., 2016).

3.9 Zonguldak Taşkömürü Havzası

Zonguldak Merkez Lavuarı'nı inceleyen Kızgut et al. (2004), ağır ortam ve flotasyon ünitelerinin devre dışı kalmasının ince kömürlerin zenginleştirilememesine, yıkama

kapasitesinin düşmesine ve yanabilir maddenin mikst ürüne taşınmasına yol açtığını belirtmiştir. Çalışmada metalurjik kömür üretiminin artırılması için ağır ortam ayırmanın ve ince kömür flotasyonunun yeniden kurulması, akım şemasının sadeleştirilmesi ve tesis ekipmanının modernize edilmesi önerilmiştir.

Zonguldak kömürlerinin ileri düzeyde temizlenebilirliğini araştıran Özbayoğlu ve Mamurekli (1994), Merkez Lavvarı jig konsantresine ağır ortam ve flotasyon uygulayarak kül içeriğini %12,11'den %2,16'ya düşürmüştür. Havza kömürleri üzerinde yapılan başka bir optimizasyon çalışmasında ise ağır ortam teknesi ve ağır ortam siklonu için uygun ayırma yoğunlukları belirlenmiş; %9,5 kompozit kül hedefinde temiz kömür veriminin yaklaşık %24'ten %30,71'e yükseltilebileceği hesaplanmıştır (Cebeci & Ulusoy, 2013). Bu sonuçlar, metalurjik kömür kayıplarının yalnız ince kömür devresinden veya yalnız ağır ortam devresinden kaynaklanan bir sorun olarak ele alınamayacağını göstermektedir. Uluslararası uygulamalardan türetilen üç ortak optimizasyon ilkesi ve önerilen performans gösterge seti Şekil 1'de bütünleştirilmiştir.



Şekil 1. Kömür hazırlama tesisleri için bütünleşik optimizasyon modeli.(*Mackinnon ve Swanson (2010), Gupta ve Mohanty (2006), Gupta et al. (2007), Lind et al. (2003), Blaschke ve Nycz (2003), Blaschke et al. (2016) ve Luttrell (2023))*

4. SONUÇLAR

Bu derleme, kömür hazırlama tesislerinde karşılaşılan sorunların farklı ülkelerde benzer teknik mekanizmalara dayandığını, ancak uygun çözümün kömürün yıkanabilirliği ve tesis akım şemasına göre değiştiğini göstermiştir. Besleme özelliklerindeki değişim dikkate alınmadan sabit işletme koşullarının korunması, ağır

ortam ve flotasyon devrelerinde ürün kalitesinin dalgalanmasına ve yanabilir maddenin atığa kaçmasına neden olmaktadır. Bu nedenle düzenli yüzdürme-batırma analizi, tane boyutu takibi ve temsil gücü yüksek numune alma, bütün optimizasyon çalışmalarının başlangıç noktası olmalıdır.

Ağır ortam devrelerinde ön şlam uzaklaştırma, süspansiyon yoğunluğu, manyetit geri kazanımı ve siklon geometrisi birlikte yönetilmelidir. Taiyuan ve diğer Çin tesislerindeki uygulamalar, nispeten sınırlı mekanik ve kontrol düzenlemelerinin şlam uzaklaştırma verimi, ortam tüketimi ve temiz kömür verimi üzerinde ölçülebilir iyileşmeler sağlayabildiğini göstermektedir. İnce kömür devrelerinde ise MGS, geliştirilmiş gravite ayırma, kolon ve Jameson flotasyonu gibi yöntemler önemli kazanım potansiyeline sahiptir; ancak elde edilen konsantrenin ekonomik değeri, susuzlandırma maliyetiyle birlikte değerlendirilmelidir.

Otomatik kontrol ve veriye dayalı modeller, besleme değişkenliğine daha hızlı tepki verilmesini sağlayabilir. Bununla birlikte sensör verisi, numune alma ve laboratuvar doğrulaması yetersizse algoritmik kontrolün güvenilirliği de sınırlı kalır. Bu nedenle gelecekteki uygulamalarda ürün külü ve veriminin yanında Ep, manyetit tüketimi, su dengesi, enerji kullanımı, ürün nemi, yanabilir madde kaybı ve atık özellikleri ortak bir performans gösterge seti içinde izlenmelidir.

Zonguldak örneği, ağır ortam ve ince kömür devrelerindeki kayıpların metalurjik kömür üretimini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Havzadaki modernizasyon çalışmalarının devre bazlı ve kısa süreli müdahaleler yerine, yıkanabilirlik verisi, ekipman performansı, ürün hedefi ve atık yönetimini bir araya getiren tesis bütününde bir optimizasyon programı olarak yürütülmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Andavarapu, M. R., Vidyadhar, A., & Prasad, R. (2023). Recovery of clean coking coal from difficult-to-wash low volatile coking coal fines of Jharia Coalfield by multi-gravity separator. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 43(6), 1098–1118. https://doi.org/10.1080/19392699.2022.2096015

Arnold, B. J. (2023). Coal formation. In R. M. S. Falcon (Ed.), *The Coal Handbook: Towards Cleaner Coal Supply Chains* (2nd ed., Vol. 1, pp. 3–21). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824328-2.00014-5

Aslan, N. (2007). Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a multi-gravity separator for coal cleaning. Fuel, 86(5–6), 769–776. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.10.020

Blaschke, W., & Nycz, R. (2003). Clean coal-preparation barriers in Poland. Applied Energy, 74(3–4), 343–348. https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00183-6

Blaschke, W. S., Baic, I., & Szafarczyk, J. (2016). Current state, improvements and latest trends in coal preparation in Poland. E3S Web of Conferences, 8, 01020. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160801020

Cebeci, Y., & Ulusoy, U. (2013). An optimization study of yield for a coal washing plant from Zonguldak region. Fuel Processing Technology, 115, 110–114. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.04.014

Chen, Q., & Wei, L. (2005). Development of coal dry beneficiation with air-dense medium fluidized bed in China. China Particuology, 3(1–2), 42. https://doi.org/10.1016/S1672-2515(07)60161-4

Çerik, Ç., & Arslan, V. (2022). The modelling of fine coal beneficiation with a water-only cyclone. Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, 38(3), 137–150. https://doi.org/10.24425/gsm.2022.142787

Dhavala, B., Koparthi, P., Singh, J., Sit, S. K., & Chakraborty, D. P. (2019). Impact of flotation machine characteristics on the performance of fine coal beneficiation (−0.5 mm & −0.25 mm): A case study of Tata Steel. Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society, 21(2), 163–170. https://doi.org/10.29227/IM-2019-02-19

Falcon, R. M. S. (2013). Coal petrography. In D. Osborne (Ed.), The coal handbook: Towards cleaner production (Vol. 1, pp. 53–79). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9780857097309.1.53

Fečko, P., & Stanclová, S. (2006). Column flotation of black coal slurries from an OKR locality, Darkov Mine. In 6th International Scientific Conference—SGEM 2006 (pp. 99–106).

Feng, Q. (2023). Analysis of the problems arising in washing of raw coal from different sources in an alternate manner and remedial measures. Coal Preparation Technology, 51(5), 77–80. https://doi.org/10.16447/j.cnki.cpt.2023.05.015

Gupta, A., & Yan, D. S. (2016). Mineral processing design and operations: An introduction (2nd ed.). Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2014-0-01236-1

Gupta, V., & Mohanty, M. K. (2006). Coal preparation plant optimization: A critical review of the existing methods. International Journal of Mineral Processing, 79(1), 9–17. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2005.11.006

Gupta, V., Mohanty, M. K., Mahajan, A., & Biswal, S. K. (2007). Genetic algorithms—A novel technique to optimize coal preparation plants. International Journal of Mineral Processing, 84(1–4), 133–143. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.05.006

Honaker, R. Q., Jain, M., Parekh, B. K., & Saracoglu, M. (2007). Ultrafine coal cleaning using spiral concentrators. Minerals Engineering, 20(14), 1315–1319. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.08.006

Honaker, R. Q., Singh, N., & Govindarajan, B. (2000). Application of dense-medium in an enhanced gravity separator for fine coal cleaning. Minerals Engineering, 13(4), 415–427. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00023-6

International Energy Agency. (2025). Coal 2025. IEA. https://www.iea.org/reports/coal-2025

Jekielek, D. (2017). Kalové hospodářství OKD, a.s., Závod úpraven [Bachelor's thesis, VSB–Technical University of Ostrava]. http://hdl.handle.net/10084/119614

Kızgut, S., Çuhadaroğlu, D., Toroğlu, İ., Samanlı, S., Barış, K., & Pilevneli, C. C. (2004). Zonguldak Merkez Lavuarında metalurjik kömür hazırlamaya yönelik iyileştirme çalışmaları. In Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı (pp. 371–399).

Kopparthi, P., Sachinraj, D., Awasthi, A., Mukherjee, A. K., & Ranjan, A. (2020). Intermediate size fine coal beneficiation by Reflux Classifier using statistical approach. Powder Technology, 361, 548–561. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.078

Lind, P., Yalcin, T., & Butcher, J. (2003). Computer simulation of the Bullmoose coal preparation plant. Coal Preparation, 23(3), 129–145. https://doi.org/10.1080/07349340302261

Liu, J., Yang, H., Yuan, M., Xie, S., & Wang, T. (2023). Product specification and economic benefit maximization prediction model of a coal preparation plant in Datong, Shanxi. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 43(5), 879–899. https://doi.org/10.1080/19392699.2022.2087639

Luttrell, G. H. (2023). Optimization, simulation, and control of coal preparation plants. In R. M. S. Falcon (Ed.), The coal handbook: Towards cleaner coal supply chains (2nd ed., Vol. 1, pp. 593–617). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824328-2.00024-8

Lv, B., Deng, X., Jiao, Y., Xing, B., & Fan, W. (2024). Deep recovery of clean coal from coking middlings: Pre-separation in liquid-solid fluidized bed and subsequent flotation. Chemical Engineering Research and Design, 210, 605–613. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.09.023

Mackinnon, W. L. A., & Swanson, A. R. (2010). Strategies for washing Australian coals. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 30(2–5), 69–82. https://doi.org/10.1080/19392699.2010.497080

Majumder, A. K., & Barnwal, J. P. (2004). Development of a new coal washability index. Minerals Engineering, 17(1), 93–96. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.10.005

Makowska, D., Strugała, A., Wierońska, F., & Bacior, M. (2019). Assessment of the content, occurrence, and leachability of arsenic, lead, and thallium in wastes from coal cleaning processes. Environmental Science and Pollution Research, 26(9), 8418–8428. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3621-7

Mohanty, M. K. (2001). In-plant optimization of a full-scale Jameson flotation cell. Minerals Engineering, 14(11), 1531–1536. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00166-2

Niu, Y. (2019). Improvement and optimization of the heavy medium separation system of Taiyuan Coal Preparation Plant. Coal Preparation Technology, 47(6), 71–73, 77. https://doi.org/10.16447/j.cnki.cpt.2019.06.016

Özbayoğlu, G., & Mamurekli, M. (1994). Super-clean coal production from Turkish bituminous coal. Fuel, 73(7), 1221–1223. https://doi.org/10.1016/0016-2361(94)90263-1

Patel, J. P., Venugopal, R., Bhar, C., & Gangopadhyay, D. (2021). Optimization studies on a coal preparation plant. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 41(8), 577–588. https://doi.org/10.1080/19392699.2018.1494163

Phengsaart, T., Srichonphaisan, P., Kertbundit, C., Soonthornwiphat, N., Sinthugoot, S., Phumkokrux, N., Juntarasakul, O., Maneeintr, K., Numprasanthai, A., Park, I., Tabelin, C. B., Hiroyoshi, N., & Ito, M. (2023). Conventional and recent advances in gravity separation technologies for coal cleaning: A systematic and critical review. Heliyon, 9(2), e13083. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13083

Purevsuren, U., Tumurpurev, N., & Dombon, E. (2017). Dry jigging of coals. Innovations, 5(1), 10–13. https://stumejournals.com/journals/innovations/2017/1/10

Sabah, E., & Koltka, S. (2014). Separation development studies on the beneficiation of fine lignite coal tailings by the Knelson concentrator. Energy & Fuels, 28(7), 4819–4827. https://doi.org/10.1021/ef500708j

Singh, A. K., Banerjee, P. K., Singh, P. K., & Das, A. (2015). Study of washability characteristics of coals from Seam-IX of Jamadoba Colliery of the Jharia Basin, India. Energy Exploration & Exploitation, 33(2), 181–202. https://doi.org/10.1260/0144-5987.33.2.181

Tong, J. (2025). Design and application of intelligent control system for heavy medium separation in Handan Coal Preparation Plant. Coal Preparation Technology, 53(4), 92–97. https://doi.org/10.16447/j.cnki.cpt.2025.04.013

Venugopal, R., Patel, J. P., & Bhar, C. (2016). Coal washing scenario in India and future prospects. International Journal of Coal Science & Technology, 3(2), 191–197. https://doi.org/10.1007/s40789-016-0133-2

Wang, L., Wang, H., Gui, X., Wang, H., & Dai, W. (2026). Autonomous density setpoint optimization for coal preparation using ridge regression and regularized stochastic configuration networks. International Journal of Coal Preparation and Utilization. Advance online publication. https://doi.org/10.1080/19392699.2026.2666657

Wang, W. C. (2012). Laboratory investigation of drying process of Illinois coals. Powder Technology, 225, 72–85. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.03.034

Wang, Z., Kuang, Y., Deng, J., Wang, G., & Ji, L. (2015). Research on the intelligent control of the dense medium separation process in coal preparation plant. International Journal of Mineral Processing, 142, 46–50. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.05.001

Wills, B. A., & Finch, J. A. (2015). Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery (8th ed.). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2010-0-65478-2

Zhang, L., Du, H., & Zhang, W. (2021). Study and practice of structural optimization of the pressure-fed 3-product heavy medium cyclone. Coal Preparation Technology, 49(6), 35–39. https://doi.org/10.16447/j.cnki.cpt.2021.06.007

Zhang, L., Xia, X., & Zhang, J. (2014). Improving energy efficiency of cyclone circuits in coal beneficiation plants by pump-storage systems. Applied Energy, 119, 306–313. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.031

Zhao, Y., Yang, X., Luo, Z., Duan, C., & Song, S. (2014). Progress in developments of dry coal beneficiation. International Journal of Coal Science & Technology, 1, 103–112. https://doi.org/10.1007/s40789-014-0014-5

Zhou, Z., Zhao, L., Sun, J., Zhang, J., & Cao, Z. (2014). Research on the washability of 3# coal in Tavan Tolgoi Coal Mine of Mongolia. Coal Preparation Technology, 42(1), 19–22. https://doi.org/10.16447/j.cnki.cpt.2014.01.006

KÖMÜR KÖKENLİ ATIKLARDAN KRİTİK HAMMADDELERİN GERİ KAZANIMI: POTANSİYEL, TEKNOLOJİLER VE GELECEK PERSPEKTİFİ

RECOVERY OF CRITICAL RAW MATERIALS FROM COAL-DERIVED WASTES: POTENTIAL, TECHNOLOGIES, AND FUTURE PERSPECTIVES

Fırat Burat
İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, 34460, Maslak, Sarıyer, İstanbul

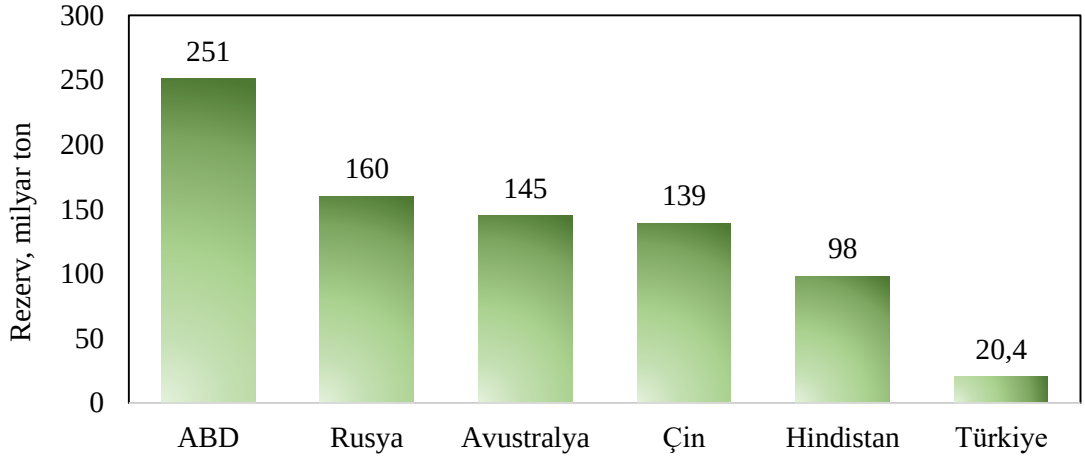
ÖZET Kömür; enerji üretimi ve metalurjik süreçlerdeki önemini korurken, çıkarma, hazırlama ve yakma aşamalarında büyük miktarlarda katı atık oluşturmaktadır. Geleneksel olarak çevresel yük olarak değerlendirilen bu atıklar, günümüzde kritik hammaddelerin ikincil kaynakları olarak öne çıkmaktadır. Kömür yıkama artıkları, uçucu kül ve taban külü; Al, Si, Fe ve Ti gibi ana bileşenlerin yanı sıra nadir toprak elementleri (NTE), Ga, Ge, Sc ve Li gibi kritik elementleri de içermektedir. Bu derlemede, kömür kökenli atıkların kritik hammadde potansiyeli ile fiziksel ve hidrometalurjik geri kazanım yaklaşımları güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir. Bulgular, fiziksel yöntemlerin tek başına sınırlı kaldığını, seçici ön işlemlerle desteklenen bütünleşik proseslerin ise kritik hammaddelerin geri kazanımı, çoklu ürün üretimi ve atık azaltımı açısından daha yüksek potansiyel sunduğunu göstermektedir.

ABSTRACT Coal remains an important energy source for power generation and metallurgical industries while generating large quantities of solid wastes during mining, preparation, and combustion. Traditionally regarded as an environmental burden, these wastes are now recognized as secondary resources of critical raw materials. Coal preparation tailings, fly ash, and bottom ash contain major constituents such as Al, Si, Fe, and Ti, as well as critical elements including rare earth elements (REEs), Ga, Ge, Sc, and Li. This review evaluates the critical raw material potential of coal-derived wastes and summarizes current physical beneficiation and hydrometallurgical recovery approaches based on recent literature. The available evidence indicates that physical beneficiation alone is generally insufficient, whereas integrated processes combining selective pretreatment with hydrometallurgical recovery offer greater potential for critical raw material recovery, multi-product utilization, and waste minimization.

e-posta adresi: buratf@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Kömür, yenilenebilir enerji yatırımlarındaki artışa rağmen elektrik üretimi ve metalürji sektörlerinde önemini korumaktadır. Dünya görünür kömür rezervi yaklaşık 1,07 trilyon ton olup elektrik üretiminde temel enerji kaynaklarından biri olmayı sürdürmektedir (Kavaz, 2019; IEA, 2025). Başlıca ülkelerin görünür kömür rezervleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Başlıca ülkelerin görünür kömür rezervleri (Kavaz, 2019).

Kömür üretimi ve kullanımının devam etmesi, bu süreçlerde oluşan atıkların çevresel etkilerinin azaltılmasını ve içerdiği değerli bileşenlerin geri kazanımını giderek daha önemli hâle getirmektedir. Türkiye, dünya kömür rezervinin yaklaşık %2'sine sahip olup rezervlerin büyük bölümünü linyit kökenli kömürler oluşturmaktadır. Düşük kalorifik değerli linyitlerin yaygın olarak termik santrallerde kullanılması, yüksek miktarda uçucu ve taban külü oluşumuna neden olmakta, bu durum söz konusu atıkları önemli ikincil hammadde kaynakları hâline getirmektedir (Kavaz, 2019).

Kömür yıkama artıkları ile uçucu ve taban külleri uzun yıllar yalnızca bertaraf edilmesi gereken atıklar olarak değerlendirilmişken, günümüzde döngüsel ekonomi ve kritik hammadde arz güvenliği kapsamında önemli ikincil kritik hammadde kaynakları olarak değerlendirilmektedir. Bu atıklar; karbon, alüminosilikat fazlar, demir mineralleri ile nadir toprak elementleri (NTE), Ga, Ge, Sc, Li, V, Co, Ni, Mo ve U gibi kritik elementleri de içermektedir (Ketris ve Yudovich, 2009; Zhang vd., 2015; Tian vd., 2025). Özellikle NTE arzının belirli ülkelerde yoğunlaşması, kömür kökenli atıklardan kritik element geri kazanımına yönelik çalışmaları hızlandırmıştır (Seredin ve Dai, 2012; Dai ve Finkelman, 2018). Türkiye'de Eskişehir-Beylikova'da keşfedilen yaklaşık 694 milyon tonluk nadir toprak elementi (NTE) rezervi, kritik hammaddelerin ulusal ölçekteki stratejik önemini de ortaya koymaktadır (EY, 2025).

Bu derlemede kömür kökenli atıkların oluşumu, özellikleri ve kritik hammadde potansiyeli güncel literatür kapsamında değerlendirilmiş; fiziksel zenginleştirme, hidrometalurjik geri kazanım ve çözelti saflaştırma yöntemleri karşılaştırmalı olarak ele alınmış, bütünleşik proses yaklaşımlarının sunduğu olanaklar tartışılmıştır.

2. KÖMÜR KÖKENLİ ATIKLARIN OLUŞUMU, BİRİKİMİ VE ÖZELLİKLERİ

2.1. Kömür Hazırlama Tesisi Artıkları

Tüvenan kömür, mineral safsızlıkların uzaklaştırılması amacıyla boyut küçültme, sınıflandırma ve fiziksel zenginleştirme işlemlerine tabi tutulmaktadır (Ateşok, 2017). Bu işlemler sonucunda iri artıklar, ince yıkama artıkları ve şlam oluşmaktadır. Özellikle ince artıklar yüksek kil ve nem içeriklerinin yanı sıra değişken miktarda artık karbon ve kritik element taşıyan mineral fazları içermektedir.

Kömür hazırlama artıklarının ekonomik potansiyeli yalnızca yanabilir maddenin geri kazanımından değil, aynı zamanda kritik elementlerce zengin mineral fraksiyonlarının değerlendirilmesinden de kaynaklanmaktadır. NTE'lerin büyük ölçüde inorganik fazlarla ilişkili olması, bu elementlerin özellikle ince artık fraksiyonlarında zenginleşmesine neden olabilmektedir. Bu durum, artık karbonun geri kazanımı ile kritik element taşıyan mineral fraksiyonlarının birlikte değerlendirilmesini mümkün kılmakta; dolayısıyla bütünleşik akım şemalarının geliştirilmesini gerekli hâle getirmektedir (Lin vd., 2017; Honaker vd., 2018; Eterigho-Ikelegbe vd., 2021).

2.2. Uçucu Kül ve Taban Külü

Pulverize kömürün kazanlarda yakılması sırasında mineral madde termal dönüşümlere uğrayarak farklı kül ürünleri oluşturmaktadır. Baca gazıyla taşınarak filtrelerde tutulan ince fraksiyon uçucu kül, kazan tabanında biriken iri ve kısmen ergimiş fraksiyon ise taban külü olarak adlandırılmaktadır. Uçucu küller genellikle 20–80 µm, taban külleri ise 500–7000 µm boyut aralığında bulunmaktadır (Türkmenoğlu, 2010; Singh ve Siddique, 2013).

Küllerin kimyasal ve mineralojik bileşimi, kömürleşme derecesine ve başlangıç mineralojisine bağlı olarak değişmektedir. Yanma sırasında kuvars gibi kalıntı mineraller korunurken, mullit, Fe oksitleri ve amorf alüminosilikat cam fazı gibi yeni fazlar oluşmaktadır. Bu heterojen yapı, Al, Si, Fe, Ti, NTE ve diğer kritik elementlerin farklı faz ve tane boyutu fraksiyonlarında zenginleşmesine olanak sağlamakta, aynı zamanda geri kazanım proseslerinin tasarımını ve kontrolünü güçleştirmektedir (Dai vd., 2014; Tian vd., 2025).

2.3. Birikim Miktarları ve Çevresel Etkiler

Küresel uçucu kül üretimine ilişkin tahminler, veri kapsamı ve raporlama farklılıklarına bağlı olarak yılda 500 milyon tonun üzerindeki değerlerden 2023 yılı için yaklaşık 1,63 milyar tona kadar değişmektedir (Mathapati vd., 2022; Liu vd., 2025). Geçmiş yıllarda oluşan kül barajları ve depolama sahalarındaki birikimler de dikkate alındığında, toplam stok miktarı yıllık üretimin oldukça üzerine çıkmaktadır.

TÜİK'in 2022 yılı verilerine göre Türkiye'deki termik santrallerde toplam 27,8 milyon ton atık oluşmuş ve tehlikesiz atıkların %82,6'sını kül ve cüruflar oluşturmuştur. Toplam atığın yaklaşık 24,45 milyon tonu kül dağı, kül barajı veya düzenli depolama tesislerine gönderilmiştir (TÜİK, 2024). Bu durum, termik santral kül depolama sahaları ile kömür hazırlama tesisi atık barajlarının Türkiye açısından önemli bir ikincil hammadde potansiyeli oluşturduğunu göstermektedir.

Kül ve kömür hazırlama atıklarının uzun süre depolanması; tozuma, süzüntü oluşumu, pirit oksidasyonu ve ağır metal hareketliliği gibi çevresel riskler oluşturmaktadır. Buna karşılık kontrollü geri kazanım uygulamaları hem depolama hacmini azaltmakta hem de kritik elementler ile silis, alümina, demir ve karbon gibi eş ürünlerin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle kömür kökenli atıkların değerlendirilmesinde tek bir kritik elementin geri kazanımına odaklanmak yerine, çok ürünlü ve bütünleşik proses yaklaşımlarının benimsenmesi daha sürdürülebilir ve ekonomik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Mathapati vd., 2022; Liu vd., 2025).

3. KÖMÜR KÖKENLİ ATIKLARIN KRİTİK HAMMADDE POTANSİYELİ

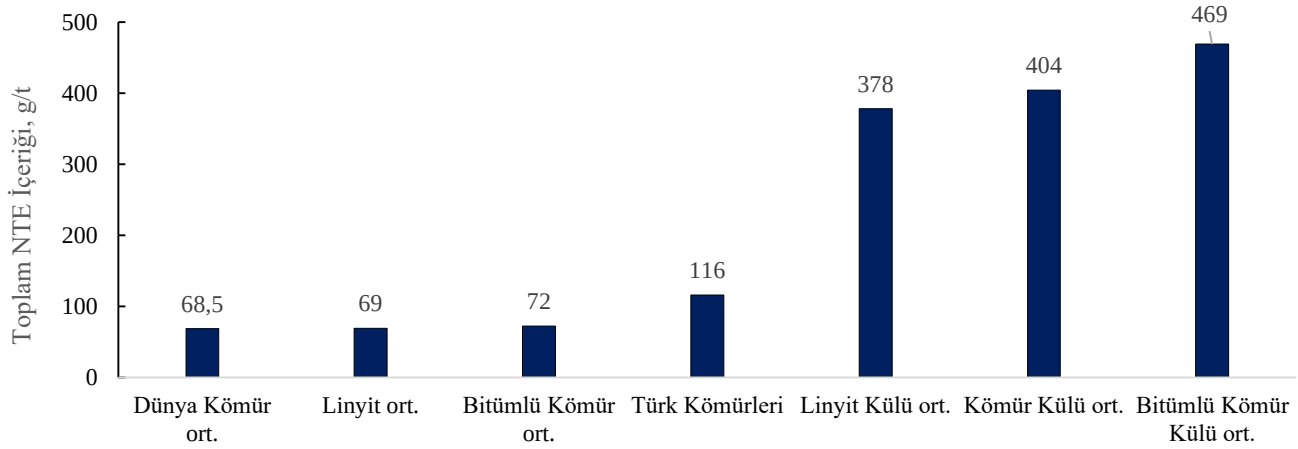
Kömür kökenli atıklarda bulunan Si, Al, Fe ve Ca gibi ana bileşenlerin değerlendirilebilir ürünlere dönüştürülmesi, kritik element kazanım süreçlerinin ekonomik uygulanabilirliğini artırmaktadır. Silis ve alüminosilikatça zengin fraksiyonlar zeolit, jeopolimer, seramik ve çimento esaslı ürünlerde kullanılabilirken, demirce zengin fazlar manyetik ayırma ile ön konsantre edilebilmektedir. Yüksek Ca içerikli küller ise hidrometalurjik işlemlerde asit tüketimini artırmasına rağmen yapı malzemeleri ve çevresel uygulamalarda değerlendirilebilmektedir. Kritik elementlerin genellikle düşük tenörlerde bulunması nedeniyle, ana bileşenler ile karbon, senosfer gibi eş ürünlerin birlikte değerlendirildiği çok ürünlü proses yaklaşımları süreç ekonomisini ve atık azaltımını desteklemektedir (Pan vd., 2021; Tian vd., 2025). Bu yaklaşım, kritik hammaddelerin geri kazanımında ekonomik sürdürülebilirliği artıran temel stratejilerden biri olarak kabul edilmektedir.

3.1. Nadir Toprak Elementleri

Nadir toprak elementleri, 15 lantanit ile itriyum ve skandiyumu kapsamakta; enerji, elektronik ve savunma teknolojilerindeki kullanımları nedeniyle stratejik hammaddeler arasında değerlendirilmektedir. Dünya ortalaması olarak toplam NTE içeriği kömürde yaklaşık 68,5 g/t, kömür külünde ise yaklaşık 404 g/t düzeyindedir (Ketris ve Yudovich, 2009; Blissett vd., 2014; Franus vd., 2015). Şekil 2'de görüldüğü üzere NTE içerikleri kömürleşme derecesine göre değişmekte ve linyit ile bitümlü kömürlerin küllerinde ana yakıta kıyasla belirgin biçimde artmaktadır (Zhang vd., 2020).

Bazı kömür yataklarında toplam NTE içerikleri küresel ortalamanın önemli ölçüde üzerine çıkabilmektedir. Örneğin, Rusya Uzak Doğu kömürlerinde 300–1000 g/t düzeyinde değerler bildirilmiş, Türk kömürleri için ise ortalama 116 g/t değer rapor edilmiştir (Seredin ve Dai, 2012; Zhang vd., 2015). Konya–Ilgın linyitlerinde La, Ce, Nd, Sm, Gd ve Lu gibi bazı NTE'lerin küresel kömür ortalamalarının üzerinde

bulunduğu bildirilmiştir (Karayiğit vd., 2000; Altunsoy vd., 2017). Kentucky'deki 220 MW kapasiteli bir termik santralin besleme kömürü ve uçucu kül numunelerinde 1500 g/t'un üzerinde toplam NTE içeriği belirlenmiştir (Mardon ve Hower, 2004). Literatürde bildirilen ortalama toplam NTE içerikleri Şekil 2'de özetlenmektedir.



Şekil 2. Kömür ve kömür küllerinde ortalama toplam NTE içerikleri (Ketris ve Yudovich, 2009; Zhang vd., 2015; Zhang vd., 2020).

Yanma sırasında organik maddenin uzaklaşması, NTE'lerin külde göreli olarak zenginleşmesine neden olmakta; buna karşılık yüksek sıcaklıkta oluşan mullit ve kimyasal olarak dayanıklı alüminosilikat cam fazları, liç proseslerini zorlaştırabilmektedir (Taggart vd., 2018; Wang vd., 2019). Kömür hazırlama sırasında NTE'ler çoğunlukla kil ve diğer mineral fazlarla birlikte ince artık fraksiyonlarına geçmekte; bu nedenle kül içeriği yüksek ürünlerde NTE zenginleşmesi gözlenebilmektedir (Ketris ve Yudovich, 2009; Lin vd., 2017). Literatürde toplam nadir toprak oksidi (TREO) içeriğinin yaklaşık 800–900 g/t ve üzerinde olması, ön ekonomik değerlendirmeler açısından önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte ekonomik uygulanabilirlik yalnızca tenöre değil; element dağılımına, mineralojik bağlanma şekline, geri kazanım verimine ve eş ürün değerlendirme potansiyeline de bağlıdır (Lin vd., 2017).

3.2. Ga, Ge, Sc, Li ve Diğer İz Elementler

Belirli iz elementlerini küresel kömür ortalamasının yaklaşık on katı düzeyinde içeren kömürler, literatürde metalifer kömür olarak adlandırılmaktadır. Bazı kömür ve kül örneklerinde Ga, Ge, Li ve Sc gibi kritik elementlerin içerikleri, düşük tenörlü geleneksel cevherlerle karşılaştırılabilir düzeylere ulaşabilmektedir (Seredin ve Finkelman, 2008; Dai ve Finkelman, 2018). Bu durum, kömür kökenli atıkları kritik hammaddeler açısından önemli bir ikincil kaynak hâline getirmektedir. Bu elementlerin bulunma biçimleri mineralojik yapıya bağlı olarak değişmektedir. Ga çoğunlukla Al içeren kil mineralleri ve amorf alüminosilikat fazlarla, Ge organik madde ve sülfürlü minerallerle, Sc ise kil mineralleri, Fe–Ti oksitleri ve fosfat fazlarıyla ilişkilidir. Li ise özellikle Al bakımından zengin kömürlerde kaolinit, mika

ve amorf alüminosilikat yapılarla birlikte bulunmaktadır (Dai vd., 2010; Dai ve Finkelman, 2018).

V, Co, Ni ve Mo organik kompleksler, sülfürlü mineraller ve Fe oksitleri arasında dağılabilmekte; Cu ve Zn ise potansiyel eş ürünler olarak değerlendirilebilmektedir. Buna karşılık Pb, As, Se, Hg, U ve Th, liç çözeltilerinin saflığı, atık yönetimi ve çevresel etkiler açısından dikkatle izlenmesi gereken elementlerdir (Karayiğit vd., 2000; Ketris ve Yudovich, 2009; Tian vd., 2025). Kömür kökenli atıklardaki başlıca değerli elementlerin bulunma biçimleri, uygun ön işlemler ve olası geri kazanım yaklaşımları Çizelge 1'de özetlenmiştir. Çizelge 1'de özetlenen veriler, kritik elementlerin farklı mineral fazlarla ilişkili olması nedeniyle tek bir geri kazanım yönteminin tüm elementler için yeterli olmadığını; uygun ön zenginleştirme ve hidrometalurjik işlemlerin birlikte tasarlandığı bütünleşik proses yaklaşımlarının daha etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Çizelge 1. Kömür kökenli atıklardaki başlıca değerli elementler, bulunma biçimleri ve olası kazanım yaklaşımları (Seredin ve Dai, 2012; Dai ve Finkelman, 2018; Zhang vd., 2020; Tian vd., 2025).

Element / ürün	**Başlıca bulunma biçimi**	**Uygun ön işlem**	**Kazanım / değerlendirme yaklaşımı**
Al ve Si	Amorf alüminosilikat camı, kaolinit türevleri, mullit ve kuvars.	Öğütme, desilikasyon, alkali aktivasyon veya kavurma.	Asit/alkali liçi; alümina, silika, zeolit ve jeopolimer üretimi.
NTE ve Sc	Kil yüzeyleri, fosfatlar (monazit, ksenotim), zirkon, Fe-Ti fazları ve alüminosilikat camı.	İnce öğütme, fiziksel ön konsantrasyon, alkali/asit kavurma.	Asit liçi; çöktürme, iyon değişimi ve solvent ekstraksiyonu.
Ga, Ge ve Li	Al mineralleri, organik bağlar, sülfürler, mika-kil ve amorf faz.	Karbon/mineral ayrımı, kavurma, seçici desilikasyon.	Asit veya alkali liçi; seçici ekstraksiyon/adsorpsiyon.
Artık karbon / temiz kömür	Serbest veya mineral maddeyle kenetlenmiş organik taneler.	Dağıtma, sınıflandırma ve flotasyon.	Gravite ve flotasyonla yakıt; aktif karbon veya karbonlu ürün.

Kömür ve kömür kökenli küllerden kritik element geri kazanımının en bilinen ticari örneklerinden biri germanyum üretimidir. Çin, küresel germanyum üretiminin önemli bir bölümünü kömür kaynaklarından karşılamakta olup, bu uygulama kömür kökenli atıklardan kritik hammadde geri kazanımının endüstriyel ölçekte uygulanabilir olduğunu göstermektedir (Dai ve Finkelman, 2018). Galyum ise özellikle Al bakımından zengin uçucu küllerde zenginleşebilmekte; İç Moğolistan'daki Jungar kömürlerinden oluşan Al bakımından zengin küller üzerinde Ga ve Li'nin birlikte geri kazanımına yönelik prosesler geliştirilmiştir (Dai vd., 2010; Dai vd., 2014).

4. ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Başarılı bir kazanım akım şeması, temsilî numune alma ve mineralojik tanımlama ile başlamaktadır. Tane boyutu dağılımı, nem, kül, sabit karbon, kükürt ve ısıl değer atığın yakıt ve mineral potansiyelini belirlerken; XRF ana oksitleri, ICP-MS iz elementleri, XRD kristalin fazları, SEM-EDS ise tane morfolojisi ve mikrokimyasal birliktelikleri ortaya koymaktadır. Ardışık kimyasal analizler ise elementlerin hangi mineral fazlarla ilişkili olduğunu ve seçilecek zenginleştirme ile geri kazanım yönteminin belirlenmesinde temel bilgi sağlamaktadır (Zhang vd., 2020; Tian vd., 2025).

Boyut sınıflandırma çoğu zaman en düşük maliyetli ön zenginleştirme basamağıdır. Kil ve NTE içeriğinin ince fraksiyonlarda arttığı malzemelerde hidrosiklon veya ince eleme ile küçük hacimli, metalce zengin bir ürün üretilebilmektedir. Buna karşılık bazı ağır mineraller veya Fe-Ti fazları daha iri fraksiyonlarda yoğunlaşabildiğinden, tek bir kesme boyutu yerine her boyut fraksiyonunun kül, karbon ve element dağılımı belirlenmelidir (Dai vd., 2014; Lin vd., 2017).

4.1. Fiziksel Zenginleştirme

Gravite yöntemleri kömür ile yüksek yoğunluklu mineral madde arasındaki yoğunluk farkından yararlanmaktadır. Jig ve sarsıntılı masa iri-orta boyutlarda; spiral, MGS, Knelson ve Falcon gibi santrifüjlü ayırıcılar ise daha ince tanelerde kullanılabilmektedir. Bu yöntemlerle kömürün kazanılması, pirit ve ağır minerallerin uzaklaştırılması veya NTE taşıyan fazların ön konsantrasyonu hedeflenmektedir. Ancak NTE'lerin kil minerallerine adsorplanması, 10 µm'nin altındaki çok ince taneler hâlinde dağılması ve taşıyıcı fazlar arasındaki küçük yoğunluk farkları nedeniyle fiziksel ayırma çoğu zaman sınırlı zenginleşme sağlamaktadır. Buna rağmen, hidrometalurjik besleme kütlesini azaltması ve asit tüketen karbonatları ayırabilmesi açısından önemlidir (Lin vd., 2017; Honaker vd., 2018).

Fiziksel ayırma çalışmalarının ortak sonucu, NTE davranışının yalnızca teorik mineral yoğunluğu veya manyetik duyarlılıkla açıklanamayacağıdır. Lin vd. (2017), kül örneklerinde NTE derişiminin çoğunlukla ince ve manyetik olmayan fraksiyonlarda arttığını, gravite farkına göre ayırmanın incelenen fiziksel yöntemler arasında en yüksek zenginleşmeyi sağlamasına karşın maksimum konsantrasyonun her zaman en ağır üründe oluşmadığını göstermiştir. Bu durum, NTE taşıyan fazların Al-Si camı içerisinde kapanımlı veya daha düşük yoğunluklu tanelerle birleşik bulunmasına bağlanmaktadır. Pan vd. (2020) ise tane boyutu sınıflandırması ve manyetik ayırmayı ardışık kullanarak uçucu küldeki toplam NTE-Y içeriğini 782 g/t'den 1025 g/t'ye yükseltmiş; ancak elde edilen ön konsantrenin kütle verimi %24 ve NTE-Y kazanımı %31,46 düzeyinde kalmıştır. Dolayısıyla fiziksel işlemlerin temel işlevi, nihai metal ürünü üretmekten çok liç işlemine tabi tutulacak malzeme miktarını azaltmak ve daha uygun bir kimyasal besleme ürünü hazırlamaktır (Lin vd., 2017; Pan vd., 2020; Thomas vd., 2024). Bu nedenle fiziksel zenginleştirme yöntemleri, tek başına nihai metal

üretiminden çok hidrometalurjik işlemlerin verimini artıran bir ön hazırlık basamağı olarak değerlendirilmektedir.

4.2. Flotasyon ve Karbon Kazanımı

Flotasyon, kömür yıkama artıklarındaki ince karbonun geri kazanılması ve uçucu küldeki yanmamış karbonun uzaklaştırılmasında en yaygın fizikokimyasal yöntemlerden biridir. Kerosen ve dizel gibi apolar toplayıcılar kömür yüzeyinin hidrofobikliğini artırırken, MIBC ve diğer alkol esaslı köpürtücüler kararlı köpük oluşumunu sağlamaktadır. Kil kaplamaları, oksitlenmiş kömür yüzeyleri ve çok ince taneler flotasyon seçiciliğini azaltabildiğinden; bastırıcılar, pH düzenleyiciler, uygun reaktif kombinasyonları ve çok kademeli flotasyon yöntemleri uygulanabilmektedir.

Karbonun köpük ürününde uzaklaştırılması, batan mineral ürünün kül ve kritik element tenörünü göreceli olarak artırırken, organik madde miktarını azaltarak sonraki hidrometalurjik işlemlerde reaktif tüketimini de düşürebilmektedir. Bu nedenle flotasyon, karbon geri kazanımının yanı sıra kritik elementlerin geri kazanımına yönelik önemli bir ön zenginleştirme yöntemi olarak değerlendirilmektedir (Zhang vd., 2017; Gupta vd., 2019).

4.3. Kimyasal Zenginleştirme Yöntemleri

Doğrudan asit liçi, öğütülmüş kömür kökenli atıklardaki değerli elementlerin mineral fazlardan asidik çözeltiye alınmasına dayanmaktadır. HCl, birçok NTE taşıyan fazın çözündürülmesinde etkili olup solvent ekstraksiyonuna uygun klorür çözeltileri oluşturabilmektedir. H_2SO_4 ise daha düşük maliyeti nedeniyle doğrudan liç ve asitle pişirme süreçlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Sıcaklık, süre, asit derişimi, katı/sıvı oranı ve tane boyutu liç verimini belirleyen temel parametrelerdir. Yüksek Ca içeriği asit tüketimini artırırken, Al ve Fe'nin birlikte çözünmesi saflaştırma maliyetini yükseltebilmektedir (Yang vd., 2019; Middleton vd., 2020). Linyitlerde NTE'lerin önemli bölümünün organik asit kompleksleri hâlinde bulunması, düşük konsantrasyonlu asitlerle yüksek çözünme verimlerine olanak sağlayabilmektedir. Örneğin, Kuzey Amerika linyitlerinde 0,5 mol/L H_2SO_4 ile toplam NTE'nin yaklaşık %90'ının çözündürülebildiği bildirilmiştir (Laudal vd., 2018).

Uçucu ve taban küllerindeki NTE'lerin bir bölümü kuvars, mullit ve amorf cam fazı içinde kapanım hâlinde bulunduğundan, alkali aktivasyon veya kavurma doğrudan liçe göre çözünürlüğü artırabilmektedir. NaOH ve Na_2CO_3 ile gerçekleştirilen ısıl işlem alüminosilikat yapısını bozarak çözünür fazlar oluşturmakta, ardından su ve/veya asit liçi uygulanmaktadır. Asit ile pişirme ve oksitleyici kavurma da liç verimini artıran yaygın ön işlemler arasında yer almaktadır (Taggart vd., 2018; Pan vd., 2021; Wen vd., 2022). Alkali ön işlem sonrası asit liçi ile %95'in üzerinde NTE çözünmesi elde edilebildiği bildirilmiştir (Wen vd., 2022). HNO_3 belirli mineral fazlarının çözündürülmesinde kullanılabilmekle birlikte, maliyet ve reaktif geri kazanımı açısından HCl ve H_2SO_4 kadar yaygın tercih edilmemektedir. Bununla birlikte yüksek ekstraksiyon veriminin tek başına yeterli olmadığı; reaktif tüketimi, eş çözünme ve

proses ekonomisinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Middleton vd., 2020; Tian vd., 2025).

Türkiye'den güncel bir örnek olarak Ulucan vd. (2026), Soma Termik Santrali taban külünde fiziksel ve kimyasal kazanım yöntemlerini karşılaştırmıştır. Fiziksel zenginleştirme sınırlı başarı sağlarken, 5 mol/L NaOH ile alkali ön işlemi izleyen HCl liçinde yaklaşık %87 NTE çözünmesi elde edilmiştir. Benzer şekilde, Güven (2024), Soma Termik Santrali uçucu külünde alkali ısıl işlem sonrası uygulanan HCl liçi ile %94,7 NTE çözünme verimine ulaşmıştır. Dinç (2024) ise Soma kömür yıkama tesisi artığında asit ile pişirme ve su liçi kombinasyonu ile %90,8 NTE çözünmesi elde etmiş; ayrıca ince fraksiyonlarda NTE'lerin yoğunlaştığını göstermiştir. Bu çalışmalar, hidrometalurjik proses seçiminde atığın mineralojik yapısının belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır (Dinç, 2024; Güven, 2024).

Son yıllarda geleneksel mineral asitlere alternatif çevreci liç sistemleri geliştirilmektedir. Sitrik asit liçi, biyosorbentler ve Ca bakımından zengin küller için geliştirilen yeni yaklaşımlar umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır (Zhang vd., 2024; Hussain vd., 2024; Gerardo ve Song, 2025). Ayrıca kömür, linyit ve biyokütle yakma artıklarının kritik element geri dönüşüm potansiyelini karşılaştıran çalışmalar, bu malzemelerin döngüsel ekonomi açısından önemini göstermektedir (Karan vd., 2024). Kömür kökenli malzemelerden kritik element geri kazanımına yönelik öne çıkan çalışmalar Çizelge 2'de özetlenmiştir.

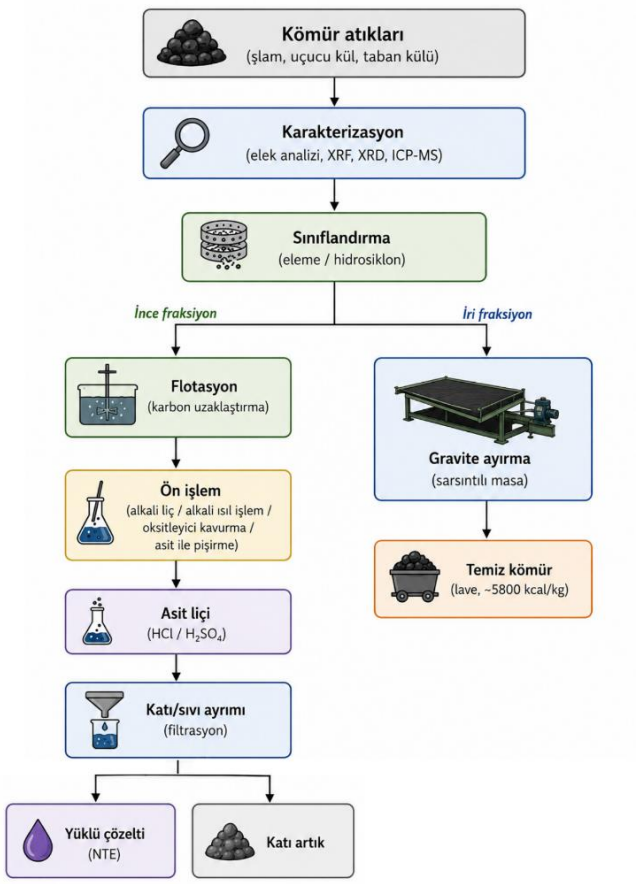
Yeni nesil proseslerde amaç yalnızca yüksek ekstraksiyon verimi değil, NTE'lerin seçimli ayrılması ve reaktiflerin yeniden kullanılabilmesidir. Termomorfik iyonik sıvılar, iyonik sıvılar, derin ötektik çözücüler, solvent ekstraksiyonu, membran süreçleri ve elektrokimyasal ayırma yöntemleri bu amaçla geliştirilen başlıca yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Stoy vd., 2021; Thomas vd., 2024).

Liç sonrasında çözelti; NTE'lerin yanı sıra Al, Fe, Ca, Mg ve diğer safsızlık elementlerini de içermektedir. İlk aşamada pH kontrollü çöktürme ile başlıca safsızlıklar uzaklaştırılmakta, ardından NTE'ler oksalat, karbonat veya hidroksit formunda çöktürülebilmektedir. Daha yüksek saflık gerektiren uygulamalarda solvent ekstraksiyonu, iyon değiştirici reçineler, seçici adsorbanlar ve membran süreçleri kullanılmaktadır. Ga, Ge ve Li gibi yan ürünlerin sıralı kazanımı ile proses suyu ve asit geri kazanımı, prosesin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğini artırmaktadır (Haghighi vd., 2018; Zhang vd., 2020; Tian vd., 2025).

Atık türüne bağlı olarak uygulanacak akım şeması farklılık göstermektedir. Kömür hazırlama artıklarında boyut sınıflandırma, gravite ayırma ve/veya flotasyon ile karbonun uzaklaştırılmasını takiben mineralce zengin fraksiyon hidrometalurjik işleme hazırlanmaktadır. Uçucu ve taban küllerinde ise manyetik ayırma ve gerekli ön işlemlerin ardından seçici liç uygulanmaktadır. Kömür kökenli atıklardan karbon ve kritik element geri kazanımına yönelik genel akım şeması Şekil 3'te verilmiştir (Honaker vd., 2018; Zhang vd., 2020).

Çizelge 2. Kömür kökenli malzemelerden değerli element kazanımına yönelik öne çıkan çalışmaların özeti.

Kaynak	**Malzeme**	**Yöntem**	**Öne çıkan bulgu**
Mardon ve Hower, 2004	Kentucky besleme kömürü ve külleri	Karakterizasyon	Besleme ve uçucu külde 1500 g/t'un üzerinde NTE içeriği.
Lin vd., 2017	Kömür ve yan ürünleri	Fiziksel ayırma (boyut, gravite, manyetik)	Küllerde NTE çoğunlukla ince ve manyetik olmayan fraksiyonlarda; yoğunluk ayırma en yüksek zenginleşme, fakat kapanım seçiciliği sınırlamıştır.
Zhang vd., 2017	Kömür	Flotasyon	NT minerallerinin yüzen üründe ön konsantrasyonu.
Haghighi vd., 2018	Uçucu kül liç çözeltisi	Solvent ekstraksiyonu	Farklı ekstraktantlarla çözeltiden Ge kazanımı.
Honaker vd., 2018	İri kömür artığı	Bütünleşik akım şeması tasarımı	Fiziksel ön konsantrasyon + liç kombinasyonu önerisi.
Laudal vd., 2018	Kuzey Amerika linyitleri	H_2SO_4 liçi (0,5 mol/L)	Organik bağlı NTE'lerin ~%90'ının çözündürülmesi.
Taggart vd., 2018	ABD uçucu külleri	NaOH kavurma + asit liçi	Kavurma katkıları NTE ekstraksiyonunu belirgin şekilde artması
Wang vd., 2019	Luzhou (Çin) uçucu ve taban külü	Karakterizasyon + NaOH-HCl ardışık liçi	Desilikasyon sonrası ekstraksiyon %32,36'dan %88,15'e yükselmiştir.
Yang vd., 2019	Illinois havzası kömürü	Asit liçi	Liç davranışının kinetik olarak tanımlanması.
Pan vd., 2020	Çin uçucu külü	Manyetik ayırma + HCl liçi	NTE-Y 782 g/t'den 1025 g/t'ye yükseldi; ön konsantre %31,46 NTE-Y içeriğiyle %79,85 liç verimine ulaşmıştır.
Pan vd., 2021	Uçucu kül	Kimyasal kavurma + su liçi + asit liçi	NTE verimi NaOH ile %79'a ve Na_2CO_3 ile yaklaşık %89'a yükselmiştir.
Mokoena vd., 2022	Güney Afrika uçucu külü	Alkali füzyon + HCl liçi	En uygun HCl derişimi 2 mol/L; toplam verim %33, ağır ve orta NTE'ler hafif NTE'lere göre daha kolay kazanılmıştır.
Trinh vd., 2022	Uçucu kül	NaOH liçi ile zenginleştirme + HCl	Desilikasyonla NTE'nin katıda zenginleştirilip çözündürülmesi sağlanmıştır.
Wen vd., 2022	Uçucu kül	Mekanik öğütme / alkali ön işlem + HCl liçi	Öğütme sonrası %79,19; alkali ön işlem sonrası %95,50 toplam NTE çözünmesi.
Kim vd., 2024	Uçucu ve taban külü	NaOH ile alkali ekstraksiyon	≤3 mol/L'de amorf faz çözünmesi baskın; >5 mol/L'de jeopolimer/zeolit benzeri çökelme eş zamanlı başlayarak NTE davranışını değiştirmiştir.
Zhang vd., 2024	Uçucu kül	Sitrik asit kolon liçi	Oda sıcaklığında %64,8 seçimli NTE kazanımı elde edilmiştir.
Gerardo ve Song, 2025	Ca'ca zengin uçucu kül	Asit liçi + ikincil faz kontrolü	Jips vb. çökelmelerin önlenmesiyle etkin kazanım sağlanmıştır.
Ulucan vd., 2026	Soma Termik Santrali taban külü	Fiziksel ayırma + ardışık NaOH-HCl liçi	5 mol/L NaOH ön işlemi sonrası -0,106 mm fraksiyonda yaklaşık %87 NTE verimi sağlanmıştır.



Şekil 3. Kömür kökenli atıklardan kömür ve kritik hammaddelerin kazanımına yönelik genel akım şeması (Honaker vd., 2018; Zhang vd., 2020).

5. TÜRKİYE AÇISINDAN GENEL DEĞERLENDİRME

Türkiye'nin linyit ağırlıklı kömür yapısı, yüksek kül içeriği nedeniyle önemli miktarda kömür hazırlama ve yanma atığı oluşmasına yol açmaktadır. Ancak farklı havzalardaki kömürlerin mineralojisi ve iz element dağılımı değişkenlik göstermektedir (Karayiğit vd., 2000; Altunsoy vd., 2017). Bu nedenle aktif termik santraller, kömür hazırlama tesisleri ve depolama sahalarını kapsayan ulusal bir envanter oluşturularak; atık miktarı, kimyasal bileşim, mineralojik yapı ve kritik element içerikleri ortak analitik protokollerle belirlenmelidir. Envanter çalışmalarında yalnızca NTE değil, Al-Si-Fe bakımından çok ürün potansiyeli taşıyan atıklar da değerlendirilmelidir.

Soma Termik Santrali taban külü üzerinde gerçekleştirilen güncel çalışmalar, Türkiye'de saha bazlı mineralojik karakterizasyon ile fiziksel ve kimyasal yöntemlerin birlikte değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Ulucan vd. (2026), fiziksel zenginleştirmenin tek başına yeterli olmadığını, alkali ön işlem ve kontrollü asit liçi kombinasyonunun yüksek NTE ekstraksiyonu sağlayabildiğini göstermiştir. Bu bulgular, proses seçiminde yalnızca toplam tenörün değil, elementlerin bulunma biçimi ve mineralojik özelliklerin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Kömür kökenli atıklarda kritik element tenörleri çoğu zaman geleneksel cevherlerden düşük olsa da, madencilik ve ilk boyut küçültme maliyetlerinin önceden karşılanmış olması, malzemenin yüzeyde stoklanması ve çevresel iyileştirme sağlaması önemli

avantajlardır (Seredin ve Dai, 2012; Dai ve Finkelman, 2018). Bu nedenle ekonomik değerlendirmeler yalnızca kritik element gelirine değil, karbon, demir ve Al-Si esaslı ürünlerin birlikte değerlendirildiği çok ürünlü proses yaklaşımlarına da dayanmalıdır. Gelecekte yapılacak çalışmaların; seçici ve düşük kimyasal tüketimli liç sistemleri, reaktif geri kazanımı, pilot ölçek doğrulama ile tekno-ekonomik ve yaşam döngüsü analizlerine odaklanması, kömür kökenli atıkların endüstriyel ölçekte değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır (Zhang vd., 2024; Hussain vd., 2024; Liu vd., 2025).

6. SONUÇLAR

Kömür yıkama artıkları, uçucu kül ve taban külü; yüksek miktarlarda oluşmaları ve kritik elementler içermeleri nedeniyle önemli ikincil hammadde kaynaklarıdır. Türkiye'de her yıl oluşan büyük miktardaki kömür kökenli atıklar, kaynak geri kazanımı açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu atıkların ana bileşenleri Si, Al, Fe ve Ca olmakla birlikte; NTE, Sc, Li, Ga, Ge, V ve diğer iz elementler ekonomik ve stratejik değer taşımaktadır. Bu nedenle değerlendirmelerde yalnızca toplam element tenörü değil, mineralojik bağlanma şekli ve elementlerin tane boyutuna göre dağılımı da dikkate alınmalıdır. Fiziksel zenginleştirme yöntemleri tek başına yeterli olmamakta; ön konsantrasyonu takiben uygulanan seçici hidrometalurjik işlemler daha yüksek geri kazanım sağlamaktadır. En uygun yaklaşım; fiziksel ön zenginleştirme, seçici liç, çözelti saflaştırma ve reaktif geri kazanımını birleştiren çok ürünlü bütünleşik proseslerdir.

Sonuç olarak kömür kökenli atıkların kritik hammaddelerin geri kazanımı amacıyla değerlendirilmesi; atık miktarının azaltılması, çevresel etkilerin sınırlandırılması, döngüsel ekonomi hedeflerinin desteklenmesi ve yerli hammadde arz güvenliğinin güçlendirilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu potansiyelin endüstriyel ölçekte değerlendirilebilmesi için standart karakterizasyon çalışmaları, pilot ölçek uygulamalar ile tekno-ekonomik ve yaşam döngüsü değerlendirmelerinin birlikte yürütülmesi öncelikli araştırma alanları olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

Altunsoy, M., Özçelik, O., Güllüdağ, C. 2017. Comparison of Major and Trace Element Enrichments of Pliocene Coal Fields from Karapınar and Ilgın (Konya) Basins (Turkey), Journal of Scientific and Engineering Research, 4, 11, 269-275.

Ateşok, G. 2017. Kömür Hazırlama ve Teknolojisi, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, İstanbul.

Blissett, R. S., Smalley, N., Rowson, N. A. 2014. An Investigation into Six Coal Fly Ashes from the United Kingdom and Poland to Evaluate Rare Earth Element Content, Fuel, 119, 236-239.

Dai, S., Finkelman, R. B. 2018. Coal as a Promising Source of Critical Elements: Progress and Future Prospects, International Journal of Coal Geology, 186, 155-164.

Dai, S., Zhao, L., Hower, J. C., Johnston, M. N., Song, W., Wang, P., Zhang, S. 2014. Petrology, Mineralogy, and Chemistry of Size-Fractioned Fly Ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China, with Emphasis on the Distribution of Rare Earth Elements, Energy & Fuels, 28, 2, 1502-1514.

Dai, S., Zhao, L., Peng, S., Chou, C. L., Wang, X., Zhang, Y., Sun, Y. 2010. Abundances and Distribution of Minerals and Elements in High-Alumina Coal Fly Ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China, International Journal of Coal Geology, 81, 4, 320-332.

Dinç, N. İ. (2024). Kömür yıkama tesisi artıklarından kömür ve nadir toprak elementlerinin kazanımı (Tez No. 845417) [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Eterigho-Ikelegbe, O., Harrar, H., Bada, S. 2021. Rare Earth Elements from Coal and Coal Discard - A Review, Minerals Engineering, 173, 107187.

EY, 2025. Nadir Toprak Elementleri Çalışması, Ernst & Young Türkiye, https://www.ey.com/tr_tr/technical/ey-turkiye-yayinlar-raporlar/ey-nadir-toprak-elementleri-calismasi (Temmuz 2026).

Franus, W., Wiatros-Motyka, M. M., Wdowin, M. 2015. Coal Fly Ash as a Resource for Rare Earth Elements, Environmental Science and Pollution Research, 22, 12, 9464-9474.

Gerardo, S., Song, W. 2025. Rare Earths Recovery from Calcium-Rich Coal Fly Ash: Secondary Phase Formation and Mitigation Approaches, Environmental Science & Technology, 59, 43, 23592-23601.

Gupta, T., Ghosh, T., Akdogan, G., Bandopadhyay, S. 2019. Maximizing REE Enrichment by Froth Flotation of Alaskan Coal Using Box-Behnken Design, Mining, Metallurgy & Exploration, 36, 571-578.

Güven, G. (2024). Soma termik santral uçucu küllerinden nadir toprak elementlerinin (NTE) kazanımı (Tez No. 845455) [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Haghighi, H. K., Irannajad, M., Fortuny, A., Sastre, A. M. 2018. Recovery of Germanium from Leach Solutions of Fly Ash Using Solvent Extraction with Various Extractants, Hydrometallurgy, 175, 164-169.

Honaker, R. Q., Zhang, W., Yang, X., Rezaee, M. 2018. Conception of an Integrated Flowsheet for Rare Earth Elements Recovery from Coal Coarse Refuse, Minerals Engineering, 122, 233-240.

Hussain, Z., Dwivedi, D., Kwon, I. 2024. Recovery of Rare Earth Elements from Low-Grade Coal Fly Ash Using a Recyclable Protein Biosorbent, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12, 1385845.

IEA, 2025. Coal Mid-Year Update 2025, International Energy Agency, https://www.iea.org/reports/coal-mid-year-update-2025 (Temmuz 2026).

Karan, K. K., Masto, R. E., Kumar, S., Agarwalla, H., Bari, S. 2024. Prospect for Recycling Critical Elements in Combustion Residues of Coal, Lignite, and Biomass Feedstocks, Minerals Engineering, 219, 109063

Karayiğit, A. İ., Gayer, R. A., Querol, X., Onacak, T. 2000. Contents of Major and Trace Elements in Feed Coals from Turkish Coal-Fired Power Plants, International Journal of Coal Geology, 44, 2, 169-184.

Kvaz, İ. 2019. Yerli ve Milli Enerji Politikaları Ekseninde Kömür, Seta Analiz, 265, 7-27.

Ketris, M. P., Yudovich, Y. E. 2009. Estimations of Clarkes for Carbonaceous Biolithes: World Averages for Trace Element Contents in Black Shales and Coals, International Journal of Coal Geology, 78, 2, 135-148.

Kim, G. M., Park, S., Choi, J., Park, S., Kim, J. 2024. Effects of Alkaline Extraction on Behavior of Rare Earth Elements in Coal Ashes, Environmental Science and Pollution Research, 31, 63210-63224.

Laudal, D. A., Benson, S. A., Addleman, R. S., Palo, D. 2018. Leaching Behavior of Rare Earth Elements in Fort Union Lignite Coals of North America, International Journal of Coal Geology, 191, 112-124.

Lin, R., Howard, B. H., Roth, E. A., Bank, T. L., Granite, E. J., Soong, Y. 2017. Enrichment of Rare Earth Elements from Coal and Coal Byproducts by Physical Separations, Fuel, 200, 506-520.

Liu, T., Chen, J., Li, X., Wang, B., Ying, Z., Wang, J., Wu, G. 2025. Recycling and Resource Utilization of Coal Fly Ash: A Review, Separation and Purification Technology, 375, 133791.

Mardon, S. M., Hower, J. C. 2004. Impact of Coal Properties on Coal Combustion By-Product Quality: Examples from a Kentucky Power Plant, International Journal of Coal Geology, 59, 153-169.

Mathapati, M., Amate, K., Durga Prasad, C. 2022. A Review on Fly Ash Utilization, Materials Today: Proceedings, 50, 1535-1540.

Middleton, A., Park, D. M., Jiao, Y., Hsu-Kim, H. 2020. Major Element Composition Controls Rare Earth Element Solubility During Leaching of Coal Fly Ash and Coal By-Products, International Journal of Coal Geology, 227, 103532.

Mokoena, K., Mokhahlane, L. S., Clarke, S. 2022. Effects of Acid Concentration on the Recovery of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash, International Journal of Coal Geology, 259, 104037.

Pan, J., Hassas, B. V., Rezaee, M., Zhou, C., Pisupati, S. V. 2021. Recovery of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash Through Sequential Chemical Roasting, Water Leaching, and Acid Leaching Processes, Journal of Cleaner Production, 284, 124725.

Pan, J., Nie, T., Hassas, B. V., Rezaee, M., Wen, Z., Zhou, C. 2020. Recovery of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash by Integrated Physical Separation and Acid Leaching, Chemosphere, 248, 126112.

Seredin, V. V., Dai, S. 2012. Coal Deposits as Potential Alternative Sources for Lanthanides and Yttrium, International Journal of Coal Geology, 94, 67-93.

Seredin, V. V., Finkelman, R. B. 2008. Metalliferous Coals: A Review of the Main Genetic and Geochemical Types, International Journal of Coal Geology, 76, 4, 253-289.

Singh, M., Siddique, R. 2013. Effect of Coal Bottom Ash as Partial Replacement of Sand on Properties of Concrete, Resources, Conservation and Recycling, 72, 20-32.

Stoy, L., Diaz, V., Huang, C.-H. 2021. Preferential Recovery of Rare-Earth Elements from Coal Fly Ash Using a Recyclable Ionic Liquid, Environmental Science & Technology, 55, 13, 9209-9220.

Taggart, R. K., Hower, J. C., Hsu-Kim, H. 2018. Effects of Roasting Additives and Leaching Parameters on the Extraction of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash, International Journal of Coal Geology, 196, 106-114.

Thomas, B. S., Dimitriadis, P., Kundu, C., Vuppaladadiyam, S. S. V., Raman, R. K. S., Bhattacharya, S. 2024. Extraction and Separation of Rare Earth Elements from Coal and Coal Fly Ash: A Review on Fundamental Understanding and On-Going Engineering Advancements, Journal of Environmental Chemical Engineering, 12, 3, 112769.

Tian, X., Guo, Z., Zhu, D., Pan, J., Yang, C., Li, S. 2025. Recovery of Valuable Elements from Coal Fly Ash: A Review, Environmental Research, 282, 121928.

Trinh, H. B., Kim, S., Lee, J. 2022. Recovery of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash Using Enrichment by Sodium Hydroxide Leaching and Dissolution by Hydrochloric Acid, Geosystem Engineering, 25, 1-2, 53-62.

TÜİK, 2024. Atık İstatistikleri - 2022, Türkiye İstatistik Kurumu, https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/49570 (Temmuz 2026).

Türkmenoğlu, M. 2010. Uçucu Küllerin Liç Karakteristiklerinin ve Çevreye Etkilerinin Araştırılması, Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24, 2, 30-39.

Ulucan, T., Güven, G., Dinç, N. İ., Pural, Y. E., Yüce, A. E., Soydaş Sözer, B., Burat, F. 2026. Comparative Evaluation of Physical and Chemical Beneficiation Routes for Rare Earth Element Recovery from Coal Bottom Ash: A Case Study from Soma Power Plant, Türkiye, International Journal of Coal Preparation and Utilization, DOI: 10.1080/19392699.2026.2686228.

Wang, Z., Dai, S., Zou, J., French, D., Graham, I. T. 2019. Rare Earth Elements and Yttrium in Coal Ash from the Luzhou Power Plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, Characterization and Optimized Extraction, International Journal of Coal Geology, 203, 1-14.

Wen, Z., Zhou, C., Pan, J., Cao, S., Hu, T., Ji, W., Nie, T. 2022. Recovery of Rare-Earth Elements from Coal Fly Ash via Enhanced Leaching, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 42, 7, 2041-2055.

Yang, X., Werner, J., Honaker, R. Q. 2019. Leaching of Rare Earth Elements from an Illinois Basin Coal Source, Journal of Rare Earths, 37, 3, 312-321.

Zhang, L., Chen, H., Pan, J., Yang, F., Long, X., Yang, Y., Zhou, C. 2024. Rare Earth Elements Recovery and Mechanisms from Coal Fly Ash by Column Leaching Using Citric Acid, Separation and Purification Technology, 353.

Zhang, W., Honaker, R., Groppo, J. 2017. Concentration of Rare Earth Minerals from Coal by Froth Flotation, Minerals & Metallurgical Processing, 34, 132-137.

Zhang, W., Noble, A., Yang, X., Honaker, R. 2020. A Comprehensive Review of Rare Earth Elements Recovery from Coal-Related Materials, Minerals, 10, 5, 451.
Zhang, W., Rezaee, M., Bhagavatula, A., Li, Y., Groppo, J., Honaker, R. 2015. A Review of the Occurrence and Promising Recovery Methods of Rare Earth Elements from Coal and Coal By-Products, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 35, 6, 295-330.

SÜPER TEMİZ KÖMÜR ÜRETİMİNDE ORGANİK REAKTİFLERİN ETKİNLİĞİ

THE EFFECTIVENESS OF ORGANIC REAGENTS IN THE PRODUCTION OF SUPER CLEAN COAL

Ayda Akın*
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fak. Maden Müh. Böl. ISTANBUL

Hasan Hacıfazlıoğlu
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fak. Maden Müh. Böl. ISTANBUL

ÖZET Zonguldak bölgesinde faaliyet gösteren kömür yıkama tesislerinden her yıl binlerce ton çok ince boyutlu şlam artık çıkmaktadır. Bu şlamlar genellikle yüksek nemli ve düşük kalorifik değerli olup, termik santrallerde yakılarak değerlendirilmektedir. Ancak bu durum çeşitli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Bu çalışmada, kömür şlamları kullanılarak süper temiz kömür üretimi hedeflenmiştir. Bu amaç için önce flotasyon, ardından liç işlemi uygulanmıştır. Hem flotasyonda hem de liç işleminde sadece çevre dostu organik reaktifler kullanılmış ve kömür şlamının külü %2.92'ye kadar düşürülmüştür.

Anahtar sözcükler: *Organik Reaktifler**,** Flotasyon, liç, kömür, şlam*

ABSTRACT Every year, thousands of tons of very fine-sized slime residue are produced from coal washing plants operating in the Zonguldak region. This slime generally has high moisture content and low calorific value and is used by burning it in thermal power plants. However, this situation causes various environmental problems. This study aims to produce super-clean coal using coal slime. For this purpose, flotation was applied first, followed by leaching. Only environmentally friendly organic reagents were used in both flotation and leaching processes, and the ash content of the coal slime was reduced to 2.92%.

Keywords: *Organic Reagents**,** Flotation, Leaching, Coal, Slime*

* *aydadikici@gmail.com*

1.GİRİŞ

Süper Temiz Kömür (SCC), genellikle ağırlıkça %3'ten daha az kül içeriğine sahip olan; düşük kükürt ve fosfor seviyeleri, yüksek kimyasal aktivite, yüksek vitrinit içeriği ve yüksek ısıl değer ile karakterize edilen bir kömür türüdür. Günümüzde, küresel enerji talebinin artmasıyla birlikte kömürün doğrudan yakılmasından kaynaklanan çevre kirliliği ve sera gazı salınımı ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu bağlamda, kömürün kül ve mineral maddelerden arındırılarak "süper temiz" hale getirilmesi; hem Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) gibi yüksek verimli güç üretim sistemleri için uygun ham madde sağlamakta hem de partikül madde, SO_2 ve NOx gibi kirletici emisyonları minimize etmektedir. Süper temiz kömür üretiminde kullanılan temel yaklaşımlar fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Fiziksel yöntemler (gravite ayırımı, flotasyon vb.) düşük maliyetli ve kömürün yapısına zarar vermeyen yöntemler olmalarına rağmen, ultra düşük kül seviyelerine ulaşmada kimyasal yöntemler kadar etkin değildir. Kimyasal temizleme yöntemleri ise kömür matrisindeki mineral maddelerin asitler, bazlar veya organik çözücüler kullanılarak çözündürülmesi esasına dayanır. Bu yöntemler arasında en yaygın olanları; hidroflorik asit (HF), hidroklorik asit (HCl) ve nitrik asit (HNO_3) gibi güçlü mineral asitlerle yapılan kimyasal liç işlemleridir (Bolat, vd., 1998; Steel vd., 2003; Gülen vd.,2013; Hacıfazlıoğlu, vd. 2016, Hacıfazlıoğlu ve Dikici, 2019).

Son yıllarda dikkat çeken bir diğer kimyasal yöntem ise organo-rafinasyon (çözücü ekstraksiyonu) işlemidir. Bu süreçte, N-metil-2-pirolidon (NMP), antrasen yağı veya seten gibi endüstriyel çözücüler kullanılarak kömürden yüksek saflıkta organik madde özütlenmekte ve genellikle %1'in altında kül içeren süper temiz kömürler elde edilmektedir. Özellikle NMP gibi polar çözücülerin kömürdeki kovalent olmayan bağları kırarak mineral maddeleri açığa çıkardığı ve kömürün aktif yüzey alanını artırarak gazlaştırma verimliliğini yükselttiği gözlemlenmiştir (Sharma ve Giri, 2016; Liu vd., 2023).

Süper temiz kömürler, geleneksel kömürün kül ve kükürt gibi kirleticilerden arındırılmasıyla elde edilen ultra saf bir karbon kaynağıdır; bu yapısıyla kömürü sadece düşük emisyonlu bir yakıt olmaktan çıkarıp ileri teknoloji endüstrileri için stratejik bir ham maddeye dönüştürür. Başta elektrikli araç bataryaları ve süper kapasitörler için anot malzemesi üretimi olmak üzere, karbon fiber, sentetik grafit, yüksek kaliteli aktif karbon üretimi ile demir-çelik ve kimya sanayisinde yüksek katma değerli bir girdi olarak kullanılır. (Fan vd., 2018; Liu vd., 2021; Zhang vd., 2023).

Zonguldak havzasında tüvenan kömür, bir yıkama tesisine girmeden önce, 100 mm açıklıklı bir elekten elenmekte ve elek üstü genellikle elle ayıklama (triyaj) yöntemi ile zenginleştirilmektedir. 100 mm’nin altındaki kömür ise ağır ortam esaslı yıkama cihazına girmektedir. 1-18 mm boyut grubu ağır ortam siklonu ile zenginleştirilirken, 18-100 mm boyut grubu ağır ortam tamburu ile zenginleştirilir. 1 mm’nin altındaki kömür ise önce hidrosiklona beslenmekte, hidrosiklon üst akımı şlam uzaklaştırılmakta, alt akım ise spiral konsantratöre gönderilmektedir. Hidrosiklon üst

akımı çok ince boyutlu killi kömür şlamları ise suyun geri kazanımı amacıyla tikinere ve ordan da ya şlam havuzuna ya da filtrelere beslenmektedir. Her iki durumda da kömür içerikli çamurlar (şlamlar) oluşmaktadır. Literatürde bu şlamlar içerisinden kömürün kazanılmasına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Dünya genelinde kömür şlamlarının zenginleştirilmesi için kullanılan en yaygın yöntem flotasyon yöntemidir. Özellikle, bir jet flotasyonu tekniği olan Jameson hücresi bu alanda başı çeken flotasyon makinesidir. Kömür şlamlarının klasik flotasyon hücreleri ile zenginleştirildiği pek çok uygulama da mevcuttur. Kömür flotasyonunda genellikle gazyağı, mazot ve fuel oil gibi petrol türevi toplayıcılar kullanılmaktadır. Köpürtücü olarak MIBC ve Octanol en yaygın kullanılan reaktiflerdir. Bu reaktifler, fosil yakıtlardan üretildiği için çevre dostu değildir ve üretim ve tüketiminde sera gazı oluşturur. Bu bakımdan araştırmacılar yeni reaktif arayışına girmiş ve yenilenebilir kaynaklardan üretilen reaktifleri kullanmaya başlamışlardır. Özellikle yemeklik bitkisel yağların ve pişirme işlemleri sonucunda ortaya çıkan atık bitkisel yağların kömür flotasyonunda etkili bir şekilde kullanılabileceği pek çok araştırmacı tarafından kanıtlanmıştır. (Alonso vd., 2000; Vasumati vd., 2013; Lang, 2017; Hacifazlioglu ve Senol-Aslan, 2017). Bu çalışmada, Zonguldak kömür şlamlarından süper temiz kömür üretimi için tamamen organik reaktifli flotasyon ve liç yöntemlerinden faydalanılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Zonguldak Kömür Şlamı Numunesi

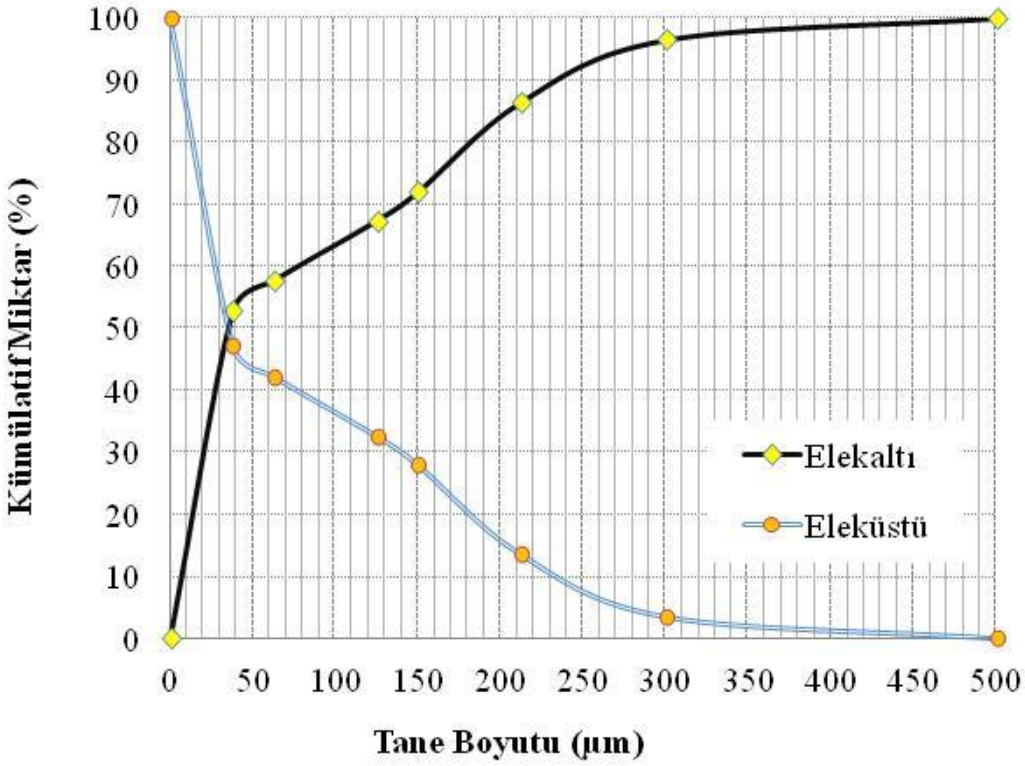
Numunenin karakterizasyonu için öncelikle numuneye kuru bazda ASTM standartlarına göre kısa kimyasal analiz yapılmıştır. Daha sonra yaş manuel eleme yöntemi ile kömürün elek analizi ve akabinde boyuta göre kül dağılımları saptanmıştır. Bu çalışmaların sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir. Şlam kömürün elek altı ve elek üstü eğrileri ise Şekil 1'de gösterilmiştir. Söz konusu numunenim kül içeriği yüksek olup % 29.67, kükürt içeriği ise %0.70 olup, oldukça düşüktür. Çizelge 2'de verilen boyut ve kül dağılımına göre şlamın ortalama tane boyutu (d_{50}) 30 mikron civarında ve özellikle 125 mikrondan daha iri boyutlu taneler oldukça düşük küllü (% 7-13) olup, temiz kömür olarak değerlendirilebilecek kalitedir.

Çizelge 1. Şlam kömür numunesinin kısa kimyasal analiz sonuçları (kuru bazda)

Analizler	Değer
Kül (%)	29.67
Uçucu Madde (%)	30.10
Sabit Karbon (%)	40.23
Toplam Kükürt (%)	0.70
Üst Isıl Değer (kcal/kg)	5390

Çizelge 2. Numunenin yaş elek analiz sonuçları ve boyuta göre kül dağılımları

Elek Açıklığı (µm)	Miktar (%)	Kül (%)	Kümülatif Elek üstü (%)	Kümülatif Elek altı (%)
-500+300	3.51	8.20	3.51	100.00
-300+212	10.12	7.10	13.63	96.49
-212+150	14.40	13.30	28.02	86.37
-150+125	4.62	9.60	32.64	71.98
-125+63	9.58	22.30	42.22	67.36
-63+38	4.98	38.50	47.16	57.78
-38	52.84	42.15	100.00	52.84
TOPLAM	100.00	29.67	-	-

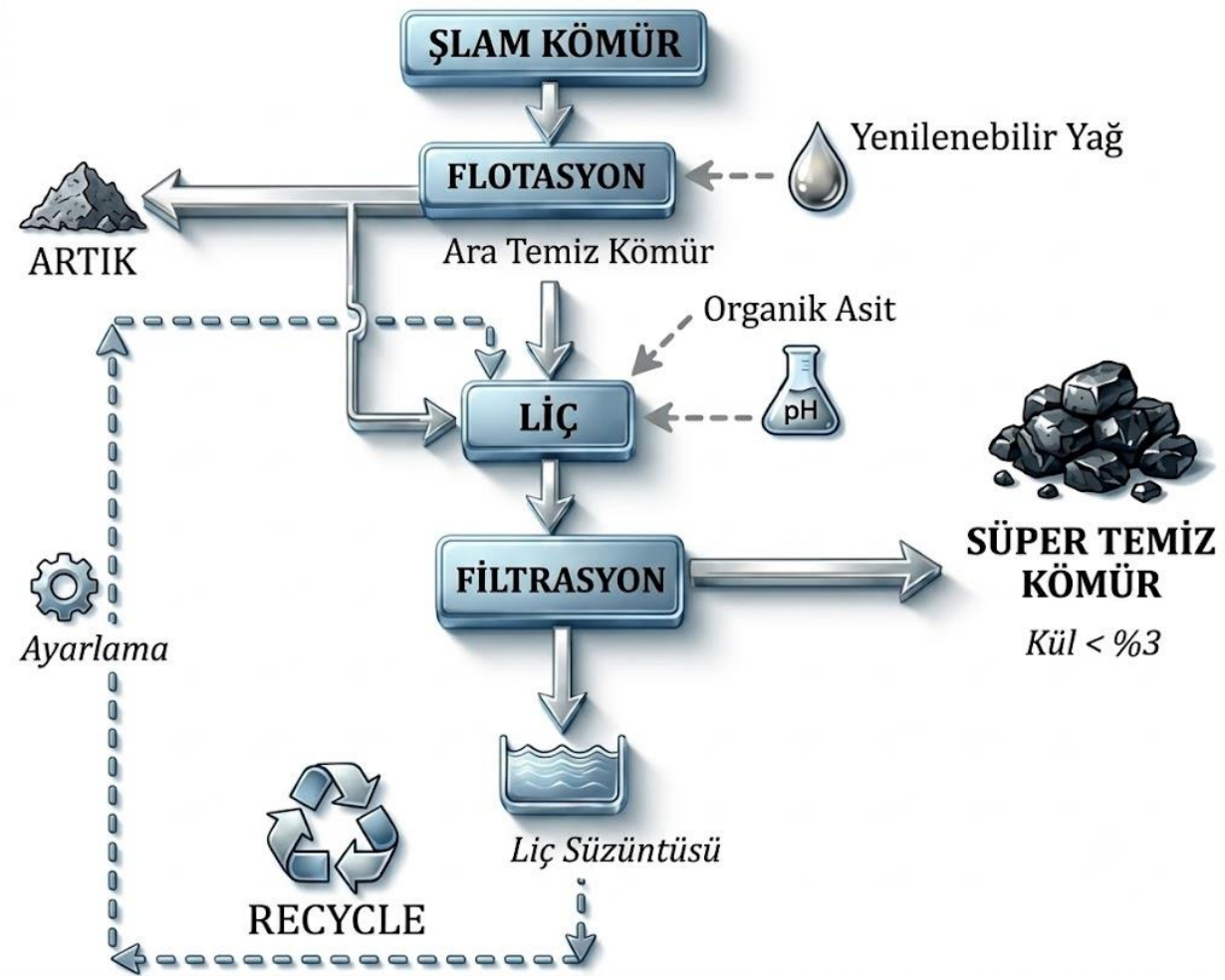


Şekil 1. Şlam kömür numunesinin elek altı ve elek üstü eğrileri

2.2. Şlamdan Süper Temiz Kömür Üretim Yöntemi

Süper temiz kömür üretimi için organik reaktifli zenginleştirme işlemi uygulanmıştır. Şekil 2'den de görülebileceği gibi, önce flotasyon yöntemi ile kül belli ölçüde azaltılacak ve ardından daha maliyetli bir işlem olan organik asitlerle liç yapılacaktır. Bu sayede, flotasyon ile önce serbest kül giderilecek ve ardından liç yöntemi ile bünye külü giderilmeye çalışılacaktır. Ön zenginleştirme işlemi olarak flotasyon yönteminin tercih edilmesinin nedeni, şlam kömürünün çok ince boyutlu ve oldukça hidrofobik özellikte olmasıdır. Flotasyon işlemi klasik Denver hücresinde yapılmıştır. Toplayıcı

olarak 10 kg/t ayçiçek yağı, köpürtücü olarak 0.1 kg/t okaliptüs yağı kullanılmıştır. Flotasyonda 2 kademe temizleme işlemi uygulanmış ve bir konsantre ile 3 ara ürün elde edilmiştir. 3 ara ürün birleştirilmiş ve bu çalışmada artık olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 2. Şlam kömürden süper temiz kömür üretimi için izlenen yöntemin akım şeması

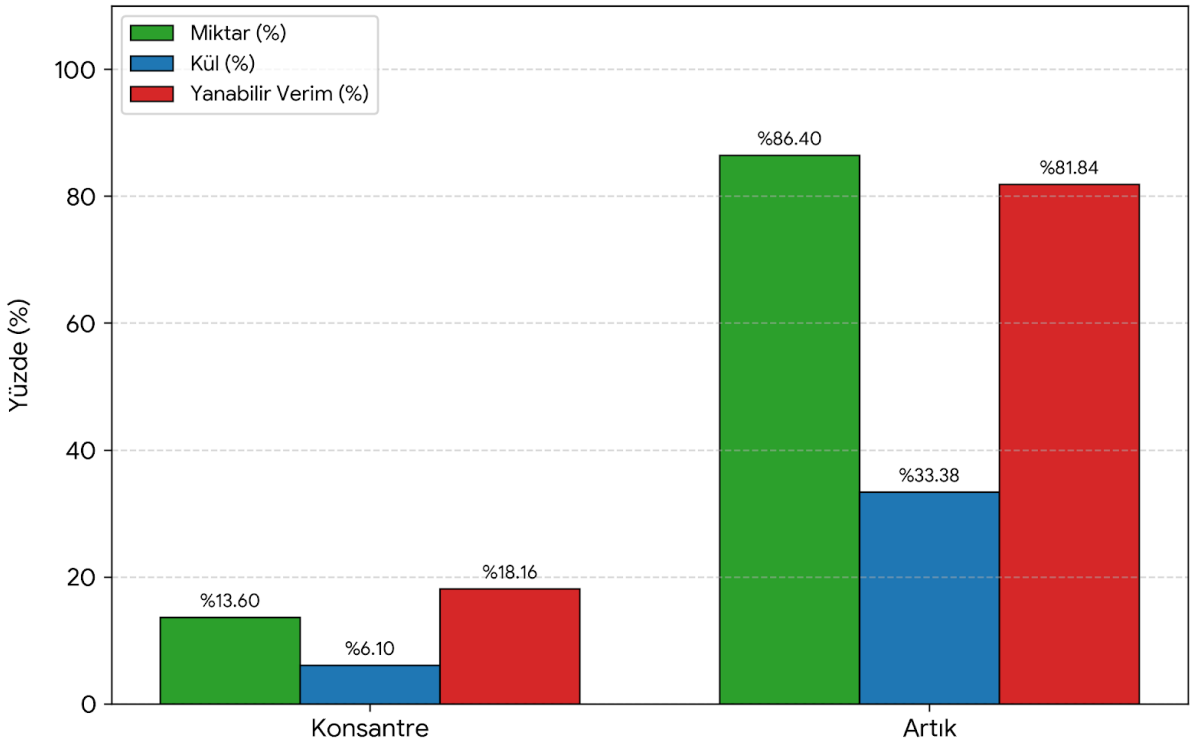
Kömürün içerisinde bulunan inorganik maddelerin giderilmesi için Liç deneyleri yapılmıştır. Liç deneyleri manyetik karıştırıcılı hot-plate üzerine yerleştirilen 500 ml'lik kapaklı beher içerisinde farklı asit tipleri ve farklı asit miktarlarında yapılmıştır. Ayrıca, sıcaklık ve liç süresinin etkisi araştırılmıştır. Liç deneylerinde ayrı ayrı sitrik asit, formik asit, asetik asit ve organik asit kullanılmıştır. Test edilen asit miktarları; 25, 50, 100, 150 ve 200 kg/t'dur. Her deneyde kullanılan kömür miktarı 20 gr, su miktarı ise 200 ml'dir. Asit ilavesi de dikkate alındığında katı oranı yaklaşık %8.5 civarındadır. Manyetik balığın dönüş hızı ise 200 rpm'dir. Liç deneyleri ekonomik olması bakımından önce ortam sıcaklığında (25 ^{o}C) ve kısa süreli (30 dk) olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra liç süresi arttırılmış ve 180 dk'ya çekilmiştir. Son aşamada, en maliyetli yöntem olan pülpü ısıtma işlemi uygulanmış ve 65 ^{0}C'de deneyler yürütülmüştür. Liç parametresi değişikliği süper temiz kömür elde edinceye kadar devam etmiştir. Elde edilen liç çözeltileri, liç işlemi sonrasında 3 mikronluk filtre kağıtlarından süzülmüş ve asidinden tam ayırma için birkaç defa sıcak suyla yıkanmıştır. Filtre kağıdı üzerinde kalan süper temiz kömür önce 105 ^{0}C'lik etüvde

kurutulmuş ve daha sonra kül analizine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmaların sonuçların değerlendirilmesi için "yanabilir verim" ve "kül giderim" değerlerinden faydalanılmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Flotasyon İşlemi Deney Sonuçları

Kömür şlamının ön zenginleştirilmesi organik reaktifli flotasyon yöntemi ile yapılmıştır. Flotasyon test sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre, şlam kömüre toplamda 2 kademe temizleme flotasyonu yapılmış ve elde edilen nihai konsantrenin kül içeriği %6.10'a kadar düşmüştür. Geri kalan kısımlar bir araya toplanmış ve artık olarak isimlendirilmiştir. Atığın ağırlıkça miktarı %86.40, külü ise %33.38'dir.



Şekil 3. Flotasyon yöntemi ile kömür şlamının zenginleştirme sonuçları

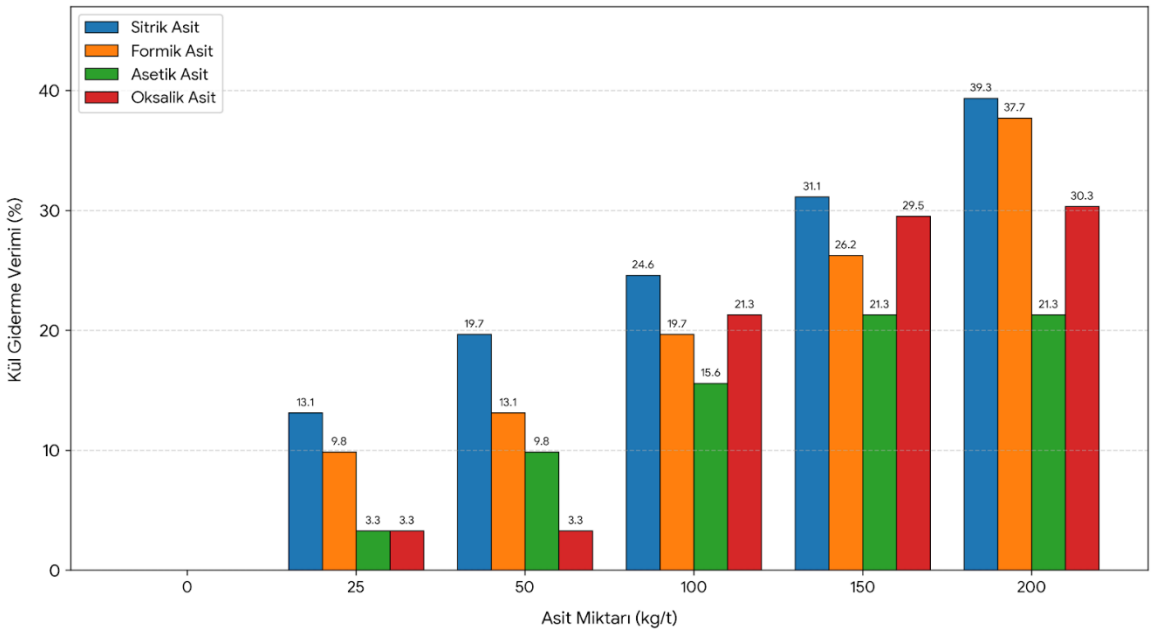
3.2. Liç İşlemi Deney Sonuçları

Toplayıcı olarak ay çiçek yağı ile yapılan flotasyon çalışmaları sonucunda elde edilen %6.10 küllü temiz kömürler biriktirilerek liç deneylerinde kullanılmıştır. Organik reaktiflerden, sitrik asit, formik asit, asetik asit ve okzalik asit ile ayrı ayrı deneyler yapılmış ve kül giderimi için en uygun asit tipi belirlenmiştir. İnorganik asitlerin kül gideriminde oldukça başarılı olduğu, süper temiz kömür hatta HF ile ultra temiz kömürün (kül<%1) bile üretilebileceği pek çok çalışmada belirtilmiştir (Steel vd., 2001; Steel vd., 2003; Yılmaz, 2004; Hacıfazlıoğlu, 2016; Hacıfazlıoğlu ve Dikici,

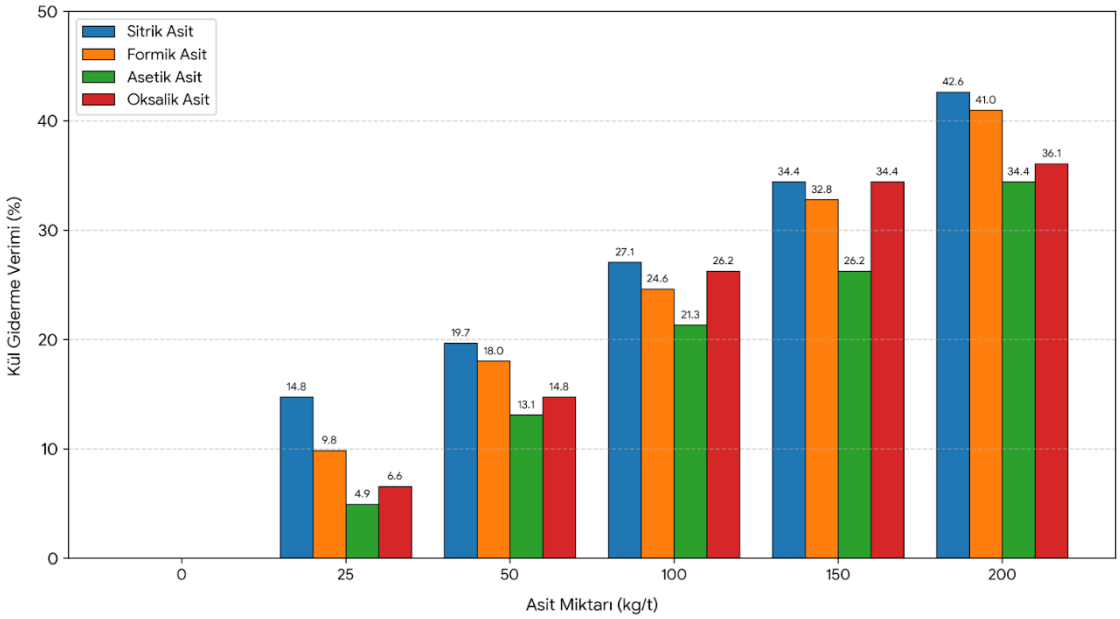
2019). Bu bakımdan, bu çalışmada süper temiz kömür üretimi için yalnızca yenilenebilir organik asitler kullanılmıştır.

Liç deneylerinin ekonomik olması bakımından, öncelikle ortam sıcaklığında (25 ^{0}C) ve kısa süreli (30 dk) liç yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Bu deneylerde organik asitlerle pülpün pH değeri 2.60'a kadar düşmüştür. Şekil 4 incelendiği zaman, hiçbir organik asit ile temiz kömür külü %3'ün altına düşürülememiştir. En yüksek kül giderim değerleri sitrik ve formik asitle elde edilmiştir. 200 kg/t asit miktarında, sitrik asitle liç sonucu elde edilen kömürün kül içeriği %3.70, formik asit ile %3.80 bulunmuştur. Asetik ve okzalik asit kömürün kül içeriğini %4'ün altına indirememiştir. Diğer koşullar sabit tutulmak koşuluyla liç süresinin 30 dk'dan 180 dk'ya çıkarılması durumunda Şekil 5, sitrik asit kömürün kül içeriğini %6.10'dan %3.50'ye düşürebilmiştir.

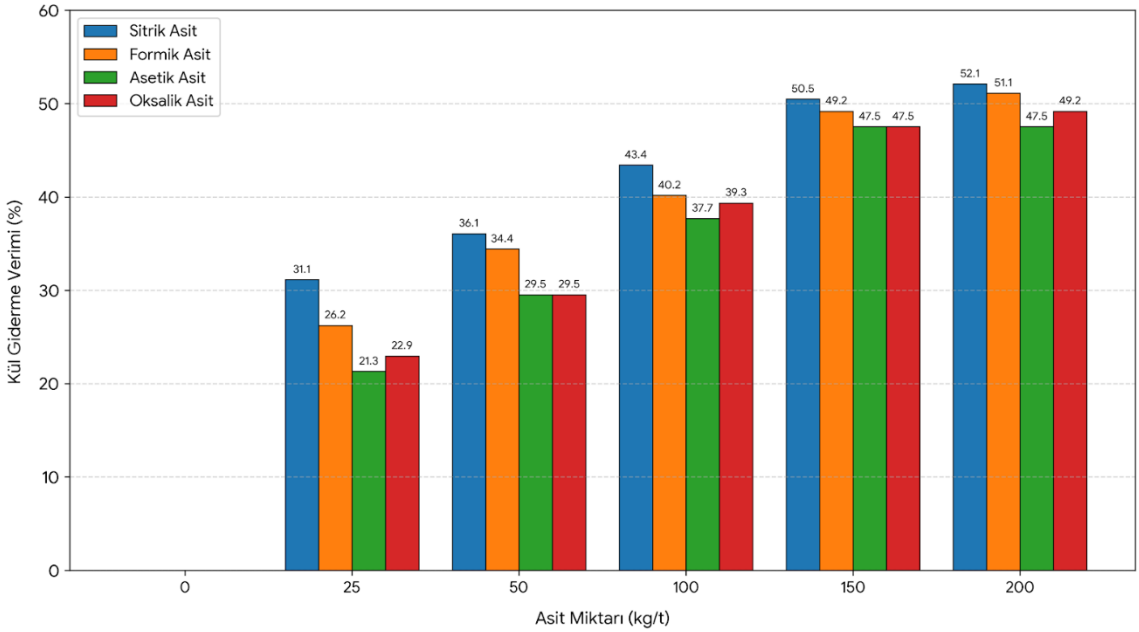
Liç süresinin 6 kat arttırılması durumunda kül giderim değeri %39.34'den %42.62'ye yükselmiş, kül içeriği ise %3.70'den 3.50'ye kadar düşürülebilmiştir. Ancak, ortam sıcaklığında liç süresinin arttırılması da süper temiz kömür üretimini sağlayamamıştır. Formik, asetik ve okzalik asitler ile de kül içeriği %3.5'in altına düşürülememiştir. Bu bakımdan, ortam sıcaklığı arttırılarak deneylere devam edilmiştir. 65^{0}C'lik ortam sıcaklığında yapılan deneylerin sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 4. Asit türü ve dozajına göre kül giderme verimlerinin karşılaştırması (25^{0}C - 30dk)



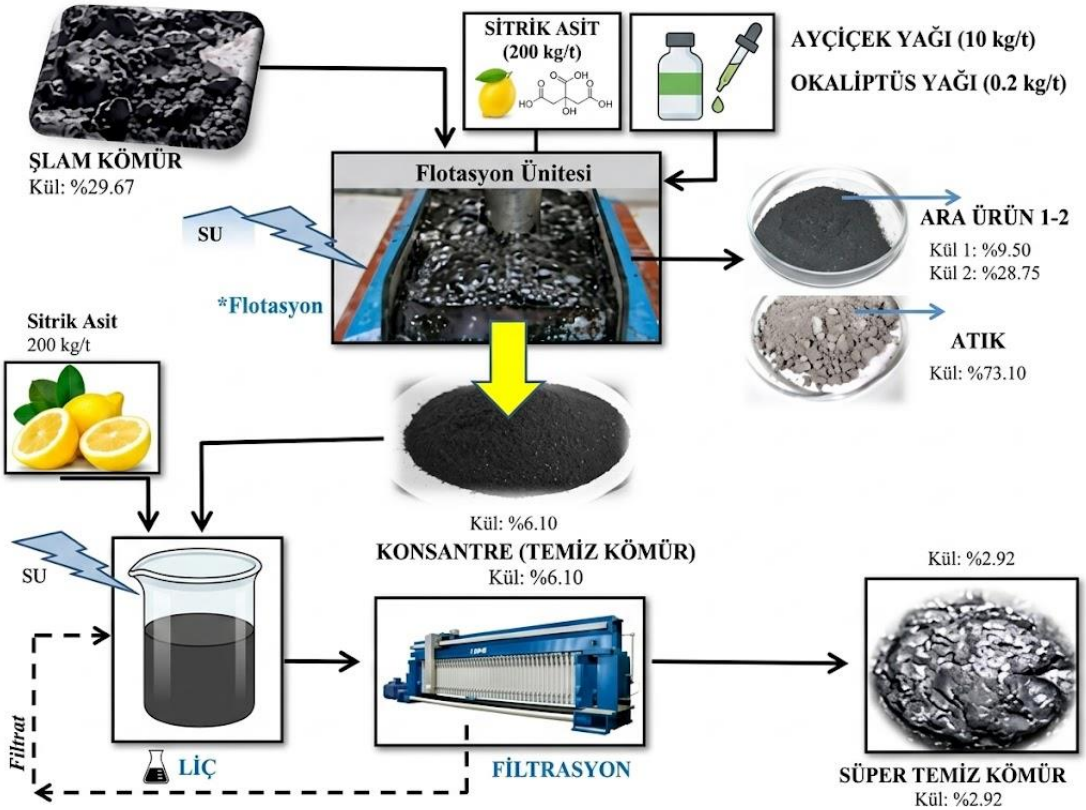
Şekil 5. Asit türü ve dozajına göre kül giderme verimlerinin karşılaştırması (25^0C - 180dk)



Şekil 6. Farklı asitlerin ürün kül içeriğine ve kül giderimine etkisi (65^0C - 180dk)

Şekil 6'da gösterilen veriler incelenirse, 65^0C'lik bir liç sıcaklığında 180 dk liç süresinde sitrik asit ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen temiz kömürün kül içeriği %2.92 bulunmuştur. Benzer koşullarda formik asitte süper temiz kömür üretmiş olup, elde edilen kömürün kül içeriği %2.98'dir. Organik asitlerle süper temiz kömür üretiminde, liç süresinden ziyade liç sıcaklığı daha etkin bir parametre olup, kül gideriminde önemli etkilere sahiptir. 65^0C'lik liç sıcaklığında ve 180 dk liç süresinde sitrik, formik asetik ve okzalik asidin 200 kg/t miktarlarında kül giderim değerleri sırasıyla %52.13, %51.15, %47.54 ve %49.18 bulunmuştur. Yukarıdaki sonuçlar ışığında, tamamen organik reaktiflerle şlam kömüründen süper temiz kömür

üretilebileceği görülmüştür. Bu sonuçlara istinaden şlam kömürden süper temiz kömür üretim işleminin güncel akım şeması Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'ye göre, %8-10 katı oranlı şlam kömür önce kıvam tankına alınıp, 5 dk süresince ayçiçek yağı (10 kg/t) ve okaliptüs yağı (0.2 kg/t) ilavesi ile kıvamlandırılır. Daha sonra, 10 dk flotasyon uygulanır. Elde edilen şlam sistemden uzaklaştırılır. Elde edilen konsantreye 2 kademe daha temizleme uygulanır. Sonuçta %6.10 küllü bir temiz kömür elde edilir. Bu temiz kömür alınarak 65 ^{0}C'de 180 dk boyunca ve 200 kg/t sitrik asit ilavesiyle liç yapılır. Liç işleminden sonucunda elde edilen bulamaç filtrelere gönderilir ve filtrasyon işlemi sonucunda %2.92 küllü süper temiz kömür elde edilmiş olur.



Şekil 7. Organik bir prosesle süper temiz kömür üretiminin komple akım şeması

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada tamamen organik reaktifler ile Zonguldak kömür şlamlarından süper temiz kömür üretilmiştir. Üretim prosesinde kömürün çok ince boyutlu olması nedeni ile öğütmeye ihtiyaç duyulmamıştır. Proseste öğütmenin olmaması enerji tasarrufu için önemli bir avantajdır. Süper temiz kömür üretimi 2 kademeli zenginleştirme işlemi ile yapılmıştır. İlk aşamada flotasyon, ikinci aşamada liç işlemi uygulanmıştır. Kullanılan reaktifler sırasıyla ayçiçek yağı, okaliptüs yağı ve sitrik asittir. Burada sitrik asite alternatif olarak formik asitte kullanılabilir. Üretim prosesinde en önemli maliyet unsuru reaktiflerin yüksek dozajlarda kullanılmış olmasıdır. Ancak, tamamen organik reaktiflerle süper temiz kömür üretilebiliyor olması, sürdürülebilirlik ve çevrenin korunması açısından büyük önem arz etmektedir. Toplayıcı olarak ayçiçek yağı (10

kg/t) ve köpürtücü olarak okaliptüs yağı (0.2 kg/t) ile yapılan flotasyon çalışmaları sonucunda %29.67 küllü kömürden %6.10 küllü bir temiz kömür üretilmiştir. Elde edilen temiz kömürün 200 kg/t sitrik asitle 65^0C'lik bir sıcaklıkta 3 saat liç edilmesi sonucunda, kül %6.10'dan %2.92'ye kadar düşmüştür. Aynı liç işleminin formik asitle yapılması durumunda, kül %2.98 bulunmuştur.
Asetik ve okzalik asit ile süper temiz kömür üretimi mümkün olmamıştır. Sonuç olarak, tamamen organik bir prosesle Zonguldak şlam kömürlerinden süper temiz kömür üretilebileceği kanıtlanmıştır.

KAYNAKLAR

Alonso, M.I. Castano, C. And Garcia, A.B. 2000. Performance of Vegetable Oils As Flotation Collectors for The Recovery of Coal From Coal Fines Wastes, Coal Preparation 21-4, pp. 411-420.

Bolat, E. Sağlam, S. Pişkin, S. 1998. Chemical Demineralization of a Turkish High Ash Bituminous Coal, Fuel Processing Technology 57, pp. 93–99

Drake, S. S., O'Carroll, D. M., Gerhard, J. I., 2013. Wettability Contrasts Between Fresh and Weathered Diesel Fuels. Journal of Contaminant Hydrology, 144(1), pp. 46-57.

Fan, M., Morris, J., & Wang, X. (2018). Clean Coal Technologies: Production of Ultra-Clean and Super-Clean Coals for Low-Emission Power Generation and Industrial Applications. Journal Of Cleaner Production, 185, pp. 412–424. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.112

Gulen, J., Doymaz, I., Piskin, S., and Ongen, S. 2013. The Effects of Temperature and Mineral Acids on The Demineralization Degree of Nallihan Lignite, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects 35, pp. 202–208.

Hacifazlioglu, H. 2016. The Production Of Ultra-Clean Coal From Zonguldak Bituminous Coal by Chemical Leaching, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 38 (24), pp. 3586-3592.

Hacıfazlıoğlu, H. 2011, ''Jameson Hücresinden Bitümlü Şlam Kömürden Flotasyon İçin En Uygun Köpürtücü ve Toplayıcı Tipinin Araştırılması'' Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, ss.33-34

Hacifazlioğlu H., Dikici A., 16-19 Nisan 2019 "Kömür Flotasyonu için Yeşil Kollektör: Şlam Bitkisel Yağ", IMCET 2019, ANTALYA, TÜRKIYE , ss.1169-1176

Hacifazlioğlu H., Dikici A., 2019 "Zonguldak-Karadon Kömüründen Liç Yöntemi ile Ultra Temiz Kömür Üretimi", Yeraltı Kaynakları Dergisi, ss. 35-41

Hacifazlioglu, H. and Senol-Arslan, D.2017. Sunflower Oil as Green Collector in Bituminous Coal Flotation, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 39:15, pp. 1602-1609.

Liu, P., Wang, H., Jiang, L., Zhang, Y., Yang, X., Li, X., & Li, F. 2023. Study on The Cleanliness of Super Clean Coal Prepared by Water-Only Cyclone. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 59(3), 168129

Sharma, D. K., & Giri, C. C. 2016. CO_2 Gasification Reactivity and Kinetics Studies of Raw Coal, Super Clean Coal and Residual Coals obtained after Organo-refining (Solvent Extraction). Journal of Power Technologies, 96(3), pp.157–169

Steel, K. M., And Patrick, J. W. 2003. The Production of Ultra Clean Coal by Sequential Leaching with HF Followed By HNO_3, Fuel 82, pp.1917–1920.

Sönmez, İ. and Cebeci, Y., 2006. Performance of Classic Oils And Lubricating Oils in Froth Flotation of Ukraine Coal, Fuel, 85, pp. 1866-1870.

Lang, X. 2017. Application of Cyclonic Microbubble Flotation Column in Xiezhuang Coal Preparation Plant: From Laboratory to Industrial Scale. Int. J. Of Coal Preparation and Utilization.

(https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1365065)
Liu, L., Wang, X., Zhang, Y., & Clean Coal Research Group. 2021. Preparation of Super Clean Coal and it is Application in Advanced Carbon Materials. Fuel Processing Technology, 215, Article 106742.
https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106742
Steel, K.M. , Besida, J., O'Donnell, T., Wood, D.G. 2001. Production Of Ultra Clean Coal Part I—Dissolution Behaviour of Mineral Matter in Black Coal Toward Hydrochloric And Hydrofluoric Acids, Fuel Processing Technology, 70, pp. 171–192.
Vasumathi, N. Vijaya Kumar, T.V., Subba Rao, S. Prabhakar, S. Bhaskar Raju, G. Shiva Kumar S. and Raman, U. 2013. Eco Friendly and Cost-Effective Reagent for Coal Flotation, International Journal of Engineering Research 2-7, pp. 418-423.
Yılmaz, S. 2004. Katı fosil Yakıtlarda Mineral Giderme Üzerine Etkisi, Karaelmas Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak, Türkiye
Zhang, J. S., Li, R., & Zhao, H. 2023. Super-Clean Coal as a Precursor for High-Performance Activated Carbons and Graphitic Materials. Energy & Fuels, 37(8), pp. 5891–5903.
https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00214
Zhou, G., Xu, C., Cheng, W., Zhang, Q., Nie, W., 2015. Effects of Oxygen Element and Oxygen-Containing Functional Groups on Surface Wettability of Coal Dust With Various Metamorphic Degrees Based On XPS Experiment. Journal Of Analytical Methods In Chemistry, pp. 1-8.

TÜRKİYE'DE TERMİK SANTRALLERDE KULLANILAN KÖMÜR YAKMA TEKNOLOJİLERİ VE AKTÜEL GELİŞMELER

COAL COMBUSTION TECHNOLOGIES AND CURRENT DEVELOPMENTS USED IN THERMAL POWER PLANTS IN TURKEY

M. Suat Delibalta*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 51240 Türkiye

ÖZET Kömür; elektrik üretiminde, ısınmada, demir-çelik, çimento sanayii ve sanayinin diğer tüm dallarında sıkça kullanılmaktadır. 2024 Yılı dünya birincil enerji tüketiminde kömür %25,9'luk payla petrolden sonra ikinci, elektrik üretiminde ise %34'lük payla birinci sırada yer almıştır. Ülkemizin 20,53 milyar ton linyit ve asfaltit (%93,3) 1,52 milyar ton taşkömürü (%6,7) olmak üzere, yaklaşık toplam 22,00 milyar ton kömür rezervi bulunmaktadır. Türkiye kömürleri genelde düşük ısıl değerlere (1.000 ~ 4.200 kcal/kg) sahip olduğundan, termik santrallerde kullanımı daha yaygındır. Ülkemizde; 1 adet asfaltit, 47 adet linyit, 4 adet taşkömürü ve 16 adet ithal kömürle çalışan toplam 68 adet termik santral vardır. Türkiye'de termik santral kurulu gücü, toplam kurulu gücün %17,6'sına karşılık gelmektedir. "*Temiz Kömür Teknolojileri*" kömürün yanma ve santral verimini artırmak, olumsuz çevresel etkileri en aza indirgemek amacıyla geliştirilmiş teknolojilerdir. Türkiye, ancak modern termik santraller ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla 2053 yılı net sıfır emisyon hedeflerine ulaşabilir.

ABSTRACT Coal is frequently used in electricity generation, heating, the iron and steel, cement industries, and all other areas of industry. In 2024, coal ranked second after petroleum in world primary energy consumption with a 25.9% share, and first in electricity generation with a 34% share. Turkey has approximately 22.00 billion tons of coal reserves, including 20.53 billion tons of lignite and asphaltite (93.3%) and 1.52 billion tons of hard coal (6.7%). Since Turkish coals generally have low calorific values (1,000 ~ 4,200 kcal/kg), their use is more common in thermal power plants. In Turkey, there are a total of 68 thermal power plants: 1 asphaltite, 47 lignite, 4 hard coal, and 16 using imported coal. The installed capacity of thermal power plants in Turkey corresponds to 17.6% of the total installed capacity. "*Clean Coal Technologies*" are technologies developed to increase coal combustion and power plant efficiency while minimizing negative environmental impacts. Turkey can only achieve its net-zero emissions target for 2053 with modern thermal power plants and renewable energy sources.

* msdelibalta@ohu.edu.tr

1. GİRİŞ

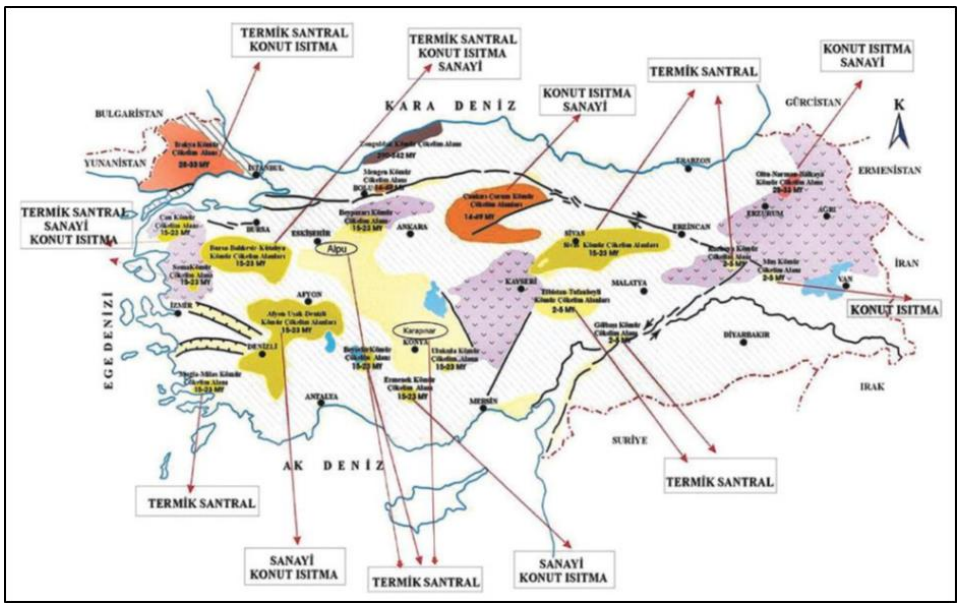
Kömür, dünyada kullanılan en temel enerji kaynaklarından birisidir. Son yıllarda, kömürün çevresel etkileri üzerinde yoğun tartışmalar ve yeni alternatif enerji kaynaklarının bilinmesine rağmen, ülkelerin kömür kullanımından pek de kolay vazgeçemeyecekleri görülmektedir (Dinçer, 2018; MadenMO, 2025, Aktan 2026). Kömür; elektrik üretiminde, ısınmada, demir-çelik ve çimento sanayii ile sanayinin diğer tüm alanlarında sıkça kullanılmaktadır. 2024 yılı dünya birincil enerji tüketiminde kömür %25,9'luk payla petrolden sonra ikinci, elektrik üretiminde ise %34'lük payla ilk sırada yer almıştır. Kömürün gelecekte de lider konumunu sürdürmesi beklenmektedir.

Dünya antrasit ve bitümlü kömür rezervlerinin %29,1'lik payı (218,94 milyar ton) Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'de yer almaktadır. ABD'yi; %17,9 payla Çin, %14,1'le Hindistan, %9,8'le Avustralya, %9,5'le Rusya izlemektedir. Dünya alt bitümlü kömür ve linyit rezervlerinin büyük bir kısmı ise %28,2'lik payla (90,45 milyar ton) Rusya'da bulunmaktadır. Rusya'yı; %23,9'la Avustralya, %11,2'yle Almanya, %9,4'le ABD, %3,7'yle Endonezya ve %3,4 payla Türkiye izlemektedir. Ülkemizin 20,53 milyar ton linyit ve asfaltit (%93,3) 1,52 milyar ton taşkömürü (%6,7) olmak üzere, toplam kömür rezervi yaklaşık 22,00 milyar ton'dur (Delibalta, 2024; ETKB, 2026). Türkiye kömürleri genelde düşük ısıl değerlere (1.000 ~ 4.200 kcal/kg) sahip linyitlerden oluştuğundan, elektrik üretimi amaçlı termik santrallerde kullanımı daha yaygındır. Ülkemizde 2024 yılı tüvenan kömür üretimi; 86,78 milyon ton linyit, 684,1 bin ton asfaltit, 1,39 milyon ton taşkömürü olmak üzere toplam 88,85 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'de 2021-2025 yılları arası ortalama kömür tüketimi ise (taşkömürü, taşkömürü koku, linyit ve asfaltit) yaklaşık 111,4 milyon ton olmuştur.

Türkiye'nin enerjide dışa bağımlı olması dolayısıyla, oluşan cari açığın azaltılmasına yönelik Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın çeşitli stratejileri mevcuttur. Bunların en önemlilerinden birisi, yerli linyit kaynaklarını temiz kömür teknolojileri vasıtasıyla elektrik üretiminde değerlendirmektir. Elektrik üretiminde "*Temiz Kömür Teknolojileri*" kömürün yanma ve santral verimini artırmak, olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla geliştirilmiş/tasarlanmış teknolojilerdir (DEK-TMK, 2010; Delibalta ve Toraman, 2013; Yetiş, 2016; Aytaç, 2018). Temiz kömür teknolojileri; konvansiyonel yöntemlere göre üstün nitelikli teknolojiler olup, sürekli gelişim göstermektedir. Bu tebliğ kapsamında; Türkiye'deki termik santrallerde kullanılan kömür yakma teknolojileri ve aktüel gelişmeler detaylı olarak sunulacaktır.

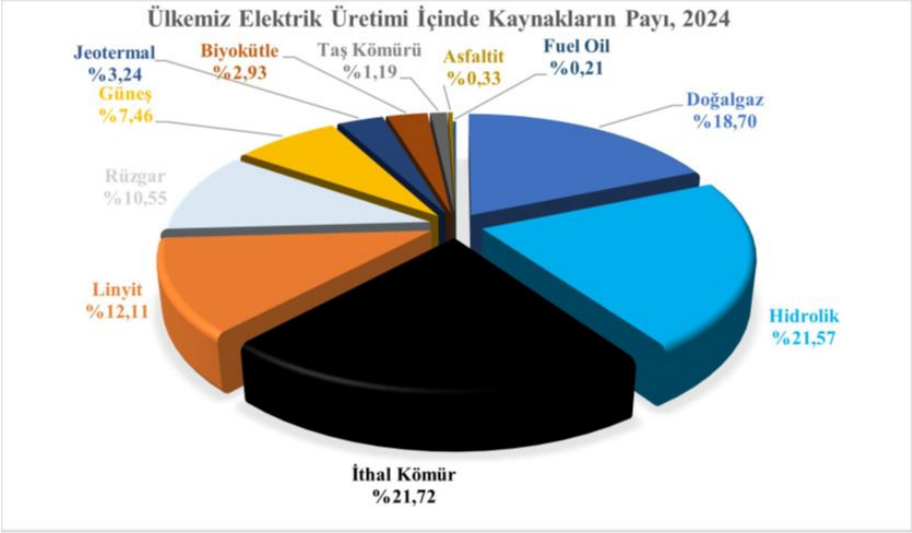
2. TÜRKİYE'DE TERMİK SANTRALLER VE KÖMÜR KULLANIMI

Ülkemizin 16 maden havzasında bulunan kömür rezervleri, termik santral yakıtına uygun sahalardır (Şekil 1).



Şekil 1. Türkiye önemli kömür sahaları ve kullanım alanları (KÖMÜRDER, 2024)

Ülkemizde 2024 yılı; yerli kömüre dayalı (linyit + asfaltit + taşkömürü) santrallerden 47.340,56 GWsa, ithal kömüre dayalı santrallerden ise 75.408,27GWsa olmak üzere, toplam 122.748,83 GWsa elektrik üretilmiştir. Aynı yıl termik santrallerden üretilen elektriğin toplam elektrik üretimi içindeki payı %35,4 olurken, yerli kömürün (linyit + taşkömürü + asfaltit) payı ise %13,6 olmuştur (Şekil 2).

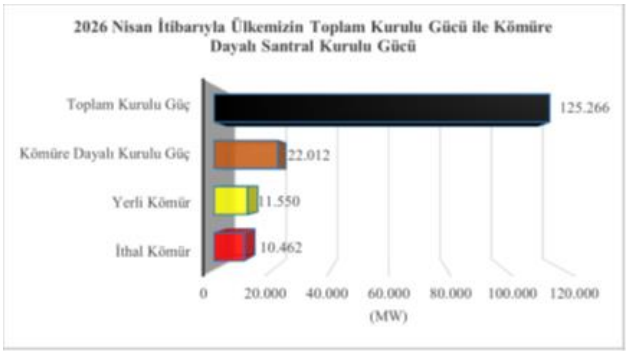


Şekil 2. Türkiye'de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı (ETKB, 2026)

Türkiye'de 2025 yılı 108,65 milyon ton kömür (42,35 milyon ton taşkömürü + 60,64 milyon ton linyit ve asfaltit + 5,66 milyon ton taşkömürü koku) tüketilmiştir. Taşkömürü ve linyit+asfaltit tüketimlerinde en büyük pay, sırasıyla %62,4 ve %80,3'lük oranlarla termik santrallerin olmuştur (Şekil 3). Ülkemizin 2021-2025 yılları arası ortalama kömür tüketimi (taşkömürü, taşkömürü koku, linyit ve asfaltit) yaklaşık 111,4 milyon ton olmuştur.

Nisan 2026 itibarıyla ülkemizde; 1 adet asfaltit, 47 adet linyit, 4 adet taşkömürü ve 16 adet ithal kömürle çalışan, toplam 68 adet termik santral bulunmaktadır. Ülkemizin termik santral kurulu gücü, toplam kurulu gücün %17,6'sına karşılık gelmektedir. Yerli kömüre dayalı kurulu gücün toplam kurulu güce oranı ise %9,2'dir (Şekil 4).

Şekil 3. Kömür tüketiminin sektörlere göre dağılımı



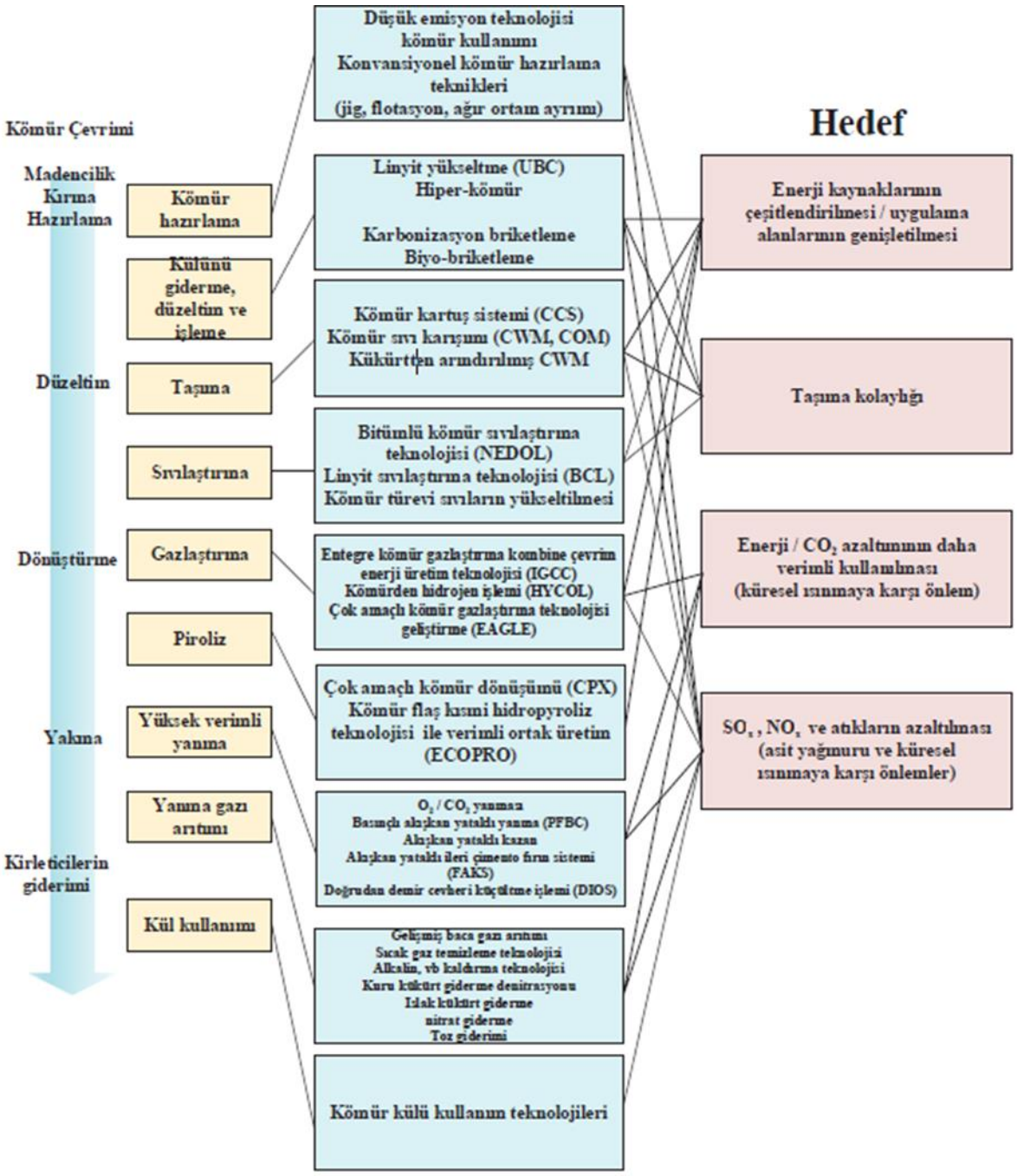
Şekil 4. Toplam kurulu güç ve termik güç dağılımı (ETKB, 2026)

Ülkemizdeki mevcut kamu ve özel sektör marifetiyle işletilen termik santrallerin durumu incelendiğinde, yaklaşık 22.000 MW kurulu güç kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bu kurulu gücün 700 MW'lık kısmının 2042 yılına kadar ekonomik ömrünü tamamlayarak, sistem dışı kalacağı hesaplanmaktadır (KÖMÜRDER, 2024). Ülkemiz enerji talebinde bir artış olmayacağı varsayılsa bile, kurulu gücün yerine yeni baz yük ihtiyacı olacağı ve bu baz yükün kömürden sağlanacağı planlandığında, modern termik santrallerin kurulması veya revizyonu önem arz etmektedir.

3. TEMİZ KÖMÜR VE YAKMA TEKNOLOJİLERİ

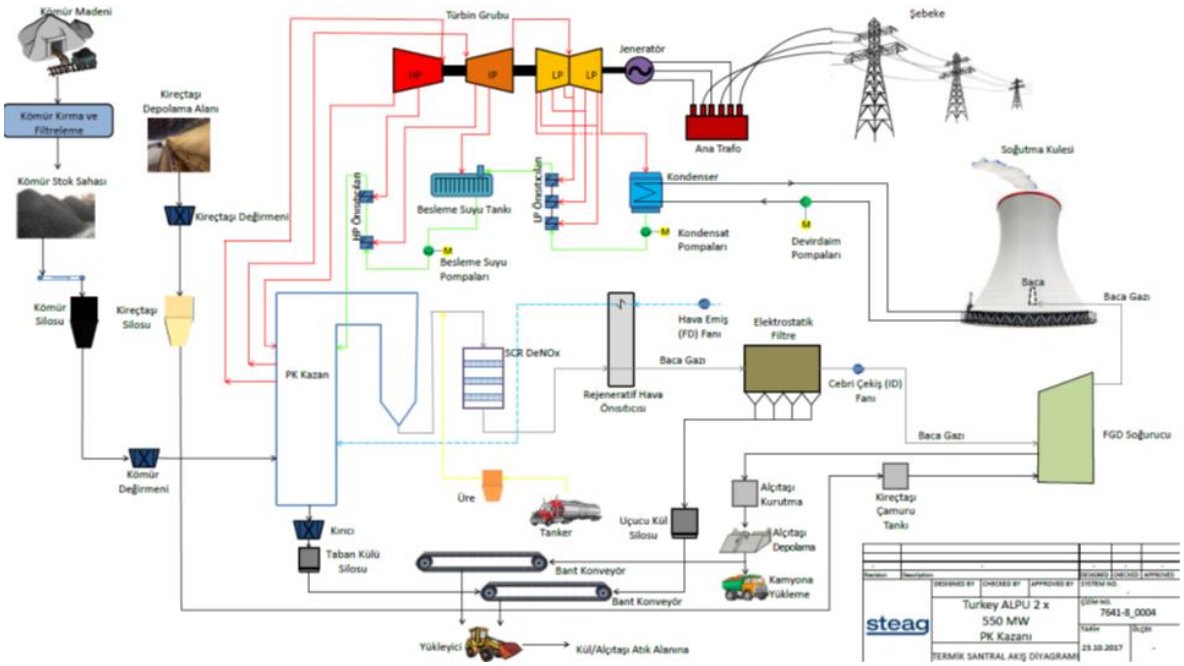
Temiz kömür teknolojileri ile kömür kullanımından kaynaklanan emisyonları ve atıkları azaltıp, birim ton başına elde edilecek enerji miktarını artırmak, diğer bir ifadeyle daha az kömür kullanarak daha çok enerji üretmektir. Asıl hedef, kömürü sıfıra yakın emisyonlar ile kullanabilmektir (Aslan, 1996; Arslan, 2016; Delibalta, 2025). Başta sera gazı emisyonlarından CO_2 ve çevre korumada önemli olan SO_2, NO_x ve partikül madde (PM) gibi emisyonları minimize etmektir. Geliştirilmekte olan bu teknolojileri dört ana grupta toplamak mümkündür:

1. Kömür Hazırlama/İyileştirme Teknolojileri (kırma/ öğütme/ eleme/ boyutlandırma/ yıkama/ kurutma/ briketleme vb.): Bu teknolojiler ile kömürün bünyesindeki kükürt miktarını, inorganik maddelerden oluşan kül miktarını azaltmak, böylece kirlilik yaratan ve yanmayan inorganik maddeleri azaltarak kömürün kalitesini artırmak ve çevresel etkisini minimize etmektedir (Şekil 5). Kömürdeki pasa miktarı azaldığı için, nakliye masrafları da düşmektedir.



Şekil 5. Temiz kömür teknolojisi sistemleri (Dinçer, 2018)

2. Santrallerde Verimlilik İyileştirmesi ve Emisyon Kontrol Teknolojileri: Yüksek Verimlilik Düşük Emisyonlu (HELE) Teknolojiler olarak tanımlanan bu teknolojilerde %1,5 verimlilik iyileştirmesi ile %3 ~ %5 CO_2 emisyonlarında azalma, daha iyi çevre koruma ve ekonomik kazanç sağlamak mümkündür (Şekli 6). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre; dünya genelinde santral verimlilik ortalamasının %33 olduğu, bu oranın %40'a çıkarılması durumda yılda 2 Gt emisyon azaltmak mümkün olduğu belirtilmektedir. Ayrıca; sera gazı olmayan emisyonlardan SO_2'yi Baca Gazı Arıtma (BGA) sistemleri ile %90-97; NOx'u muhtelif NOx giderme teknolojileri ile (düşük NOx yakıcılar (%30), SCR, SNCR (%90)), PM'yi Elektrostatik Presipitatör (ESP) teknolojileri ile %99'lara varan yüksek verimlilikle tutmak mümkündür.



Şekil 6. Termik santral örnek akış şeması (Aytaç, 2018)

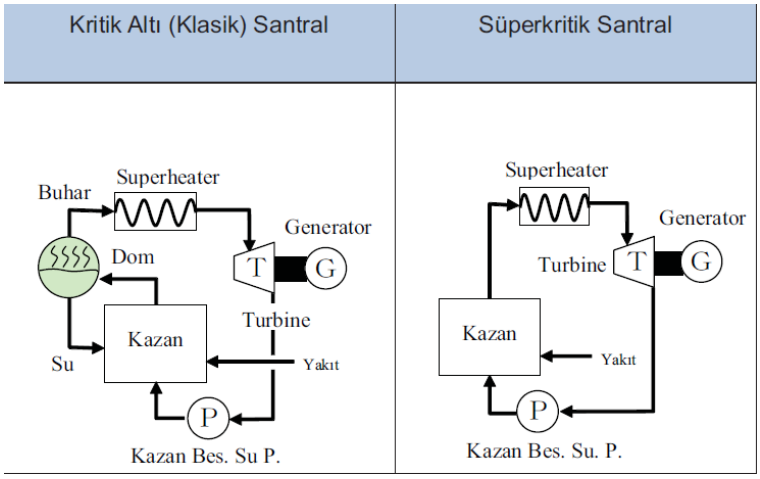
3. Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim Teknolojileri (IGCC) gibi İleri Teknolojiler: Kömür gazlaştırma ve üretilen sentez gazından elektrik üretimi teknolojisi olan IGCC; elektrik dönüşüm veriminin konvansiyonel santrallere göre çok daha yüksek olması, yanma öncesi kirleticileri önleme teknolojisine sahip olmaları, daha düşük emisyon yaymaları, daha az su kullanıp daha az katı atık üretmeleri, girdi ve ürün esnekliğine sahip olması (sentez gazından sadece elektrik değil ulaşımda kullanılan sıvı yakıt, hidrojen ve çeşitli kimyasalların üretilebilmesine olanak sağlaması) gibi avantajlara sahiptir.

4. Karbondioksit Tutma, Kullanma ve Depolama Teknolojileri (CCS/CCUS): İklim değişikliği ile mücadelede, özellikle Paris Anlaşması hedeflerine ulaşmada, sıfıra yakın CO_2 emisyonuna olanak vermesi yönüyle, kömürün geleceğinde önemli yeri olan ve üzerinde en çok araştırma yapılan teknolojilerdir.

Ülkemizin temiz kömür teknolojileri kullanım düzeyine bakacak olursak; kömür hazırlama/iyileştirme teknolojileri yönünden dünya uygulamaları ile ülkemizin genel olarak aynı seviyede olduğu söylenebilir, ancak bu teknolojilerden ticari ölçekte linyit kurutma tesisimiz bulunmamaktadır. Sadece pilot ölçekli linyit kurutma tesisi imal edilip, Elbistan A Termik Santrali'nde test edilmiştir. Bu tesis ile kömürdeki nemin %10 azaltılabildiği, kalorifik değerinin de %30 artırılabildiği ortaya konulmuştur.

Santrallerde verimlilik iyileştirmesi ve emisyon kontrol teknolojileri; dünya genelinde 670'den fazla HELE teknolojisine sahip santral mevcuttur. Bu santraller kazan basıncı ve sıcaklığına göre üç kategoride sınıflandırılmakta olup, süperkritik kazanlar %38-%42, ultra-süperkritik kazanlar %42-%45; ileri ultra-superkritik kazanlar ise %45-%52 verimliliğe sahiptirler. Ülkemizde bulunan 100 MW'ın üstü toplam 17 GW kapasiteli

kömüre dayalı santralin; %28-%39 verimlilikle 9,5 GW'ı sub-kritik, %41-%42 verimlilikle 5,4 GW'ı süperkritik, %35-%41 verimlilikle 2,1 GW'ı Pülverize Kömür (PC) ve Dolaşımlı Akışkan Yatak (CFB) teknolojisine sahiptirler. İthal kömüre dayalı iki adet ultra-süperkritik teknolojiye sahip santral Çanakkale'de faaliyettedir (Şekil 7).



Şekil 7. Klasik ve süperkritik santral çalışma prensipleri (DEK-TMK, 2010)

Çizelge 1. Sub-kritik ve süperkritik kazan kıyaslaması (DEK-TMK, 2010)

Özellikler	**Sub-kritik (klasik) Kazan**	**Süperkritik Kazan**
Konfigürasyon	• Dom	• Tek geçişli • Start sistemi gerekli
Kullanılan malzeme	• Çoğunluk karbon çelik	• Yüksek alaşımlı özel çelik
Besleme	• Dom blöfü	• Kondanse arıtma • Besleme suyu kalitesini izleyen özel kontrol sistemi
Kontrol	• OBK (Otomatik Kazan Kontrol)	• OSK (Otomatik Santral Kontrol)
Yapım maliyeti	• Baz	• Yaklaşık 110% daha fazla

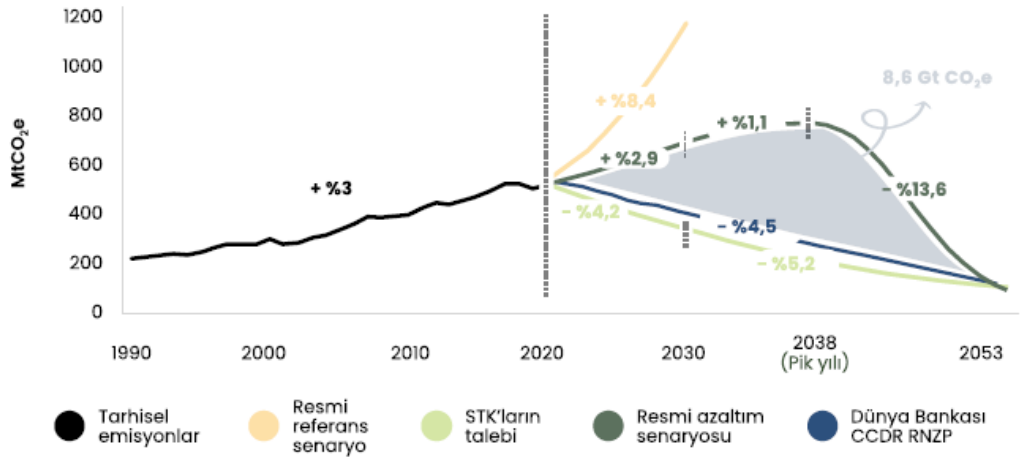
Entegre gazlaştırma kombine çevrim teknolojileri (IGCC) gibi ileri teknolojiler; 1990'lı yıllardan günümüze kadar önce ABD ve Avrupa'da devamında Japonya ve Çin'de ticari ölçekte demonstrasyon tesisler kurulmuştur. Ülkemizde ise hâlihazırda kömürün gazlaştırılması ile ilgili pilot ölçekli projeler mevcuttur.

Karbondioksit tutma, kullanma ve depolama teknolojileri (CCS/CCUS); dünya genelinde, 5'i yapım aşamasında, 17'si tamamlanmış olmak üzere 22 büyük ölçekli CCS projesi mevcuttur. Teknolojisi ispatlanmış ve test edilmiş olmakla birlikte, halen pahalı bir teknolojidir. Maliyeti ve ticari riskleri azaltmaya yönelik üzerinde yoğun Ar-Ge çalışmaları yürütülmektedir. Ülkemizde kömürün gazlaştırılması ile ilgili pilot projelerde CO_2 tutma teknolojisi üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ODTÜ PAM tarafından yürütülen "Türkiye'de termik santrallerden ve sanayi tesislerinden gelen CO_2 emisyonu envanterinin çıkarılması ve CO_2'nun yeraltı jeolojik ortamlarda depolanması potansiyelinin araştırılması" konulu bir TÜBİTAK KAMAG projesi tamamlanmıştır.

Ayrıca; mevcut termik santrallerde eskime, yıpranma, metal yorgunluğu vb. nedenlerle santral verimliliği, emre amadelik, güvenilirlik düşmekte, çevresel performansı da azalmaktadır. Bu nedenle; rehabilitasyon olarak tanımlanan yenileme ve iyileştirme faaliyetleri yapılarak, bir yandan verimlilik/güvenirlik artırılırken, diğer yandan çevresel performans artırılmakta, santralın ömrü de uzatılmaktadır.

4. KÖMÜR SEKTÖRÜNDE AKTÜEL GELİŞMELER

Türkiye Nisan 2023'te UNFCCC Sekreteryası'na sunduğu emisyon patikası ve net-sıfır hedefi, bu hususta bize genel bir bilgi vermektedir. 2030 yılı için emisyon azaltım hedefini mevcut senaryoya kıyasla %21'den %41'e çıkarmayı amaçlayan Türkiye, 2038 yılına kadar emisyonlarını zirveye ulaştıracağını beyan etmektedir. 2038'deki zirve noktasından 2053'e kadar net sıfır hedefine ulaşmak için, takip eden 15 yıl boyunca yıllık ortalama %13 civarında bir azaltım gerekmektedir (Şekil 8). Dolayısıyla, güncel ulusal katkı beyanı ile 2053 yılı net sıfır hedefinin uygulanabilirliği tartışma konusu hâline gelmektedir.



Şekil 8. Türkiye'nin emisyon senaryosu yıllık değişimleri (SEFiA, 2024)

Türkiye'nin kömür kullanım planları, enerji sektörlerini karbonsuzlaştırma ve gerekliliğini kabul eden çoğu OECD/AB ülkesinin kömürden çıkış politikalarıyla ters düşmektedir. 2019'dan bu yana Türkiye haricinde hiçbir OECD ülkesi yeni bir kömür santrali kurulumu gerçekleştirmemiştir. Sadece dört ülkede yeni kömür projeleri bulunmaktadır. Japonya ve Avustralya'nın her biri tek bir nihai kömürlü termik santral düşünürken, ABD'de son iki adet termik santral inşaat aşamasında bulunmaktadır (Şekil 9). Türkiye ise 5 GW'lık aktif yatırım planı ile blokta planlanan yeni kömürlü termik santral kapasitesinin neredeyse %75'ini oluşturmaktadır. Bu ülkeler arasında hızlı bir karşılaştırma yapıldığında, Türkiye'nin kendine özgü konumu ortaya çıkmaktadır.

Şekil 9. Ülkelerin kömürden çıkış taahhütleri (SEFiA, 2024)

Türkiye'de temiz kömür yatırımları; enerji arz güvenliğini artırmak ve ithalata bağımlılığı azaltmak argümanları çerçevesinde sürekli desteklenmektedir. Buna karşılık, "kömür yılı" olarak ilan edilen 2012'yi de içine alan dönemde (2010-2022) 142 termik santral projesi (87.853 MW) iptal edilmiş ve yerli değil, ithal kömüre dayalı termik santral kapasitesi artırılmıştır. 2022 yılında gerek Türkiye'nin kömür ithalatındaki artış gerekse Rusya'nın Ukrayna'yı işgali nedeniyle ortaya çıkan enerji krizinin yükselttiği emtia fiyatları nedeniyle kömür ithalatı tutarı, toplam enerji ithalatı tutarının %10'una denk gelen 8,8 milyar $'a yükselmiştir. Bu toplam içerisinde 5,3 milyar $ tutar elektrik üretimi amaçlı kömür ithalatından kaynaklanmaktadır. Bu durum, fosil yakıt bağımlı bir enerji altyapısının doğurabileceği ekonomik ve jeopolitik risklere önemli bir örnek olarak gösterilebilir.

5. SONUÇLAR

Dünyada sınırlı miktarda enerji kaynakları mevcuttur. Bu nedenle, elektrik enerjisi üretirken, iletirken (taşırken) ve tüketirken her aşamada verimliliğe ve tasarrufa azami özen gösterilmelidir. Ülkemizin 2032 yılı elektrik enerjisi talebinin düşük senaryoya göre ortalama %2,7 artış ile 400.349 GWh'a, baz senaryoya göre %3,3 artış ile 450.754 GWh'a ve yüksek senaryoya göre %3,8 artış ile 493.720 GWh'a ulaşması beklenmektedir. Türkiye; ancak kendi öz kaynaklarına dayalı modern termik santraller ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla, enerji arz güvenliği ve taahhüt etmiş olduğu 2053 yılı net sıfır emisyon hedeflerine ulaşabilir.

Günümüz termik santrallerinde yaygın olarak kullanılan yöntem, besleme suyunun ısıtılması, buharın kızdırılması (superheating) ve tekrar kızdırılması (reheating) esaslarına dayanan Rejeneratif Rankine çevrimidir. Geçtiğimiz 20 yıllık dönemde, taşkömürü yakıtlı termik santrallerde verim %38'den %46'ya yükselmiştir. Buna karşılık; alt ısıl değerleri düşük, kül muhtevası yüksek linyit kullanan termik santrallerde verim, taşkömürüne kıyasla ortalama %3 daha düşüktür.

Düşük kaliteli kömürlerden enerji üretimi için, Pülverize Kömür (PC) ve Dolaşımlı Akışkan Yataklı (CFB) teknolojiler kullanılmaktadır. PC prosesi, dünyada büyük ölçekli enerji santrallerinde en fazla kullanılan kömür yakma teknolojisidir. Bu proseste kömür ince toz haline getirilmekte ve içinde yakıldığı kazanın yanma odasına gönderilmektedir. PC teknolojisi yüksek verim sağlarken, iyi bir emre amadelikte sunmaktadır. CFB teknolojisi ise PC'ye göre daha fazla yakıt esnekliği sunmakta ve kazan çıkışında normalden daha az baca gazı desülfürizasyonu gerektirmektedir. Bununla birlikte, PC teknolojisi daha esnek bir işletme imkânı sunduğundan, büyük ünite güçlerinde yüksek çevrim verimi ile dizayn edilen kömürleri yakabilmektedir. Bu durum, MWh başına daha düşük yatırım ve işletme maliyeti sağlamaktadır. CFB prosesi farklı özellikler taşımakla birlikte, kapasite ve tedarikçi sayısında kısıtlamalar ile karşılaşılmaktadır. PC teknolojisinde herhangi bir kapasite kısıtlaması bulunmamaktadır. Ayrıca; kömür bileşimindeki değişim santralde güç düşümüne, çabuk eskimeye ve zararlı çevresel etkilere sebebiyet vereceği için, termik santral tasarımı mutlaka kullanılacak kömür özelliklerine göre yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Aktan, M. 2026. Yerli Kömür İçin Yol Haritası Önerisi, (https://www.enerjigunlugu.net/), (Erişim tarihi: 22 Haziran 2026).

Arslan, F. 2016. Kömür Yakıtlı Enerji Santrallerinde Birim Elektrik Enerjisi Üretim Maliyeti, Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 676, s. 49-55.

Aslan, H. 1996. Kömüre Dayalı Termik Elektrik Santrallarında Verim ve Kapasite Kullanım Oranı Düşüklüğünün Nedenleri ve Bunların Yükseltilmeleri İçin Alınması Gerekli Tedbirler, TMMOB 1. Enerji Sempozyumu-12-14 Kasım 1996, Ankara (Türkiye), 143-159.

Aytaç, O. 2018. Kömür Yakan Santrallerin Çalışma Prensibi ve Çevresel Etkileri, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Enerji Çalışma Grubu, Ankara, 44.

DEK-TMK, 2010. Temiz Kömür Teknolojileri, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi (DEK-TMK), ISBN: 978-605-89548-4-7, Yayın No: 0015/2010, Ankara, 154.

Delibalta, M.S. 2025. Bubbling fluidized bed and oven drying for Turkish coal: a comparative study, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 45:2, 296-310.

Delibalta, M.S. 2024. Türkiye kömür rezervlerinin rasyonel değerlendirilmesi ve ekonomik önemi, NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 13(2), 745-749.

Delibalta, M.S. ve Toraman, Ö.Y. 2013. Çevreye Duyarlı Modern Termik Santraller, Madencilik Türkiye, ISSN:1309-1670, Yıl 4, Sayı 31, s.74-81.

Dinçer, İ. 2018. TÜBA-Temiz Kömür Teknolojileri Raporu, Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No: 25, ISBN: 978-9944-252-90-4, Ankara, 48.

ETKB, 2026. Kömür, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), (https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabiikaynaklar-komur), (Erişim tarihi: 18 Haziran 2026).

KÖMÜRDER, 2024. Enerjideki Kömürün Yeri ve Yerli Kömüre Dayalı Termik Santral Kurulması Projesi Süreç ve Model Önerisi, Türkiye Kömür Üreticileri Derneği (KÖMÜRDER), Ankara, 78.

MadenMO, 2025. Kömür ve Enerji Raporu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, ISBN: 978-605-01-1742-4, Ankara, 70.

SEFiA, 2024. Kömürden Çıkışın Finansmanı: Türkiye Örneği, Sürdürülebilir Ekonomi ve Finans Araştırmaları Derneği (SEFiA), www.sefia.org, 67.

Yetiş, Ü. 2016. Sektörel Atık Kılavuzları-Termik Santraller, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, ODTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü, Ankara, 82.

YUMUŞAK LİNYİTLERİNİN AÇIK ATMOSFER KOŞULLARINDA NEM ALMA/ATMA DAVRANIŞI

MOISTURE ABSORPTION/REMOVAL BEHAVIOR OF SOFT LIGNITES UNDER OPEN ATMOSPHERE CONDITIONS

Taki Güler,* Ercan Polat
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Menteşe, Muğla

Rıdvan Edip Akdeniz, İlker Özer, Selda Ceylan
Yatağan Termik Enerji, Yatağan, Muğla

ÖZET Yüksek nem ve düşük kalori değerli yumuşak linyitlerin enerji hammaddesi olarak kullanımı, düşük enerji verimliliği nedeniyle sınırlıdır. Kurutma maliyeti nedeniyle, bu tür kömürlerin açık atmosfer koşullarında nem alma/atma davranışının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında, Çankırı bölgesinden alınan yumuşak linyitlerin nem alma/atma davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Karakterizasyon testleri, linyit örneğinin yaklaşık %51 nem içerdiğini, ana kül yapıcı bileşenlerinin kuvars ve kil mineralleri olduğunu ve kuru bazda kül içeriğinin yaklaşık %41 olduğunu ortaya koymuştur. Kömür örneklerinin açık atmosfer koşullarında yüzey neminin giderilmesinin en az 12-13 gün sürdüğü gözlenmiştir. Kurutma işlemi sırasında bünye neminin kendiliğinden giderilemediği ve kurutma ortamındaki bağıl nemin kurutulmuş ürünün ağırlığında ihmal edilebilir değişikliğe neden olduğu belirlenmiştir. Fırında kurutmayla yüzey ve bünye nemi giderilen linyit örneklerinin, açık atmosfer koşullarında 3-4 gün içinde yaklaşık %10 nem alarak denge ağırlığa ulaştığı gözlenmiştir. Kurutulmuş kömürün orijinal değerine kıyasla daha düşük nem alma oranı, kurutma işlemi sırasında mezogözenek yapısındaki değişikliklerle açıklanmıştır.

ABSTRACT The use of soft lignites with high moisture content and low calorific value as energy raw materials is limited due to low energy efficiency. Because of drying cost, determining the moisture absorption/removal behavior of such coals under open atmosphere conditions is of great importance. In this study, the moisture absorption/removal behavior of soft lignites from Çankırı region was experimentally investigated. Characterization tests revealed that lignite sample contained approximately 51% moisture, its main ash-forming components were quartz and clay minerals, and its ash content on dry basis was approximately 41%. Removal of surface moisture from the coal samples under open atmosphere conditions was observed to take at least 12-13 days. Body moisture was determined not to be removed spontaneously during drying process, and relative humidity in drying environment caused negligible change in the weight of dried product. Lignite samples from which surface and body moisture were removed by oven-drying were observed to reach equilibrium weight by absorbing approximately 10% moisture within 3-4 days under open atmosphere conditions. The lower moisture absorption rate of dried coal compared to its original value was explained by changes in the mesopore structure during drying process.

1. GİRİŞ

Linyitler; genellikle termik santrallerde yakıt olarak kullanılan, nispeten düşük kalorifik değerli ve yüksek nem içeriğine sahip fosil yakıtlardır (Lei vd., 2025; Yu vd., 2013). Oluşumuna bağlı olarak yüksek oranda alifatik C−H bağları içerir, hidrojen ve oksijen içeriği düşüktür ve nem içeriği %70'e kadar çıkabilir (Hassid vd., 2022; Kemal ve Arslan, 2014). Linyitler; düşük kalorifik değerlerine rağmen dünya genelinde büyük rezervlere sahip olması ve düşük üretim maliyeti nedeniyle küresel enerji arzında büyük öneme sahiptir (Hassid vd., 2022; Lei vd., 2025).

Jeolojik oluşumu, fiziksel dayanıklılığı ve nem içeriğine göre linyitler, yumuşak ve sert linyitler olarak sınıflandırılır (Kemal ve Arslan, 2014; Miao vd., 2017). Yumuşak linyitlerin yüksek nem içeriği (> %40); termik santrallerde enerji üretiminde düşük verimliliğe neden olmaktadır. Kömür ocağı ile termik santral arasındaki mesafenin yüksek olması durumunda ise yüksek nakliye maliyetleri, düşük kalorili yumuşak linyitlerin termik santrallerde enerji üretiminde değerlendirilmesi konusunda büyük bir engel oluşturmaktadır. Yumuşak linyitlerin yüksek nem içeriğinden dolayı olumsuz etkilenen yanma davranışı da bu rezervlerin termik santrallerde enerji üretiminde değerlendirilmesinde kaygılara neden olmaktadır. Tahmasebi vd. (2016), linyitlerin nem içeriğindeki artışın tutuşmayı önemli ölçüde geciktirdiğini ortaya koymuştur. Yu vd. (2013) kömür yakma sürecinde açığa çıkan ısının %25'e kadar çıkabilen kısmının kömür bünyesinde bulunan suyun uzaklaştırılmasında harcandığını belirtmiş ve enerji verimliliğinin olumsuz etkilendiğini vurgulamışlardır. Bu nedenle enerji üretim süreci öncesi kurutma uygulanması enerji verimliliği açısından çözüm olarak kabul görmeye başalmıştır. Kurutma işleminin; toplam CO_2 emisyonunda %13'e kadar azalma ve enerji üretim maliyetinde dikkate değer düşüşe (2,7 €/MWh) olanak sağladığı yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur (Agraniotis vd., 2012; Cheng vd., 2023; Rakopoulos vd., 2017).

Çankırı bölgesinde büyük hacimlerde yumuşak linyit rezervi vardır. Fakat yüksek nem içerikleri ve düşük kalorili oluşu ve yakın bölgede termik santral olmaması, bu linyit rezervlerinin enerji üretiminde kullanılmasına olanak vermemektedir. Bu nedenle bölgenin linyit zenginliklerinin özellikle enerji üretiminde değerlendirilebilmesi için kurutma uygulanması bir gereklilik olarak öngörülmektedir. Kurutma işlemi; nemin uzaklaştırılması ile nakledilmesi gereken miktarda önemli oranda azalmaya neden olacağı için kuru ürünün yakın bir termik santrale naklinde ekonomik avantaj sağlayacaktır (Cheng vd., 2023). Ayrıca nemin uzaklaştırılması ile kömür kalorifik değeri yükselecek (Lei vd., 2025; Yu vd., 2013) ve yanma davranışı iyileşecektir (Hassid vd., 2022; Tahmasebi vd., 2016). Dolayısıyla kurutulmuş yumuşak linyitler, enerji üretiminde büyük önemli kazanacaklardır. Fakat kurutma maliyeti de yumuşak linyitlerin değerlendirilmesinde sorun olarak dikkat çekmektedir (Pawlak–Kruczek vd., 2019). Bu nedenle ilgili bölgenin yumuşak linyitlerinin açık atmosfer koşullarında nem atma davranışının belirlenmesi, enerji verimliliği ve süreç maliyeti açısından önem arz etmektedir. Ayrıca kurutulmuş ürünün termik santrale transferi belirli bir süre alacağı için bu süreçte kurutulmuş ürün atmosferik nemden de etkilenecektir (Dong

vd., 2021; Lei vd., 2025; Yang vd., 2013). Bu tespitler çerçevesinde ilgili bölgenin yumuşak linyitlerinin açık atmosfer koşullarında nem atma (kuruma) davranışı ve kurutulmuş ürünün nem alma davranışı, bu çalışma kapsamında deneysel olarak araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Kömür örneği, ÇATES Elektrik Üretim A.Ş. firmasına ait Çankırı ili sınırlarındaki bir linyit kömürü ocağından temin edilmiştir. Yaklaşık 7 m kalınlığındaki kömür damarının yaklaşık 100 m mesafedeki iki farklı noktasından yığını temsil edecek şekilde iş makinesi yardımı ile atmosfere maruz kalmış yüzey temizlendikten sonra kömür damarından deney örneği alınmıştır. Kömür örneği nem kaybını önlemek amacıyla yerinde paketlenerek atmosferik etkilerden yalıtılmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere temsili örnek hazırlamak amacıyla konileme-dörtleme yöntemi uygulanmıştır. Kömür örneği tane boyut dağılımı kuru eleme ile belirlenmiştir. Temsili kömür örneğinin nem içeriğini belirlemek amacıyla 105 °C'de 24 saat süre ile etüvde kurutma yapılmış. Kuru ürün nem alma davranışını belirlemek ve deneysel çalışma kapsamında ihtiyaç duyulan tüm termal kurutma işlemlerinde aynı kurutma süreci uygulanmıştır. Deney örneğinin kimyasal bileşimi XRF analizi ile mineralojik bileşimi ise XRD analizleri ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda hazırlanan örneklerin kısa kömür analizleri (kül, uçucu madde, toplam kükürt, hidrojen, kalorifik değer analizleri) Yatağan Termik Enerji laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

3. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

3.1. Kömür Örneği Karakterizasyonu

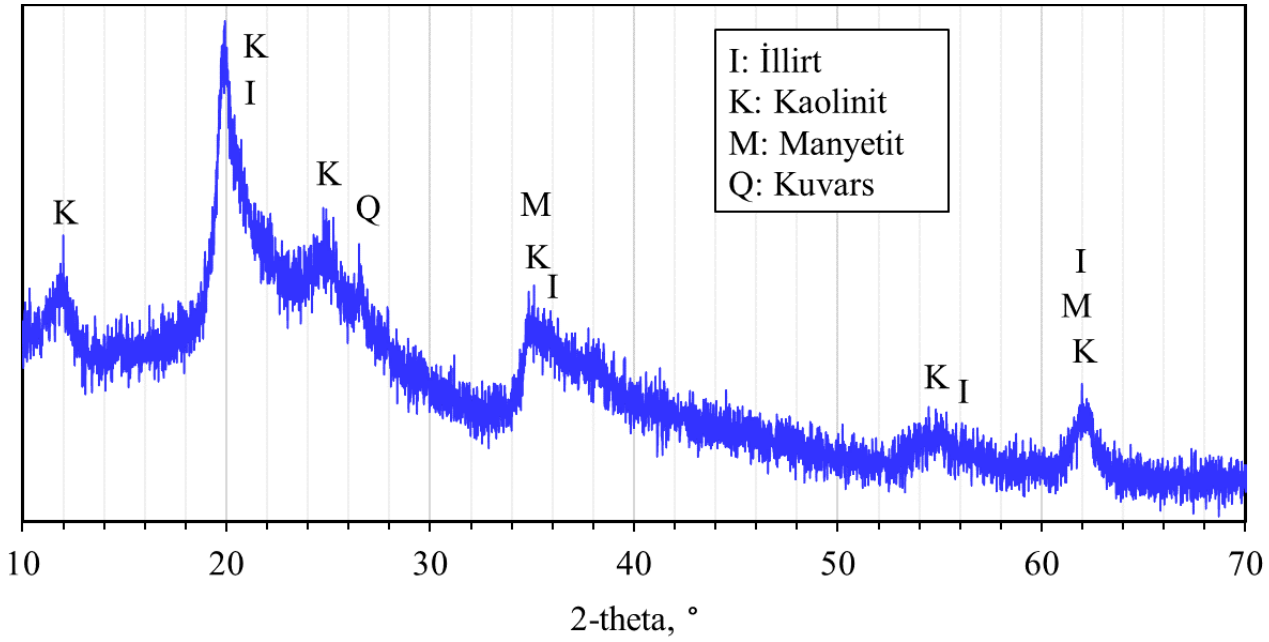
Kömür, oluşumu gereği homojen bir kimyasal bileşime sahip değildir (Kemal ve Arslan, 2014). Bununla birlikte çalışılan kömür örneğinin kül yapıcı bileşenleri hakkında genel bilgi vermesi amacıyla XRF yöntemiyle kimyasal analizi yapılmıştır. Elde edilen analiz verileri kül yapıcı bileşenlerin ağırlıklı olarak alümina-silika kökenli olduğunu göstermiştir (Çizelge 1). Deney örneğinin dikkate değer oranda CaO ve Fe_2O_3 içerdiği tespit edilmiştir. Tortul organik bir kayaç olan kömürün oluşum koşulları nedeniyle analizi yapılan örnek, Çizelge 1'de görüleceği gibi eser miktarda farklı element ve oksitleri de içermektedir.

XRD yöntemi ile yapılan mineralojik karakterizasyon çalışması, kömür yapısında bulunan ana kristalin fazların kaolinit ($Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$), illit ($(K,Na)_{0.95}(Al_{1.81}Fe0.01Mg0.19)(Si_{3.35}Al_{0.75})O_{10}(OH)_2$) ve kuvars ($SiO_2$) olduğunu göstermiştir (Şekil 1). XRD deseninde özellikle düşük 2θ değerlerinde (10-30° 2θ) oluşan pik yapısı amorf fazların varlığına işaret etmektedir. Çizelge 1'de verilen kimyasal analiz sonuçları dikkate alındığında, kömür yapısında en çok bulunan oksitlerden biri olan CaO'in varlığı kalsit ve/veya jips ile açıklanabilir. Fakat yaygın

amorf pik yansımaları nedeniyle XRD deseninde kalsit ve jips yansımaları tespit edilememiştir. XRD ve XRF bulgularının birlikte değerlendirildiğinde, deney örneğinde düşük oranda bulunması muhtemel farklı kil minerallerinin bileşiminde Ca olabileceği ve kömür örneğinin ihmal edilebilir oranda kalsit ve jips içerebileceği sonucuna ulaşılmıştır. XRD deseninde kaolinit ve illite atfedilen ve yaklaşık 35° ve 62° 2θ değerlerinde oluşan pikler, manyetit (Fe_3O_4) pikleri ile çakışmaktadır. Bu nedenle manyetit varlığını tespit etmek amacıyla kömür örneği üzerinde manyetik ayırma ile zenginleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, kömür örneğinin en az %1 oranında manyetit içerebileceğini göstermiştir.

Çizelge 1. Kömür örneği kimyasal bileşimi

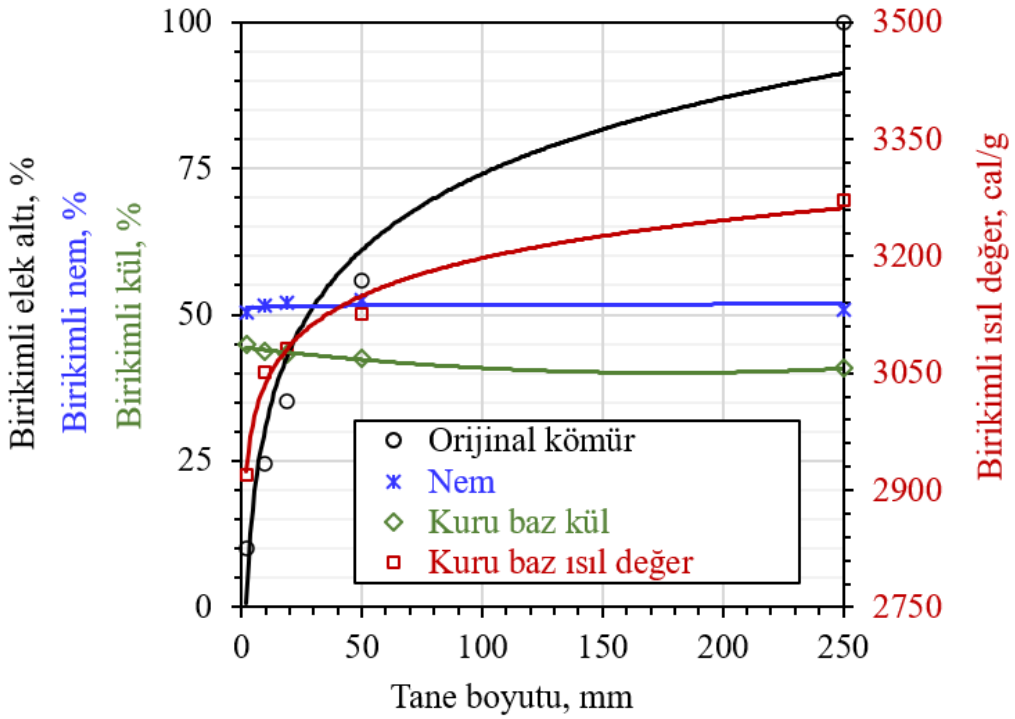
	Bileşen, %									
	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	CO_2
İçerik	0,640	10,019	19,414	0,165	3,006	0,247	2,971	0,469	2,951	60,000
	Bileşen, g/ton									
	Cl	V_2O_5	Cr_2O_3	MnO	NiO	CuO	ZnO	SrO	ZrO_2	Eu_2O_3
İçerik	118	238	97	138	86	44	81	170	119	97



Şekil 1. Kömür örneği XRD deseni

Laboratuvar ortamında kömür örneğinin elek analizi yapılmış, deney örneğinin tamamının -250 mm boyutunda olduğu, yaklaşık %56'sının -50 mm boyutunda olduğu belirlenmiştir (Şekil 2). Etüvde 105 °C'de 24 saat süreyle gerçekleştirilen kurutma işlemi sonrası kömür örneğinin nem içeriğinin %50,93 olduğu hesaplanmıştır. Bu nem içeriği kömür örneğinin yumuşak linyitler sınıfında olduğunu göstermektedir. Nem içeriği, farklı boyut fraksiyonlarında, yakın değerler vermekle birlikte iri ve ince boyutlarda hafif düşmüştür. Buna karşın kömür örneği tane boyutuna bağlı olarak kül içeriği ve özellikle kalorifik değerinde değişim tespit edilmiştir. Kül içeriği yaklaşık

%41 olan deney örneğinin, ince boyutlara gidildikçe birikimli kül içeriği hafif artarak %45'e çıkmıştır. Orijinal deney örneğinin alt ısıl değeri 1261 cal/g, kuru bazda ise 3195 cal/g olarak belirlenmiştir. İri boyutlarda 3400 cal/g üzerine çıkan birikimli alt ısıl değer, ince boyutlara doğru dikkate değer oranda düşmüştür.



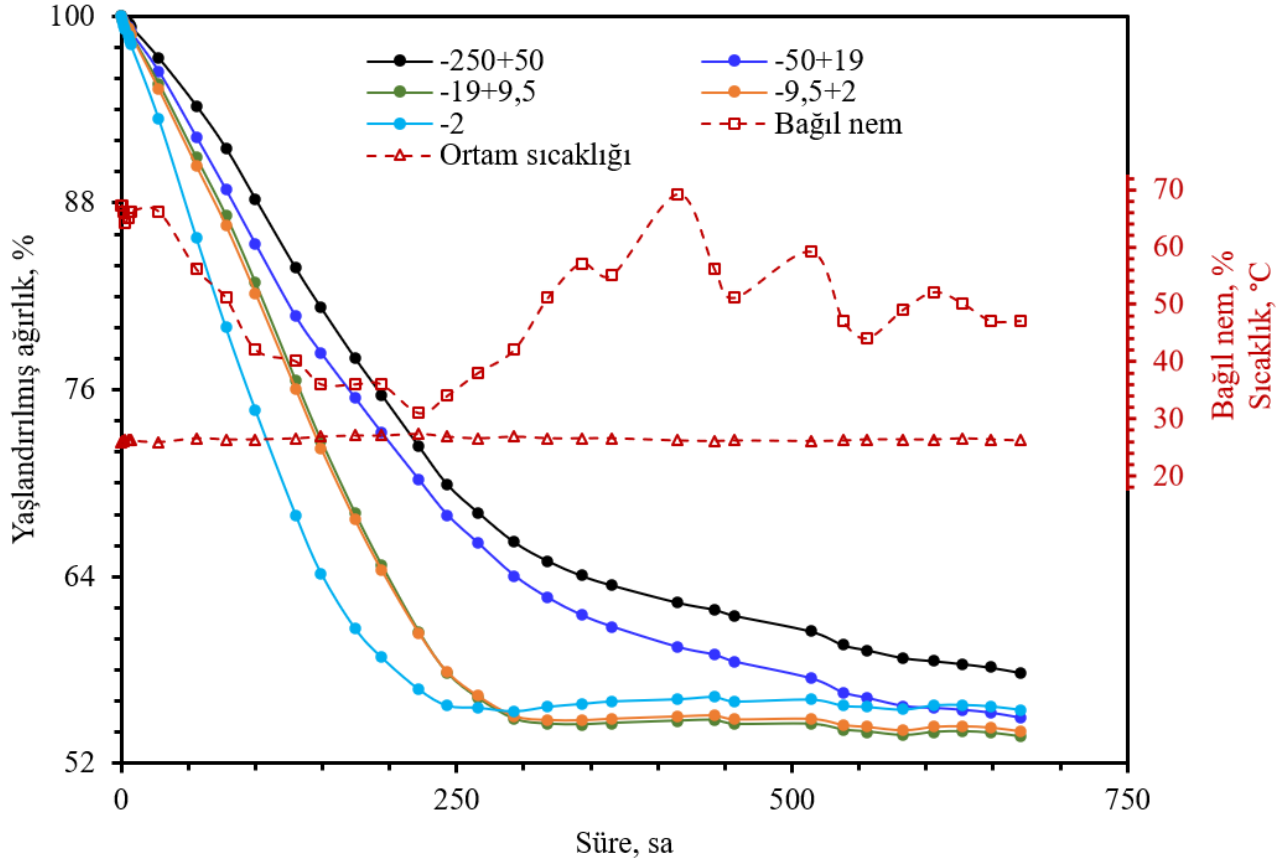
Şekil 2. Deney örneğinin tane boyutuna göre birikimli elek altı, orijinal nem, kül ve alt ısıl değeri

3.2. Orijinal Kömürün Nem Atma Davranışı

Kömür nemi, genel hatlarıyla yüzey ve bünye nemi olarak sınıflandırılır (Kemal ve Arslan, 2014; Wood vd., 1983; Xian vd., 2022). Açık atmosfer koşullarında kurumaya bırakılan kömürün, zamanla yüzey nemini bırakması beklenir. Bünye neminin uzaklaştırılması için ise termal kurutma uygulanması gerekir. Bünye nemi olarak tanımlanan ve kömür yapısında kalan kısım, iç ve yüzey absorpsiyonu ile kapiller boşlukları dolduran, termal kurutma uygulanmadan uzaklaştırılması güç olan higroskopik nemi oluşturmaktadır (Kemal ve Arslan, 2014).

Orijinal kömür örneğinin açık atmosfer koşullarında nem atma (kuruma) davranışını belirlemek amacıyla deney örneği, laboratuvar ortamında eleme ile farklı boyut aralıklarında sınıflandırılmıştır. Hazırlanan örnekler, bir ay süreyle laboratuvarda açık ortamda bekletilmiş ve ağırlık değişimi izlenmiştir (Şekil 3). Aynı süreçte ortam sıcaklığı ve bağıl neminin de değişimi izlenmiş ve kaydedilmiştir. Bu süre boyunca ortam sıcaklığı 25,9-27,4 °C arasında en fazla 1,5 °C değişirken, bağıl nem %31-69 arasında değişmiştir. Kömür örnekleri ilk 10 gün içerisinde hızla nem kaybetmiş ve kütle doğrusal olarak azalmıştır. İnce fraksiyonlarda (-19 mm) örneklerin ağırlığı, yüzey alanının fazla olması nedeniyle 10-12 günde dengeye ulaşırken, iri boyutlarda

15 günden sonra ancak denge ağırlığa yaklaşılmıştır (Cheng vd., 2023; Pawlak–Kruczek vd., 2019; Xian vd., 2022). Ortam neminin artışı, kömürün kendiliğinden kurumasını yavaşlatmıştır. İnce boyutlu kömür örneklerinin, nem atma sürecinin dengeye yaklaştığı zaman dilimlerinde artan bağıl nem, örnek ağırlığında %1-2 artışa neden olmuştur. Açık atmosfer koşullarında deney örneklerinin bir ay süreyle bekletilmesi sonucu %43-47 civarında bir kütle kaybı tespit edilmiştir. Bu kütle kaybı yüzey nemi ile ilişkilendirilmiştir (Kemal ve Arslan, 2014; Xian vd., 2022; Wood vd., 1983). Orijinal nem içeriğinin %51 civarında olduğu dikkate alındığında deney örneğinde kalan yaklaşık %4-8 nemin bünye nemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bünye nemi olarak tanımlanan ve kömür yapısında kalan kısım, iç ve yüzey absorpsiyonu ile kapiller boşlukları dolduran, termal kurutma uygulanmadan uzaklaştırılması güç olan higroskopik nemi oluşturmaktadır (Kemal ve Arslan, 2014). Kuruma verileri, ilgili bölge kömürlerinin neminin yaklaşık %90'ının yüzey nemi ve kalan kısmın ise bünye nemi olduğunu ortaya koymuştur.

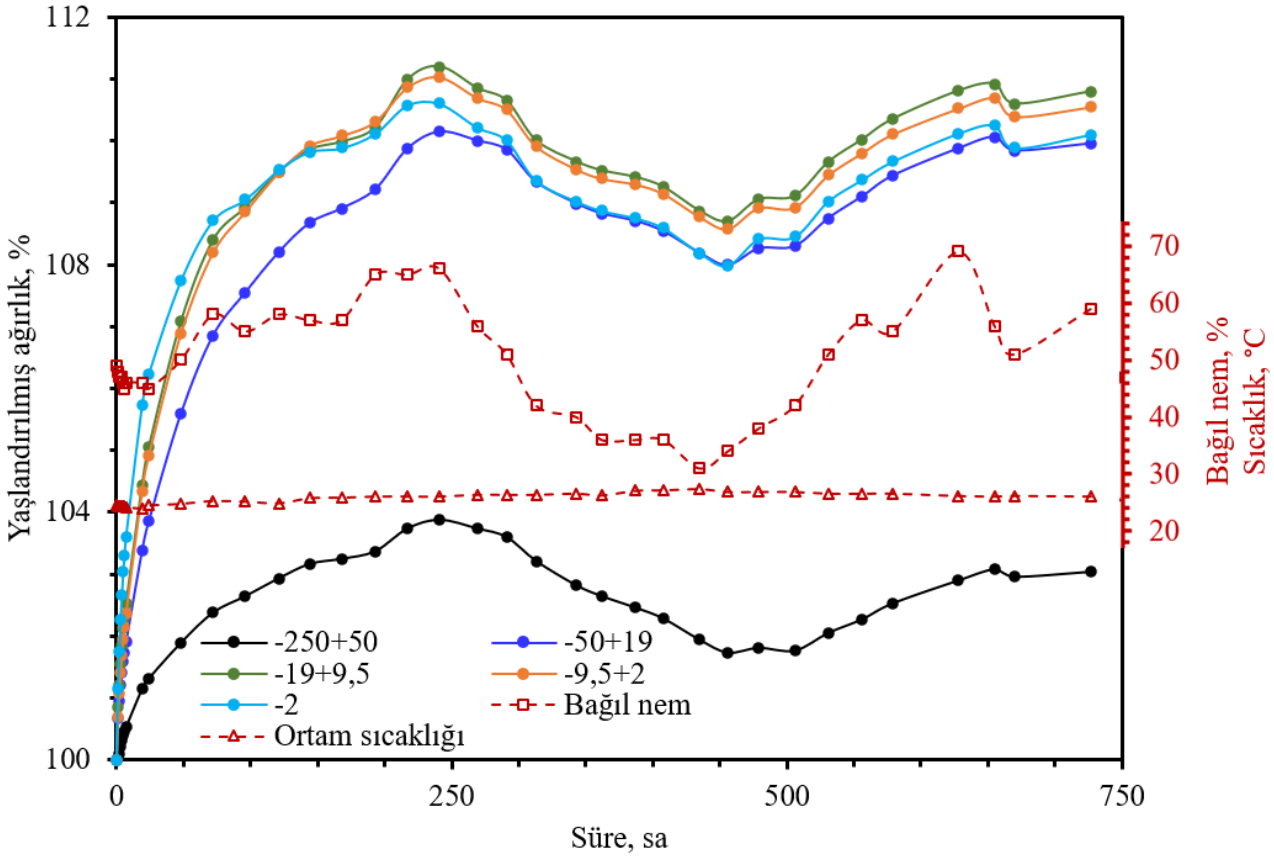


Şekil 3. Farklı boyut aralıklarında sınıflandırılmış kömür örneklerinin açık atmosfer koşullarında nem atma davranışı

3.3. Fırında Kurutulmuş Kömürün Nem Alma Davranışı

Termal kurutmaya tabi tutulmuş kömürün nem alma davranışına tane boyutunun etkisini belirlemek amacıyla kömür örneği sınıflandırılmıştır. Kömür yapısında bulunan yüzey nemi ve bünye nemini uzaklaştırmak için deney örnekleri 24 saat

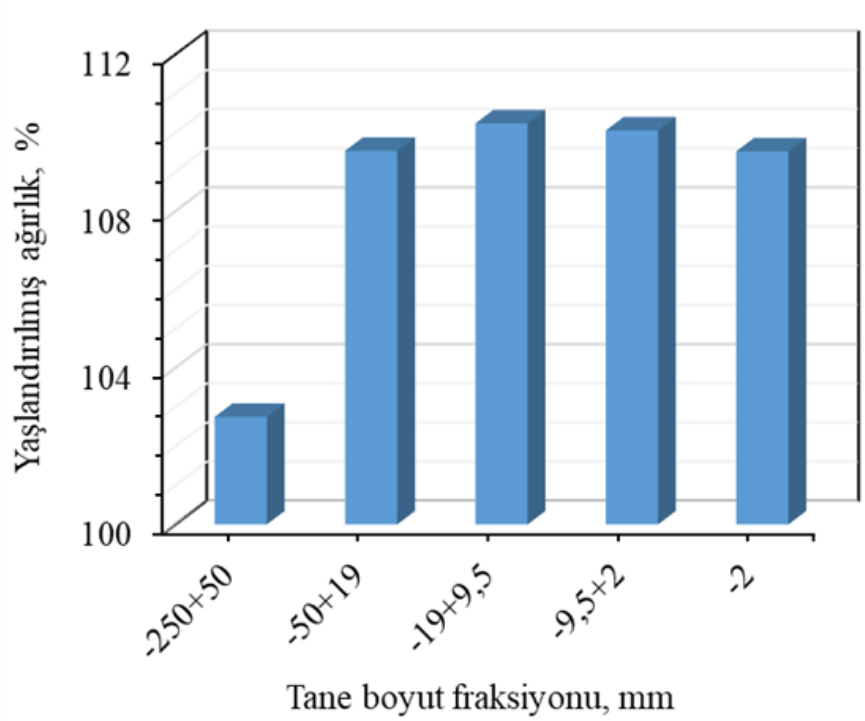
süreyle 105 °C'de etüvde bekletilmiştir. Hazırlanan nemi alınmış temsili kömür örnekleri bir ay süreyle laboratuvarda açık atmosfer koşullarında bekletilmiş ve ağırlık değişimi izlenmiştir (Şekil 4). Aynı süreçte ortam sıcaklığı ve neminin de değişimi izlenmiş ve kaydedilmiştir. Bu süre boyunca ortam sıcaklığı 24,0-27,4 °C arasında, nem ise %31-69 arasında değişmiştir. İnce boyutlu (-50 mm) kömür örnekleri, 3-4 gün içinde yaklaşık %8 nem alarak denge ağırlığa ulaşmıştır. İri boyutlarda (+50 mm) ise kömür örneğinin nem alma hızının dikkate değer oranda düşük (~%2,5) olduğu gözlenmiştir. Denge ağırlığa ulaşılan bu sürede, ortam sıcaklığında 1,3 °C, bağıl nemde ise %13 dalgalanma olmuştur.



Şekil 4. Farklı boyut aralıklarında sınıflandırılmış ve etüve kurutulmuş kömür örneklerinin açık atmosfer koşullarında nem alma davranışı

Atmosferik koşullara maruz kalma süresindeki artış ile ortam neminin değişimine paralel olarak kömür örneklerinin ağırlığında artış ve azalma olmuştur. Denge nem düzeyine ulaşıldıktan sonraki yaklaşık 20 günlük süreçte ortam bağıl neminde gerçekleşen %31-69 arasında değişimi, deney örneklerinin ağırlığında %2 civarında değişime neden olmuştur. Bir aylık yaşlandırma süresi sonunda +50 mm boyutlu kömürün ağırlığı yaklaşık %3 artarak %103 seviyesine (~%2,91 nemli kömür) çıkarken ince fraksiyonların ağırlığı %10 civarında artarak %110 seviyelerine (~%9,09 nemli kömür) çıkmıştır (Şekil 5). Kömür örneklerinin yaşlandırılmış ağırlığı, iri fraksiyonlara oranla, ince boyutlara doğru hafif artmış, -9,5 mm boyutunda ise ihmal edilir oranda olmakla birlikte tekrar azalmaya başlamıştır. Bu bulgular tane boyutunun, kömürün nem alma davranışını kontrol ettiğini ve toplam yüzey alanı ile doğrudan

ilişkili olduğunu göstermektedir (Li vd., 2009; Yang vd., 2013). Yang vd (2013), kurutulmuş kömürlerin nem alma davranışını mezogözenek yapısıyla açıklamıştır. Lv vd. (2017), polar grupların kurutma sürecinde ayrışarak temas açısının artmasına ve ıslanabilirliğin azalmasına neden olduğunu ileri sürmüşlerdir. Ayrıca aynı çalışmada, kurutma süreçlerinde mikrogözenekerin kaybolması ve mezogözeneklerin sayısının artması nedeniyle linyit nemini azaltmak için kurutmanın şart olduğunu vurgulanmıştır. Başka bir çalışmada da kurutma sürecinde makrogözeneklerin büzüşmesine ve mezogözenek sayısının artmasına neden olduğu belirtmişlerdir (Cheng vd., 2023).



Şekil 5. Farklı boyut aralıklarında sınıflandırılmış ve bir ay süreyle açık atmosfer koşullarında yaşlandırılmış kurutulmuş kömürün tane boyutuna bağlı olarak ağırlığındaki değişim

4. SONUÇLAR

Çankırı bölgesinden alınan yumuşak linyit kömürü örnekleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kömür örneği yüksek nem (~%51) ve kuru bazda yüksek kül (~%41) içeriğine sahiptir. Kül yapıcı önemli bileşenleri kil mineralleri ve kuvarstır. Deney örneği alt ısıl değeri orijinal bazda 1264 cal/g, kuru bazda 3195 cal/g'dır.
- Açık atmosfer koşullarında kurumaya bırakılan kömür örnekleri zamanla nemini kaybederek, ancak 10-12 günde denge ağırlığa ulaşabilmiştir. Tane boyutunun artması kömür örneğinin nem atma ve denge ağırlığa ulaşma süresini artırmıştır. Bu nedenle yığın kalınlığı ve stok sahası ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda, açık atmosfer

koşullarında kuruma işlemi, yüksek nemli linyitlerin kurutulmasında uygulanabilir bir yöntem değildir.
- Fırında kurutulmuş linyit, açık atmosfer koşullarında bırakıldığında 3-4 gün gibi kısa bir sürede %10 civarında nem alarak denge ağırlığa ulaşmıştır. İri boyutlarda nem alma oranı %3'e kadar düşmektedir. Dolayısıyla fırında kurutulmuş linyitin kalın yığın oluşturularak stoklanmasının, nem almayı sınırlandırmada etkili olacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, projenin gerçekleştirilmesine finansal destek sağlayan ÇATES Elektrik Üretim A.Ş. firmasına ve kısa kömür analizlerine imkân sağlayan Yatağan Termik Enerji A.Ş. firmasına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Agraniotis, M., Koumanakos, A., Doukelis, A., Karellas, S., Kakaras, E. 2012. Investigation of Technical and Economic Aspects of Pre-Dried Lignite Utilisation in a Modern Lignite Power Plant Towards Zero CO_2 Emissions. Energy, 45(1), 134–41.

Hassid, A., Klinger, M., Krzack, S., Cohen, H. 2022. TGA–DSC Combined Coal Analysis as a Tool for QC (Quality Control) and Reactivity Patterns of Coals. ACS Omega, 7 (2), 1893–1907.

Cheng, C., Gao, M., Miao, Z., Wan, K., He, Q. 2023. Structural Changes Mechanism of Lignite during Drying: Correlation between Macroscopic and Microscopic, Fuel, 339, 126955.

Dong, Z., Yu, W. Jia, T., Guo, S., Geng, W., Peng, B., 2021. Experimental Study on the Variation of Surface Widths of Lignite Desiccation Cracks during Low-Temperature Drying. ACS Omega, 6 (30), 19409–19418.

Kemal, M., Arslan, V. 2014. Kömür Teknolojisi (6. Baskı). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Lei, H., Wan, T., Chen, T., Ma, B., Yao, Z., Xu, B., Wang, Q., Xu, X. 2025. Study on the Drying Characteristics of Moist Fine Lignite in a Dense Gas–Solid Separation Fluidized Bed. Minerals, 15, 1039.

Li, X., Song, H., Wang, Q., Meesrı, C., Wall, T., Yu, J. 2009. Experimental Study on Drying and Moisture Re-Adsorption Kinetics of an Indonesian Low Rank Coal. Journal of Environmental Sciences, 21 (1), S127-S130.

Lv, B., Luo, Z., Zhang, B., Chen, C. 2017. Drying and Moisture Readsorption Characteristics of Lignite. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2017, 40, 712–729.

Miao, Z., Tian, J., He, Q., Wan, K., Zhou, G., Ren, X., Chen. J., 2017. Drying Kinetics of Soft and Hard Lignite and the Surface Characteristics of Products. Energy Fuels, 31 (3), 2439–2447.

Pawlak–Kruczek, H., Czerep, M., Niedzwiecki, L., Karampinis, E., Violidakis, I., Avagianos, I., Grammelis, P. 2019. Drying of Lignite of Various Origins in a Pilot Scale Toroidal Fluidized Bed Dryer using Low Quality Heat. Energies, 12, 1191.

Rakopoulos, D., Agraniotis, M., Grammelis, P., Kakaras, E. 2017. Efficient CHP-Plant Configuration for District Heating Systems Utilizing Low-Rank Coals. Journal of Energy Engineering, 143(4), 04016066.

Tahmasebi, A., Zheng, H., Yu, J. 2016. The Influences of Moisture on Particle Ignition Behavior of Chinese and Indonesian Lignite Coals in Hot Air Flow. Fuel Processing Technology, 153, 149–155.

Wood, G.H., Kehn, T.M., Carter, M.D., Culbertson, W.C. 1983. Coal Resource Classification System of the U.S. Geological Survey. USGS Circular 891.

Xian, W., Ziwen, D., Lifeng, S., Tinggui, J., 2022. Experimental Study of the Volume Drying Shrinkage Characteristics of Lignite under Low Temperatures. ACS Omega, 7 (12), 10029–10038.
Yang, Y., Jing, X., Li, Z., Liu, X., Zhang, Y., Chang, L. 2013. Effect of Drying Conditions on Moisture Re-Adsorption Performance of Dewatered Lignite. Drying Technology, 31, 1430–1437.
Yu, J., Tahmasebi, A., Han, Y., Yin, F., Li, X. 2013. A Review on Water in Low Rank Coals: The Existence, Interaction with Coal Structure and Effects on Coal Utilization. Fuel Processing Technology, 106, 9-20.

ZONGULDAK TAŞKÖMÜRLERİNİN KATMA DEĞERLİ DÖNÜŞÜMÜ: ENJEKSİYON KÖMÜRÜ, AKTİF KARBON VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN BÜTÜNLEŞİK YAKLAŞIMLAR

VALUE-ADDED CONVERSION of ZONGULDAK HARD COALS: INTEGRATED APPROACHES FOR INJECTION COAL, ACTIVATED CARBON, and INDUSTRIAL APPLICATIONS

Faik ALP*
Türkiye Taşkömürü Kurumu, 67100, Zonguldak, TÜRKİYE

Serdar YILMAZ, Mehmet BİLEN, Sait KIZGUT, İhsan TOROĞLU
Zonguldak Bülent Ecevit University, Engineering Faculty, Department of Mining Engineering, İncivez, 67100, Zonguldak, Turkiye

ÖZET Zonguldak Taşkömürü Havzası, Türkiye'nin tüm taşkömürü potansiyelini barındıran ve farklı koklaşma özelliklerine sahip kömürler sunan tek bölgedir. Bu çalışma, Armutçuk ve çevresindeki koklaşabilir ve yarı koklaşabilir kömürlerin, geleneksel santral yakıtı kullanımının ötesinde yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesine yönelik üç büyük projenin sonuçlarını sunmaktadır. İlk olarak, eski yıkama sistemleri nedeniyle yüksek kül içeren kömürlerin modern teknolojilerle iyileştirilerek enjeksiyon kömürü (PCI), dökümhane kumu katkısı, mangal/nargile kömürü ve aktif karbon hammaddesi üretilebileceği gösterilmiştir. İkinci olarak, koklaşabilir kömürden yüksek yüzey alanlı aktif karbon üretimi için fiziksel aktivasyon prensibiyle çalışan yeni bir prototip fırın sistemi geliştirilmiştir. Üçüncü olarak, Zonguldak kömürlerinin metalurji, çevre teknolojileri, dökümhane ve su arıtma gibi endüstriyel alanlara uygunluğunu değerlendirmek üzere kapsamlı ve akredite analizler yapılmıştır. Çalışma, Zonguldak kömürlerinin sürdürülebilir kullanımı için stratejik bir dönüşüm modeli önermekte ve ithalat bağımlılığını azaltmaya yönelik yenilikçi, yerli çözümleri desteklemektedir.

ABSTRACT The Zonguldak Hard Coal Basin is the only region in Türkiye that hosts the country's entire hard coal potential, offering coals with varying coking properties. This study presents the outcomes of three major projects focused on converting coking and semi-coking coals from Armutçuk and its vicinity into high value-added products beyond their conventional use as power plant fuel. First, it was demonstrated that coals with high ash content due to outdated washing systems can be upgraded using modern technologies to produce pulverized coal injection (PCI) coal, foundry sand additives, barbecue/hookah charcoal, and raw material for activated carbon. Second, a novel prototype furnace system operating on the physical activation principle was developed to produce high-surface-area activated carbon from coking coal. Third, comprehensive and accredited analyses were conducted to assess the suitability of Zonguldak coals for various industrial fields such as metallurgy, environmental technologies, foundry, and water treatment. The study proposes a strategic transformation model for the sustainable utilization of Zonguldak coals and supports innovative, local solutions to reduce import dependency.

* *faikerim@hotmail.com*

1. GİRİŞ

Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Zonguldak Kömür Havzası, ülkenin tek taşkömürü havzası olup, yüksek uçucu madde içerikli ve güçlü koklaşma potansiyeline sahip (FSI: 7–9) bitümlü kömürlerle karakterize edilmektedir; ancak karmaşık çökelim ve tektonik koşullar nedeniyle yanal ve dikey yönde belirgin kalite farklılıkları gözlenmektedir. Amasra alt havzasında koklaşmayan kömürler (FSI: 0–1) bulunurken, Armutçuk bölgesinde zayıf koklaşabilir kömürler (FSI: 2–4; LC: 8–12) hâkimdir ve bu durum onların teknolojik davranışlarını ve kullanım potansiyellerini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışma, Armutçuk (TTK) kömürlerinin geleneksel yakma uygulamalarının ötesinde yüksek katma değerli kullanımlara uygunluğunu, fizikokimyasal, petrografik ve teknolojik analizlerden oluşan bütünleşik bir çerçeve ile değerlendirmekte; alternatif kullanım yollarını belirleyerek daha sürdürülebilir ve verimli kaynak kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

2. ZONGULDAK KÖMÜR HAVZASI

Zonguldak Kömür Havzası, Türkiye'nin tek taşkömürü bölgesi olup, koklaşabilir ve koklaşmayan kömürler de dahil olmak üzere bitümlü rezervlerin başlıca kaynağıdır. Yüksek kaliteli metalurjik kömürler esas olarak Kozlu, Üzülmez ve Karadon'da bulunurken, Armutçuk ve Amasra kömürleri harmanlama için uygundur. Havza, Üst Karbonifer Alacaağzı'ndan Karadon Formasyonu'na kadar uzanmakta olup, 18'i ekonomik olarak işletilebilir toplam 46 kömür damarı içermektedir. Toplam rezerv yaklaşık 1,514 milyar tondur (%48'i kanıtlanmış) ve damar kalınlıkları tipik olarak 0,8 ile 3,5 m arasında değişmektedir. Madencilik −630 m derinliklere kadar ulaşmış olup, operasyonlar karmaşık jeolojik koşullar nedeniyle kısıtlıdır. Koklaşabilir kömürler rezervlerin yaklaşık %57'sini oluşturmakta olup, bu durum havzanın stratejik önemini vurgulamaktadır. Havzadaki rezerv miktarları ve koklaşma özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Havzadaki rezerv miktarları ve koklaşma özellikleri (TTK 2024).

İşletme	Toplam Rezerv (10^6 ton)	Koklaşma Özelliği
Armutçuk	26,63	Yarı koklaşabilir
Amasra	69,19	Koklaşamaz
Karadon	405,49	Koklaşabilir
Kozlu	152,80	Koklaşabilir
Üzülmez	163,83*	Koklaşabilir
TTK Toplamı	817,94	—
Havza Toplamı	1.514,67	—

Tablo 2. Dünya Kömür Ticareti (Milyon Ton)

Tür	İhr. 2023	İhr. 2024	İth. 2023	İth. 2024
Termik ve Linyit	1.151	1.178	1.157	1.178
Koklaşabilir Kömür	351	369	352	368
Toplam	1.502	1.547	1.510	1.546

3. TTK ARMUTÇUK TAŞKÖMÜRÜ İŞLETMESİ

Türkiye'de taşkömürü madenciliği, 1829 yılında Uzun Mehmet'in Karadeniz Ereğli bölgesinde yaptığı keşifle başlamış, ardından 1848 yılında Zonguldak Kömür Havzası'nda sistematik üretime geçilmesiyle sürdürülebilir yeraltı madenciliğinin temeli atılmıştır. Bu havza içerisinde, Zonguldak'ın yaklaşık 35 km batısında yer alan TTK Armutçuk İşletmesi, yaklaşık 100 km²'lik bir alanı kapsamakta ve çoğunluğu Büyük damarında yoğunlaşmış yaklaşık 38 milyon ton rezerv barındırmaktadır. Kozlu ve Alacaağzı formasyonları arasında yer alan bu ana üretim damarı, 3 ila 25 m arasında değişen (ortalama ~6 m) kalınlıklar sergilemektedir (TTK 2021, Didari ve diğerleri 2015).

3.1. ARMUTÇUK KÖMÜR HAZIRLAMA TESİSİ

Armutçuk Kömür Hazırlama Tesisi, 1960 yılında McNally tarafından 210 t/s kapasiteyle devreye alınmış olup, TTK Armutçuk İşletmesi'nden gelen tüvenan kömürü işlemektedir. Başlangıçta Baum jigi, sallantılı masalar ve flotasyon ünitelerini içeren akım şeması, daha sonra ince kömür temizleme devrelerinin çıkarılmasıyla basitleştirilmiştir. Bu modifikasyon, özellikle 0–10 mm boyut fraksiyonunda ayırma verimini önemli ölçüde düşürmüş ve temiz kömürdeki kül içeriğinin artmasına neden olmuştur; bu durum Aralık 2024 tedarik verilerine de yansımıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Aralık 2024 TTK Armutçuk Kömür Tedariği.

Tarih	TTK Yükleme Miktarı (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	ERDEMİR Boşaltma Miktarı (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	Ödenebilir (TTK & ERDEMİR Ortalaması) Miktar (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	Kül Farkı	Nem Farkı
3.12.2024	113,320	21,00	8,60	112,96	19,92	8,59	113,320	20,46	8,60	1,08	0,01
4.12.2024	113,780	20,30	8,90	113,50	21,28	8,64	113,780	20,30	8,90	-0,98	0,26
5.12.2024	56,500	20,80	9,70	56,12	23,56	9,62	56,500	22,18	9,70	-2,76	0,08
6.12.2024	85,000	21,50	8,40	84,68	22,17	9,53	85,000	21,50	8,97	-0,67	-1,13
11.12.2024	56,440	19,00	8,30	56,36	20,94	8,67	56,440	19,97	8,30	-1,94	-0,37
12.12.2024	113,900	20,30	8,80	113,44	21,91	10,23	113,900	21,11	9,52	-1,61	-1,43
13.12.2024	85,300	20,50	8,90	84,88	21,92	9,54	85,300	21,21	8,90	-1,42	-0,64
16.12.2024	84,420	15,40	9,20	84,22	19,05	9,90	84,420	17,23	9,20	-3,65	-0,70
17.12.2024	84,380	18,10	7,60	84,92	19,40	9,23	84,380	18,75	8,42	-1,30	-1,63
18.12.2024	113,620	14,30	7,30	113,26							

Tablo 3'te görüldüğü üzere, kül içeriği sıklıkla %20'yi aşmakta olup, yükleme-boşaltma farkları değişken kaliteye işaret etmektedir; nem oranı kabul edilebilir düzeyde olsa da, yüksek kül performansı düşürmektedir ve bu eğilim Kasım 2024 verilerinde de görülmektedir (Tablo 4).

Tablo 4. Kasım 2024 TTK Armutçuk Kömür Tedariği.

Tarih	TTK Yükleme Miktarı (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	ERDEMİR Boşaltma Miktarı (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	Ödenebilir (TTK & ERDEMİR Ortalaması) Miktar (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	Kül Farkı	Nem Farkı
1.11.2024	56,880	16,40	7,00	56,74	18,60	8,67	56,880	17,50	7,84	-2,20	-1,67
4.11.2024	56,660	16,50	6,60	56,54	19,38	7,50	56,660	17,94	6,60	-2,88	-0,90
6.11.2024	113,800	15,80	7,10	113,50	19,38	7,50	113,800	17,59	7,10	-3,58	-0,40
7.11.2024	111,820	16,90	9,00	111,60	19,74	10,25	111,820	18,32	9,63	-2,84	-1,25
18.11.2024	113,320	20,36	9,72	112,90	23,86	11,38	113,320	22,11	10,55	-3,50	-1,66
19.11.2024	113,760	20,55	8,80	113,30	26,77	10,39	113,760	23,66	9,60	-6,22	-1,59
20.11.2024	56,580	20,76	9,04	56,46	25,92	10,20	56,580	23,34	9,62	-5,16	-1,16
21.11.2024	85,220	19,45	8,86	84,98	18,54	10,59	85,220	19,45	9,73	0,91	-1,73
22.11.2024	85,240	21,60	9,40	84,80	17,89	10,31	85,240	19,75	9,40	3,71	-0,91
25.11.2024	84,920	20,70	7,60	84,32	19,59	7,80	84,920	20,15	7,60	1,11	-0,20
26.11.2024	56,640	19,80	7,30	56,52	20,66	23,11	56,640	19,80	15,21	-0,86	-15,81
TOTAL / AVG	934,840	18,99	8,36	931,660	21,10	10,40	934,840	20,06	9,28	-21,51	-27,28

Tablo 4, yaklaşık %20 kül içeriğini göstermekte olup, bazı partilerde bu oran %22–23'ün üzerine çıkmakta; bu durum, ince kömür temizleme eksikliğinden kaynaklanan zayıf kontrolü işaret etmektedir ve bu eğilim Ekim 2024 verilerinde de görülmektedir (Tablo 5).

Tablo 5. Ekim 2024 TTK Armutçuk Kömür Tedariği.

Tarih	TTK Yükleme Miktarı (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	ERDEMİR Boşaltma Miktarı (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	Ödenebilir (TTK & ERDEMİR Ortalaması) Miktar (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	Kül Farkı	Nem Farkı
1.10.2024	56,560	15,50	9,20	56,70	18,49	10,50	56,560	17,00	9,85	-2,99	-1,30
3.10.2024	84,780	19,80	9,00	84,60	20,32	9,34	84,780	19,80	9,00	-0,52	-0,34
9.10.2024	113,780	19,00	9,60	113,40	15,49	10,20	113,780	17,25	9,60	3,51	-0,60
10.10.2024	113,140	17,20	8,80	112,80	21,17	9,14	113,140	19,19	8,80	-3,97	-0,34
11.10.2024	85,220	18,90	8,90	85,00	20,34	9,61	85,220	19,62	8,90	-1,44	-0,71
14.10.2024	84,540	18,60	9,00	84,30	20,75	9,59	84,540	19,68	9,00	-2,15	-0,59
15.10.2024	85,880	16,10	7,50	84,40	14,90	9,26	85,880	15,50	8,38	1,20	-1,76
16.10.2024	56,620	17,20	7,40	56,40	22,38	8,15	56,620	19,79	7,40	-5,18	-0,75
17.10.2024	85,080	16,30	7,80	85,10	18,46	9,82	85,080	17,38	8,81	-2,16	-2,02
22.10.2024	85,000	17,50	9,90	84,70	24,02	10,82	85,000	20,76	9,90	-6,52	-0,92
24.10.2024	85,240	19,30	8,70	85,00	15,47	10,32	85,240	17,39	9,51	3,83	-1,62
25.10.2024	84,980	20,30	8,30	84,54	18,92	10,08	84,980	19,61	9,19	1,38	-1,78
30.10.2024	56,820	21,40	8,80	56,74	17,05	9,33	56,820	19,23	8,80	4,35	-0,53
TOTAL / AVG	1.077,640	18,25	8,73	1.073,680	19,00	9,73	1.077,640	18,60	9,05	-16,39	-10,95

Ekim ayı, Kasım–Aralık aylarına kıyasla biraz daha düşük kül oranı göstermekle birlikte, hâlâ optimal PCI sınırlarının üzerindedir. Değişkenlik, tutarsız kaliteye işaret etmektedir. Eylül ayı verileri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Eylül 2024 TTK Armutçuk Kömür Tedariği.

Tarih	TTK Yükleme Miktarı (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	ERDEMİR Boşaltma Miktarı (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	Ödenebilir (TTK & ERDEMİR Ortalaması) Yükleme Miktarı (Ton)	Kül (%)	Nem (%)	Kül Farkı	Nem Farkı
2.09.2024	113,100	14,80	6,20	112,98	16,83	5,91	113,100	15,82	6,20	-2,03	0,29
9.09.2024	84,760	14,60	7,10	84,58	14,84	9,44	84,760	14,60	8,27	-0,24	-2,34
10.09.2024	113,100	13,40	8,60	112,76	16,94	8,13	113,100	15,17	8,60	-3,54	0,47
11.09.2024	85,280	14,20	8,20	84,94	16,85	8,34	85,280	15,53	8,20	-2,65	-0,14
12.09.2024	56,360	13,50	7,40	56,18	15,68	8,21	56,360	14,59	7,40	-2,18	-0,81
16.09.2024	84,480	13,40	7,80	84,34	15,95	7,84	84,480	14,68	7,80	-2,55	-0,04
17.09.2024	84,700	13,70	7,60	84,46	13,99	12,70	84,700	13,70	10,15	-0,29	-5,10
18.09.2024	85,200	15,90	8,50	84,68	18,91	8,23	85,200	17,41	8,50	-3,01	0,27
19.09.2024	56,840	16,30	7,90	56,58	19,47	8,78	56,840	17,89	7,90	-3,17	-0,88
24.09.2024	84,740	15,80	7,90	84,60	19,77	8,71	84,740	17,79	7,90	-3,97	-0,81
25.09.2024	56,720	14,70	8,30	56,62	20,01	8,36	56,720	17,36	8,30	-5,31	-0,06
26.09.2024	56,640	15,20	8,80	56,44	19,64	7,69	56,640	17,42	8,25	-4,44	1,11
27.09.2024	85,240	14,80	9,30	85,08	16,48	9,86	85,240	15,64	9,30	-1,68	-0,56
TOTAL / AVG	1.047,160	14,58	7,93	1.044,240	17,17	8,58	1.047,160	15,85	8,20	-28,94	-9,15

Tablo 6, daha düşük kül oranlarını (~%15–16) göstermekle birlikte, Ekim'den Aralık'a kadar artan değerler, performansın düştüğüne ve modernizasyon ihtiyacına işaret etmekte olup, bu eğilim Ocak 2025'te de devam etmektedir (Tablo 7).

Tablo 7. Ocak 2025 TTK Armutçuk Kömür Tedariği.

Tarih	TTK Yükleme Miktarı (t)	Kül (%)	Nem (%)	ERDEMİR Boşaltma Miktarı (t)	Kül (%)	Nem (%)	Ödenebilir Miktar (t)	Kül (%)	Nem (%)	Kül Farkı	Nem Farkı
14.01.2025	112.58	21.20	10.60	112.26	18.76	10.38	112.58	19.98	10.60	2.44	0.22
15.01.2025	84.72	16.40	9.10	84.40	12.95	8.97	84.72	14.68	9.10	3.45	0.13
20.01.2025	84.56	12.20	10.50	83.74	15.69	13.88	84.56	13.95	12.19	-3.49	-3.38
21.01.2025	28.32	11.70	9.40	28.12	15.35	9.44	28.32	13.53	9.40	-3.65	-0.04
22.01.2025	56.72	18.80	11.70	56.10	19.67	13.76	56.72	18.80	12.73	-0.87	-2.06
23.01.2025	113.00	20.10	11.10	111.98	19.17	11.48	113.00	20.10	11.10	0.93	-0.38
27.01.2025	84.48	21.00	7.70	83.88	19.89	8.04	84.48	20.45	7.70	1.11	-0.34
28.01.2025	56.86	19.60	7.10	56.42	22.71	9.13	56.86	21.16	8.12	-3.11	-2.03
29.01.2025	83.86	20.70	9.10	83.44	22.36	8.48	83.86	21.53	9.10	-1.66	0.62
30.01.2025	56.72	21.80	8.50	56.36	21.18	9.39	56.72	21.80	8.50	0.62	-0.89
TOTAL / AVG	761.820	18.82	9.63	756.700	18.77	10.35	761.820	18.86	9.97	-4.23	-8.15

Tablo 7, satılabilir külün %19 civarında kaldığını, nemin ise sınır değerleri karşıladığını göstermekte olup, temel sorunun yetersiz kül indirimi olduğuna işaret etmektedir. Finansal etkiler Tablo 8 ve 9'da özetlenmiştir.

Tablo 8: TTK Müşteri Prim–Ceza Tablosu (2024, KDV Hariç).

Müşteri	Miktar (ton)	Değer (TL)	Kül/Kalorifik Bonus (TL)	Kül/Kalorifik Kesinti (TL)	Nem Bonus (TL)	Nem Kesinti (TL)	Net Prim Ceza (TL)	Toplam Değer (TL)	Ortalama Satış Fiyatı (TL/ton)
ÇATES Electricity Generation Inc.	490,202.460	468,820,448.22	0	0	0	0	0	468,820,448.22	956
Other Industry	2,000.655	13,689,483.86	0	0	0	0	0	13,689,483.86	6,842.50
ERDEMİR	17,186.701	89,023,547.39	262,281.77	3,054,550.59	1,075,603.90	51,813.16	-1,768,478.08	87,255,069.31	5,076.89
Internal Consumption	9,369.093	49,130,943.14	0	0	0	0	0	49,130,943.14	5,243.94
KARDEMİR	197,465.623	1,208,386,900.24	5,608,545.96	21,436,398.28	30,095,628.39	1,076,960.52	13,190,815.55	1,221,577,715.79	6,186.28
TESHİN	6,073.420	47,263,292.49	0	0	0	0	0	47,263,292.49	7,781.99
TOTAL	722,297.952	1,876,314,615.34	5,870,827.73	24,490,948.87	31,171,232.29	1,128,773.68	11,422,337.47	1,888,100,902.57	2,614.02

Tablo 9. Prim-Ceza Tablosu Özeti.

Müşteri	Miktar (ton)	Değer (TL)	Prim (TL)	Ceza (TL)	Net Prim Ceza (TL)	Toplam Değer (TL)	Ortalama Satış Fiyatı (TL/ton)
ÇATES Electricity Generation Inc.	490,202.460	468,820,448.22	0	0	0	468,820,448.22	956
Other Industry	2,000.655	13,689,483.86	0	0	0	13,689,483.86	6,842.50
ERDEMİR	17,186.701	89,023,547.39	1,337,885.67	3,106,363.75	-1,768,478.08	87,255,069.31	5,076.89
Internal Consumption	9,369.093	49,130,943.14	0	0	0	49,130,943.14	5,243.94
KARDEMİR	197,465.623	1,208,386,900.24	35,704,174.35	22,513,358.80	13,190,815.55	1,221,577,715.79	6,186.28
TESHİN	6,073.420	47,263,292.49	0	0	0	47,263,292.49	7,781.99
TOTAL	722,297.952	1,876,314,615.34	37,042,060.02	25,619,722.55	11,422,337.47	1,888,100,902.57	2,614.02

Tablo 8–9, ERDEMİR için kül cezalarının primleri aştığını ve net kayıplara yol açtığını göstermektedir; genel olarak (Tablo 3–9), tesis kapasitesinin sınırına ulaşmış olup, 0–10 mm fraksiyonundaki yüksek kül oranı, modern bir tesis ihtiyacını zorunlu kılmaktadır.

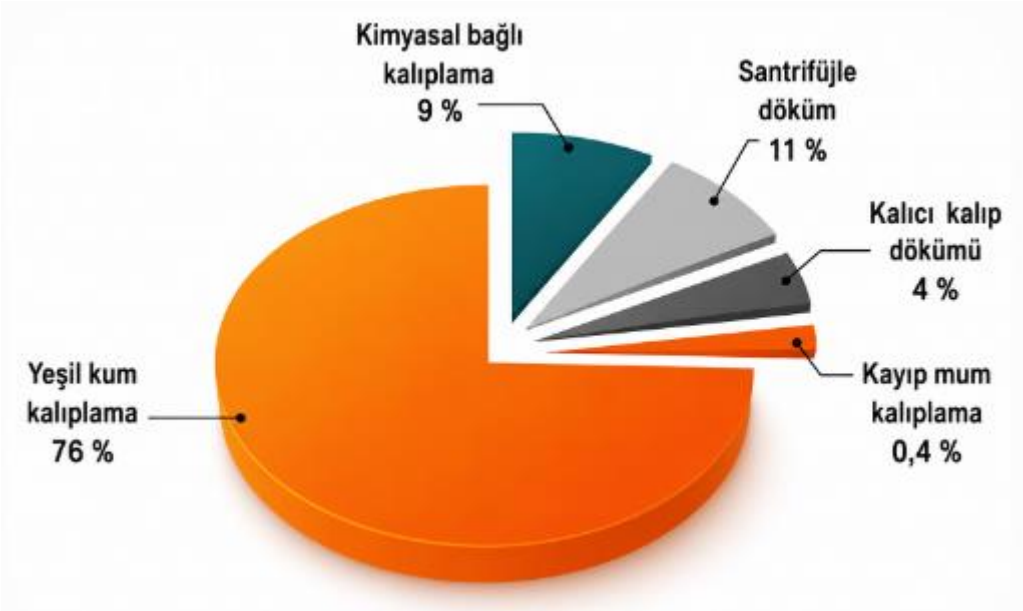
4. ARMUTÇUK KÖMÜRÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

Armutçuk kömürü, yüksek parlak karbon içeriğiyle karakterize edilen ve bu özelliğiyle metalurjik proseslerdeki reaktivitesini artıran, yarı koklaşabilir, yüksek uçucu madde içerikli bir bitümlü kömürdür. Tüvenan kömür %45–50 kül içermesine rağmen, etkin bir yıkama ile bu oran %5–10'a düşürülebilir ve kalite ile değer önemli ölçüde iyileştirilebilir. Bu tür kömürler nispeten nadir olup, stratejik önemlerini artırmaktadır.

Bu özellikleri sayesinde Armutçuk kömürü, yüksek fırınlarda PCI, dökümhanelerde karbon katkı maddesi, aktif karbon üretimi, mangal ve nargile kömürü ile EAF çelik üretiminde karbon ve enerji kaynağı gibi yüksek katma değerli kullanımlara uygun olup, onu çok yönlü bir endüstriyel kaynak haline getirmektedir.

4.1. DÖKÜMHANE KUMUNDA KARBON KATKI MADDESİ OLARAK KULLANIM

Dökümde kalıp kalitesi, bağlayıcı sistemine bağlıdır. Kalıp kumları esas olarak kil bağlayıcılı (yeşil kum) veya kimyasal bağlayıcılıdır. Yeşil kum tipik olarak silis kumu (%85–95), bentonit (%4–10), karbon katkı maddeleri (%2–10) ve minör bileşenler içerir; düşük maliyeti, geri dönüştürülebilirliği ve kararlı performansı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Yeşil Kum Sistemi kalıplama yönteminin payı (Kwaśniewska ve Holtzer 2013)

Şekil 1'de görüldüğü gibi, yeşil kum, esnekliği ve karbon katkı maddeleriyle uyumluluğu sayesinde döküm sektöründe baskın konumdadır. Bu sistemlerde, düşük küllü ve yüksek parlak karbon içerikli kömür, yüzey kalitesini iyileştirir, kusurları azaltır ve oksidasyonu sınırlandırır; kül, uçucu madde, kükürt, azot ve 2–4 arası FSI gibi temel özelliklerin kontrol edilmesi gerekmektedir.

Kimyasal sistemlere kıyasla çevresel açıdan daha kabul edilebilir olmasına rağmen, bazı organik katkı maddeleri zararlı emisyonlar (VOC, PAH, BTEX) yaymakta ve genellikle bunlardan kaçınılmaktadır. Yeşil kum dökümü, otomotiv, makine, madencilik ve çelik üretimi dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2, Şekil 3).

Şekil 2. Yeşil Kum Dökümün Avantajları

Şekil 3. Yeşil Kum Dökümü

Şekil 2 ve 3, yeşil kum kalıplamanın avantajlarını, uygulama ve döküm kalitesini göstermekte olup, uygun karbon katkı maddeleriyle kalıp yapısını ve iyileştirilmiş yüzey kalitesini ortaya koymaktadır. Türkiye'de döküm sektörü yaklaşık 1.040 işletmeyi kapsamakta ve küresel ölçekte önemli bir yere sahiptir; yeşil kum sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu tür uygulamalar için gerekli özellikleri karşılayan sınırlı sayıda kömür kaynağı bulunmaktadır.

Armutçuk kömürü, uygun uçucu madde, %10–12 parlak karbon, düşük kükürt ve uygun öğütülebilirlik ile bu kriterleri karşılamaktadır. Tüvenan kömür yüksek kül içermesine rağmen, yıkama ile bu oran %5–10'a düşürülerek dökümhane kullanımına uygun yüksek kaliteli bir kömür elde edilmektedir.

4.2. YÜKSEK FIRINLARDA PÜLVERİZE KÖMÜR ENJEKSİYONU (PCI) KULLANIMI

Pülverize Kömür Enjeksiyonu (PCI), yüksek fırınlarda kok tüketimini azaltmak, verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla ince öğütülmüş kömürün tüyerlerden enjekte edilmesiyle kullanılmaktadır. Performansı, kömürün rank, kül, uçucu madde, nem, kükürt, maseral bileşimi ve tane boyutu gibi yanma davranışını etkileyen özelliklerine bağlıdır (Dike 2008).

PCI'nin endüstriyel kullanımı 1980'lerin başında Avrupa ve Japonya'da, ağırlıklı olarak pahalı koka olan bağımlılığı azaltma ihtiyacıyla başlamıştır. Önemi, 1979 petrol krizinden sonra, kömür enjeksiyonunun fuel oil sistemlerinin yerini almasıyla artmış ve güçlü ekonomik faydalar sağladığını göstermiştir; yaklaşık 0,9 ton enjekte edilen kömür, yaklaşık 1,4 ton koklaşabilir kömürün yerini alabilmektedir.

Türkiye'de PCI kalite gereksinimlerini karşılayan tek kömür kaynağı Armutçuk kömür sahasıdır. Bu bölgeden çıkarılan tüvenan kömür, kül içeriğinin %10'un altına düşürülecek şekilde zenginleştirildiğinde, yanma veya cüruf kimyasını olumsuz etkilemeden yüksek enjeksiyon oranlarına uygun hale gelmektedir. Erdemir ile TTK arasındaki anlaşma kapsamında bu kömür, PCI uygulamaları için tedarik edilmekte olup, fiyatı ton başına 127 USD (10% nem ve 12% kül için) olarak belirlenmiş ve

enjeksiyon öncesinde 75–85 mikronun altında öğütülmektedir. Erdemir ve İsdemir yıllık yaklaşık 1.000.000 ton PCI kömürü tüketmesine rağmen, bunun yalnızca küçük bir kısmı yurt içinden tedarik edilmekte, büyük çoğunluğu ise ton başına yaklaşık 250 USD'den ithal edilmektedir. Türkiye'nin toplam PCI talebi yıllık yaklaşık 1,6 milyon ton iken, Armutçuk yaklaşık 35 milyon ton jeolojik rezerve sahiptir. Yerli üretimin artırılması ve kömür hazırlama altyapısının iyileştirilmesi, ithalat bağımlılığını önemli ölçüde azaltacaktır.

Küresel ölçekte, kömür çelik üretiminde vazgeçilmez olmaya devam etmekte olup, taşkömürünün yaklaşık %14'ü demir-çelik endüstrisinde kullanılmakta ve ham çeliğin yaklaşık %70'i hâlâ kömür bazlı yöntemlerle üretilmektedir. Özellikle PCI kömürü, maliyet avantajı ve yüksek fırın işletme maliyetlerini düşürmedeki rolü nedeniyle uluslararası ticarette önem kazanmış ve küresel talebin istikrarlı bir şekilde artmasına yol açmıştır.

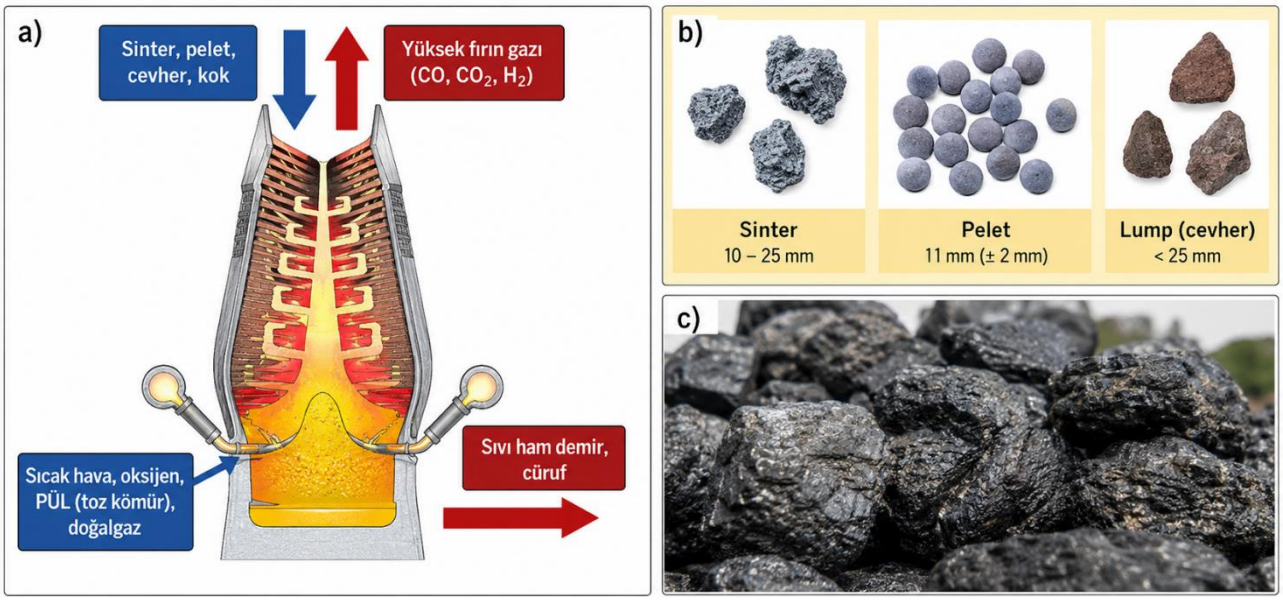
Tablo 10. Dünya Genelinde PCI Kömürü Kullanan Ülkeler (Bin Ton).

Ülke	2015	2016	2017	Ülke	2015	2016	2017	Ülke	2015	2016	2017
Japan	14,005	14,043	14,376	Netherlands	1,496	1,459	1,641	Sweden	313	441	406
Korea	9,592	8,266	8,539	United Kingdom	1,544	1,364	1,301	Czechia	300	319	278
Russia	5,080	6,264	6,376	Belgium	1,253	1,495	1,495	Finland	53	304	333
Germany	4,881	4,841	4,933	Italy	672	855	483	Poland	270	283	366
India	3,390	3,461	3,696	Spain	879	819	909	Serbia	56	74	82
France	2,421	2,359	2,873	Austria	764	806	838	Australia	60	73	73
Taiwan	2,161	2,066	1,815	Türkiye	690	660	1,394	Norway	74	55	101
USA	870	1,462	1,376	Slovakia	608	586	668	Dünya Toplamı	51,419	52,355	54,351

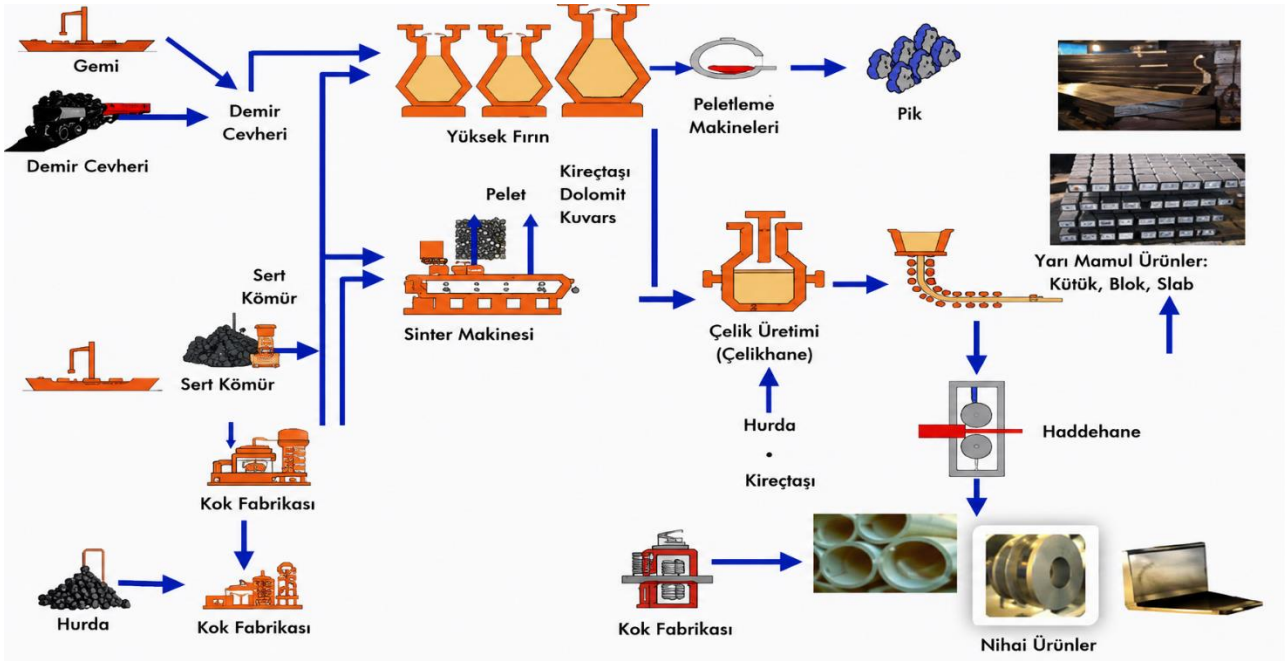
Tablo 10, PCI kullanımının 2015–2017 döneminde 54,351 milyon tona yükseldiğini ve bu artışa Japonya, Kore, Rusya, Almanya ve Hindistan'ın (~%70) öncülük ettiğini göstermektedir; Türkiye de artış göstermiş olup, bu durum PCI'nin maliyet etkin demir üretiminde artan rolünü doğrulamaktadır.

4.3. YÜKSEK FIRIN PROSESİ

Çelik üretimi esas olarak iki yolla gerçekleştirilir: yüksek fırın–bazik oksijen fırını (BF–BOF) ve elektrik ark ocağı (EAF). Bu yöntemler, hammadde, proses kimyası ve enerji kullanımı açısından farklılık gösterir. BF–BOF genellikle yassı ürünler için kullanılırken, EAF uzun ürünler için daha yaygındır, ancak modern EAF'ler yassı çelik de üretebilmektedir. Buna rağmen, BF–BOF yolu baskın olmaya devam etmekte olup, genel süreç akışı Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmektedir.

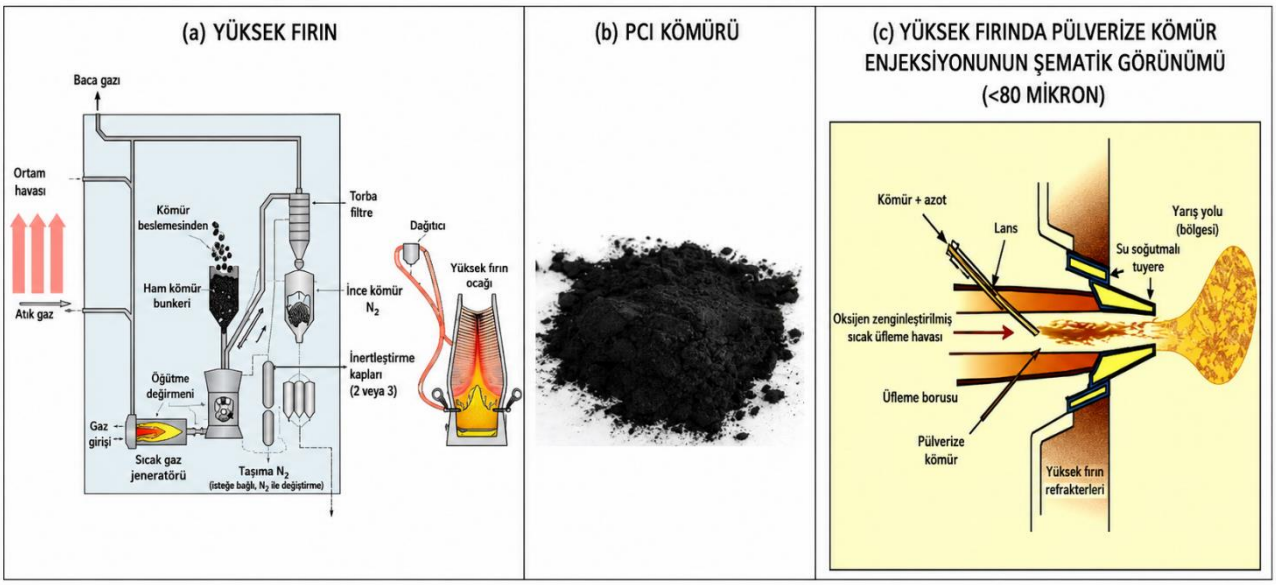


Şekil 4. a) Yüksek fırın girdi/çıktıları, b) Demir içeren şarj malzemeleri, c) Metalurjik koklaşabilir kömür (Geerdes ve diğerleri, 2015; Chaigneau ve Wise 2009).



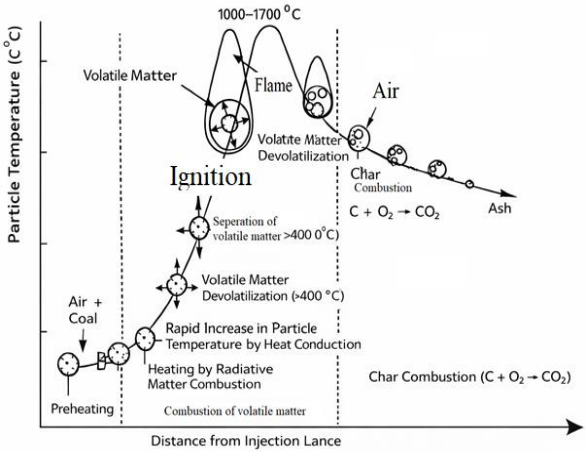
Şekil 5. Yüksek fırın girdileri, çıktıları ve nihai ürünler.

Şekil 4 ve Şekil 5'te görüldüğü gibi, yüksek fırınla demir üretimi, entegre bir üretim sistemi içerisinde demir içeren malzemeler, kok ve yardımcı yakıtları kapsamaktadır. EAF yolundan farklı olarak (Maki ve diğerleri, 1996), bu proses kok ve PCI kullanımıyla kimyasal indirgemeye dayanmaktadır; sistem konfigürasyonu Şekil 6'da gösterilmiştir.

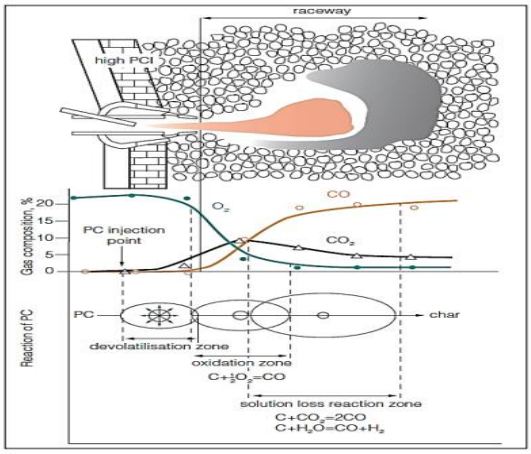


Şekil 6. Yüksek fırınlarda pulverize kömür enjeksiyonu (PCI): (a) PCI hazırlama ve besleme sistemi, (b) öğütülmüş PCI kömürü (<80 µm), (c) tuyere bölgesinden yüksek fırına PCI enjeksiyonunun şematik gösterimi.

Şekil 6, fırın yapısı, ince kömür öğütme ve tüyer enjeksiyonu dahil olmak üzere PCI destekli yüksek fırın çalışmasını gösterirken, Şekil 7 kömürün yakıt ve indirgeyici ajan olarak rolünü vurgulamaktadır. Kok, aşağı doğru ilerlerken kuruma, sınırlı reaksiyon ve yapısal destek süreçlerinden geçerek kohezif bölgede geçirgenliği sağlar. Daha yüksek sıcaklıklarda, erimiş fazlarla etkileşime girer ve yanma süreçlerinin Şekil 7 ve Şekil 8'da gösterildiği raceway bölgesine doğru hareket eder.



Şekil 7. Pülverize kömür yanma süreci.



Şekil 8. Raceway (Alev Bölgesi) reaksiyonlarının şematik gösterimi (Mousa 2019).

Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterildiği gibi, enjekte edilen pülverize kömür, raceway (alev bölgesi) içerisinde oksidasyon ve gazlaştırma mekanizmalarıyla hızla uçucu maddelerini salarak reaksiyona girer. Kokun büyük bir kısmı bu bölgede tüketilirken, küçük bir kısmı ocağın alt kısmına ulaşır ve ergimiş demir içinde yavaşça çözünür

(Baran 2019). Genel olarak, PCI destekli yüksek fırın, büyük ölçekli demir üretiminde baskın yol olmaya devam etmekte olup, bu durum şekillerle gösterilmektedir.

5. PCI KÖMÜRÜNÜN MALİYETLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

PCI oranlarının artırılması, kok tüketimini azaltırken yanma yoğunluğunu, fırın verimliliğini ve üretkenliği iyileştirir. Ayrıca, kömür koktan daha ucuz olduğu için enerji maliyetlerini düşürür ve kok fırınları üzerindeki yükü azaltır. Endüstriyel uygulamalar, önemli ekonomik kazanımları doğrulamakta olup, PCI'nin maliyet etkin demir üretimindeki önemini vurgulamaktadır. Ancak, yüksek enjeksiyon oranlarında performansın korunabilmesi için kömür kalitesinin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir.

Tablo 11'de görüldüğü gibi, nem ve kül sınırlandırılmış olup, sabit karbon, uçucu madde, kükürt ve alkaliler, stabil çalışmayı sağlamak ve cüruf ile refrakter sorunlarını önlemek amacıyla kontrol edilmektedir. Bu kriterler, PCI kömürü seçiminin maliyetin yanı sıra sıkı teknik gerekliliklere de bağlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 11. ERDEMİR–İSDEMİR A.Ş.'de Kullanılan Pülverize Kömürün Özellikleri

Özellik	Değer (%)	Standart Yöntem
Nem	8% max	ASTM D2961–93
Kül	11% max	ASTM D3174–93
Sabit Karbon	53% min	ASTM D3172–89 (1993)
Uçucu Madde	30–36%	ASTM D3175–89a (1993)
Kükürt	0.50% max	ASTM D4239–94
Külde K_2O	1.40% max	ASTM D4326–94
Külde Na_2O	0.40% max	ASTM D4326–94
Külde Toplam Alkali	1.8% max	ASTM D4326–94
Külde Al_2O_3	27% max	ASTM D4326–94
Külde P	0.40% max	ASTM D4326–94
O_2 Miktarı	10% max	ASTM D3176–89
Işık Geçirgenliği (bitümlü kömürlere uygulanır)	90% min	ASTM D5263–92

6. AKTİF KARBON ÜRETİMİ

Aktif karbon, oldukça gelişmiş gözenekli bir yapıya ve geniş bir iç yüzey alanına sahip, karbonca zengin bir malzeme olup, bu özellikleri onun güçlü adsorpsiyon kapasitesini belirlemektedir. Gaz ve sıvı fazlarından kirleticilerin uzaklaştırılmasında yaygın olarak

kullanılmaktadır. IUPAC sınıflandırmasına göre gözenekler, mikrogözenekler (<2 nm), mezogözenekler (2–50 nm) ve makrogözenekler (>50 nm) olarak ayrılmakta olup, mikrogözenekler toplam yüzey alanının yaklaşık %95'ini oluşturmakta ve adsorpsiyonda baskın rol oynamaktadır. Odun, kömür, turba, hindistan cevizi kabuğu ve tarımsal atıklar gibi çeşitli düşük maliyetli karbonlu öncüllerden üretilebilir. Hammaddenin karbon içeriği, mineral madde miktarı ve yapısal özellikleri gibi nitelikleri, nihai ürünün gözenek yapısını ve adsorpsiyon performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bunlar arasında kömür, bulunabilirliği ve mekanik dayanımı nedeniyle yaygın olarak tercih edilmekte olup, artan çevresel kısıtlamalar altında doğrudan yakmaya alternatif olarak aktif karbon üretiminde kullanımı önem kazanmıştır (Döngel 1997, Demir ve Elbinsoy 2019). Aktif karbon, ticari olarak Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterildiği gibi yığın, peletlenmiş, granül ve toz halinde olmak üzere çeşitli formlarda üretilmektedir.

Şekil 9. Yığın, pelet ve toz aktif karbon.

Şekil 10. Toksik gaz filtrelerinde kullanılan kömür bazlı aktif karbon.

Şekil 11'de görüldüğü gibi, parçacık morfolojisi ve boyut dağılımı, üretim yöntemine ve uygulamaya göre değişmekte olup, Şekil 12, kömür bazlı aktif karbonun, iyi gelişmiş mikrogözenekli yapısı sayesinde gaz maskeleri ve endüstriyel filtrelerde toksik gazların etkin bir şekilde uzaklaştırılmasındaki kritik rolünü vurgulamaktadır. Toz aktif karbon (PAC) tipik olarak kesikli proseslerde kullanılırken, granül aktif karbon (GAC) mekanik dayanımı nedeniyle sabit yataklı sistemlerde tercih edilmektedir. Üretim süreci; hazırlama, granülasyon, karbonizasyon (500–600 °C) ve aktivasyonu (900–950 °C) kapsamakta olup, bu aşamalarda gözenek yapısı ve yüzey alanı kademeli olarak geliştirilmektedir.

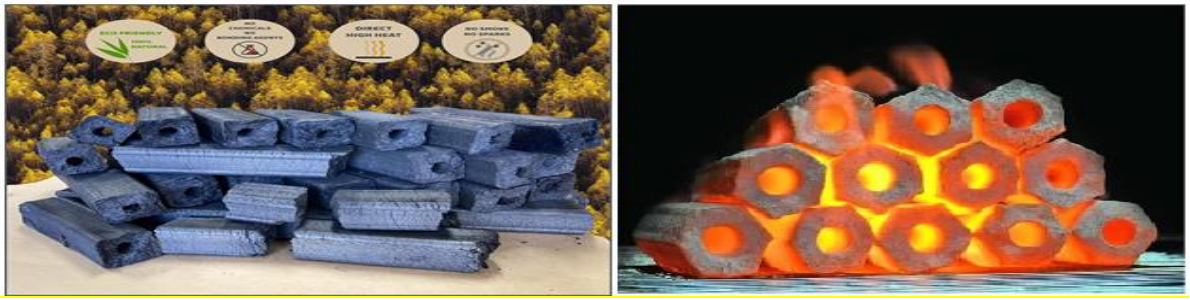
Küresel aktif karbon pazarının değeri yaklaşık 4,7 milyar USD olup, Türkiye yıllık yaklaşık 6.000 ton tüketimde bulunmakta, bu tüketim ağırlıklı olarak su arıtmada gerçekleşmektedir. Sınırlı yerli üretim, ithalatı azaltmak ve ihracatı desteklemek için kömür bazlı alternatiflerin güçlü bir potansiyel sunduğunu göstermektedir. Temel kalite parametreleri arasında yüzey alanı, iyot sayısı, kül, nem ve tane boyutu yer almaktadır. Bu çalışmada, yüksek kaliteli GAC (iyot sayısı ≥900 mg/g; yüzey alanı 1000–1600 m^2/g) hedeflenmekte olup, sonuçlar zenginleştirilmiş TTK Armutçuk kömürünün 1250–2500 m^2/g aralığında BET yüzey alanlarına ulaşabileceğini ve bunun yüksek adsorpsiyon performansına işaret ettiğini göstermektedir.

7. MANGAL KÖMÜRÜ ÜRETİMİ

Odun, geleneksel katı yakıtlara kıyasla hızlı tutuşma, daha düşük hava ihtiyacı (kömür için 15–17 m^3/kg'a karşılık 7–9 m^3/kg) ve nispeten düşük kül içeriği (~%5) gibi olumlu yanma özellikleri sergilemektedir. Kalorifik değeri, nem, yoğunluk ve ekstraktif madde içeriği gibi faktörlere bağlı olup, yüksek nem ısıtma verimini düşürmektedir. Fırında kurutulmuş orman atıkları tipik olarak 3000–4500 kcal/kg aralığındadır.

Kömür ve biyokütle kalıntıları gibi karbonize malzemeler, bağlayıcılar ve kontrollü nem (%8–25) kullanılarak briketleme yoluyla çeşitli şekillerde yoğunlaştırılabilir. Bu işlem; kırma, karıştırma, sıkıştırma ve kurutmayı kapsamakta olup, bağlayıcı türü ve nem içeriği, ürün kalitesini ve yanma performansını kritik ölçüde etkilemektedir.

Armutçuk kömürü, külün %9–10'un altına düşürülecek şekilde zenginleştirildiğinde, duman çıkarmayan mangal kömürü üretimi için güçlü bir potansiyel göstermektedir. Karbonize biyokütle (örneğin; fındık kabuğu, zeytin ve kayısı çekirdeği) ile birlikte briketlenebilir; bu durum Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Kömür bazlı dumansız mangal kömürü.

8. SONUÇLAR

Armutçuk kömürleri, Türkiye'de PCI, dökümhane katkı maddeleri, aktif karbon ve dumansız mangal kömürü gibi yüksek katma değerli uygulamalara uygun özelliklere sahip nadir bir yerli kaynaktır. PCI ve dökümhane proseslerinde kullanımları yerleşik olmakla birlikte, aktif karbon ve mangal kömürü üretimindeki potansiyelleri yeterince değerlendirilmemektedir. Bu potansiyelin etkin bir şekilde değerlendirilmesi, ekonomik ömrünü tamamlamış olan mevcut hazırlama tesisinin modernizasyonunu gerektirmektedir.

Küresel ölçekte sınırlı bulunabilirlikleri göz önüne alındığında, Armutçuk kömürleri yalnızca enerji kaynağı olarak değil, stratejik endüstriyel hammaddeler olarak değerlendirilmelidir. PCI uygulamalarında, kontrol altındaki koşullarda 115 kg/thm'ye varan enjeksiyon oranlarıyla pahalı kokun kısmi ikamesini sağlarlar. Kül, kükürt ve yanma verimliliği gibi temel operasyonel zorluklar, proses optimizasyonu ile hafifletilebilir; böylece stabil fırın performansı ve iyileştirilmiş metalurjik verimlilik elde edilebilir.

KAYNAKLAR

Baran, F, (2022) "Dökümhanelerde kullanılan kalıp ve maça kumları kaynaklı döküm hataları ve önlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 79 s.

Chaigneau, T. V. R., & Wise, J. (2009). "Modern Blast Furnace Ironmaking".

Demir, U and Elbinsoy S. (2019). "Investigation of the Usability of High Sulfur Coal in Activated Carbon"

Didari, V Oskan M and Barış K (2015). "TTK Armutçuk Müessesesi Büyük damar gaz içeriğinin doğrudan ölçme yöntemiyle belirlenmesi" Bilimsel Madencilik Dergisi, Cilt 54, sayı 2, s.3-12.

Dike, Ö.S., (2008). "Pulverize kömür enjeksiyonu kullanımının yüksek fırın çalışmasına etkileri". Yüksek Lisans Tezi, Cukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 74 s. Adana.

Döngel, B (1997). "Zonguldak kömürlerinden aktif karbon üretimi", Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak, 76 p.

Geerdes, M., Chaigneau, R., Kurunov, I., (2015). "Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction" (Third Edition, 2015). IOS Press.

Kwaśniewska-Królikowska, D., & Holtzer, M. (2013). "Selection criteria of lustrous carbon carriers in the aspect of properties of greensand system". Metalurgija, 52(1), 62-64.

Maki, A., Sakai, A., Takagaki, N., Mori, K., Ariyama, T., Sato, M., & Murai, R. (1996). "High rate coal injection of 218 kg/t at Fukuyama No. 4 blast furnace". ISIJ international, 36(6), 650-657.

Mousa, E. (2019). "Modern blast furnace ironmaking technology: potentials to meet the demand of high hot metal production and lower energy consumption". Metallurgical and Materials Engineering, 25(2), 69-104.

Öztürk, M (2014). "Taşkömürü Havzası Damar Gaz İçerikleri Tespit Çalışmaları", Zonguldak Türkiye Taşkömürü Kurumu İş Sağlığı Güvenliği ve Eğitim Daire Başkanlığı, 71.

TTK (2021). "Türkiye Taşkömürü Kurumu 2021 yılı Faaliyet Raporu"

TTK (2024). "Türkiye Taşkömürü Kurumu 2024 yılı Faaliyet Raporu"

ZONGULDAK VE SOMA HAVZASI KÖMÜR ATIKLARININ RGB TABANLI NTE ANALİZİ

RGB IMAGE-BASED DETERMINATION OF RARE EARTH ELEMENTS IN COAL WASTES FROM THE ZONGULDAK AND SOMA COAL BASINS

Banu BÜYÜKDEĞİRMENCİ*
Türkiye Taşkömürü Kurumu, 67100, Zonguldak, TÜRKİYE

Mehmet BİLEN
Zonguldak Bülent Ecevit University, Engineering Faculty, Department of Mining Engineering, İncivez, 67100, Zonguldak, Turkiye

ÖZET Kömür atıkları, içerdiği nadir toprak elementleri (NTE) nedeniyle önemli bir ikincil hammadde kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, Zonguldak ve Soma havzalarından temin edilen kömür atıklarının NTE içerikleri X-ışını floresans (XRF) yöntemiyle belirlenmiş ve görüntü işleme tabanlı RGB analizleri kullanılarak NTE potansiyellerinin hızlı bir şekilde tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. Numunelerin standart laboratuvar koşullarında elde edilen görüntülerinden kırmızı (R), yeşil (G) ve mavi (B) renk parametreleri hesaplanmış ve kimyasal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, özellikle Ce, La, Nd ve Gd elementlerinin yüksek konsantrasyonlarda bulunduğunu ve RGB parametreleri ile NTE içerikleri arasında anlamlı eğilimler olduğunu göstermiştir. Elde edilen bulgular, RGB tabanlı görüntü analizinin kömür atıklarının NTE potansiyelinin belirlenmesinde hızlı, düşük maliyetli ve tahribatsız bir ön değerlendirme yöntemi olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

ABSTRACT Coal wastes have attracted increasing attention as potential secondary resources due to their rare earth element (REE) content. In this study, the REE concentrations of coal waste samples collected from the Zonguldak and Soma coal basins were determined by X-ray fluorescence (XRF), and the applicability of RGB image analysis for rapid prediction of REE potential was investigated. High-resolution digital images of the samples were acquired under standardized laboratory conditions, and red (R), green (G), and blue (B) color parameters were extracted and compared with the chemical analysis results. The findings revealed relatively high concentrations of Ce, La, Nd, and Gd, together with noticeable relationships between RGB parameters and REE contents. The results demonstrate that RGB image analysis can serve as a rapid, low-cost, and non-destructive preliminary screening tool for evaluating the rare earth element potential of coal wastes.

* *banu.buyukdegirmenci@taskomuru.gov.tr*

1. GİRİŞ

Nadir toprak elementleri (NTE) doğal kaynakları, elementlerin bulunduğu oluşum şekline göre birincil ve ikincil kaynaklar olarak sınıflandırılmaktadır. Günümüzde küresel NTE üretiminin büyük bölümü, bastnazit, monazit ve ksenotim gibi ekonomik değeri yüksek cevher minerallerinden sağlanırken, özellikle ağır nadir toprak elementleri bakımından zengin iyon adsorpsiyonlu killer de stratejik öneme sahip birincil kaynaklar arasında yer almaktadır. Artan teknolojik gelişmeler ve temiz enerji uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte NTE'lere olan talep hızla artmakta; kalıcı mıknatıslar, bataryalar, katalizörler, elektronik cihazlar ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi yüksek teknoloji uygulamalarında vazgeçilmez hammaddeler olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, birincil kaynakların sürdürülebilir şekilde değerlendirilmesinin yanı sıra alternatif kaynakların araştırılmasını da giderek daha önemli hâle getirmektedir.

1.1 Birincil Kaynaklar

1.1.1 Bastnazit

Bastnazit ($(Ce,La)CO_3F$), yüksek nadir toprak oksidi içeriği ve nispeten kolay işlenebilir yapısı sayesinde hafif nadir toprak elementlerinin en önemli birincil cevher minerallerinden biridir. Başta seryum (Ce) ve lantan (La) olmak üzere hafif nadir toprak elementlerince zengin olan bu mineral, günümüzde küresel nadir toprak üretiminin önemli bir bölümünü karşılamakta olup, en büyük ekonomik rezervleri Çin ve Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunmaktadır. Bastnazit çoğunlukla karbonatit kökenli yataklar ile ilişkili olarak oluşmakta, ayrıca pegmatitler ve hidrotermal damar sistemlerinde de gözlenmektedir. Monazitin aksine belirgin miktarda uranyum ve toryum içermemesi, bastnaziti çevresel ve radyolojik açıdan daha avantajlı hâle getirmekte ve nadir toprak elementlerinin üretiminde en yaygın tercih edilen cevherlerden biri olmasını sağlamaktadır.

1.1.2 Monazit

Monazit ($(Ce,La,Nd,Th)PO_4$), hafif nadir toprak elementleri bakımından zengin olmakla birlikte belirli oranlarda ağır nadir toprak elementlerini de içeren önemli bir fosfat mineralidir. Ancak yapısındaki toryum ve uranyum gibi radyoaktif elementler, madencilik, zenginleştirme ve işleme süreçlerinde çevresel ve teknik açıdan ilave önlemler gerektirmektedir. Monazit genellikle kıyı kumları, alüvyonel birikintiler ve ağır mineral kumları içerisinde bulunmakta, çoğu zaman ilmenit, rutil ve zirkon gibi minerallerin üretimi sırasında yan ürün olarak geri kazanılmaktadır. İşlenmesindeki zorluklara rağmen, içerdiği yüksek nadir toprak elementi konsantrasyonu nedeniyle monazit, küresel nadir toprak tedarikinde stratejik önemini koruyan başlıca doğal kaynaklardan biri olarak kabul edilmektedir.

1.1.3 Ksenotim

Ksenotim (YPO_4), yaklaşık %70 nadir toprak oksidi (NTO) içeriğiyle özellikle ağır nadir toprak elementleri (HNTE) bakımından zengin olan önemli bir fosfat mineralidir. Ağır nadir toprak elementlerinin başlıca doğal kaynaklarından biri olarak kabul edilen ksenotim, kristalin magmatik kayaçlar, granitler ve pegmatitlerle ilişkili yataklarda bulunmakta; Brezilya gibi ülkelerde ağır mineral kumlarının işletilmesi sırasında çoğunlukla monazit ile birlikte yan ürün olarak geri kazanılmaktadır. Ancak, yüksek ekonomik değerine rağmen ksenotimin monazitten ayrılması ve zenginleştirilmesine yönelik çalışmalar sınırlı olup, flotasyon ve manyetik ayırma gibi yöntemlerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bu nedenle ksenotim, ağır nadir toprak elementlerinin sürdürülebilir temini açısından önemli bir potansiyele sahip stratejik bir mineral olarak değerlendirilmektedir.

1.2 İkincil Kaynaklar

Birincil nadir toprak elementi (NTE) rezervlerinin sınırlı olması, ekonomik ve çevresel kısıtların artması nedeniyle ikincil kaynaklardan geri kazanım giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Endüstriyel atıklar, üretim artıkları ve kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerden NTE geri kazanımı, hem arz güvenliğinin sağlanmasına hem de madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, ikincil kaynakların değerlendirilmesi sürdürülebilir kaynak yönetimi ve döngüsel ekonomi yaklaşımının önemli bir bileşeni olarak görülmektedir.

1.2.1 Kalıcı Mıknatıslar

Kalıcı mıknatıslar, içerdiği yüksek nadir toprak elementi (NTE) konsantrasyonları nedeniyle en önemli ikincil NTE kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle neodimyum-demir-bor (Nd-Fe-B) esaslı mıknatıslar, yüksek manyetik enerji yoğunlukları sayesinde sabit disk sürücüleri, elektrik motorları, rüzgâr türbinleri, hibrit ve elektrikli araçlar ile çok sayıda elektronik cihazda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu mıknatısların temel yapısını $Nd_2Fe_{14}B$ fazı oluştururken, neodimyum başta olmak üzere praseodimyum (Pr), disprozyum (Dy) ve terbiyum (Tb) gibi kritik nadir toprak elementlerini de içermektedir. Kullanım ömrünü tamamlamış elektronik ekipmanlar ile mıknatıs üretiminden kaynaklanan proses artıkları, önemli miktarda NTE barındırdığından geri kazanım açısından yüksek potansiyel sunmaktadır. Bu nedenle, farklı boyut ve kullanım alanlarına sahip mıknatıs atıkları, içerik ve fiziksel özelliklerine uygun mekanik, pirometalurjik veya hidrometalurjik yöntemlerle değerlendirilerek kritik hammaddelerin sürdürülebilir geri kazanımına önemli katkı sağlamaktadır.

1.2.2 Kömür Külü

Kömür ve kömür yanma kalıntıları, nadir toprak elementleri (NTE) bakımından önemli ikincil kaynaklar arasında değerlendirilmektedir. Kömürün yakılması sonucunda

oluşan uçucu kül ve taban külü içerisinde NTE'ler, özellikle uçucu kül fazında zenginleşme eğilimi göstermekte ve bu durum kömür külünü geri kazanım açısından değerli bir hammadde hâline getirmektedir. Literatürde, bazı kömür külü örneklerinde toplam NTE oksit içeriğinin %1,85'e kadar ulaştığı bildirilmiş olup, bu tenörler bazı düşük tenörlü birincil NTE yataklarıyla karşılaştırılabilecek seviyededir. Bunun yanında, dünya genelinde yılda yaklaşık 800 milyon ton kömür külü oluştuğu ve büyük miktarlarda külün depolama sahalarında biriktiği göz önüne alındığında, bu atıkların yalnızca çevresel bir sorun değil, aynı zamanda kritik hammaddelerin sürdürülebilir temini açısından önemli bir kaynak olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle kömür külünden NTE geri kazanımına yönelik çalışmalar, hem atıkların katma değere dönüştürülmesi hem de birincil cevherlere olan bağımlılığın azaltılması bakımından giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

1.2.3 Floresan Lambalar

Floresan lambalar, düşük enerji tüketimi ve uzun hizmet ömürleri nedeniyle uzun yıllar boyunca yaygın olarak kullanılan aydınlatma sistemleri arasında yer almıştır. Bu lambalar, büyük oranda cam, metal bileşenler ve iç yüzeyini kaplayan fosfor tabakasından oluşmakta olup, kullanım ömrünü tamamladıktan sonra önemli bir ikincil hammadde kaynağı oluşturmaktadır. Öğütme ve fiziksel ayırma işlemleri sonrasında elde edilen fosfor tozu, başta itriyum (Y), europiyum (Eu), terbiyum (Tb), seryum (Ce) ve lantan (La) olmak üzere çeşitli nadir toprak elementlerini içeren değerli bir fraksiyondur. Bu fosfor fazı, doğrudan yeni aydınlatma ürünlerinin üretiminde yeniden kullanılabildiği gibi, hidrometalurjik geri kazanım yöntemleriyle içerdiği nadir toprak elementlerinin ayrıştırılmasına da olanak sağlamaktadır. Bu nedenle kullanım ömrünü tamamlamış floresan lambalar, hem atık yönetimi hem de kritik hammaddelerin sürdürülebilir temini açısından önemli bir ikincil kaynak olarak değerlendirilmektedir.

1.2.4 Nikel–Metal Hidrit Bataryalar

Nikel–metal hidrit (NiMH) bataryalar, hidrojen depolayabilen metal alaşımlı anot ve nikel oksihidroksit katottan oluşan, yüksek enerji yoğunluğu ve NiCd bataryalara göre daha yüksek kapasite sunan enerji depolama sistemleridir. Bu özellikleri sayesinde hibrit araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır. NiMH bataryaların anot alaşımlarında başta lantan (La), seryum (Ce), neodimyum (Nd), praseodimyum (Pr) ve itriyum (Y) olmak üzere hafif nadir toprak elementlerinden oluşan "miş metal" tercih edilmekte olup, kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların yaklaşık üçte birini bu alaşım oluşturmaktadır. Bu nedenle atık NiMH bataryalar, nadir toprak elementleri bakımından önemli bir ikincil kaynak olarak değerlendirilmekte ve uygun geri kazanım yöntemleriyle hem ekonomik değer oluşturma hem de birincil kaynaklara olan bağımlılığı azaltma potansiyeli taşımaktadır.

2. İKİNCİL KAYNAKLARDAN NTE GERİ KAZANIMI

Kömür ve kömürden elde edilen yan ürünler, özellikle uçucu kül ve taban külü, uzun yıllardır nadir toprak elementleri (NTE) açısından önemli ikincil kaynaklar olarak değerlendirilmektedir. Kömürleşme sürecinde çevre kayaçlardan taşınan mineraller bünyeye dahil olmakta, zenginleştirme ve özellikle yanma işlemleri sonrasında ise NTE'ler kül fazında daha yüksek oranlarda yoğunlaşabilmektedir. Bu durum, kömür atıklarını yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir atık olmaktan çıkararak, kritik hammaddelerin geri kazanımı açısından stratejik bir kaynak haline getirmektedir. Literatürde, bazı kömür külü örneklerinde toplam NTE oksit içeriklerinin %1 seviyesine ulaştığı, hatta belirli jeolojik koşullarda bu değerlerin daha da yükselebildiği bildirilmektedir. Söz konusu tenörler, bazı düşük tenörlü birincil NTE cevherleriyle karşılaştırılabilecek düzeyde olup, kömür atıklarının ekonomik geri kazanım potansiyelini ortaya koymaktadır.

NTE'lerin kömür yanma kalıntılarından etkin şekilde geri kazanılabilmesi, elementlerin kül içerisindeki bağlanma biçimleri ile uygulanan proses koşullarına doğrudan bağlıdır. Özellikle uçucu külde yoğunlaşan NTE'lerin ekstraksiyonunda kavurma–liç kombinasyonları, kullanılan liç reaktifi, asit derişimi, sıcaklık ve tane boyutu gibi parametreler süreç verimini belirleyen temel faktörlerdir. Birincil NTE yataklarının sınırlı olduğu veya arz güvenliği açısından risk taşıdığı ülkelerde, kömür külü başta olmak üzere endüstriyel atıklar, kırmızı çamur, fosfojips, metalurjik artıklar ve kullanım ömrünü tamamlamış mıknatıslar gibi ikincil kaynaklara yönelik çalışmalar giderek önem kazanmaktadır. Bu kapsamda yürütülen araştırmalar, hem mevcut hidrometalurjik yöntemlerin optimize edilmesine hem de yeni geri kazanım teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanmakta; böylece çevresel yükün azaltılmasıyla birlikte ekonomik değeri yüksek kritik hammaddelerin sürdürülebilir şekilde geri kazanılması hedeflenmektedir.

Tablo 1. İkincil REE kaynakları ve geri kazanım yöntemleri

İkincil Kaynak	**REE İçeriği**	**Başlıca Ekstraksiyon Yöntemi**	**Geri Kazanım (%)**
Apatit kaya	0,1–1 wt.%	H_3PO_4, hemihidrat, HNO_3/HCl	20–85
Fosfojips	0,3–0,4 wt.%	H_2SO_4 liçi, $(NH_4)_2CO_3$ prosesi	~50
Kırmızı çamur	0,05–0,17 wt.%	Fiziksel zenginleştirme + liç, doğrudan liç	20–90
Floresan lamba fosforu	10–28 wt.%	Ardışık liç	Değişken
SmCo mıknatısları	23–33 wt.%	Tam çözündürme	70–100
NdFeB mıknatısları	26,7 wt.%	Tam/Seçici çözündürme	96–100

3. KÖMÜR VE KÖMÜR YAN ÜRÜNLERININ NADIR TOPRAK ELEMENTI KAYNAĞI OLARAK DEĞERLENDIRILMESI

Kömür ve kömürün işlenmesi ile enerji üretimi sırasında oluşan uçucu kül, taban külü, gazifikasyon curufu ve zenginleştirme atıkları, nadir toprak elementleri (NTE) bakımından önemli bir ikincil kaynak olarak değerlendirilmektedir. Yanma sırasında organik maddenin uzaklaşmasıyla birlikte kömür bünyesinde bulunan NTE'ler kül fazında yoğunlaşmakta ve özellikle uçucu külde daha yüksek konsantrasyonlara ulaşabilmektedir. Ağır nadir toprak elementleri bakımından zengin bazı kömür ve yan ürünleri, ekonomik açıdan dikkat çekici bir potansiyel sunarken, artan küresel talep ve birincil rezervlerin sınırlı olması bu kaynaklara olan ilgiyi artırmaktadır. Bu nedenle son yıllarda, kömür kaynaklı atıklarda NTE dağılımının belirlenmesi ve uygun geri kazanım yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar önemli ölçüde hız kazanmıştır (Aktar, 2024).

Kömür külünde bulunan NTE'lerin mineralojik dağılımı, geri kazanım süreçlerinin başarısını doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Bu elementler çoğunlukla aluminosilikatlar, silikatlar, feldispatlar, fosfatlar, karbonatlar ve demir oksit fazları ile ilişkili olarak bulunmakta; yanma sıcaklığına bağlı olarak farklı mineral fazlarında yeniden dağılım göstermektedir. Araştırmalar, özellikle ince taneli uçucu kül fraksiyonlarında NTE konsantrasyonlarının daha yüksek olduğunu ve bazı kömür külü örneklerinde toplam NTE içeriklerinin düşük tenörlü birincil cevherlerle karşılaştırılabilecek seviyelere ulaştığını ortaya koymaktadır. Ayrıca cam fazları ile fosfat minerallerinin NTE'lerin tutulmasında önemli rol oynadığı, bu nedenle külün mineralojik yapısının ayrıntılı olarak belirlenmesinin uygun zenginleştirme ve ekstraksiyon yöntemlerinin seçimi açısından kritik olduğu bildirilmektedir (Fu vd., 2022; Aktar, 2024).

Kömür yanma atıklarından NTE geri kazanımı, yalnızca ekonomik açıdan değil, çevresel sürdürülebilirlik bakımından da önemli avantajlar sunmaktadır. Büyük miktarlarda depolanan uçucu külün değerlendirilmesi, hem atık miktarının azaltılmasına hem de yeni maden işletmelerine olan ihtiyacın sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, NTE'lerin kül içerisinde farklı mineral fazlarına bağlı bulunması ve birbirine oldukça benzer kimyasal özellikler göstermesi, geri kazanım süreçlerini teknik açıdan zorlaştırmaktadır. Bu nedenle seçici liç, çözücü ekstraksiyonu ve diğer hidrometalurjik yöntemlerin geliştirilmesi, kömür külünün sürdürülebilir bir NTE kaynağı olarak değerlendirilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Kömür ve kömür yan ürünlerinin mevcut atık stoklarından elde edilebilmesi, ilave madencilik faaliyetlerine duyulan gereksinimi azaltarak döngüsel ekonomi yaklaşımına da önemli katkılar sağlamaktadır (Aktar, 2024).

4. MALZEME ve YÖNTEM

4.1. Numune Toplama ve Hazırlama

Bu çalışmada, Türkiye'nin iki önemli kömür havzası olan Zonguldak ve Soma'dan temin edilen kömür atıkları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kömür zenginleştirme atıkları ile kömür yanma küllerinden oluşan toplam 74 numune değerlendirilmiştir. Numuneler temsil edici şekilde farklı atık noktalarından alınmış, laboratuvara taşındıktan sonra oda sıcaklığında kurutulmuş ve homojen hale getirilmiştir. Görüntü analizlerinde yüzey farklılıklarının etkisini azaltmak amacıyla tüm numuneler −106 +90 µm tane boyutuna sınıflandırılmıştır.

4.2. Nadir Toprak Elementi Analizleri

Hazırlanan numunelerin nadir toprak elementi (NTE) içerikleri X-Işını Floresans (XRF) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen toplam NTE konsantrasyonları, görüntü işleme sonuçlarının değerlendirilmesinde referans veri olarak kullanılmıştır.

4.3. RGB Tabanlı Görüntü Analizi

Görüntü analizleri, tüm numuneler için standartlaştırılmış laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Her numuneden 15 g alınarak sabit hacimli numune kaplarına yerleştirilmiş ve yüzey düzgünlüğünü sağlamak amacıyla mekanik olarak sıkıştırılmıştır. Numunelerin görüntüleri, dış ortam ışığından tamamen izole edilmiş kapalı bir görüntüleme düzeneğinde yüksek çözünürlüklü dijital mikroskop kullanılarak elde edilmiştir. Böylece tüm görüntüler aynı aydınlatma ve kamera koşullarında kaydedilerek ölçümlerin tekrarlanabilirliği sağlanmıştır.

Elde edilen görüntüler Image Color Summarizer yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve her numune için Kırmızı (R), Yeşil (G) ve Mavi (B) renk kanallarına ait ortalama piksel değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra bu RGB parametreleri ile XRF analizlerinden elde edilen NTE içerikleri arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve kömür atıklarında nadir toprak elementi potansiyelinin RGB tabanlı görüntü işleme yöntemiyle belirlenebilirliği araştırılmıştır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Zonguldak ve Soma havzalarından temin edilen kömür atıklarının nadir toprak elementi (NTE) içerikleri XRF analizleri ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar RGB tabanlı görüntü analizleri ile karşılaştırılmıştır. Analizler, incelenen numunelerin NTE içeriklerinin önemli farklılıklar gösterdiğini ve bazı elementlerin belirgin şekilde zenginleştiğini ortaya koymuştur. Tablo 2'de kömür atıklarında belirlenen başlıca nadir toprak elementlerinin konsantrasyon aralıkları sunulmaktadır.

Sonuçlar incelendiğinde, özellikle hafif nadir toprak elementlerinin (LREE) ağır nadir toprak elementlerine (HREE) kıyasla daha yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu görülmektedir. En yüksek konsantrasyon Ce, Gd, Nd ve La elementlerinde belirlenmiş olup, bu durum kömürün oluşum koşulları, mineralojik bileşimi ve zenginleştirme süreçlerinden kaynaklanan jeokimyasal farklılıklarla ilişkilendirilebilir. Elde edilen bulgular, Zonguldak ve Soma havzalarındaki kömür atıklarının nadir toprak elementleri bakımından önemli bir ikincil kaynak potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Kömür atıklarında belirlenen başlıca nadir toprak elementlerinin konsantrasyon aralıkları.

Element	Minimum (mg/kg)	Maksimum (mg/kg)
Ce	338,64	4169,30
Gd	203,07	2390,03
Nd	171,55	1643,90
La	142,92	1567,94
Sc	71,02	1365,55
Sm	73,98	1035,38
Pr	52,27	509,29
Dy	46,42	400,21
Er	36,28	320,03
Tb	32,23	286,81

Tablo 2 incelendiğinde, en yüksek konsantrasyonun seryum (Ce) elementinde olduğu görülmektedir. Ce içeriği 338,64–4169,30 mg/kg arasında değişirken, bunu sırasıyla gadolinyum (203,07–2390,03 mg/kg), neodimyum (171,55–1643,90 mg/kg) ve lantan (142,92–1567,94 mg/kg) izlemektedir. Skandiyumun da bazı numunelerde 1365,55 mg/kg seviyesine ulaşması, kömür atıklarının yalnızca klasik LREE elementleri açısından değil, kritik elementler bakımından da önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. NTE içeriklerindeki geniş değişim aralığı, havzalar arasındaki jeolojik farklılıkların ve mineral dağılımının kömür atıklarının kimyasal bileşimini doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Numunelerin yüksek çözünürlüklü görüntüleri standart laboratuvar koşullarında elde edilmiş ve RGB renk uzayında analiz edilmiştir. Görüntülerden hesaplanan kırmızı (R), yeşil (G) ve mavi (B) renk kanallarına ait değerler, XRF analizleri ile belirlenen NTE içerikleriyle birlikte değerlendirilmiştir. RGB tabanlı analizlerden elde edilen temel bulgular Tablo 3'te özetlenmektedir. Sonuçlar, özellikle kırmızı (R) renk kanalının NTE konsantrasyonlarındaki değişimleri diğer renk bileşenlerine kıyasla daha belirgin şekilde yansıttığını göstermiştir. Ayrıca, NTE bakımından zengin numunelerde gri tonlardan daha açık, sarımsı ve kırmızımsı tonlara doğru sistematik bir renk değişimi

gözlenmiştir. Bu bulgular, kömür atıklarının yüzey renk özellikleri ile mineralojik bileşimleri arasında anlamlı bir ilişki bulunduğunu ortaya koymakta ve RGB tabanlı görüntü analizinin yüksek NTE potansiyeline sahip numunelerin hızlı, düşük maliyetli ve tahribatsız bir ön değerlendirme yöntemi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 3. RGB tabanlı NTE analizinin genel değerlendirmesi

Parametre	Bulgular	Değerlendirme
NTE dağılımı	Numuneler arasında belirgin farklılıklar belirlenmiştir.	Jeolojik yapı ve mineralojik bileşim etkilidir.
Baskın NTE'ler	Ce, Gd, Nd, La ve Sc yüksek konsantrasyonlarda belirlenmiştir.	Kömür atıkları önemli bir ikincil NTE kaynağıdır.
RGB analizi	RGB değerlerinde belirgin değişimler gözlenmiştir.	Renk parametreleri mineralojik farklılıkları yansıtmaktadır.
RGB–NTE ilişkisi	Özellikle R kanalında daha güçlü bir eğilim belirlenmiştir.	RGB verileri NTE tahmini için kullanılabilir.
Yöntemin uygulanabilirliği	RGB sonuçları kimyasal analizlerle uyumlu eğilim göstermektedir.	Hızlı ve düşük maliyetli ön tarama yöntemi sunmaktadır.

Tablo 3'de özetlendiği üzere, RGB görüntü analizleri ile kimyasal analizler arasında uyumlu eğilimler belirlenmiştir. Özellikle kırmızı renk kanalındaki değişimler ile yüksek NTE içerikleri arasında dikkat çekici bir ilişki gözlenmiş, yeşil ve mavi kanalların ise mineralojik farklılıkları destekleyici nitelikte olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, görüntü işleme yöntemlerinin yalnızca görsel bir değerlendirme aracı olmadığını, aynı zamanda kömür atıklarının jeokimyasal özelliklerinin tahmininde kullanılabilecek alternatif bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışma sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, Zonguldak ve Soma havzalarındaki kömür atıklarının önemli miktarda nadir toprak elementi içerdiği ve bu atıkların ikincil hammadde kaynağı olarak değerlendirilebileceği anlaşılmaktadır. RGB tabanlı görüntü analizi ise laboratuvar tabanlı XRF analizlerine göre çok daha kısa sürede sonuç verebilmesi, düşük maliyetli olması ve numuneye zarar vermemesi nedeniyle ön eleme çalışmaları açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yöntemin daha geniş veri setleri ile desteklenmesi ve makine öğrenmesi tabanlı tahmin modelleri ile entegre edilmesi durumunda, kömür atıklarının NTE potansiyelinin hızlı sınıflandırılmasında etkin bir karar destek sistemi olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Böylece hem analiz maliyetlerinin azaltılması hem de NTE bakımından zengin atıkların daha verimli şekilde belirlenmesi mümkün olacaktır.

6. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, Zonguldak ve Soma havzalarından elde edilen kömür atıklarının nadir toprak elementi (NTE) içerikleri XRF analizleri ile belirlenmiş ve RGB tabanlı görüntü analizi yöntemi kullanılarak NTE dağılımlarının hızlı bir şekilde tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kömür atıklarının özellikle Ce, La, Nd ve Gd gibi elementler bakımından önemli bir ikincil kaynak potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. RGB analizleri ise numunelerin renk parametreleri ile NTE içerikleri

arasında anlamlı eğilimler bulunduğunu ortaya koymuş ve görüntü işleme yöntemlerinin kömür atıklarının ön değerlendirilmesinde hızlı, düşük maliyetli ve tahribatsız bir yaklaşım olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Gelecekte daha geniş veri setleri ve yapay zekâ tabanlı modelleme çalışmalarıyla desteklenmesi halinde, RGB tabanlı analiz yönteminin NTE potansiyelinin belirlenmesinde güvenilir bir karar destek aracı olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

Büyüktanır Aktar, K. (2024) Investigation of rare earths extraction potential from various solid fossil fuel wastes. PhD Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mining Engineering, Ankara, 163 p.

Fu, B., Hower, J. C., Zhang, W., Luo, G., Hu, H., and Yao, H. (2022) A review of rare earth elements and yttrium in coal ash: Content, modes of occurrences, combustion behavior, and extraction methods. Progress in Energy and Combustion Science, 88: 100954.

Talan, D., Huang, Q. (2020) Separation of thorium, uranium, and rare earths from a strip solution generated from coarse coal refuse. Hydrometallurgy, 197: 105446.

Talan, D., Huang, Q. (2022) A review of environmental aspect of rare earth element extraction processes and solution purification techniques. Minerals Engineering, 179: 107430.

Sarı, A., Attar, A.F., Akkaya, P. (2015) Dodurga (Çorum) Sahasi Kömürlerinde Nadir Toprak Element (Nte) Zenginleşmelerinin İncelenmesi, 68. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 6-10 Nisan 2015, Ankara, Türkiye, 356-357.

Seredin, V.V., Dai, S. (2012) Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. International Journal of Coal Geology, 94: 67-93.

Tanaydın, M.K. (2021) Hidrometalurjik Yöntemlerle Nadir Toprak Elementlerinin Kazanılması, International Journal of Pure and Applied Sciences, 7 (I2): 288-304.

2014-2024 YILLARI ARASINDA MEYDANA GELEN KÖMÜR MADENCİLİĞİ İŞ KAZALARININ ÖRGÜTSEL SOSYOLOJİ AÇISINDAN ANALİZİ

AN ANALYSIS OF COAL MINING OCCUPATIONAL ACCIDENTS BETWEEN 2014 AND 2024 FROM THE PERSPECTIVE OF ORGANIZATIONAL SOCIOLOGY

Fatih Zere
Maden Mühendisi / Sosyolog

ÖZET Yapılan çalışmada, 2014-2024 yılları arasında Türkiye genelinde ve özellikle Sosyal Güvenlik Kurumu kayıtlarında Kömür ve Linyit çıkartılması kodu altında yer alan işyerlerinde yaşanan iş kazaları ve iş kazası sonucu meydana gelen ölümler, örgütsel sosyoloji perspektifinden boylamsal olarak incelenmektedir. Kazalar ekseriyetle bireysel işçi kusurlarına veya kaçınılmaz teknik arızalara indirgenirken; yapılan çalışmada Sosyal Güvenlik Kurumu resmi verileri üzerinden örgütsel ölçek, kurumsal yapı ve güvenlik kültürü dinamikleri analiz edilmektedir. Tablo 2, Tablo 3 ve kömür madenciliğine özel Tablo 1'te yer alan verilerin çapraz analizi, örgütsel sosyolojideki "Ölçek Paradoksu"nu ve sektörel risk yoğunlaşmasını çarpıcı biçimde ortaya koymaktadır: Türkiye genelinde kaza sıklığı büyük ölçekli örgütlerde %9,73 ile zirve yaparken, kömür madenciliği sektörü tek başına 2024 yılı için 37.447 işçide 12.592 kaza ile %33,62'lik şok edici bir iş kazası oranına ulaşmıştır. Çalışmada, "sapmanın normalleşmesi" ve "normal kazalar teorisi" çerçevesinde, kömür madenlerindeki kurumsal yapıların, rödovans sisteminin ve dikey hiyerarşinin güvenlik iklimini nasıl dönüştürdüğü güncel literatür verileriyle tartışılmakta ve sistemsel çözüm önerileri sunulmaktadır.
Anahtar Kelimeler: Örgütsel Sosyoloji, Güvenlik Kültürü, Kömür Madenciliği, Örgütsel Ölçek, Sapmanın Normalleşmesi, Normal Kazalar Teorisi.

ABSTRACT This study longitudinally examines—from an organizational sociology perspective—workplace accidents and resulting fatalities across Turkey between 2014 and 2024, specifically focusing on workplaces classified under the "coal and lignite extraction" code in Social Security Institution records. While accidents are frequently attributed to individual worker errors or unavoidable technical failures, this study analyzes dynamics such as organizational scale, institutional structure, and safety culture using official Social Security Institution data. A cross-analysis of the data presented in Tables 2 and 3, as well as Table 1 (specific to coal mining), strikingly illustrates the "Scale Paradox" and the concentration of sectoral risk found in organizational sociology: whereas the accident frequency across Turkey peaks at 9.73% in large-scale organizations, the coal mining sector alone reached a shocking accident rate of 33.62% in 2024, with 12,592 accidents occurring among 37,447 workers. Drawing on the frameworks of the "normalization of deviance" and "normal accident theory," the study discusses—using current literature—how institutional structures, the royalty (sub-leasing) system, and vertical hierarchies in coal mines transform the safety climate, and it offers proposals for systemic solutions.

Keywords: Organizational Sociology, Safety Culture, Coal Mining Accidents, Organizational Scale, Normalization of Deviance, Normal Accidents Theory.

fatihzere@hotmail.com

1. GİRİŞ

Türkiye'de endüstriyel büyüme ve enerji politikalarının merkezinde yer alan kömür madenciliği sektörü, insan maliyeti açısından en ağır bedellerin ödendiği çalışma alanıdır. SGK verilerine göre 2014 Soma felaketinden bu yana geçen 11 yıllık süreçte, kömür madenciliği iş kolunda yüz binlerce iş kazası ve yüzlerce can kaybı kayıtlara geçmiş; 2024 yılı itibarıyla sektördeki iş kazası oranı %33,6'lık şok edici bir seviyeye ulaşmıştır. Türkiye genelindeki en riskli büyük ölçekli işletmelerde dahi kaza oranı %9,7 seviyelerinde seyrederken, kömür madenciliğinin bu oranın yaklaşık 3,5 katı oranında kronik kaza üretmesi, sorunun münferit ihmallerden ziyade kurumsal bir çöküşe işaret ettiğini göstermektedir. Yapılan çalışma, söz konusu vahim tablonun arka planındaki örgütsel sosyoloji dinamiklerini boylamsal olarak ortaya koyarak literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

Kömür madenciliği sektörü (NACE 05: Kömür ve Linyit Çıkartılması), jeolojik belirsizlikler, yer altı gaz birikimleri ve dinamik üretim hatları nedeniyle sosyo-teknik sistemler içinde en yüksek risk ve yapısal tehlikeleri barındıran alandır. Ağır endüstriyel sektörlerin iskeletini oluşturan bu iş kolu, doğası gereği yüksek düzeyde emek-yoğun ve tehlikeli operasyonel süreçleri içermektedir. Türkiye endüstri tarihinde derin izler bırakan ve kitlesel can kayıplarıyla sonuçlanan büyük maden felaketleri (Soma, Ermenek ve Amasra maden kazaları), egemen söylemlerde genellikle "anlık işçi dikkatsizliği" gibi indirgemeci ve öznel kavramlarla rasyonalize edilmektedir. Oysa endüstriyel sosyoloji ve örgüt kuramları literatürü, bu kazaların anlık teknik arızalardan ziyade yapısal asimetriler, kâr odaklı üretim baskıları, taşeronlaşma (rödovans) zincirleri ve işletme ölçeğinin ürettiği sistemik zafiyetlerden kaynaklandığını ampirik kanıtlarla ortaya koymaktadır (Perrow, 1984).

İş kazaları ve buna bağlı can kayıpları, salt birer mühendislik veya operasyonel performans başarısızlığı olarak görülemez. Örgütler, ekonomik rasyonaliteyi ve üretim kotalarını iş güvenliği prosedürlerinin önüne koydukları ölçüde kendi iç işleyişlerinde kurumsal bir körlük ve sistemik risk alanı üretirler (Hopkins, 2006). Kömür madenlerindeki dikey hiyerarşi derinleştikçe ve çalışan sayısı arttıkça, en alt kademedeki sahadan üst yönetim kademesine akması gereken hayati risk sinyalleri bürokratik bariyerlere takılmakta ve örgüt kendi ürettiği tehlikeye karşı körleşmektedir (Child, 1973). 2014 yılındaki 301 maden işçisinin ölümüyle sonuçlanan Soma maden kazasından günümüze kadar geçen süreç, idari teftişlerin gevşemesi ve kurumsal gevşeme pratiklerinin riskli davranışları zamanla nasıl "normalleştirdiğini" boylamsal olarak göstermektedir.

2. TEORİK ÇERÇEVE: KARMAŞIKLIK, SIKI BAĞLAR VE KÖMÜR MADENLERİNDE RİSK BİRİKİMİ

Örgütsel sosyoloji ve emniyet yönetimi literatüründe yüksek risk barındıran sosyo-teknik sistemlerin analizi ve kazaların sistemsel kökenleri iki temel kuramsal yaklaşım üzerinden yürütülmektedir:

2.1. Normal Kazalar Teorisi (Charles Perrow)

Charles Perrow (1984) tarafından geliştirilen Normal Kazalar Teorisi (*Normal Accidents Theory - NAT*), sosyo-teknik sistemlerin iki temel boyutu olan "interaktif karmaşıklık" ve "sıkı bağlılık" kavramlarına dayanır. Karmaşıklık, sistem içindeki birden fazla parçanın veya alt sürecin öngörülemeyen, görünmeyen veya doğrusal olmayan şekillerde etkileşime girmesini ifade eder. Sıkı bağlılık ise sistem parçaları arasında zaman esnekliğinin bulunmaması, süreçlerin hızlı ilerlemesi ve bir aşamadaki hatanın diğer aşamalara gecikmesiz olarak yansıması durumudur (Höpfl, 2006).

Perrow'a göre, hem yüksek derecede karmaşık hem de sıkı sıkıya bağlı sistemlerde kazalar kaçınılmazdır; yani sistemin yapısı gereği "normal" ve beklenen bir sonuçtur. Yeraltı kömür madenleri bu iki parametreyi bünyesinde en yoğun barındıran endüstriyel alanların başında gelir. Yeraltı kömür madenciliği; havalandırma, gaz izleme sensörleri, enerji nakil hatları, konveyör bant sistemleri gibi birbiriyle doğrudan ilişkili alt sistemlerden oluşur. Bu şekilde birbirine bağlı sistemlerde bir alt birimde meydana gelen operasyonel sapma veya iletişim kopukluğu doğrusal olmayan bir hızla kitlesel felaketleri tetikler.

NAT yaklaşımı, kazaların sorumluluğunu sahada çalışan işçilerin anlık "insan hatasına" veya operasyonel dikkatsizliğine indirgeyen öznel yaklaşımları reddeder. Bunun yerine riskin, örgütün tasarımında, yönetsel kararlarında ve sistemin yapısal mimarisinde önceden "kodlanmış" olduğunu savunur (Reason, 1997).

2.2. Yüksek Güvenilirlik Teorisi (HRO)

Normal Kazalar Teorisi'nin karamsar ve determinist "kaçınılmazlık" öngörüsüne bir tepki olarak gelişen Yüksek Güvenilirlik Teorisi (*High Reliability Theory - HRO*), karmaşık ve yüksek riskli teknolojik sistemlerin dahi doğru örgütsel tasarım ve güvenlik kültürü ile uzun süreler boyunca kaza yapmadan çalıştırılabileceğini ileri sürer (La Porte & Consolini, 1991; Roberts, 1990).

HRO okulu (Weick & Sutcliffe, 2007), yüksek güvenilirlik sergileyen örgütlerin beş temel ilkeye dayandığını belirtir:

1. **Başarısızlık/Hata Odaklılık:** En küçük sapmaları bile büyük bir felaketin öncülü kabul ederek sürekli teyakkuzda olmak.
2. **Basitleştirmeye Direnç:** Karmaşık riskleri basit ve indirgemeci gerekçelerle açıklamaktan kaçınmak.
3. **Operasyonlara Duyarlılık:** Sahadaki gerçek işleyişi ve anlık riskleri yönetim düzeyinde kesintisiz izlemek.
4. **Esnek Dayanıklılık:** Beklenmedik bir kriz veya sapma anında sistemi hızla toparlama ve uyum sağlama kapasitesi.
5. **Uzmanlığa Saygı ve Yetki Devri:** Acil durum ve risk anlarında karar alma yetkisinin katı hiyerarşik üstlerden ziyade, sahadaki en deneyimli uzmana/işçiye devredilmesi.

Ancak endüstriyel sosyoloji ve çalışma ekonomisi literatürü; kömür madenlerindeki piyasa koşullarının, rödovans sisteminin, katı kâr marjı baskısının ve dikey hiyerarşik güç ilişkilerinin örgütleri HRO ilkelerinden hızla uzaklaştırdığını ortaya koymaktadır (Cam, 2012; Quinlan, 2014). Kömür madenciliğinde ekonomik rasyonalitenin ve üretim kotalarının güvenlik prosedürlerinin önüne geçmesi, örgütleri HRO'nun esnek ve teyakkuz halindeki yapısından çıkarıp, Perrow'un bahsettiği kırılgan, kurumsal körlük yaşayan ve sistemik risk biriktiren yapılara dönüştürmektedir.

3. ÖRGÜTSEL ÖLÇEK VE KÖMÜR MADENCİLİĞİNDEKİ "HİPER-RİSK" YOĞUNLAŞMASI

Resmi veriler (Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3), 11 yıllık boylamsal süreçte örgütsel sosyolojide "Ölçek Paradoksu" ve "Sektörel Yoğunlaşma" olarak adlandırılan yapısal gerçekliği ampirik olarak gözler önüne sermektedir. Blau (1970)'ya göre işletme büyüklüğünün hiyerarşik derinliği artırarak kurumsal körlüğe yol açtığı bilinmektedir.

Tablo 1. 2014-2024 yılları arası kömür madenciliği (05-Kömür ve Linyit Çıkartılması) sektöründe toplam sigortalı, iş kazası geçiren sigortalı ve ölen sigortalı sayıları (SGK, 2014-2024)

Yıl	Sigortalı sayısı	İş kazası geçiren sigortalı	Kaza oranı (Yüzde)	İş kazası sonucu ölen sigortalı	Kaza oranı (on binde)
2014	41.058	10026	24,419	335	81,592
2015	40.508	7429	18,34	26	6,418
2016	34.582	8274	23,926	11	3,181
2017	37.596	8468	22,524	31	8,246
2018	35.953	8399	23,361	11	3,06
2019	36.436	8983	24,654	13	3,568
2020	36.442	8460	23,215	21	5,763
2021	38.349	11104	28,955	10	2,608
2022	42.985	12839	29,869	54	12,563
2023	40.334	13199	32,724	17	4,215
2024	37.447	12592	33,626	20	5,341

Kömür madenciliği sektörü, Türkiye genelindeki en riskli çalışma alanı arasında bulunmakta olup kurumsal yapıdaki bir işletmenin bile yaklaşık 3,5 katı oranında kronik kaza ürettiği eldeki verilerle görülmektedir.

Tablo 2. İş yerindeki çalışan sayısı ile yıllara göre sigortalı sayısı ve iş kazası geçiren sigortalı sayıları bunların yüzde oranları (SGK, 2014-2024)

		Çalışan sayısı			Toplam
		Küçük ölçekli işletme (1-49)	Orta ölçekli işletme (50-249)	Büyük ölçekli işletme (250-1000+)	
2024	İş kazası geçiren sigortalı	166799	220415	346432	733646
	Sigortalı sayısı	9.504.371	3.538.825	3.559.672	16.602.868
	Yüzde oranı	1,755	6,228	9,732	4,419
2023	İş kazası geçiren sigortalı	156841	206878	317682	681401
	Sigortalı sayısı	9.318.166	3.549.853	3.538.401	16.406.420
	Yüzde oranı	1,683	5,828	8,978	4,153
2022	İş kazası geçiren sigortalı	141538	178346	268939	588823
	Sigortalı sayısı	9.737.837	3.802.685	3.792.469	17.332.991
	Yüzde oranı	1,453	4,690	7,091	3,397
2021	İş kazası geçiren sigortalı	131148	155565	224371	511084
	Sigortalı sayısı	9.149.998	3.534.372	3.485.309	16.169.679
	Yüzde oranı	1,433	4,401	6,438	3,161
2020	İş kazası geçiren sigortalı	99641	119219	165402	384262
	Sigortalı sayısı	8.618.871	3.294.545	3.290.007	15.203.423
	Yüzde oranı	1,156	3,619	5,027	2,527
2019	İş kazası geçiren sigortalı	105592	129037	187834	422463
	Sigortalı sayısı	8.211.153	3.207.919	2.895.241	14.314.313
	Yüzde oranı	1,286	4,022	6,488	2,951
2018	İş kazası geçiren sigortalı	107861	127463	195661	430985
	Sigortalı sayısı	8.277.908	3.152.394	2.798.868	14.229.170
	Yüzde oranı	1,303	4,043	6,991	3,029
2017	İş kazası geçiren sigortalı	93283	109238	157132	359653
	Sigortalı sayısı	8.572.666	3.205.434	2.699.717	14.477.817
	Yüzde oranı	1,088	3,408	5,820	2,484
2016	İş kazası geçiren sigortalı	87318	94942	103808	286068
	Sigortalı sayısı	7.886.811	2.945.336	2.583.696	13.415.843
	Yüzde oranı	1,107	3,223	4,018	2,132
2015	İş kazası geçiren sigortalı	72051	79696	89800	241547
	Sigortalı sayısı	8.249.992	3.102.926	2.646.480	13.999.398
	Yüzde oranı	0,873	2,568	3,393	1,725
2014	İş kazası geçiren sigortalı	70471	71519	79376	221366
	Sigortalı sayısı	8.034.098	2.917.611	2.288.413	13.240.122
	Yüzde oranı	0,877	2,451	3,469	1,672

Tablo 3. İş yerindeki çalışan sayısı ile yıllara göre sigortalı sayısı ve iş kazası sonucu ölen sigortalı sayıları bunların on binde oranları (SGK, 2014-2024)

		Çalışan sayısı			Toplam
		Küçük ölçekli işletme (1-49)	Orta ölçekli işletme (50-249)	Büyük ölçekli işletme (250-1000+)	
2024	İş kazası sonucu ölen sigortalı	1024	501	372	1897
	Sigortalı sayısı	9.504.371	3.538.825	3.559.672	16.602.868
	On binde oranı	1,077	1,416	1,045	1,143
2023	İş kazası sonucu ölen sigortalı	1107	503	356	1966
	Sigortalı sayısı	9.318.166	3.549.853	3.538.401	16.406.420
	On binde oranı	1,188	1,417	1,006	1,198
2022	İş kazası sonucu ölen sigortalı	871	367	279	1517
	Sigortalı sayısı	9.737.837	3.802.685	3.792.469	17.332.991
	On binde oranı	0,894	0,965	0,736	0,875
2021	İş kazası sonucu ölen sigortalı	798	349	235	1382
	Sigortalı sayısı	9.149.998	3.534.372	3.485.309	16.169.679
	On binde oranı	0,872	0,987	0,674	0,855
2020	İş kazası sonucu ölen sigortalı	704	326	201	1231
	Sigortalı sayısı	8.618.871	3.294.545	3.290.007	15.203.423
	On binde oranı	0,817	0,990	0,611	0,810
2019	İş kazası sonucu ölen sigortalı	651	293	203	1147
	Sigortalı sayısı	8.211.153	3.207.919	2.895.241	14.314.313
	On binde oranı	0,793	0,913	0,701	0,801
2018	İş kazası sonucu ölen sigortalı	859	384	298	1541
	Sigortalı sayısı	8.277.908	3.152.394	2.798.868	14.229.170
	On binde oranı	1,038	1,218	1,065	1,083
2017	İş kazası sonucu ölen sigortalı	905	434	294	1633
	Sigortalı sayısı	8.572.666	3.205.434	2.699.717	14.477.817
	On binde oranı	1,056	1,354	1,089	1,128
2016	İş kazası sonucu ölen sigortalı	855	368	182	1405
	Sigortalı sayısı	7.886.811	2.945.336	2.583.696	13.415.843
	On binde oranı	1,084	1,249	0,704	1,047
2015	İş kazası sonucu ölen sigortalı	762	288	202	1252
	Sigortalı sayısı	8.249.992	3.102.926	2.646.480	13.999.398
	On binde oranı	0,924	0,928	0,763	0,894
2014	İş kazası sonucu ölen sigortalı	830	358	438	1626
	Sigortalı sayısı	8.034.098	2.917.611	2.288.413	13.240.122
	On binde oranı	1,033	1,227	1,914	1,228

Tablo 2 ve Tablo 3'nin birlikte çapraz analizi, Türkiye'deki iş güvenliği mimarisinde çarpıcı bir ikiliği ortaya koymaktadır: Kaza frekansı (yaralanma ve operasyonel aksaklıklar) örgütsel hiyerarşinin ve bürokrasinin en derin olduğu büyük ölçekli işletmelerde (%9,73) yoğunlaşırken; ölümcül sonuçlar (mortalite) ise kurumsal altyapısı yetersiz ve sendikal korumadan yoksun orta ölçekli işletmelerde (on binde 1,416) kümelenmektedir. Bu dinamik, ölçek büyüklüğünün kazayı önlemede tek başına yeterli bir parametre olmadığını ampirik olarak kanıtlamaktadır.

3.1. Kömür Madenciliğinde İstihdam Genişlemesi ve Kaza Yoğunlaşması

Tablo 1 verileri incelendiğinde, Türkiye'de kömür madenciliği işkolunda istihdam edilen işçi sayısının 2014'te 41.058 iken, 2024'te 37.447'ye gerilediği, yani sektörel istihdamın daraldığı görülmektedir (SGK, 2014-2024). Ancak aynı zaman diliminde iş kazası geçiren sigortalı sayısı 10.026'dan 12.592'ye fırlamıştır (SGK, 2014-2024). Dolayısıyla eldeki veriler boylamsal olarak incelendiğinde, madencilik sektöründeki işçi sayısının azalmasına rağmen kaza frekansının artması zıt yönlü ilişki göstermektedir.

3.1.1. Boylamsal Eğilim

Soma maden kazasının (2014) hemen ardından alınan idari tedbirlerle kaza sayısı 2015 yılında 7.429'a (%18,3) gerilemişken; takip eden yıllarda kaza sayısı 2021'de 11.104'e (%28,9), 2023'te 13.199'a (%32,7) ve 2024 yılında ise 12.592'ye ulaşmıştır (SGK, 2014-2024).

3.1.2. Ölüm Oranı

Buna karşılık Tablo 3 incelendiğinde, aynı gruptaki on binde ölüm oranı Soma maden kazasının yaşandığı 2014 yılını kapsam dışı bırakacak olursak 2015 yılında 0,763 iken, 2024 yılında 1,045'e yükselmiştir (SGK, 2014-2024).

3.1.3. Sosyolojik Yorum

2024 yılı itibarıyla kömür madenciliğindeki iş kazası oranı %33,62'dir (SGK, 2014-2024). Tablo 2'de Türkiye genelindeki en riskli kurumsal yapı olan büyük ölçekli işletmelerin (250+ çalışan) kaza oranı %9,73 iken, kömür madenciliğinin %33,62 kaza oranına sahip olması, bu sektörde çalışan her 3 işçiden 1'inin her yıl iş kazasına uğradığını gösterir. Bu durum, sektörün rasyonel bir İSG yönetiminden tamamen uzaklaştığını kanıtlamaktadır.

3.2. Ölüm Verilerindeki Kronik Dalgalanma ve "Sürekli Teyakkuz" Zafiyeti

Tablo 1'deki ölüm verileri, kömür madenciliğinin Perrow'un (1984) bahsettiği "karmaşık ve ani kırılan" yapısını tam anlamıyla doğrulamaktadır.

3.2.1. Mortalite Zirvesi

Soma maden felaketinin yaşandığı 2014 yılında 335 kömür madencisi hayatını kaybetmiştir (SGK, 2014-2024). Bu vaka, kömür madenlerinde çalışan her 4 işçiden 1'inin (%24,4) iş kazası geçirdiği dehşet verici bir kurumsal sistemik çöküşün kanıtıdır.

3.2.2. HRO İlkelerinin Çöküşü

Soma kazası sonrası teftişlerin sıkılaşmasıyla 2016'da ölüm sayısı 11'e kadar düşürülmüştür (SGK, 2014-2024). Ancak Yüksek Güvenilirlik Teorisi'nin (HRO) vurguladığı "sürekli teyakkuz" halinin sürdürülememesi nedeniyle ölüm sayıları yeniden tırmanışa geçmiş; Amasra maden kazasının da etkisiyle 2022 yılında 54 ölüm ile yeniden kritik eşiği aşmıştır (SGK, 2014-2024).

3.3. Genel Ölçek ve Kömür Madenciliği Verisinin Çapraz Okuması

Tablo 3'e göre Türkiye genelinde kaza başına ölüm riski, orta ölçekli (50-249 çalışan) kurumsal yapılarda (on binde 1,416) yoğunlaşmaktadır (SGK, 2014-2024). Bu yapılar, madencilik işkolundaki rödovanslı ve sendikasız ara yapıları temsil etmektedir (Cam, 2012). Koruyucu kurumsal kalkanın ve sendikal güvencenin olmadığı bu ara ölçekli özel madenlerde, yaşanan yapısal kazalar doğrudan ölümle sonuçlanmaktadır (Quinlan, 2014). Tablo 1'e bakıldığında ise kömür madenciliği sektörünün on binde ölüm oranı 2024 yılı için 5,34'tür (20 ölüm / 37.447 işçi) (SGK, 2014-2024). Bu çaprazlama, kömür madenciliğindeki ölüm hızının, Türkiye genelindeki en tehlikeli işletme ölçeğinden bile yaklaşık 3,8 kat daha ölümcül olduğunu nesnel olarak ortaya koymaktadır.

4. GÜVENLİK KÜLTÜRÜ VE KÖMÜR MADENLERİNDE "SAPMANIN NORMALLEŞMESİ"

Örgütsel yapının iskeletini çalışan sayıları belirlerken, o iskelete yönetsel ruhunu veren unsur "güvenlik kültürü"dür. Kural ve mevzuatların resmi olarak varlığı tek başına yeterli değildir. Personelin bu kuralları günlük pratiklerinde nasıl içselleştirdiği önem taşır.

4.1. Sapmanın Normalleşmesi

Sosyolog Diane Vaughan (1996), kurallara aykırı riskli bir davranış örgüt içinde ilk yapıldığında felaketle sonuçlanmazsa, bu sapmanın zamanla sistem tarafından "rutin ve tehlikesiz" kabul edilmeye başlandığını belirtir. Tablo 2'de büyük ölçekli işletmelerdeki kaza oranının sürekli katlanarak %9,73'e ulaşması, riskli çalışma pratiklerinin ve İSG ihlallerinin kurumsal yapılar tarafından zamanla nasıl kanıksandığını ve normalleştiğini sosyolojik olarak açıklamaktadır.

Kömür madenlerinde ise metan gazı değerleri uyarı sınırını aşsa dahi üretimin durdurulmaması ve bunun "kömür çıkarmanın doğal bir parçası" olarak kanıksanması, sapmanın kültürel olarak normalleşmesidir.

4.2. Kültürel Yabancılaşma ve Bürokratik Ritüeller

Kömür madenlerinde ölçek büyüdükçe güvenlik kültürü "bürokratikleşmektedir" (Reason, 1997). Güvenlik kültürü işlevsel bir koruma değeri olmaktan çıkıp, sadece idari cezalardan kaçınmak için yürütülen bürokratik birer ritüele (Mış gibi yapmak) dönüştüğünde, sistemik felaket kaçınılmaz hale gelir (Glendon & McKenna, 2006).

5. GÜÇ İLİŞKİLERİ, RÖDOVANS VE SESSİZLİK SARMALI

Örgütsel yapılardaki güç asimetrisi, işçilerin riskler karşısındaki eylemselliğini doğrudan belirler.

5.1. Çalışmaktan Kaçınma Hakkı

İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, işçilere hayati tehlike durumunda çalışmaktan kaçınma hakkı verse de, Sayılar'a (2013) göre bu hak ancak güçlü bir kurumsal koruma veya sendikal güvence altında kullanılabilmektedir.

5.2. Sessizlik Sarmalı

Rödovanslı özel kömür madenlerinde sendikasızlaşma, işçileri sessizlik sarmalına iter (Cam, 2012). Alternatif istihdam kapısı olmaması nedeniyle işçiler işten atılma, yeraltının en kör damarlarına sürülme veya ücret kesintisi korkusuyla hayati riskleri görseler dahi susmayı tercih ederler. Güç hiyerarşisi, tehlikeye karşı mutlak bir itaat ve rıza üretir (Nichols & Suğur, 2005).

6. SONUÇ VE YAPISAL ÖNERİLER

Örgütsel sosyoloji perspektifi ve SGK resmi verileri ışığında yapılan bu çalışma, kömür madenciliğinde yaşanan iş kazaları ve can kayıplarının indirgemeci yaklaşımda iddia edildiği gibi kaçınılmazlık ya da yalnızca işçilerin anlık "dikkat kaybı / kişisel kusuru" olarak değerlendirilemeyeceğini ampirik olarak göstermektedir. 2024 verilerine göre kömür madenciliğinde %33,62'ye ulaşan kaza sıklığı, sektörün rasyonel ve proaktif bir İş Sağlığı ve Güvenliği yönetiminden uzaklaşarak sistemik bir risk birikim alanına dönüştüğünü kanıtlamaktadır. Bu bulgu, tehlikeli iş kollarında kazaların kişisel hatalardan ziyade örgüt içi sistemik ve yapısal bozukluklardan kaynaklandığını savunan Perrow (1984) ve Hopkins (2006) görüşleri ile doğrudan örtüşmektedir.

Elde edilen ampirik bulguların akademik literatürdeki karşılıkları, örtüşme ve çelişme noktaları dikkate alınarak geliştirilen sistemsel öneriler aşağıda başlıklar halinde sunulmaktadır:

6.1. Orta Ölçekli İşletmelere (%1,416 Mortalite Hızı) Özel Yapısal İSG Desteği

İnceleme döneminde Türkiye genelinde kaza başına ölüm oranının orta ölçekli (50-249 çalışan) işletmelerde (on binde 1,416) yoğunlaşması, literatürde Cam (2012) tarafından kavramsallaştırılan "orta ölçekli işletmelerin İSG cenderesi" bulgusuyla tam bir örtüşme göstermektedir. Küçük işletmeler kadar esnek olamayan, ancak büyük işletmelerin sunduğu kurumsal koruyucu kalkan ve güçlü sendikal/teknik altyapıya da sahip olamayan bu "ara ölçekli" yapılar, Quinlan'ın (2014) madencilik kaza modellerinde vurguladığı "kurumsal güvencesizlik ve kaynak yetersizliği" nedeniyle en ölümcül halkayı oluşturmaktadır. Bu "ölümcül bölge" için devlet destekli kurumsal İSG teşvikleri ve sıkı denetim modelleri geliştirilmelidir. Bakanlık düzeyinde hayata geçirilecek olan çapraz ve habersiz denetim mekanizmaları ile Ortak Sağlık ve Güvenlik Birimleri'nin (OSGB) bu ölçekteki firmaları, sahada aktif kontrol etmeleri sağlanmalıdır.

6.2. Büyük Ölçekli Yapılarda (%9,73 Kaza Oranı) Merkezsizleşme

Büyük ölçekli işletmelerde kaza frekansının %9,73'e tırmanması, Blau'nun (1970) "Örgütsel Farklılaşma ve Hiyerarşi" kuramı ile Child'ın (1973) bürokrasi modellerini doğrulayacak niteliktedir. Ancak bu durum, literatürdeki "büyük ölçekli firmaların daha yüksek standarda sahip olduğu için daha güvenli olduğu" yönündeki Klasik İSG Yönetim yaklaşımlarıyla çelişmektedir. Hiyerarşik katmanlar derinleştikçe sahadan gelen risk sinyalleri üst yönetime ulaşamamakta, Reason'ın (1997) ifade ettiği "bürokratik körleşme" ve Reason & Hobbs'un (2003) "sessiz tehlike birikimi" olgusu ortaya çıkmaktadır. Katı ve bürokratik dikey hiyerarşi kırılarak yatay iletişim kanalları açılmalıdır. Risk bildirimlerinin bürokratik engellere takılmadan doğrudan güvenlik komitelerine iletilebildiği merkezsizleşmiş ve otonom İSG birimleri kurulmalıdır.

6.3. Küçük Ölçekli İşletmelerde Kayıt Dışılıkla Mücadele

Küçük ölçekli işletmelerin (1-49 çalışan) kaza oranının (%1,75) düşük görünmesi, ilk bakışta güvenli bir tablo çizse de Walters ve ark.'nın (2011) "kayıt dışılık ve kaza bildiriminden kaçınma" literatürüyle değerlendirildiğinde bunun yapısal bir yanılsama olabileceği görülmektedir. Küçük işletmelerdeki sahte güvenlik algısını yıkmak adına, tüm iş kazası ve yaralanmaların dijital sağlık sistemleri (e-Nabız, hastane otomasyonları vb.) üzerinden SGK ve Bakanlık veri tabanlarına otomatik entegrasyonu sağlanmalıdır.

6.4. Performans ve Ödüllendirme Kriterlerinin Radikal Dönüşümü

Kömür madenciliğinde üretim baskısının güvenlik prosedürlerinin önüne geçmesi, Clarke (2006) ve Dekker'ın (2014) "Güvenlik Yönetimi ve Örgütsel Öncelikler"

araştırmalarıyla doğrudan örtüşmektedir. Üretim tonajına dayalı prim sistemleri, çalışanları ve orta kademe yöneticileri riskli davranışlara itmekte ve sapmayı teşvik etmektedir. Kömür işletmelerinin kurumsal başarı ve prim kriterleri yalnızca çıkarılan kömür tonajı veya ilerleme metrajı üzerinden belirlenmemelidir. Başarı kriterleri; "Sıfır kaza frekansı", "İSG uyum oranı" ve çalışanların ramak kala / tehlike bildirim sıklığı gibi proaktif performans göstergelerine (KPI) endekslenmelidir (Clarke, 2006).

6.5. Kültürel Dönüşüm ve "Psikolojik Güvenlik" Ortamı

SGK verilerinde kaza oranının %18'lerden %33,62'ye tırmanması, Vaughan'ın (1996) "Sapmanın Normalleşmesi" kuramının kömür madenciliğinde somutlaştığını göstermektedir. İhlallerin zamanla "işin doğası" olarak kanıksanması, Edmondson'ın (1999) kavramsallaştırdığı "Psikolojik Güvenlik" ortamının eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Çalışanlar olumsuz bir tepki alma ya da dışlanma korkusuyla güvensiz durumları dile getirememektedir. Saha içindeki güvensiz maço pratiklerinin ve "sapmanın normalleşmesi" süreçlerinin önüne geçilmesi amacıyla psikolojik güvenlik temelli bir örgüt iklimi inşa edilmelidir. Kurallara uymayan kıdemli personelin usta-çırak ilişkisiyle bu güvensiz davranışı yayması engellenmeli, İSG eğitimleri davranışsal sosyolojik simülasyonlarla desteklenmelidir.

6.6. Şeffaf ve Katılımcı Denetim

HRO (Yüksek Güvenilirlik Teorisi) literatürü (Weick & Sutcliffe, 2007), karmaşık ve yüksek riskli sistemlerin ancak dışa açık, sorgulanabilir ve bağımsız denetim mekanizmaları sayesinde esneklik ve güvenlik sağlayabileceğini savunur. Denetim süreçlerinde, sadece kamusal teftişle sınırlı kalınmamalı; meslek odası, ilgili STK'lar ve sendika temsilcilerinin yer aldığı bağımsız, şeffaf ve katılımcı denetim kurulları oluşturulmalı ve aktif rol almasının önü açılmalıdır.

6.7. Kömür Madenlerinde Otonom İşçi Veto Yetkisi (Desantralizasyon)

Perrow'un (1984) Normal Kazalar Teorisi'nde belirttiği "sıkı bağlı ve karmaşık" sistemlerde anlık müdahale yetkisinin olmaması kitlesel felaketleri tetikler. Üst yönetimden ve şirket sermayesinden tamamen bağımsız çalışan, yeraltında hayati bir gaz, havalandırma veya tahkimat riski anında üretimi ve iş akışını anında durdurma yetkisine sahip otonom işçi/uzman komiteleri kurulmalıdır (Hopkins, 2006). Bilgi akışının sansürlenmesini engellemek adına cezalandırılma korkusu barındırmayan anonim dijital risk bildirim altyapıları yasal olarak zorunlu tutulmalıdır (Reason, 1997).

6.8. Rödovans ve Taşeronlaşma Sisteminin Tamamen Tasfiyesi

Rödovans ve alt yüklenici pratikleri, Nichols & Suğur (2005), Cam (2012) ve Quinlan'ın (2014) ampirik çalışmalarında tespit edildiği üzere güvencesizliği artırmakta, maliyet baskısıyla güvenlik harcamalarından tasarruf edilmesine yol

açmakta ve örgüt içi "sessizlik sarmalı" üretmektedir. Üretim sorumluluğunu parçalayarak kurumsal denetimi imkansız hale getiren rödovans (taşeron) uygulamalarına son verilmelidir. Kömür madeni üretimi; İSG altyapısı ve merkezi kurumsal yapıları güçlü firmalar tarafından yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Blau, P. M. (1970). A formal theory of differentiation in organizations. *American Sociological Review*, 35(2), 201-218.

Cam, S. (2012). Subcontracting and occupational health and safety in Turkey. *Labour & Industry*, 22(3), 295-312.

Child, J. (1973). Predicting and understanding organization structure. *Administrative Science Quarterly*, 18(2), 168-185.

Clarke, S. (2006). The contemporary causes of occupational accidents: The role of organizational culture. *Human Relations*, 59(9), 1175-1200.

Dekker, S. (2014). The field guide to understanding 'human error'. Ashgate Publishing.

Edmondson, A. (1999). Psychological safety and learning behavior in work teams. Administrative Science Quarterly, 44(2), 350-383.

Glendon, A. I., & McKenna, E. F. (2006). *Human safety and risk management*. CRC Press.

Höpfl, H. (2006). Post-rationalism and normal accidents. Organization Studies, 27(1), 125-135.

Hopkins, A. (2006). What are we to make of safety culture?. *Safety Science*, 44(7), 583-599.

La Porte, T. R., & Consolini, P. M. (1991). Working in practice but not in theory: Theoretical challenges of "High-Reliability" organizations. Journal of Public Administration Research and Theory, 1(1), 19-48.

Nichols, T., & Suğur, N. (2005). *Global management, local labour: Turkish workers and modern industry*. Palgrave Macmillan.

Perrow, C. (1984). *Normal accidents: Living with high-risk technologies*. Basic Books.

Quinlan, M. (2014). *Ten pathways to death and disaster: Learning from fatal incidents in mines and other high-hazard workplaces*. Federation Press.

Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate.

Reason, J., & Hobbs, A. (2003). Managing maintenance error: A practical guide. Ashgate Publishing.

Roberts, K. H. (1990). Some characteristics of one type of high reliability organization. Organization Science, 1(2), 160-176

Sayılar, Y. (2013). İşyerlerinde güç ilişkileri ve çalışanların çalışmaktan kaçınma hakkı. *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 68(1), 89-114.

SGK (2014-2024), SGK İstatistik Yıllıkları, Sosyal Güvenlik Kurumu (https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/) (05.06.2026)

Vaughan, D. (1996). *The Challenger launch decision: Risks, technology, culture, and deviance at NASA*. University of Chicago Press.

Walters, D., Johnstone, R., Frick, K., Quinlan, M., Baril-Gingras, G., & Thébaud-Mony, A. (2011). Regulating workplace risks: A comparative study of inspection practices in ten countries. Federation Press.

Weick, K. E., & Sutcliffe, K. M. (2007). *Managing the unexpected: Resilient performance in an age of uncertainty*. John Wiley & Sons.

ENERJİ ARZ GÜVENLİĞİNDE KÖMÜRÜN STRATEJİK ÖNEMİ VE YENİLENEBİLİR KAYNAKLAR KARŞISINDAKİ GÜCÜ: UNUTULAN ENERJİ HAVZASI ERGENE (TRAKYA)

THE STRATEGIC IMPORTANCE OF COAL IN ENERGY SUPPLY SECURITY AND ITS STRENGTH AGAINST RENEWABLE RESOURCES: THE FORGOTTEN ENERGY BASIN OF ERGENE (THRACE)

İlker Şengüler, Özcan Koç, Erkan Yaşar ve Eyüp Akgün

EUROGOLG Maden İşletmeleri A.Ş. Maslak Mahallesi Ahi Evran Caddesi Polaris Plaza 22/71 Kat:19 Sarıyer İSTANBUL

ÖZET Bütün Dünya'da ekonomi enerji ile şekillenirken konvansiyonel kaynakların yerini alma savaşları hızla devam ediyor. Çevresel kısıtlamalar bütün platformlarda dile getirilse de, fosil yakıtların enerji üretimindek payı yüzde 80'ler üzerinde seyrediyor. Özellikle ülkemiz yakın çevresinde yaşanan gerilim bu sürece farklı bir boyut kazandıryor. Enerji arz güvenliğinin yeniden tanımlanmasında tedarik zinciri güvenliği ön plana çıkıyor. Bu noktada güvenlik ve sürdürülebilirlik kavramları ile öz kaynaklarımızın başında yer alan kömür varlığımız güçlü bir şekilde yeniden gündeme geliyor.

Bu çalışmada, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine dayalı enerji arz ve talep verileri ile, ülkemizin önemli bir enerji havzası olan Trakya Bölgesi ele alınmıştır. Son yıllarda MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılan sondajlı aramalar ile ortaya çıkarılan kömür varlığımızın, ülkemiz enerji bütünlemesindeki önemi vurgulanmaya çalışılmıştır.

ABSTRACT While the global economy is shaped by energy, the battles to replace conventional resources are rapidly continuing. Although environmental restrictions are voiced on all platforms, the share of fossil fuels in energy production remains above 80%. Tensions in our immediate vicinity, in particular, add a new dimension to this process. Supply chain security is becoming paramount in redefining energy supply security. At this point, the concepts of security and sustainability, along with our coal reserves, which are among our primary resources, are strongly re-emerging.

This study examines the Thrace Region, a significant energy basin in our country, using energy supply and demand data based on International Energy Agency (IEA) figures. The study aims to highlight the importance of our coal reserves, discovered through exploratory drilling by the General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) in recent years, in integrating our country's energy resources.

1. GİRİŞ

Dünya’da enerji üretiminde kömür kullanımının çevresel kısıtlamalar nedeni ile gittikçe azalacağı görüşü hakimdir. İklim zirvelerinde fosil yakıt tüketiminin azaltılması konusunda hedefe kömür oturtulmuş ve bütün önlemler o çerçevede ele alınmıştır. Petrol ve doğalgaz üreten ülkeler sahip oldukları lobi gücü ile en azından mevcut durumlarını koruma pahasına kömürü gözden çıkarma çabasına girmiş olup, iklim zirvelerinde bu konuyu öncelikle gündeme getirmektedirler (Kömür ve Enerji Raporu, 2025).

Uluslararası Enerji Ajansı’nın 2050 projeksiyonunda petrol ve doğalgaz 2025 üretim değerlerini korurken, kömürde %70’e yakın bir düşüş ön görülmektedir. Ancak başta ABD olmak üzere söz konusu çevreler tarafından ileri sürülen gerekçeler ile kömür kullanımının ifade edilen hızla düşmesi mümkün görülmemektedir.

Dünya’da elektrik tüketimi gerek gelişmiş ülkelerde ve gerekse gelişmekte olan ülkelerde yenilenebilir kaynakların sağlayabileceğinden daha hızlı artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından, fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik arz ve talebin 2050'ye kadar izleyeceği muhtemel yolların kapsamlı analizini içeren yıllık Dünya Enerji Görünümü başlıklı raporda önemli bir uyarı ile kömür için görünümün, özellikle önümüzdeki on yıl için, Çin ve Hindistan'dan gelen güncellenmiş elektrik talebi projeksiyonları sonucunda yukarı doğru revize edildiği duyurulmuştur.

Bu küçük bir revizyon gibi görülmekle beraber, 2030'daki kömür tüketiminin artık sadece bir yıl öncesine göre %6 düzeyinde daha yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Bu artışın, Dünya’nın dördüncü büyük kömür kullanan ülkesi Japonya'nın tüketimine eşdeğer bir tüketim eklemek anlamına geldiğini ifade etmek gerekir. IEA, 2030'a kadar kömür tüketiminin 2010'dakinden daha yüksek kalacağına inanmaktadır.

Şaşırtıcı gelişmelerden biri, dünya her şeyden elektrik elde etme çabaları sürerken ve bu konuda projeler geliştirilirken küresel elektrik talebinin her yerde artmasıdır. Benzinli araçların yerini elektrikli araçlar alıyor; gaz kazanları yerine ısı pompaları geliyor ve enerji dönüşümü böyle devam ediyor.

Ancak göz ardı edilemeyecek gerçek şudur; enerji talebi yenilenebilir kaynakların sağlayabileceğinden daha hızlı arttıkça, dünya onu üretmek için zamanla test edilmiş ve halen en güvenilir kaynak olan kömüre yönelmektedir (Ökten, 2026). Kömür, yalnızca bir ülkede son kömür yakıtlı elektrik santrali kapatıldığında anılıyor ve madenin bütün geçmişi basında, çevre felaketi takviyeli fotoğraflar ile halka sunuluyor. İngiltere'de yayımlanan bir yazı ile, Londra'nın yaklaşık 100 mil

kuzeyindeki Ratcliffe-on-Soar'daki son kömür santralinin kapatılarak 142 yıllık kömüre dayalı enerji üretimine son verildiği duyuruldu. Ancak aynı tarihlerde, Asya Kıtasında, yeni kömüre dayalı termik santral projelerinin açılışı gündemde idi.

Ülkemizin toplam kömür varlığı, 2026 yılı itibarıyla 22 milyar ton civarında olup, bunun yaklaşık 19,5 milyar tonu linyit ve bitümlü kömür, kalanı ise taşkömürüdür. Türkiye'nin aktif olarak işletilen başlıca linyit havzaları arasında Manisa-Soma, Kütahya-Tunçbilek, Kütahya-Seyitömer, Muğla-Yatağan, Muğla-Yeniköy, Muğla-Kemerköy, Kahramanmaraş-Elbistan, Ankara-Çayırhan ve Adana-Tufanbeyli yer almaktadır.

Ülkemiz kömür varlığını maalesef yeterli ölçüde kullanamamaktadır. Kahramanmaraş-Elbistan havzasının C, D ve E sektörlerinde yenileme çalışmaları tamamlanamadığından, Konya-Karapınar, Eskişehir-Alpu ve Trakya-Ergene havzalarındaki milyar tonluk kömür kaynakları için çevresel problemleri ortadan kaldırmaya, minimize etmeye ve kamuoyunu ikna etmeye yönelik yeterli çaba sarf edilmediğinden, önemli miktarda dış ödemeler ile karşı karşıya kalmaya devam etmekteyiz.

Ülkemiz için 22 milyar ton civarındaki kömür varlığımızı kullanma konusunda halen fırsat vardır; yeni teknolojiler, yeni uygulamalar kalkınma sürecinde ülkemize 2053 net zero hedefleri doğrultusunda büyük destek sağlayacaktır. Kömürü eskisinden çok daha etkin kullanabilir ve kalkınma sürecinde 2053 net zero hedefimize ulaşabiliriz.

Günümüzde kömür, eskisinden çok daha etkin olarak kullanılma dönemindedir. "Karbon Zirvesi"nde yayımlanan "Dünya Kömür Raporu" kömür gazlaştırma ürünleri başlığı ile çıkmıştır. Kömür gazlaştırma ürünleri; CO2 ve H2 yanında; metanol, amonyak, etanol, propanol, dimetileter, etilen, propilen, asetik asit, aseton, metil etil keton vb kimyasallar kömürün geleceği için yeni bir sayfa açmıştır. Metanol, özellikle fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma ve iklim değişikliğini hafifletme çabaları artmaya devam ederken, çeşitli endüstriyel ve enerji uygulamaları için çok yönlü ve potansiyel olarak sürdürülebilir bir seçenek olarak görülmektedir. Ancak riskleri en aza indirirken faydalarını en üst düzeye çıkarmak için üretim yöntemlerinin, güvenlik protokollerinin ve çevresel etkilerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesinin büyük önem taşıdığı uzmanlar tarafından ifade edilmektedir.

Kömür, biyokütle ve atıkların sentez gazına dönüştürülmesi için özgün gazlaştırıcı geliştirme çalışmalarını yürütmek üzere TÜBİTAK MAM'da "Temiz Enerji Teknolojileri Araştırma Grubu" bulunmaktadır. Gazlaştırma sonucu elde edilen sentez gazından sıvı yakıt, metanol, dimetil eter (DME), olefin vb. değerli

kimyasalların üretimine yönelik fonksiyonel katalizörlerin sentezi, karakterizasyonu ve performans testleri ile proses tasarımı çalışmaları yürütülmektedir.

Ülkemizde termik santralleri besleyen kömürlerin iz elementlerinin incelendiği çalışmada; Çayırhan, Seyitömer, Tunçbilek, Orhaneli, Soma, Yatağan, Yeniköy, Elbistan ve Kangal bölgesi kömürleri ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, kömürlerin çoğunun Cr, Cs, Mo, Ni, Rb, Th, U ve V açısından zenginleştiği yönündedir. Ayrıca çalışmalarında; As, Co, Cu, Ga, Mn, Li, Sc, Sn, Ta, Tl konsantrasyonları ile bazı kömürlerdeki nadir toprak elementlerinin (NTE), dünya kömürlerinde belirlenen limit değerlerin üzerinde olduğu belirtilmektedir (Karayiğit, 2007).

2. HAVZA MADENCİLİĞİ BAĞLAMINDA TRAKYA'YA BAKIŞIN DÜNÜ VE BUGÜNÜ

Trakya bölgesinde belirlenmiş olan linyit rezervlerinin enerji üretiminde kullanılmasının yeraltı suyu açısından değerlendirilmesi amacıyla EİGM, MTA, TKİ, EUAŞ, MİGEM (MAPEG), DSİ ve Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü yetkilileri ve uzmanları ile 2013 yılında bilimsel toplantılar ve teknik arazi gezileri düzenlenmiştir. MTA sondajları ile ortaya çıkarılan yeni linyit rezervleri bağlamında 4 ana linyit bölgesi belirlenmiştir.

O yıllarda söz konusu bölgeler için planlanan santrallerin devreye alınmasının arz güvenliği açısından büyük önem taşıdığı "ETKB Kurumlar Arası İş Birliği Projesi" kapsamında dile getirilmiştir. Bölgenin yüzey ve yeraltı suları, DSİ tarafından yürütülmekte olan projeler dikkate alınarak modern işletme yöntemleri ve gelişmiş yakma teknolojileri ile çevre ile uyumlu bir madencilik anlayışı temelinde "Havza Madenciliği" ile Ergene Havzası kömür rezervlerimizin kullanılmasının gerektiği vurgulanmıştır.

Yapılan çalışmalarda, Ergene havzasında yer alan linyit rezervlerinin bulunduğu alanların yeraltı suyu açısından fakir bölgelerde olduğu ve sulu tarım alanlarına düşmediği bu nedenle kömür madenciliğinin bölgedeki yeraltı suları ve tarım arazilerine olumsuz etkisinin olmayacağı, toplantılara katılan bütün kurumların ortak görüşü olarak değerlendirilmiştir.

Trakya Bölgesinde kurulması planlanan yerli kömüre dayalı termik santrallerin yatırım modelinin görüşülmesi amacıyla Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ) ve Türkiye Kömür Üreticileri Derneği (KÖMÜRDER) iş birliğinde geçtiğimiz yılın ikinci yarısında bir toplantı düzenlenmiştir.

07 Temmuz 2025 tarihinde EÜAŞ İstanbul Kumburgaz Eğitim Merkezi Müdürlüğü tesislerinde gerçekleştirilen toplantıya kömür üretiminde faaliyet gösteren sektörün temsilcileri katılmış olup, 2013 yılında yapılan bir dizi toplantı ve saha çalışmasında da yer alan katılımcılar arasında büyük heyecan yaratmıştır. Toplantının açılış konuşmalarında, her zaman olduğu gibi yerli kaynaklarımızın ilk sırasında yer alan kömürlerimizin termik santrallerde enerjiye dönüştürülmesinin önemi vurgulanmış, kömür potansiyelimizin Dünya'da ilk on ülke arasında olduğunun bir kez daha altı çizilmiştir. Toplantının ilerleyen bölümünde Trakya Bölgesi için kömüre dayalı termik santraller için, havza madenciliği düzleminde karşılıklı görüş alışverişi ile bir yol haritası belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu bölüm EÜAŞ Genel Müdürlüğü tarafından yapılan sunumlar ve değerlendirmeler ile başlamıştır. Sunumda güncel veriler ile yer alan kömür üretim ve tüketim bilgileri tüm katılımcılar tarafından ilgi ile izlenmiştir.

Kömür yatırımlarına verilen finans destekleri konusu ayrı bir bölümde ele alınarak değerlendirilmiş ve Trakya Bölgesinde özellikle çevre konusundaki zorlukların EÜAŞ önderliğinde aşılmasının önemi vurgulanmıştır. Finans konusundaki güçlü EÜAŞ desteğinin, projenin en önemli itici gücü olacağı belirtilmiştir. Katılımcıların ortak kanısı da Elektrik Üretim A.Ş' nin (EÜAŞ) Trakya Bölgesinde kömüre dayalı santral ve havza madenciliği konusunda çok güçlü bir lokomotif olacağı doğrultusunda belirginleşmiştir.

Toplantı sonunda bölgenin büyük kömür üreticilerinin yer aldığı bir komisyon oluşturulmasına ve alt yapı çalışmalarını hızlandırmak yanında kömür tedarik protokolünün detaylandırılmasına karar verilmiştir. Söz konusu komisyonun, sektör-kamu temsilcileri arasındaki iletişimi sağlaması, proje koordinasyonunu yürütmesi ve bu bağlamda belirli aralıklarla toplantılar düzenlemesi kararlaştırılmıştır.

3. ERGENE HAVZASI'NIN (TRAKYA) ÜLKEMİZ ENERJİ BÜTÜNLEMESİNDEKİ YERİ VE ÖNEMİ

Geçmiş yıllarda yapılan araştırmalar, bölgedeki yeraltı kaynaklarımızın yüzey ve yeraltı suları zarar görmeden değerlendirme imkânına sahip olduğunu göstermiştir. DSİ tarafından yürütülmekte olan projeler dikkate alınarak, modern işletme yöntemleri ve gelişmiş yakma teknolojilerine bağlı çevre ile uyumlu bir madencilik yapılmasının önemi vurgulanmıştır.

Yapılan çalışmalarda, Ergene havzasında yer alan linyit rezervlerinin bulunduğu alanların yeraltı suyu açısından fakir bölgelerde olduğu ve sulu tarım alanlarına düşmediği bu nedenle kömür madenciliğinin bölgedeki yeraltı suları ve tarım

arazilerine olumsuz etkisinin olmayacağı, toplantılara katılan bütün kurumların ortak görüşü olarak değerlendirilmiştir. Olabilecek olumsuzlukların ise yönetilebilir düzeyde kalacağının özellikle altı çizilmiştir. Stratejik Planda belirtilen yerli kaynaklarımızın tamamının harekete geçirilmesi hedefine ulaşabilmek için Ergene Havzasında belirlenmiş olan linyit Rezervlerinin enerjiye dönüştürülmesi amacıyla, 1:100.000 ölçekli Ergene Havzası Çevre Düzeni Planında "bölgede kömür madenciliğine yönelik faaliyetlerin yeraltı su rezerv alanlarına ve tarım alanlarına zarar vereceği" öngörüsüyle kömüre dayalı termik santrallerin yer almaması kararının gözden geçirilerek revize edilmesi ülkemiz yerli kaynaklarının çevreyle uyumlu şekilde kullanılmasının önünü açacağı hazırlanan raporda belirtilmiştir.

"ETKB Kurumlar Arası İş Birliği Projesi" çerçevesinde ilgili kurum tarafından hazırlanan teknik raporda özetle; madenler ile ilgili yapılacak her türlü çalışmanın bölge için önemli olan yüzey sularının kömür yayılım sınırını etkileyeceği düşünülen bölgedeki göletler ile yeraltı suyu temin edilen akifer ve kaynakların olumsuz etkilenmemesi için yasal mevzuatlar doğrultusunda hareket edilmesi gereği yer almıştı. Bütün bu değerlendirmeler sonucunda; Ergene havzası yeraltı suyu yönünden fakir (%16), yüzey suyu (%84) bakımından zengin olduğu ve yüzey suları kirletici unsurlar nedeniyle kalitesiz sular sınıfında bulunduğu tespit edilmişti. Ergene havzasında toprak örtüsünün altında yer alan geçirimsiz birimler, yağışlardan ve akarsulardan yeraltına doğru süzülmenin çok düşük olduğunu göstermiştir. Ergene havzasında raporun hazırlandığı tarihe kadar yapılan kömür madencilik (açık/galeri) faaliyetlerinde kayda değer su sorunu ile karşılaşılmadığı bilgisi raporlarda yer almaktadır. Madencilik faaliyeti sırasında kirlilik yaratacak kimyasallar kullanılmadığından yeraltı ve yer üstü sularının kirlenmesinin söz konusu olmadığı özellikle ifade edilmektedir.

4. ERGENE (TRAKYA) HAVZASININ JEOLOJİSİ VE KÖMÜR VARLIĞIMIZ

Ergene havzası, kömür içermesi nedeni ile yoğun jeolojik araştırmaların gerçekleştirildiği bir bölge olmuştur. Trakya Havzası'nın kuzeyindeki kömür sahaları genellikle Istranca Masifi eteklerinde yer almakta olup bu sahalar; Silivri-Sinekli, Tekirdağ-Saray-Küçük Yoncalı, Tekirdağ-Saray-Safaalan ve Tekirdağ Saray-Edirköy olarak bilinmektedir (Şengüler, 2008).
Trakya Havzası'nın güneyindeki kömür oluşumları ise Keşan, Malkara, Uzunköprü ve Meriç sahaları ile anılır. Havzanın kuzeyinde ve güneyinde mostra veren kömürler, havzanın ortasına doğru tedrici olarak derinleşmekte ve havzanın orta kesimlerinde 11.000 m ye ulaşan çökel istif içerisinde, 600 metreyi aşan derinliklerde yer almaktadır. Çerkezköy bölgesinde yapılan sondajlarda 900 metrede kömür oluşumlarına rastlanmıştır (Şengüler, 2013).

Trakya Havzası'nın çok önemli bir diğer kömür sahası Saray'da (Tekirdağ) bulunmaktadır. Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) uhdesindeki sahada iki binli yılların ikinci yarısında (2007–2008), Saray/Çerkezköy linyit sahasının elektrik üretimine açılması amacıyla yapılan rezerv, kömür kalitesi, santral kapasitesi ve fizibilite çalışmaları bölgede kömüre dayalı termik santral için önemli bir girişim olmuştur. Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) tarafından 20 Haziran 2006 tarihinde düzenlenen Tekirdağ Saray sahası linyit kömürüne dayalı termik santral ihalesini Başat Elektrik A.Ş. (Başat Enerji) kazanmıştır.

TKİ'nin, Saray linyit sahasını "maden + termik santral" modeliyle özel sektöre devretmesinden sonra Başat Elektrik Üretim A.Ş. tarafından yürütülen proje/fizibilite çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Proje, ÇED süreçlerinde yaşanan hukuki ve çevresel engeller nedeniyle hayata geçirilememiştir.

Saray (Tekirdağ) sahasında yaklaşık 300 MW gücünde bir termik santral kurulması hedeflenmiş, proje çalışmaları 2006 ihalesinden sonra 2007–2008'de yoğun saha çalışmaları yürütülmüş; ancak proje çevresel izin/ÇED aşamasında ilerleyememiş ve sonuçta santral gerçekleşmemiştir.

Daha sonraki kaynaklarda Başat Elektrik'in 15 Ocak 2009'da üretim lisansı aldığı, fakat santral için gerekli ÇED sürecinin tamamlanamaması nedeniyle lisansın 17 Mart 2010'da EPDK tarafından iptal edildiği bilgisi yer almıştır.

Hazırlanan raporda, Saray kömürlerinin en uygun değerlendirme biçiminin termik santral olabileceği ve özellikle akışkan yatak teknolojisinin düşünüldüğü belirtilmektedir. 2008 yılında bazı teknik değerlendirmelerde sahanın 300 MW, daha sonraki bazı değerlendirmelerde ise yaklaşık 175 MW kapasiteyle ekonomik olarak değerlendirilebileceği öngörülmüştür. Bu farkın nedeni; rezerv tanımı, işletilebilir rezerv miktarı, kömür kalitesi ve santral ömrü varsayımlarındaki değişiklikler olarak yorumlanmıştır.

Kömürün fiziksel ve ekonomik özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve yaklaşık 300 MW ölçeğinde bir proje geliştirilmiştir. Ancak proje, kömür rezervinin yetersizliği veya santral teknolojisinin uygulanamaz olması nedeniyle değil, esas olarak yatırımın izin ve ÇED sürecinin tamamlanamaması nedeniyle hayata geçirilememiş görünmektedir. Ayrıca kömür işletme yönteminin de (kapalı/açık) verilen kararda etkisi açıkça görülmektedir.

5. TRAKYA HAVZASINDA GÜNCEL ÇALIŞMALAR

Trakya havzasında Dr. Richard F. Lebküchner tarafından yapılan çalışmalarda bölgesel jeoloji ayrıntılı olarak incelenmiş ve kömürlü birim, linyitli kumtaşı formasyonu olarak adlandırılmıştır. Şengüler ve diğ. (2000) makalelerinde Keşan,

Malkara ve Uzunköprü yöresindeki kömür işletmelerinden alınan örnekler üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarda özellikle işletilmekte olan damarları inceleyerek kömür çökelme ortamlarına ilişkin yorumlar getirmişlerdir. Şengüler (2008) tarafından 2 cilt olarak hazırlanan raporda Trakya Havzası kömürlerinin yayılımı, özellikleri, çökelim modeli yanında bölgede bilinen saha ve işletmelere de yer verilmiştir. Trakya Havzası'nın kömürleri; gölsel ortamların delta bataklıklarında çökelmiştir. Çökme hızının yüksek olması çökel kalınlığının fazla olmasına neden olmuş, bu ise kömür damarlarının korelasyonunu güçleştirmiştir (Şengüler, 2013). Danişmen Formasyonu çökelimi sırasında yer yer akarsu ortam koşulları etkin olmuş, bu durum kömür çökelimini engellemiştir. Kömürlü formasyon Oligosen dönemi boyunca batıda Rodop masifi, kuzeyde Istranca masifi, güneyde Biga yarımadası ve Gelibolu yarımadası ile İstanbul ve Sakarya kıtasından beslenmiştir. Trakya Havzasın da kömürleşme lagün, delta, taşkın ovası ve göl bataklıklarında gelişmiştir ancak ekonomik kömür oluşumları delta düzlüğü, lagün ve göl bataklığı çökelme ortamın da gözlenmektedir. İncelenen örnekler, kömürlerin hüminit maseral grubu ve bu grup içinde gelinitce zengin bir bileşime sahip olduğu, vitrinit yansıma değerlerine göre alt bitümlü kömür sınıflamasına girdiği ve bu kömürlerin limnik-paralik ortamda çökeldiği belirlenmiştir.

Tekirdağ-Malkara-Hayrabolu Saray, Edirne-Uzunköprü-Süloğlu, Kırklareli-Vize, İstanbul-Silivri Sahalarında yer alan MTA Genel Müdürlüğü'ne ait ruhsat sahalarında çalışmalar sonucunda toplam 1.100.000 metre sondaj yapılmıştır. 68 adet ruhsatın buluculuk raporu hazırlanmış olup bu ruhsatlarda toplam 5.450.000.000 ton kaynak tespit edilmiştir. 2025 yılında İstanbul-Silivri bölgesinde MTA Genel Müdürlüğünce sondaj çalışmaları yapılmıştır. Aynı zamanda önceki yıllarda çalışmaları tamamlanmış olan 4 adet ruhsatın UMREK standartlarına uyumlu kaynak tahmin raporları hazırlanmış ve buluculukları alınmıştır. 6 adet ruhsatın ise kaynak tahmin raporu hazırlanmıştır. Bu ruhsatlarda toplam 685.997.320 ton kaynak tespit edilmiştir (Tansak ve Özsoy, 2026).

Birinci ve diğ. (2024) çalışmalarında Danişmen akiferinde, CH4 gazının, yeraltı sularındaki (pH>7,5) SO4 iyonu ile tepkimeye girdiğini ve sülfat indirgenmesi reaksiyonuna neden olduğunu ifade etmektedirler. Buna bağlı olarak, HCO3 iyonunun zenginleştiği, SO4 iyonunun azaldığı vurgulanmaktadır. Bu süreçteki HCO3 zenginleşmesinin, sırasıyla jeotermal sondajlar, derin hidrojeoloji sondajları ve gömülü tektonik hatlara yakın sığ hidrojeoloji sondajlarında gözlendiği çalışmalarında yer almaktadır.

Ergene Havzası'nda, Eosen den itibaren havzada gelişen sedimantasyon sonrasında, formasyonlar içerisinde deniz suyu kapanımı meydana gelmiştir. Na-Cl fasiyesindeki kapanım suları, hidrolik iletkenliği yüksek tektonik hatlar boyunca yüzeye doğru hareket etmekte ve üst akifer seviyelerinin Na-Cl iyon

derişimini artırmaktadır. Bu süreç gerek yeraltı sularında gerekse kuyulardan çekilen bu suların akarsulara karışması nedeniyle doğal kökenli bir kirlenmeye neden olduğu raporun sonuç bölümünde ifade edilmektedir.

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Ülkemiz doğal gazda yaklaşık yüzde 97-98, ham petrolde ise yaklaşık yüzde 90 oranında dışa bağımlı olduğundan büyük jeopolitik riskler ile karşı karşıya kalmaktadır. Yenilenebilir enerjide önemli yol almış olsak da kaynakların (rüzgâr, güneş vb) özelliği nedeniyle kesinti her zaman söz konusudur. Sürdürülebilirliğin teminatı olan ve baz yük problemi yaşatmayan en önemli enerji kaynağımız kömürdür. 22 milyar ton kaynağa ulaştığı yayınlarda yer alan kömürlerimiz için önemli bir dönemeçteyiz. 2024 yılı verilerine göre elektrik üretiminde ithal kömür yüzde 21,96 olurken, öz kaynaklarımız olarak her yerde sözünü ettiğimiz yerli linyitin payı yüzde 12,60 seviyesine kadar gerilemiştir. Burada şu soru sorulabilir, yüzde 20 üzerinde dışalım ile kömür kullanacaksak, neden öz kaynaklarımızı denemiyoruz?

Aktan (2025/1) tarafından bu konuda yapılan ekonomik değerlendirmenin başında ithal kömür rekabeti yer almaktadır. 2026 yılının başlarında ithal kömür 80-90 dolar/ton olurken, öz kaynaklarımız bu fiyatlar ile rekabet edememiştir. İkinci sırada termik santrallerin fiyat baskısı yer almaktadır. Elektrik piyasasındaki düşük fiyatlandırmalar, yerli kömür kullanan termik santrallerin finansal dengelerini bozmuş ve kendi bilançolarını dengelemek isteyen santral işletmecileri, ana hammadde olan kömürü mümkün olan en düşük fiyattan tedarik etme yoluna gitmiştir.

Araştırmacı son çalışmalarında, kapasite mekanizması ve teşvik eşitsizliğine dikkat çekmiştir. Kapasite mekanizması kapsamında sağlanan ödemelerin, üreticilerin artan maliyetlerini karşılamada yetersiz kaldığını, yenilenebilir enerji projelerine sağlanan KDV istisnasının, düşük faizli kredi ve yüzde 75'e varan hibe gibi teşviklerin yerli kömürden esirgenmesinin, sektörü tamamen rekabet edemez duruma getirdiğini ifade etmiştir Aktan (2025/2).

Madencilik Türkiye Dergisi'nin 15 Temmuz 2026 tarihinde yayımlanan sayısında, dergi tarafından yapılan değerlendirmede; Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre küresel kömür talebinin 2025 yılında %0,5 artarak 8,85 milyar tona ulaştığı ve bu rakam ile yeni bir rekor kırıldığı ifade edilmektedir. Ancak bu verinin, kömürün yeniden güçlü bir yükseliş döngüsüne girdiği anlamına gelmediği, elektrik üretimi, çelik yapımı ve sanayi büyümesi nedeniyle yüksek bir seviyede kalmaya devam ettiği ifade edilmektedir.

Diğer bir deyişle, 2025'teki kömür talebindeki artışın, kömürün "geri dönüşü" anlamına gelmeyeceği, enerji ve sanayi sistemlerindeki dönüşümün beklenenden daha yavaş olmasının neden olduğu tespiti akılcıdır. Elektrik sektöründe kömür, birçok ülkede hâlâ maliyet, güvenlik ve sistem esnekliği nedeniyle önemli konumunu muhafaza etmektedir.

Kömür havza madenciliği, bir kömür havzasının tek tek ruhsatlar veya ocaklar yerine bütüncül olarak planlanması, işletilmesi ve yönetilmesini ifade eder. Bu konuda hem akademik çalışmalar hem de büyük ölçekli endüstriyel projeler bulunmaktadır. Trakya'da yeni kömür sahaları aramak, sadece "kömürün devamını" aramak olmayıp, kömürleşmeye uygun paleocoğrafik ve tektonik koşulların oluştuğu alanların bulunması ile anlam kazanır. Bu nedenle yeni nesil bir arama modeli oluşturulmak mümkündür.

Bu amaçla; Edirne–Uzunköprü–Keşan–Meriç kömür arama ve karar destek modeli oluşturulabilir. Bu model doğru veri setleriyle kurulursa, yalnızca bir kömür potansiyel haritası değil, Trakya Havzası için yeni nesil bir kömür arama ve karar destek modeli olabilir. Havza madenciliğinin ilk adımında; Trakya Bölgesinin zengin veri kaynağı ile, Türkiye'de örnek gösterilebilecek bir "Predictive Coal Exploration Model (PCEM)" hayata geçirilebilir. PCEM için Trakya Havzasının verileri yeterli ölçüde olup; eski kömür damarı → stratigrafik korelasyon → paleocoğrafya → tektonik yapı → sediment kalınlığı → paleoortam → 3B model → sondaj hedefi şeklinde bir akım şeması yapay zeka desteği ile geliştirilebilir.

Yapay zekâ destekli jeolojik risk analizi, kömür havzalarının yönetiminde yeni bir paradigma sunmaktadır. Makine öğrenmesi algoritmalarının üç boyutlu jeolojik modelleme, gerçek zamanlı sensör verileri ve dijital ikiz teknolojisi ile bütünleştirilmesi; jeolojik belirsizliklerin azaltılmasını, operasyonel güvenliğin artırılmasını ve havza madenciliğinde veri odaklı karar verme süreçlerinin geliştirilmesini sağlamada önemli rol oynamaktadır.

Yapay zeka olgusu ile Trakya Havzasında kömüre dayalı termik santrallerin hayata geçirilmesi eskiye göre çok daha mümkün görünmektedir. Dünyada enerji güvenliğinin teminatı olarak görülen ve her ülkenin yedeğinde bulunan kömür, stratejik önemi ile ülkemizin de en önemli öz kaynağıdır.

KAYNAKLAR

Aktan, M., 2025 (1)., Kömürün Gölgesinde Yükselen Devler: AB, Çin ve ABD'nin Enerji İktidarı. Enerji Günlüğü, 16 Mayıs 2025.
https://www.enerjigunlugu.net/en-%20erjinin-iktidari-komurun-uzerinde-yuksel-%20en-devler-32306yy.htm

Aktan, M., 2025 (2), Türkiye Yerli Kömür Sektörünün Mevcut Durumu ve Yaşanan Zorluklar. Enerji Günlüğü Haber Bülteni, 8 Eylül 2025, Ankara.
https://www.enerjigunlugu.net/yerli-komur-uretimi-zorda-32339yy.htm

Birinci, A. K., Güner, İ. N. ve Koçyiğit, A., 2024. Ergene Havzasındaki Yeraltısularının Kökeni ve Tektonizmanın Yeraltısuyu Kalitesine Etkisi. Uluslararası Katılımlı 76. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı, Sayfa: 234, Ankara, Türkiye.
https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/fed21205db99c2d_ek.pdf

Karayiğit, A. İ.., 2007, Tunçbilek, Seyitömer ve Orhaneli Termik Santrallarında Yanan Kömür, Uçucu Kül ve Taban Külünde Bazı Toksik İz Elementlerinin Dağılımı. Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölüm, Proje Bitiş Tarihi: 15.04.2007, Ankara.
https://trdizin.gov.tr/

Kömür ve Enerji Raporu 2025. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Yayın Tarihi: 10.03.2026, Ankara.
https://www.maden.org.tr/uploads/ContentFiles/2026-03-10-11-24-44-536761.pdf

Ökten, E., 2026, Türkiye'nin Stratejik Enerji Güvenliği ve Yerli Kömür Rezervlerinin Ekonomik ve Teknolojik Dönüşümü.
https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7474895915112095744/

Şengüler, İ., Toprak, S., Kara, H., Öner, A., Tuncalı, E., Kır, N. 2000. Güney Trakya Bölgesindeki Kömürlerin Petrografik İncelemesi ve Ortamsal Yorumu. Türkiye 12. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Karadeniz Ereğlisi, Zonguldak. 173-180.
https://api2.maden.org.tr/uploads/portal/resimler/ekler/ae5780d22688d97_ek.pdf

Şengüler, İ. 2008. Trakya Havzası Kömür Aramaları Projesi Raporu (2005-2006-2007 Yılı Sondajları), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 11069, Ankara, (yayımlanmamış).
https://eticaret.mta.gov.tr/index.php?route=product/product&product_id=11069

Şengüler, İ. 2013. Ergene (Trakya) Havzası'nın jeolojisi ve kömür potansiyeli. Maden Tetkik ve Arama Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, Sayı 16, 109-114.
https://bulten.mta.gov.tr/dosyalar/makaleler/276/tr_20221018140747_276_4_2c9ddaff.pdf

Tansak, T, Özsoy, H. R., 2026 Trakya Oligosen Havzası Kömür Aramaları. MTA Bilimsel Etkinlikler Haftası, 22-26 Haziran 2026, Bildiri Özleri Kitabı, s. 40, Ankara.
https://www.mta.gov.tr/BEH/bildiri_ozleri_kitabi.pdf

KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE YEŞİL DÖNÜŞÜM; DENİZLİ KALE LİNYİT İŞLETMESİ ÖRNEĞİ

GREEN TRANSITION IN COAL MINING: THE CASE OF KALE LIGNITE MINE, DENİZLİ

Ali Koray Özdoğan*
Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara

Orçun Durak
Duraksan San. Harf. ve Tic. Ltd. Şti., Denizli

Hakan Akıncı
Irmak Mad. Müh. Müş. Tic. Ltd. Şti., Ankara

Hakan Kıran
Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara

ÖZET Günümüzde "sürdürülebilirlik" kavramı doğal kaynakların işlenerek ekonomiye kazandırılmasında daha da önemli hale gelmektedir. Yeşil dönüşüm ile daha önemli hale gelen sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda yapılacak çalışmalar çevresel, sosyal ve ekonomik olarak sağladığı ve sağlayacağı faydalar ile toplumsal kalkınmada rol oynamaktadır. Açık ocak işletmeciliğinde yaygın olarak kullanılan makine ve ekipmanların yeşil dönüşüm sürecindeki katkıları ile ilgili yapılacak çalışmalar önem arz etmektedir. Bu kapsamda açık ocak işletmeciliğinde yaygın olarak kullanılan aynı üretim kapasitesine ve teknik özelliklere sahip dizel ve elektrikli model iki farklı iş makinesinin kullanılabilirliği, ekonomik performansı ve çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak fiili saha verileri üzerinden analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, elektrikli ekskavatörün %99,03 kullanılabilirlik etkinliğine ulaştığını ve dizel modele kıyasla %51 oranında net enerji maliyeti tasarrufu sağladığını göstermiştir. Karbon ayak izinde mevcut durumun nedenleri ortaya konulmuş ve yeşil dönüşüm sürecinin yalnızca makine ve teçhizat değişimleriyle sınırlı kalmaması gerektiğini, süreçte sürdürülebilir enerji tedariğinin de önemi ortaya konulmuştur.

ABSTRACT Nowadays, the concept of "sustainability" is becoming increasingly important in the processing and economic utilization of natural resources. Sustainable development goals, becoming even more crucial with the green transformation, play a role in societal development through the environmental, social, and economic benefits they provide and will provide. Studies on the contributions of commonly used machinery and equipment in open-pit mining to the green transformation process are of great importance. In this context, the usability, economic performance, and environmental impacts of two different excavators, a diesel and an electric model with the same production capacity and technical specifications, commonly used in open-pit mining were analyzed comparatively using actual field data. The findings showed that the electric excavator achieved a 99,03% availability efficiency and provided a net energy cost

* *akozdogan@gmail.com*

saving of 51% compared to the diesel model. The reasons for the current carbon footprint were revealed, and it was emphasized that the green transformation process should not be limited solely to machinery and equipment changes; the importance of sustainable energy supply in the process was also highlighted.

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte madencilikte işletme maliyetlerin minimize edilmesi, ekipman verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilirlik hedeflerine uyum sağlanması en önemli süreçler olarak bilinmektedir. Geleneksel fosil yakıtlı büyük iş makineleri; artan yakıt maliyetleri ve yüksek karbon salınımları nedeniyle, madenciliğin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik ilkeleriyle çelişmektedir. Açık ocak kömür madenciliğinde yükleme ve kazı faaliyetlerinin merkezinde yer alan yüksek kapasiteli ekskavatörlerin yeşil dönüşümü, işletmelerin ekonomik olarak kayıplarını asgari düzeye indirmede önemli rol oynamaktadır. Kömür madenciliği açısından özellikle son yıllarda dünyada yeşil dönüşümde önemli yol kat edilmiş ve bunun yanında otomasyon sistemlerinin yaygınlaşmasının da etkisi ile karbon ayak izi azaltmaya yönelik çalışmalar giderek daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca günümüzde Döngüsel Ekonomi modeli uygulanması önemli bir hedef olarak gösterilmektedir (Özdoğan vd., 2025)

Bir ekipmanın verimliliğini ölçmede önemli bir standart olan Toplam Ekipman Etkinliği (OEE - Overall Equipment Effectiveness) endüstrinin farklı kollarında kullanılmaktadır. OEE; Kullanılabilirlik (Availability), Performans (Performance) ve Kalite (Quality) bileşenlerinin çarpımı ile hesaplanarak sistemin gerçek verimliliğini ortaya koymaktadır (Kök ve Yıldız, 2023). Bunun yanında ekipman etkinliğinden ayrı olarak makine enerji maliyetleri ve kurumsal karbon ayak izi gibi multidisipliner parametrelerin bir arada değerlendirildiği kapsamlı analizler ile sektörel olarak yeşil dönüşüm sürecinin olumlu etkilerinin daha iyi anlaşılabileceği öngörülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, açık ocak kömür madenciliğinde aynı üretim kapasitesine, şasi yapısına ve kova geometrisine sahip iki farklı dizel ve elektrikli ekskavatörün performansını doğrudan saha verileri üzerinden analiz etmektir. Günlük 8 saatlik vardiya düzenine göre tasarlanan bu çalışmada, iki makinenin duruş sürelerini, enerji sarfiyatlarını, işletme maliyetlerini ve neden oldukları doğrudan/dolaylı salınım bileşenlerini detaylandırarak açık ocak kömür madenciliğinde sektörel bir farkındalık oluşturulmasına katkı sunulması hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Araştırmada verilerin alındığı iş makineleri, Denizli ili, Kale ilçesinin batısında, ilçe merkezine 20 km. mesafede yer alan açık ocak işletme yöntemi ile çalışılan linyit üretiminin yapıldığı ocakta işletme faaliyetlerinde kullanılmaktadır. Çalışma alanında elektrikli ekskavatörün çalışma alanındaki geniş perspektif görünümü Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1. Çalışma sahasında faaliyet gösteren elektrikli ekskavatörün genel görünümü

İki makine aynı teknik özelliklere sahip olup, 2010 Model olan makinenin elektrik gücü ile çalışması için gerekli revizyonlar yapılarak kullanımı sağlanmıştır. Çizelge 1.'de makinelerin teknik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 1: Ekskavatörlerin teknik özellikleri (Hitachi,2025)

	Dizel Ekskavatör	**Elektrikli Ekskavatör**
Model Yılı	2008	2010
Çalışma Ağırlığı	84,5 ton	84,5 ton
Kova Kapasitesi	6,1 m³	6,1 m³
Taşıma Genişliği/ Yüksekliği	4,43 m./3,78 m.	4,43 m./3,78 m
Maksimum Yatay Ulaşım	14,1 m.	14,1 m.
Tarama Derinliği	8,87 m.	8,87 m.
Şasi ve Palet Yapısı	LC (650 nm genişlik)	LC (650 nm genişlik)
Motor Gücü	530 HP	397 kW

Makinelerin günlük çalışma kapasitesi teknik özelliklerinin benzer olması sebebi ile benzerlik göstermekte ve ortalama olarak 3.100 m^3 civarında günlük kazı yapılabilmektedir. Yapılan çalışmada, elektrikli ekskavatörün performansı dizel ekskavatöre göre yüksek olmakla birlikte her iki makinenin verimlilik değerlerinin oransal olarak birbirine yakın seyrettiği görülmüştür.

2.2. Metot

Operasyonel etkinliğin hesaplanmasında, işletmenin mevcut gündüz vardiya süresi olan 8 saat baz alınmıştır. 13 günlük gözlem periyodunda makinelerin gerçekleştirdiği planlı duruşlar (bakım, vites değişimi, rutin kontroller) ve arıza kaynaklı plansız duruşlar kaydedilmiştir. Makinelerin günlük yükleme miktarları birbirine yakın seyrettiği için Performans (P) parametresi eşit kabul edil edilmiştir. Ayrıca saha koşulları ve cevher/yan kayacın mevcut durumu sayesinde firesiz yükleme yapılabildiği için Kalite (Q) parametresi de sabit tutulmuştur. Bu bağlamda operasyonel etkinlik değerlendirilmesinde Kullanılabilirlik etkinliği öne çıkmıştır.

Kullanılabilirlik (A) etkinliği, planlanan üretim süresi ile fiili çalışma süresi arasındaki oran üzerinden hesaplanmıştır (Kök ve Yıldız, 2023) (Formül 1).

A = [(Planlanan Üretim Süresi- Plansız Duruş Süresi) / Planlanan Üretim Süresi]x100

Planlanan Üretim Süresi, toplam vardiya süresinden planlı duruşların çıkarılmasıyla elde edilir (Formül 2).

Planlanan Üretim Süresi = Toplam Vardiya Süresi- Planlı Duruş Süresi

Maliyet analizinde, çalışma dönemine ait birim enerji maliyetleri güncel piyasa verileri esas alınarak, dizel ekskavatör için motorin birim fiyatı 56,78 TL/litre, elektrikli ekskavatör için endüstriyel şebeke elektrik tarifesi birim fiyatı 4,36 TL/kWh olarak hesaplamaya dâhil edilmiştir (TÜİK,2025).

Çevresel etkilerin analizi, Sera Gazı Protokolü standartlarına uygun olarak yürütülmüştür (GHG, 2023). Dizel ekskavatörün tükettiği motorin, doğrudan ocak sınırları içinde sarf edildiği için Kapsam 1 (Doğrudan Salınımlar) kategorisinde değerlendirilmiştir. Motorin yakıtı için salınım miktarı 53,6 ton CO_2/yıl olarak gerçekleşmiştir.

Elektrikli ekskavatör doğrudan egzoz gazı üretmemekle birlikte, şebekeden çektiği elektrik dolayısıyla Kapsam 2 (Dolaylı Enerji Salınımları) sınıfına girmektedir. Salınım miktarı 65,2 ton CO_2/yıl olarak gerçekleşmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Kullanılabilirliğin İncelenmesi

Ekskavatörlerin 2025 yılı haziran ayında 13 gün boyunca planlı ve plansız duruş süreleri kayıt altına alınmıştır. Elektrikli ekskavatörlerin plansız duruş süresinde dizel modele göre daha yüksek kullanılabilirlik sağladığı sayısal ortalamalardan da açıkça görülebilmektedir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Dizel ve elektrikli ekskavatörlere ait duruş çizelgesi

	Dizel Ekskavatör		Elektrikli Ekskavatör	
Tarih	Planlı Duruş Süresi (Saat)	Plansız Duruş Süresi (Saat)	Planlı Duruş Süresi (Saat)	Plansız Duruş Süresi (Saat)
16.06.2025	0	0	0	0,5
17.06.2025	1	0	0	0
18.06.2025	0	1	0,5	0
19.06.2025	0	0	0	0
20.06.2025	0	0	0	0,5
21.06.2025	0	0	0	0
23.06.2025	0	1	0	0
24.06.2025	1	0	0	0
25.06.2025	0	0	0,5	0
26.06.2025	0	0	0	0
27.06.2025	0	1	0	0
28.06.2025	0	0	0	0
30.06.2025	0	0	0	0

Toplam 104 saatlik vardiya süresi içinde dizel ekskavatör toplam 2 saat planlı, 3 saat plansız duruş gerçekleştirmiştir. Elektrikli ekskavatörde ise planlı duruşlar 1 saat, plansız arıza duruşları ise yalnızca 1 saat olarak kaydedilmiştir. Bu verilerden hareketle hesaplanan kullanılabilirlik göstergeleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Kullanılabilirlik etkinliği

Kullanılabilirlik Göstergesi	Dizel Ekskavatör	Elektrikli Ekskavatör
Toplam Planlanan Vardiya Süresi	104,0 saat	104,0 saat
Toplam Planlı Duruş Süresi	2,0 saat	1,0 saat
Planlanan Üretim Süresi	102,0 saat	103,0 saat
Toplam Plansız (Arıza) Duruş Süresi	3,0 saat	1,0 saat
Fiili Çalışma Süresi	99,0 saat	102,0 saat
Kullanılabilirlik Etkinliği (A)	%97,06	%99,03

Gün bazlı incelemeler yapıldığında, dizel ekskavatörün 18, 23 ve 27 Haziran tarihlerinde yaşadığı 1'er saatlik plansız duruşlar nedeniyle ilgili günlerdeki Kullanılabilirlik etkinliğinin %87,50'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Elektrikli ekskavatörün ise sadece 16 ve 20 Haziran tarihlerinde meydana gelen 30'ar dakikalık kesintilerle Kullanılabilirlik etkinliğinin iki gün %93,75'e düştüğü, diğer tüm günlerde ise %100'lük Kullanılabilirlik etkinliğini koruduğu görülmüştür. Elektrikli ekskavatörün sağladığı yaklaşık %2'lik Kullanılabilirlik etkinliği avantajının, yıllık olarak işletme faaliyetine oranlandığında ciddi bir üretim verimliliğine önemli bir katkı sunacağı öngörülmektedir.

3.2. Enerji Sarfiyatı ve Maliyet Analizi

Makinelerin enerji verimlilikleri fiili çalışma saatleri üzerinden incelenmiştir. Dizel ekskavatörün saatlik tüketimi en düşük 61 litre/saat ve en yüksek 66 litre/saat olarak gerçekleşmiş ve sayısal verilerin elde edildiği periyotta ortalama 63,33 litre/saat olarak gerçekleşmiştir. Elektrikli ekskavatör ise çalışma periyodu boyunca saatte 400 kWh sabit enerji tüketimi sarf etmiştir. Dizel ekskavatörün günlük tüketimleri Çizelge 4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Dizel ekskavatör gün bazlı tüketim çizelgesi

Tarih	Motorin Tüketimi (lt/saat)
16.06.2025	62
17.06.2025	64
18.06.2025	65
19.06.2025	63
20.06.2025	66
21.06.2025	62
23.06.2025	61
24.06.2025	62
25.06.2025	65
26.06.2025	63
27.06.2025	62
28.06.2025	64
30.06.2025	64

Maliyet analizinde elektrikli ekskavatörün sağladığı avantaj ise Çizelge 5'de gösterilmektedir. Dizel ekskavatörün yıllık enerji tüketiminde işletme maliyetini belirgin şekilde yükselttiği tespit edilmiştir.

Çizelge 5. Maliyet analizi

Maliyet Analizi Bileşeni	Dizel Ekskavatör	Elektrikli Ekskavatör
Fiili Çalışma Süresi	99,0 saat	102,0 saat
Ortalama Saatlik Tüketim Hızı	63,33 litre/saat	400.00 kW/saat
Enerji Birim Fiyatı	56,78 TL/litre	4,36 TL/kW
Ortalama Saatlik İşletme Maliyeti	3.589,11 TL/saat	1.744,00 TL/saat
Dönemsel Toplam Enerji Tüketimi	6.270,00 litre	40.800,00 kWh
Dönemsel Toplam Enerji Maliyeti	355.321,89 TL	177.888,00 TL
Net Dönemsel Tasarruf Miktarı	177.433,89 TL (Elektrikli)	

Elde edilen veriler, elektrikli ekskavatörün enerji maliyetinin, dizel makinenin maliyetine oranla %51 daha düşük olduğunu kanıtlamaktadır. Bu çalışmada hesaplanan net tasarruf, yıllık bazda (300 iş günü ve çift vardiya kabulü altında)

makine başına yaklaşık 8,5 milyon TL'lik işletme bütçesi avantajı sunduğu öngörülmektedir.

3.3. Karbon Salınım Analizi

Çalışmanın en dikkat çekici bulgusu, salınım analizi aşamasında ortaya çıkmıştır. Dizel ekskavatör Kapsam 1 kapsamında yıllık 53,6 ton CO_2 salınımına yol açarken, elektrikli ekskavatör Kapsam 2 dolaylı salınım alanında yıllık 65,2 ton CO_2 salınımına neden olmaktadır. Bu durum, elektrikli makinenin karbon ayak izinde %21,6 oranında daha dezavantajlı olduğunu göstermektedir. Toplam CO_2 salınımında da %9,76 farkla elektrikli ekskavatör olumsuz etki göstermektedir.

Fiili saatlik salınım hızları üzerinden yapılan hesaplamada da bu durum doğrulanmıştır. Dizel makine saatte 169,7 kg CO_2 üretirken, elektrikli makine tükettiği enerji dolayısıyla dolaylı olarak saatte 206,5 kg CO_2 oluşmasına sebebiyet vermektedir. Literatürde Jevons Paradoksu (Bozkaya, 2023) olarak adlandırılan verimlilik ikilemi ile de açıklanabilecek bu bulgu elektrikli ekskavatörün açık ocak kömür işletmesinde sıfır egzoz salınımı ile iş sağlığı ve hava kalitesi açısından oluşturduğu olumlu etkiyi, tüketilen elektriğin üretim koşullarına bağlı olarak azaltmaktadır. Bu husus ile ilgili çözüm önerileri ise sonuç kısmında detaylandırılmıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Denizli ili Kale ilçesinde linyit üretimi gerçekleştirilen bir açık ocak kömür işletmesinde, aynı teknik özelliklere ve üretim kapasitesine sahip dizel ve elektrikli iki farklı ekskavatörün operasyonel etkinliği, ekonomik performansı ve çevresel etkileri fiili saha verileri üzerinden karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. 13 günlük vardiya gözlemlerine dayanan operasyonel değerlendirmeler, elektrikli ekskavatörün plansız arıza duruş sürelerinin dizel modele göre belirgin ölçüde daha düşük olduğunu ve %99.03'lük dikkate değer bir kullanılabilirlik (Availability) etkinliğine ulaştığını göstermiştir. Dizel ekskavatörün %97.06'da kalan kullanılabilirlik etkinliğine kıyasla elektrikli modelin sunduğu bu %2'lik avantaj, linyit sahasındaki üretim sürekliliği ve toplam ekipman etkinliği (OEE) açısından yıllık bazda çok ciddi bir üretim artışı ve verimlilik potansiyeline işaret etmektedir.

Bu araştırma, açık ocak kömür madenciliğinde kullanılan elektrikli ekskavatörlerin hem çevresel hem de ekonomik açıdan geleneksel dizel modellere kıyasla üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Saha verilerine dayalı analizler, elektrikli modelin yüksek kullanılabilirlik oranı sunduğunu ve enerji maliyetlerinde yaklaşık %51 oranında net bir tasarruf sağladığını

göstermiştir. Elde edilen bu maliyet avantajının, uzun vadeli işletme bütçelerine ve yıllık ölçekte milyonlarca liralık finansal kazanca dönüşeceği öngörülmektedir.

Dizel ekskavatörün ocak içindeki motorin tüketiminden kaynaklanan Kapsam 1 (Doğrudan Salınımlar) değeri yıllık 53,6 ton CO_2 olarak gerçekleşirken; elektrikli ekskavatörün şebekeden çektiği enerjiden kaynaklanan Kapsam 2 (Dolaylı Enerji Salınımları) değeri yıllık 65,2 ton CO_2 olarak hesaplanmıştır. Fiili saatlik salınım hızlarında da elektrikli modelin dolaylı olarak saatte 206,5 kg CO_2 salınımına neden olarak, dizel modelin (169,7 kg CO_2/saat) %21,6 oranında gerisinde kalması, yeşil dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan verimlilik ikilemini bu çalışmada da ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, açık ocak kömür madenciliğinde iş makinelerinin elektrifikasyonu tek başına yeterli bir yeşil dönüşüm hamlesi olmakta sınırlı kaldığı, tüketilen enerjinin kaynağının da dönüştürülmesini zorunlu kıldığı değerlendirilmektedir.

Bu verimlilik ikilemini aşmak ve madencilik sektöründe gerçek anlamda sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşabilmek adına, işletmelerin elektrifikasyon yatırımlarını yenilenebilir enerji entegrasyonu ile desteklemesi hayati önem arz etmektedir. Maden sahası yakın çevresinde kurulacak bir Güneş Enerjisi Santrali (GES) projesi ile elektrikli iş makinelerinin ihtiyaç duyduğu enerjinin yerinde ve temiz kaynaklardan üretilmesi sağlanmalıdır. Bu bağlamda devam eden süreçte Denizli Kale örneğinin de kalkınma hedefleri içinde yenilenebilir enerji entegrasyonu ve tüm makinelerin yeşil dönüşümünün sağlanması öncelikli hedef olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada ortaya konulan yeşil dönüşümün olumlu etkilerinin, benzer jeolojik ve operasyonel koşullara sahip açık ocak kömür madenlerinde yaygınlaştırılması durumunda sektörel düzeyde önemli bir ekonomik ve çevresel kazanım sağlanacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda elde edilen bulguların, benzer karakteristik özellikler taşıyan diğer maden işletmeleri için bir referans teşkil edeceği ve literatüre bu yönde katkı sunacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

Özdoğan, A. K., Özdoğan, G., Akbulut, A. 2025. AB Perspektifinden Güvenli Madencilik İçin Atık Yönetiminde Yol Haritası ve Afet/Acil Durum Farkındalığı, Uluslararası Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu'2025, Soma, 14-15 Mayıs, 316-332.

Kök, N., Yıldız, M. S. 2023. Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) Analizi ve İyileştirmesi: Otomotiv Sektörü Sızdırmazlık Elemanları İşletmesinde Uygulama. Business, Economics and Management Research Journal, 6(1), 69-82.

Hitachi., 2025. Advertisement Brochure ZX850-870LD-3. URL adresi; https://www.hitachicm.ru/wp-content/uploads/2017/04/ZX850-870LD-3_KS-EN059_EN.pdf (kaynağa erişilen tarih, Haziran 2025).

WRI., 2023. GHG Protocol Scope 2 Guidance, URL adresi; https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Scope%202%20Guidance.pdf, (kaynağa erişilen tarih, Haziran 2025).

Türkiye İstatistik Kurumu, 2025. TÜİK Veri Portalı, URL adresi; https://veriportali.tuik.gov.tr/tr, (kaynağa erişilen tarih, Haziran 2025).

Bozkaya, Ş., 2023. G-7 Ülkelerinde Enerji Tüketimi ve Enerji Verimliği İlişkisi: Jevons Paradoksu, Pamukkale Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Sayı 55, Denizli, ss. 303-314.

MADENCİLİKTE KAMU YARARININ ÖLÇÜLMESİ

ASSESSING PUBLIC INTEREST IN MINING

Ömer Günay
Maden Mühendisi, Avukat

Mehmet Torun
Maden Mühendisi

ÖZET Madencilik faaliyetlerinin meşruiyetini destekleyen "kamu yararı" kavramı, büyük ölçüde niteliksel ve soyut bir tartışma alanı olarak kalmaktadır. Bu çalışmanın amacı, bu tartışmaları nicel ve karşılaştırılabilir bir temele taşımak, böylece verilerin ölçülebilir değişkenler aracılığıyla operasyonel hâle getirilebilmesi ve sağlam sonuçlara varılmasına katkı sağlamaktır. Bu doğrultuda çalışmada; kamuya açık finansal tablolardan, vergi mutabakatlarından, dipnotlardan ve faaliyet raporlarından doğrulanabilen on iki değişkenli bir ölçüm çerçevesi önerilmektedir. Çerçeve beş eksende toplanmaktadır: mali yük ve kamu geliri, gelir dağılımı ve istihdam, çevresel maliyet, faaliyet raporu kaynaklı operasyonel göstergeler ile madenin stratejik niteliği ve nesiller arası adalet. Önerilen çerçeve, idari yargıdaki bilirkişi incelemelerine, ÇED süreçlerine ve kamuoyu tartışmasına ortak ve denetlenebilir bir zemin sunmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Kamu yararı, madencilik hukuku, devlet hakkı, efektif vergi oranı, çevresel rehabilitasyon karşılığı, nesiller arası adalet, ÇED.

ABSTRACT The concept of "public interest", which underpins the legitimacy of mining activities, has largely remained a qualitative and abstract field of debate. The aim of this study is to place these discussions on a quantitative and comparable basis, thereby enabling data to become operational through measurable variables and contributing to the attainment of robust and reliable conclusions. To this end, the study proposes a twelve-variable measurement framework derived from publicly available financial statements, tax reconciliations, footnotes and annual reports. The framework is organised along five axes: fiscal burden and public revenue, income distribution and employment, environmental cost, operational indicators derived from annual reports, and the strategic nature of the mineral together with intergenerational equity. The proposed framework aims to provide a common and auditable basis for expert examinations in administrative litigation, EIA procedures and public debate.

Keywords: Public interest, mining law, state royalty, effective tax rate, asset retirement obligation, intergenerational equity, EIA.

1. GİRİŞ

Madencilik faaliyetlerinin hukuki ve toplumsal meşruiyeti, büyük ölçüde "kamu yararı" kavramı üzerinden kurulmaktadır. Ne var ki bu kavram, gerek idari yargı kararlarında gerek kamuoyu tartışmalarında çoğu zaman niceliksel bir karşılığı olmaksızın, taraflarca ileri sürülen genel iddialar düzleminde ele alınmaktadır. Bu durum, tartışmayı doğrulanabilir verilerin değil, söylemlerin belirlediği bir alana taşımaktadır.

Bu çalışma, madencilikte kamu yararı tartışmasını ölçülebilir bir zemine taşımayı amaçlamaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde kamu yararı kavramının tanımı, anayasal dayanakları ve içtihadi çerçevesi ele alınmakta; ikinci bölümde madenciliğin toplum ve çevre üzerindeki olumlu ve olumsuz etkileri kamu yararı perspektifinden değerlendirilmekte; üçüncü bölümde kamu yararı testinin hukuki unsurları ile niteliksel söylem ve niceliksel kanıt arasındaki boşluk incelenmektedir. Dördüncü bölümde, kamuya açık verilerden hesaplanabilen on iki değişkenli ölçüm çerçevesi ayrıntılı biçimde önerilmekte; beşinci bölümde çerçevenin sınırlılıkları tartışılmakta; altıncı bölümde ise politika önerileri sıralanmaktadır.

2. KAMU YARARI KAVRAMI: TANIM, ANAYASAL DAYANAK VE İÇTİHADİ ÇERÇEVE

"Kamu yararı" kavramı, çok tartışılan ve çok farklı biçimlerde anlaşılabilen bir kavramdır. Türk Dil Kurumu (2026), kamu yararını "devletin gereksinimlerine cevap veren ve bu ihtiyaçları karşılayan, topluma yarar sağlayan değerler bütünü" olarak tanımlamaktadır. Bir toplumdaki sınıfların, grupların ve kişilerin çıkarları farklı yönlerde olabildiğinden, herhangi bir değerin ya da faaliyetin toplumun her kesimine her zaman -en azından aynı ölçüde- yarar sağlaması mümkün değildir. Bu nedenle tartışma konularından biri de, bir faaliyette ya da değerde kamu yararının bulunduğunu kabul edebilmek için toplumun ne kadarının o faaliyetten yararlanması gerektiğidir. Çakmak (2013), doktrinde toplumun tümünün yararlanması gerektiğini öne sürenler bulunduğu gibi, toplumun bir kısmının yararlanmasının yeterli olduğunu düşünenlerin de bulunduğunu belirtmektedir.

Yürürlükteki 1982 Anayasası'nın, "Sosyal ve Ekonomik Haklar ve Ödevler" konulu Üçüncü Bölümü'nün III no.lu alt başlığı "Kamu yararı"dır. Bu alt başlık altında; "Kıyılardan yararlanma" (md. 43), "Toprak mülkiyeti" (md. 44), "Tarım, hayvancılık ve bu üretim dallarında çalışanların korunması" (md. 45), "Kamulaştırma" (md. 46) ve "Devletleştirme ve özelleştirme" (md. 47) maddeleri

bulunmaktadır. Bu maddelerin dışında; mülkiyet hakkının sınırlanabileceğinden (md. 35), ispat hakkından (md. 39) ve ormanların korunması ve geliştirilmesinden (md. 169) söz edilirken de kamu yararı deyimi geçmektedir.

Kamu yararı kavramı, Anayasa Mahkemesi kararlarıyla her olayda somut koşullara göre bir şekil ve bir esneklik kazanmıştır. Anayasa Mahkemesi, kamu yararını konu edinen kararlarında bu kavramı şu şekilde ortaya koymaktadır:

> *" Toplum yararı, ortak çıkar, genel yarar gibi birbirinin yerine kullanılan kavramlarla ifade edilen ve bireysel çıkardan farklı onun üstünde ortak bir yarar olan kamu yararı Anayasa'nın 35. maddesinin mülkiyet hakkı açısından öngördüğü özel sınırlandırma sebebi olup genel yarar ve toplumsal yarar gibi ifadeleri de kapsayacak şekilde geniş yorumlanmaktadır (AYM, E. 1999/46, K. 2000/25, 20/09/2000*)

Kavramın uygulamadaki belirsizliği, meslek örgütleri açısından da ayrıca önem taşımaktadır. Nitekim kamu yararını kollamak, TMMOB'nin kuruluş kanunundaki asli görevlerinden biridir. Bu belirsizliğe ilişkin olarak şu değerlendirme yapılmaktadır:

> *"...Kamu yararını kollama -elbette ki- çok önemli bir konu, özellikle de bizim için; zira altı çizili ibare, TMMOB'nin -6235 (3073) sayılı kanunun dibacesinde 'amme menfaati' diye yazılan- yasal aslî görevlerinden birinin yeni Türkçesinden ibaret... Geçen yüzyılda, 'amme menfaati' de dense, 'kamu yararı' da dense; herkes kimin ne demek istendiğini anlıyordu; daha da önemlisi, hangi fiilin veya siyasî icraatın kamu yararına olup olmadığı hususu münakaşadan varesteydi. Lakin devir değişti... Çünkü, her kavram gibi, 'kamu yararı' da -hem anlam, hem de mahiyeti itibarıyla- tartışma yasağının zincirlerini kırdı artık... Artık herkes; rüşvet, ihtikâr, irtikâp, ihtilas vs. gibi binbir melanetle -devletin hüküm ve tasarrufu altında bulunan doğal kaynaklardan olan- orman arazilerini işgal edebilir ve üzerlerine villalar, kâşaneler dikebilir. Sonra da bu binaların bulunduğu arazi kuşağının tamamı orman vasfını kaybeder ve '2b' kategorisine kaydırılıp 'kamu yararı' yönünde imar ve iskâna açılır... Örneğin, İR hukuku ETİBANK uhdesinde bulunan Beylikahır Barit+Flüorit+NTM yatağı üzerindeki köylüler, birer rüzgâr türbini inşa etme lisansı alırlar veya kesesi şişkin müteşebbisin birisi, köyün bütün arazisini kapatıp aynı lisansı kendi alabilir. Sonra da mahkemenin birisi; arazinin, madencilik yerine temiz enerji üretimi için kullanımında daha fazla 'kamu yararı' bulunduğu mülâhazasıyla karara varır*. (Özuslu, M.T)

Çakmak'ın (2013) da ortaya koyduğu üzere kamu yararı kavramı; genellikle yasalarla tanımlanmış hak ve çıkarlar, etik, estetik, bireysel ya da kolektif değer yargıları gibi zor ölçülebilir veya ölçülemez normatif ve öznel kriterler cinsinden ifade edilmektedir. Ancak yatırım projelerine uygulanan ekonomik analizlerle bu kavramı ölçebilmek, sayısal kriterlerle ifade edebilmek de mümkündür.

3. KAMU YARARI AÇISINDAN MADENCİLİK: OLUMLU VE OLUMSUZ ETKİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Doğal kaynaklar insanlığa bir mirastır ve bunlardan yararlanma hakkı, üzerinde yaşayan topluma aittir. Günay'ın (2025) da belirttiği gibi, hemen hemen bütün ülkelerde diğer doğal kaynaklar gibi mineral kaynakların da kamuya/topluma ait olduğu kabul edilmektedir.

Madencilik faaliyetlerinin, maden yatağının aranmasından maden işletmesinin kapanmasına kadar olan her safhasında, geniş ve dar anlamlarında toplum ve çevre üzerinde olumlu ya da olumsuz ciddi etkileri olabilmektedir. Madenciliğin topluma şu tür etkilerinden söz edilebilmektedir:

3.1. Madenciliğin Olumlu Etkileri: Ekonomik Katkı ve Toplumsal Dönüşüm

- Bilinen gerçekleri yinelemeden belirtilmelidir ki, madencilik olmaksızın refah içinde bir yaşam düşünülemez.
- Doğru yapılandırılmış ve iyi yönetilen bir madencilik sanayiinden ülkeler çok yarar sağlayabilmektedir. Çünkü madencilik; devlete gelir, döviz kazancı (ya da tasarrufu) sağlar; ulusal kalkınmayı, özellikle pazardan ve gelişmiş yörelerden uzak yerlerdeki bölgesel ve yerel kalkınmayı hızlandırır; fiziksel altyapının (yol, su, elektrik, telekomünikasyon, kanalizasyon, okul, hastane vb.) gelişmesine katkıda bulunur; doğrudan ya da dolaylı ek istihdam sağlar; ülkenin mesleki ve teknik becerilerini artırır ve teknoloji edinimini kolaylaştırır; mal ve hizmet biçimindeki girdileri ve çıktılarının işlenmesi sayesinde ileriye ve geriye doğru bağlantılarıyla ülke ekonomisinin çeşitlenmesine yardım eder; ekonominin belirli merkezlerin dışına yayılmasına, bölgeler arası gelişmişlik farkının azaltılmasına ve iç göçün önlenmesine katkıda bulunur (Kayadelen, 2008).
- Yeni bir maden işletmesi, üretici güçlerin gelişmesine olumlu yönde bir müdahaledir. Şöyle ki: bir mineral kaynağı işletilmezse, yöredeki ekonomik ve toplumsal yapı çok büyük olasılıkla uzun süre olduğu gibi kalacak; işletilmesi durumunda ise değişecektir. Mineral kaynağı işletildiğinde gereken

iş gücünün bir kısmı yakın köy ve kasabalardan temin edilir. Yöre halkının bir kısmı da işletme nedeniyle gelişen hizmet sektöründe çalışır. Maden işletmesi ölçeğinin büyüdüğü, mekanizasyon düzeyinin arttığı ve ömrünün uzadığı ölçüde bölge sanayileşebilir, pazara eklemlenebilir ve bir cazibe merkezine dönüşebilir. Mineral yatağının aranmasına yönelik çalışmalarla başlayan bu süreç yörede, varsa feodal ya da yarı feodal ilişkilerin tasfiyesine, köylülüğün işçiliğe evrilmesine ve yaşamın modernleşmesine yol açar.

3.2. Madalyonun Diğer Yüzü: Metabolik Yarılma ve Örtülü Kamusal Zarar

Marx'ın (2011) 1859 tarihli Önsöz'de ortaya koyduğu çerçevede bu süreç, bir yönüyle o bölgedeki iş gücünü, teknolojiyi ve araçları harekete geçiren, yani "üretici güçleri" büyüterek eski toplumsal yapıyı dönüştüren tarihsel bir adım olarak görülebilir. Ancak madalyonun diğer yüzünde, kapitalizmin doğayı sadece bir ticari mal olarak görmesinden kaynaklanan köklü bir çelişki yatar. Sistem; yer kabuğunun milyonlarca yılda oluşturduğu yenilenemeyen madenleri ve canlı ekosistemi, kendi kâr döngüsü için karşılıksız bir "bedava lütuf" olarak kabul eder. Doğanın yaşamı var eden asıl değerini (kullanım değerini) görmezden gelip onu yalnızca piyasada alınıp satılabilen bir "fiyat etiketine" (değişim değerine) indirger. Bu yaklaşım, çevreye ve yaşam alanlarına verilen devasa zararları şirket bilançolarının dışına iterek faturayı örtülü bir biçimde kamunun, yani halkın sırtına yükler.

Netice itibarıyla madencilik, bir yandan bölgeye teknoloji taşıyıp ekonomik canlılık getirirken, diğer yandan insan ile doğa arasındaki kadim ve dengeli yaşam bağını koparır; yani derin bir "metabolik yarılma" meydana getirir (Foster, 2001). İşte bu yüzden, "kalkınıyoruz, istihdam yaratıyoruz" gibi soyut ve süslü sloganların arkasına saklanan bu kâr çarkının, aslında doğanın sonlu sınırlarına çarpıp toplum için kalıcı bir yıkıma ve asli bir kamusal zarara dönüşüp dönüşmediğini somut ve hukuki ölçütlerle çok sıkı denetlemeyi gerektirir.

3.3. Çevresel ve Toplumsal Riskler

- Toplumsal ve bireysel gereksinmelerin karşılanmasına yönelik pek çok faaliyet gibi, madencilik de doğal çevreye pek çok açıdan risk oluşturabilmektedir. İşletme yöntemi, zenginleştirme prosesi ile atıkların tür, miktar ve özelliklerine ve alınan önlemlere bağlı olarak canlı doğaya zarar verebilmekte, topoğrafyayı değiştirebilmekte, yeraltı ve yerüstü su kaynaklarını kirletebilmekte, önemli miktarda atık oluşturabilmekte, gürültü yapabilmekte, toz çıkarabilmekte; mineral kaynağının bulunduğu ve

çevresindeki araziyi olumsuz etkileyebilmekte; tarım, ormancılık ve hayvancılığa zarar verebilmektedir (2872 sayılı Çevre Kanunu ve ÇED Yönetmeliği).

- Kimi zaman bir madenin geliştirilmesi için köy ya da mezra gibi yerleşim yerlerinin taşınması gerekebilmektedir. Bu gibi durumlarda madencilik göçe neden olabilmekte, yerleşik kimi kültürlerin ya da alışkanlıkların değişimine/erozyonuna yol açabilmektedir.

3.4. Faaliyetin Anayasal Statüsü ve Kamusal Denetim İhtiyacı

Madencilik, doğası gereği yenilenemeyen bir kaynağın geri dönüşsüz biçimde yer kabuğundan alınması anlamına gelir. Bu özellik, faaliyetin meşruiyetini her zaman sıradan bir özel teşebbüs etkinliğinin ötesine taşır. Anayasa'nın 168. maddesi uyarınca tabii servetler ve kaynaklar devletin hüküm ve tasarrufu altındadır ve bunların aranması ile işletilmesi hakkı, ancak belirli süre ve şartlarla gerçek veya tüzel kişilere devredilebilir. Günay'a (2025b) göre bu hüküm, madencilik faaliyetinin sadece bir sözleşme ilişkisi değil, aynı zamanda kamusal bir yetkinin geçici devri olduğunu ortaya koyar.

Bu hukuki çerçeve, faaliyetin "kim için" yapıldığı sorusunu kaçınılmaz biçimde gündeme getirir. İdari yargı, özellikle Danıştay, çevresel etkileri yüksek madencilik projelerinde ÇED kararlarının hukuka uygunluk denetiminde sıklıkla "kamu yararı" testine başvurmaktadır. (Danıştay E.2023/6115, E.2022/7358, E.2022/7823, E.2022/3467, E.2025/3536, E.2024/1100, E.2022/2549 sayılı kararları)

Ne var ki bu test, çoğu zaman tarafların öne sürdüğü genel ve niceliksel olmayan iddialar üzerinden değerlendirilmekte; vergi ödendiği, istihdam yaratıldığı ve ihracata katkı sağlandığı yönündeki argümanlar, çoğunlukla şirket finansal tabloları üzerinden doğrulanmaksızın karine olarak kabul edilmektedir.

Buna karşılık, son yıllarda hem Türkiye'de hem de uluslararası literatürde madenciliğin kamuya net katkısının ölçülebilir göstergelerle test edilmesi gerektiği yönünde bir yaklaşım belirginleşmektedir. Uluslararası Madencilik ve Metaller Konseyi (ICMM) (2026) ve Doğal Kaynaklar Yönetişim Enstitüsü (NRGI, 2023) "Tax Base Erosion in the Mining Sector" (Maden Sektöründe Vergi Matrahı Aşınması) gibi kuruluşların çalışmaları; özellikle düşük efektif vergi oranları, yetersiz çevresel rehabilitasyon karşılıkları ve maden kapama yükümlülüklerinin örtülü biçimde kamuya transfer edilmesi olgularını sistematik olarak belgelemektedir.

Çalışmanın temel amacı şu şekilde özetlenebilir: Kamu yararı tartışması, ancak somut, kamuya açık verilerden türetilebilen ve karşılaştırmaya elverişli değişkenler üzerinden yürütüldüğünde hukuki ve toplumsal bir denetim aracı hâline gelebilir. Aksi takdirde tartışma, tarafların sayısal verilerle desteklenmemiş söylemleri arasında bir tercihe indirgenmektedir.

4. HUKUKİ VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE: KAMU YARARI TESTİNİN UNSURLARI

Bu bölümde, kamu yararı testinin dayandığı pozitif hukuk normları ile Danıştay içtihadında gözetilen ölçütler ortaya konmakta; ardından mevcut tartışmanın niteliksel söylem ile niceliksel kanıt arasındaki boşluğu tespit edilmektedir.

"Kamu yararı" kavramı, mevzuatta açıkça tanımlanmamış olmakla birlikte, Çakmak'ın (2013) da ortaya koyduğu gibi, idari yargı içtihadında istikrarlı biçimde uygulanan bir denetim ölçütü hâline gelmiştir. Kavramın kullanım alanı tipik olarak, somut olayda birden fazla kamu yararının çatıştığı ya da bir kamu yararı iddiası ile temel hak ve özgürlüklerin sınırlanması gerekçesinin karşı karşıya geldiği durumları kapsar. Madencilik özelinde bu çatışma çoğunlukla; ekonomik kalkınma, döviz girdisi ve istihdam temelli kamu yararı iddiası ile çevre hakkı (Anayasa md. 56), sağlıklı bir çevrede yaşama hakkı, su kaynakları üzerindeki kamusal menfaat ve tarımsal sürdürülebilirlik gibi karşı kamu yararları arasında ortaya çıkar.

4.1. Pozitif Hukuki Dayanaklar

Kamu yararı testinin dayandığı başlıca normatif kaynaklar ve bunların ilgili oldukları hususlar aşağıda gösterilmiştir:

- **Anayasa md. 56 -** Herkesin sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkı.
- **Anayasa md. 168 -** Tabii servetlerin devletin hüküm ve tasarrufu altında olması.
- **3213 sayılı Maden Kanunu-** Ruhsat rejimi, devlet hakkı ve çevre ile uyum planı yükümlülükleri.
- **2872 sayılı Çevre Kanunu ve ÇED Yönetmeliği -** Çevresel etki değerlendirmesinin zorunlu unsurları.
- **5520 sayılı Kurumlar Vergisi Kanunu -** İstisna, indirim ve teşvik rejimi.
- **Yatırım Teşvik Mevzuatı (Karar ve Tebliğler) -** Vergi, SGK ve gümrük teşvikleri (9903 sayılı Cumhurbaşkanı Kararı, 2025; 2025/1 sayılı Tebliğ).

4.2. Danıştay İçtihadında Kamu Yararı Testinde Gözetilen Ölçütler

Danıştay'ın çevre ile ilgili davalarda geliştirdiği yerleşik içtihat, kamu yararının soyut ve ortalama bir kavram olarak değil; somut olayın özgül koşulları içinde tartılması gereken çatışan kamusal menfaatlerin bileşkesi olarak değerlendirilmesini gerektirir. Uluslararası Çevre ve Kalkınma Enstitüsü (IIED), çevresel karar alma süreçlerinde, projelerin idari değerlendirmelerinin birbiriyle rekabet eden çıkar grupları arasında hassasiyetle tartılması (*balancing of interests*) gerektiğini vurgulamaktadır. Bkz. IIED, *Report of the Conference on the Role of Public Participation*.

Bu kapsamda mahkemeler çoğunlukla şu hususları gözetmektedir:
a) Söz konusu projenin yarattığı ekonomik faydanın somut ve ölçülebilir nitelikte olup olmadığı,
b) Bu faydanın kamuya mı yoksa ağırlıklı olarak özel sermayeye mi aktığı,
c) Çevresel zararın geri dönüştürülebilir nitelikte olup olmadığı ve bunun bedelinin kim tarafından üstlenildiği,
d) Yerel halkın, meslek kuruluşlarının ve kamusal niteliği baskın diğer aktörlerin tutumu (toplumsal rıza),
e) Alternatif çözümlerin ve teknolojilerin değerlendirilip değerlendirilmediği,
f) Gelecek nesillerin hakkının gözetilmesi.
Görüleceği üzere, bu testin uygulanabilmesi, salt hukuki argümanlarla sınırlı bir değerlendirmenin ötesinde; finansal, çevresel ve sosyolojik göstergelerin sayısal düzlemde, evrensel nitelikteki "adil denge" (*fair balance*) ilkesi çerçevesinde ortaya konulmasını gerektirir. Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi (AİHM), idarenin sağladığı ekonomik fayda ile bireylerin Anayasal hakları arasındaki bu ölçülebilirlik ve denge zorunluluğunu "adil denge" (*fair balance*) testiyle kurmaktadır. *Taşkın ve Diğerleri v. Türkiye* (Başvuru No: 46117/99) kararında; devletin elde edeceği ekonomik menfaat ile yöre halkının sağlıklı çevrede yaşama hakkı arasında mutlak surette somut ve adil bir dengenin kurulması gerektiği hükme bağlanmıştır.
Aksi takdirde idarenin ve şirketin söylemi, mahkemenin önündeki tek somut "delil" olma riskini taşır.

4.3. Niteliksel Söylem ile Niceliksel Kanıt Arasındaki Boşluk

Madencilik tartışmalarında kamuoyu önüne çıkan tipik argümanlar; vergi ödendiği, istihdam yaratıldığı, ihracata katkı sağlandığı, ülkenin döviz ihtiyacına cevap verildiği ve faaliyet sonrası alanın rehabilite edileceği yönündedir. Bu argümanların her biri ilk bakışta kamu yararı yönünden lehte bir önerme gibi görünür. Ancak hiçbiri, kendi başına, finansal tablolardan doğrulanabilir bir büyüklüğe işaret etmedikçe analitik değer taşımaz.

"Vergi ödendi" ifadesi; hangi tutardaki hasılat üzerinden, hangi efektif oranla ve hangi devlet feragatlerinin ardından bu verginin ödendiğini açıklamadıkça, kamu yararı tartışmasında bir veri değil bir slogan niteliği taşır.

Aynı sorun "istihdam" argümanı için de geçerlidir. Bir madenin 500 kişi istihdam etmesi, kamu açısından bu 500 kişinin geçici, taşeron ve düşük ücretli olup olmadığından; her bir çalışan başına kamuya kalan net payın ne olduğundan ve aynı kaynağın işletilmesiyle ortaya çıkan üst düzey menfaat yoğunlaşmasından bağımsız değerlendirilemez.

Bu çalışma, tartışmayı veri temelli bir zemine çekmeyi amaçlamaktadır. Bir sonraki bölümde önerilen on iki değişken; finansal tablolardan, vergi mutabakatlarından, dipnotlardan ve faaliyet raporlarından ölçülebilir ve doğrulanabilir olduğundan, yargısal bilirkişi incelemesine ve kamusal denetime daha elverişli bir yol göstermektedir.

5. METODOLOJİ: ON İKİ DEĞİŞKENLİ ÖLÇÜM ÇERÇEVESİ

Bu bölümde önerilen ölçüm çerçevesi, beş eksende toplanan on iki değişken üzerinden tanıtılmakta; her değişken için ölçümün hangi kalemden, hangi formülle ve hangi veri kaynağından yapılacağı ayrıntılandırılmaktadır. Çerçevenin bütününe ilişkin özet, Tablo 1'de verilmiştir.

Önerilen çerçeve beş eksen üzerinde şekillenmiştir:

- (A) Mali yük ve kamu geliri göstergeleri,
- (B) Gelir dağılımı ve istihdam göstergeleri,
- (C) Çevresel maliyet göstergeleri,
- (D) Faaliyet raporu kaynaklı operasyonel göstergeler,
- (E) Madenin stratejik niteliği ve nesiller arası adalet göstergeleri.

Tablo 1. Madencilikte kamu yararının ölçülmesine yönelik on iki değişkenli analiz çerçevesi: göstergeler, ölçüm amaçları, hesaplama biçimleri ve veri kaynakları

No	Gösterge	Neyi ölçer?	Hesaplama / alt göstergeler	Veri kaynağı
A. MALİ YÜK VE KAMU GELİRİ GÖSTERGELERİ (Bölüm 4.1)				
1	**Efektif vergi oranı**	Devletin maden faaliyetinden fiilen ne kadar nakit gelir elde ettiğini gösterir.	Fiilen ödenen vergi / Hasılat Tahakkuk eden değil, nakden ödenen vergi esas alınır; ertelenmiş vergi ve karşılıklar hariç tutulur.	Nakit akış tablosu, "ödenen gelir/kurumlar vergisi" satırı
2	**Vergi feragat oranı**	Devletin her 1 TL vergi tahsil ederken kaç TL vergiden	İstisna ve indirimler / Fiilen ödenen vergi	Vergi mutabakat tablosu (5520 s. KVK

No	Gösterge	Neyi ölçer?	Hesaplama / alt göstergeler	Veri kaynağı
		vazgeçtiğini gösterir. Oranın 1'i aşması örtülü sübvansiyona işaret eder.		ve yatırım teşvik mevzuatı kapsamındaki kalemler)
3	**Devlet hakkı / hasılat**	Kamunun, kaynak üzerindeki mülkiyet hakkından doğan asli payını gösterir. Vergiden farklı bir hukuki kategoridir.	Ödenen devlet hakkı / Hasılat Devlet hakkı ocak başı satış tutarı üzerinden hesaplanır; gösterge ise toplam hasılata oranlanır.	Nakit akış tablosu ve maliyet dipnotları; 3213 s. Maden Kanunu md. 14
4	**Toplam kamu payı / hasılat**	Her 100 birim hasılattan kamuya fiilen ne kaldığını gösteren sentez göstergedir ("Government Take").	(Efektif vergi + Devlet hakkı) / Hasılat	1 ve 3 no.lu değişkenlerden türetilir
B. GELİR DAĞILIMI VE İSTİHDAM GÖSTERGELERİ (Bölüm 4.2)				
5	**Gelir dağılımı göstergeleri**	Yaratılan değerin şirket içinde geniş tabanlı paylaşılıp paylaşılmadığını; üst yönetim ile saha çalışanı arasındaki makası ölçer.	(a) Toplam personel gideri / Üst yönetime sağlanan menfaatler (b) Üst yönetim menfaatleri / Hasılat (c) Personel giderindeki yıllık değişim ile üst yönetim menfaatlerindeki yıllık değişimin karşılaştırılması	İlişkili taraf açıklamaları; niteliklerine göre giderler dipnotu
6	**Kişi başı kamu geliri**	"İstihdam yaratma" argümanını ampirik teste tabi tutar: kaç kişi çalıştığı değil, çalışan başına kamuya ne kaldığı ölçülür.	Toplam kamu payı / Öz mal çalışan sayısı	Faaliyet raporu çalışan sayısı verisi; 4 no.lu değişken
C. ÇEVRESEL MALİYET GÖSTERGELERİ (Bölüm 4.3)				
7	**Çevresel maliyet göstergeleri**	Verilen tahribatın mali tablolardaki resmî karşılığını ve karşılıksız kalan, dolayısıyla kamuya devredilen örtülü yükü ölçer.	(a) Bilançoda ayrılan çevre rehabilitasyonu / maden kapama karşılığı (ARO) (b) Yıllık toprak hareketi (milyon ton) (c) Kullanılan kimyasal yöntem (siyanür liçi, sülfürik asit vb.) Ayrılan karşılığın gerçek kapama maliyetini eksik yansıttığı varsayımıyla düzeltme katsayısı uygulanır (bkz. Tablo notu 3).	Karşılıklar dipnotu; ÇED raporu; faaliyet raporu
D. FAALİYET RAPORU KAYNAKLI OPERASYONEL GÖSTERGELER (Bölüm 4.4)				
8	**Üretim hacmi ve fiyat bağımlılığı**	Hasılat artışının hacimsel büyümeden mi yoksa küresel fiyat artışından mı kaynaklandığını ayrıştırır.	Yıllık üretim miktarı Ortalama gerçekleşen satış fiyatı Birim nakit maliyet	Faaliyet raporu üretim ve satış tabloları
9	**Nakit birikimi ve kâr dağıtımı**	Yaratılan zenginliğin nerede biriktiğini; kamuya yansımayan bölümün şirket içi sermaye birikimine dönüşüp dönüşmediğini gösterir.	Dönem sonu nakit pozisyonu Geçmiş yıllar birikmiş kârları Dağıtılan temettü tutarı	Bilanço; öz kaynak değişim tablosu; genel kurul kâr dağıtım kararları
10	**Toplumsal rıza göstergesi**	Danıştay'ın "üstün kamu yararı" testinde belirleyici olan toplumsal rızanın ampirik izdüşümünü ölçer.	ÇED iptal davalarının sayısı Davacıların niteliği (belediyeler, meslek odaları, barolar, üniversiteler, STK'lar, yöre dernekleri)	Faaliyet raporu "devam eden davalar" bölümü; yargı kararı veri tabanları
E. STRATEJİK VE KUŞAKLARARASI GÖSTERGELER (Bölüm 4.5)				
11	**Stratejik nitelik ve ikame edilebilirlik**	Tükenebilir kaynağın kamu açısından stratejik değerini ve ikamesinin bulunup bulunmadığını değerlendirir.	(a) Madenin kamu açısından stratejik önem düzeyi (b) Ulusal/küresel ölçekte ikame imkânı (c) Üretilmemesi hâlinde kamunun yoksun kalacağı menfaatin niteliği ve büyüklüğü	Nitel değerlendirme; Anayasa md. 168 bağlamı; sektörel arz güvenliği raporları
12	**Nesiller arası adalet göstergesi**	Jeoetik perspektiften kuşaklararası hakkaniyeti; bugünkü üretimin gelecek nesilleri kaynaktan mahrum bırakıp bırakmadığını ölçer.	Rezerv tüketim hızı = Yıllık üretim / Toplam rezerv Mevcut tempoyla kalan ekonomik ömür (yıl) Gelirin kalıcı kamusal değerlere (fon, altyapı, eğitim) aktarılan payı	Faaliyet raporu rezerv tabloları; uluslararası standartlara göre hazırlanmış rezerv raporları

Tablo notları:

1. Hasılat: Tüm oranlarda payda olarak, gelir tablosundaki net satışlar (hasılat) tutarı esas alınmıştır.

2. ARO: Asset Retirement Obligation; bilançoda maden sahasının kapatılması ve rehabilitasyonu için ayrılan karşılık.

3. Düzeltme katsayısı: Ayrılan rehabilitasyon karşılıklarının gerçek kapama maliyetini tipik olarak % 30–60 oranında eksik yansıttığı yönündeki bulgular esas alınmıştır [ICMM (2025), Doğal Kaynaklar Yönetişim Enstitüsü (NRGI, 2023)

4. Öz mal çalışan: Alt yüklenici (taşeron) personeli hariç, doğrudan şirket bordrosunda yer alan çalışanlar.

5. Kısaltmalar: ÇED: Çevresel Etki Değerlendirmesi; KVK: Kurumlar Vergisi Kanunu; ICMM: International Council on Mining and Metals; IAGS: Institute for the Analysis of Global Security; MAPEG: Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü; STK: Sivil Toplum Kuruluşu; SGK: Sosyal Güvenlik Kurumu.

Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

5.1. Mali Yük ve Kamu Geliri Göstergeleri (Değişken 1–4)

Değişken 1 – Efektif Vergi Oranı (Fiilen Ödenen Vergi / Hasılat)

Bu oran, şirketin toplam satış hasılatına oran olarak fiilen nakit çıkışı gerçekleşen vergi tutarını ifade eder. Önemli olan, tahakkuk eden değil; nakit olarak Hazine'ye intikal eden vergidir. Bu nedenle ölçüm, vergi mutabakatı kaleminden değil, doğrudan nakit akış tablosunun "ödenen gelir/kurumlar vergisi" satırından yapılmalıdır. Ertelenmiş vergiler ve karşılıklar bu hesabın dışında tutulur. Oran, devletin maden faaliyetinden fiilen ne kadar gelir elde ettiğini gösterir; düşük değerler kamu yararı argümanını zayıflatır.

Değişken 2 – Vergi Feragat Oranı (İstisna ve İndirimler / Fiilen Ödenen Vergi)

5520 sayılı Kurumlar Vergisi Kanunu'ndaki istisna ve indirimler ile yatırım teşvik mevzuatı kapsamındaki uygulamalar nedeniyle devletin vazgeçtiği vergi tutarının, fiilen tahsil edilen vergiye oranıdır. Mali tablolarda bu bilgi vergi mutabakat tablosundan elde edilir. Oranın 1'i aşması, devletin her 1 TL tahsil ettiği vergiye karşılık daha fazla TL'den feragat ettiği anlamına gelir; bu durum tartışmayı "kamuya katkı" söyleminden "örtülü kamu sübvansiyonu" tartışmasına taşır.

Değişken 3 – Devlet Hakkı / Hasılat Oranı

3213 sayılı Maden Kanunu'nun 14. maddesi uyarınca ödenen devlet hakkı, Günay'ın (2025b) belirttiği gibi vergiden farklı bir hukuki kategoridir. Vergi, genel bir mali yükümlülük olarak alınırken; devlet hakkı, kaynağın asli sahibinin (kamunun) mülkiyet hakkından doğan asli payıdır. Devlet hakkı, madenin satış tutarı üzerinden değil, ocak başı satış tutarı üzerinden hesaplanmaktadır. Kamu yararının ölçülmesinde ise doğrudan devlet hakkı tutarının değil, bu tutarın hasılata oranının dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle düşük bir devlet hakkı oranı, sadece bir mali tercih değil; kamunun kendi mülkiyet hakkını yetersiz fiyatlandırması anlamına gelir. Veri, nakit akış tabloları ve maliyet dipnotlarından elde edilir.

Değişken 4 – Toplam Kamu Payı / Hasılat

Efektif vergi ile devlet hakkının toplamının hasılata oranıdır. Bu oran, her 100 birim hasılattan kamuya fiilen ne kaldığını gösteren sentez göstergedir. Karşılaştırmalı analiz için en pratik tek başlıklı ölçüttür; uluslararası benchmark çalışmalarında "Government Take" adıyla yer alan büyüklüğün finansal tablolardan doğrulanabilir hâlidir. (IMF (Uluslararası Para Fonu): IMF'nin Mali İşler Departmanı tarafından hazırlanan *"Fiscal Regimes for Extractive Industries: Design and Implementation"* (Ekstraktif Endüstriler İçin Mali Rejimler) adlı çalışma, "Government Take" hesaplamasının küresel standartlarını belirler.).

5.2. Gelir Dağılımı ve İstihdam Göstergeleri (Değişken 5–6)

Değişken 5 – Gelir Dağılımı Göstergeleri

Gelir dağılımı, kamu yararının çoğu zaman göz ardı edilen bir boyutudur. Bir madenin yarattığı ekonomik değerin, kamu ile özel sermaye arasındaki paylaşımı kadar; özel sermaye içinde de geniş tabanlı bir paylaşımı sağlayıp sağlamadığı belirleyicidir. Bu kapsamda üç alt gösterge önerilmektedir: (a) toplam personel giderlerinin üst yönetime sağlanan menfaatlere oranı; (b) üst yönetim menfaatlerinin hasılata oranı; (c) toplam personel giderlerinin yıllık değişim oranı ile üst yönetim menfaatlerinin değişim oranının karşılaştırılması. Bu veriler, ilişkili taraf açıklamaları ve niteliklerine göre giderler dipnotlarından elde edilir.

Değişken 6 – Kişi Başı Kamu Geliri (Çalışan Başına Kamu Yararı)

Toplam kamu payının (vergi + devlet hakkı) öz mal çalışan sayısına bölünmesiyle elde edilen orandır. Bu gösterge, madenciliğin tipik "istihdam yaratma" argümanını analitik bir teste tabi tutar: yüksek istihdam, kamuya yansıyan paydan bağımsız değerlendirildiğinde yanıltıcı olabilir. Soru, kaç kişinin istihdam edildiğinden çok, her bir çalışan başına kamuya ne kaldığıdır. Düşük bir kişi başı kamu geliri; faaliyetin emek-yoğun bir kamu yararı üretiminden çok, emek-yoğun bir özel sermaye birikim sürecine yol açtığına işaret edebilir.

5.3. Çevresel Maliyet Göstergeleri (Değişken 7)

Değişken 7 – Çevresel Maliyet Göstergeleri

Çevresel maliyet, üç alt boyutla ele alınmalıdır: (a) bilançoda ayrılan çevre rehabilitasyonu ve maden kapama karşılığı tutarı; (b) yıllık toprak hareketi (milyon ton cinsinden); (c) kullanılan kimyasal yöntem türü (siyanür liçi, ağır metal salınımı potansiyeli vb.).

ICMM (2026) ayrılan rehabilitasyon karşılıklarının gerçek kapama maliyetinin tipik olarak yüzde 30 ile 60 oranında eksik kaldığını ortaya koymaktadır. Bu eksik karşılık, faaliyet ömrü sonunda doğrudan ya da dolaylı biçimde kamuya devredilen örtülü bir yükümlülüktür. Bu nedenle gösterge, "şirketin ayırdığı karşılık" ile "bağımsız tahmini gerçek maliyet" arasındaki farkı da dikkate almalıdır.

Çevresel rehabilitasyon karşılığının yetersizliği, kamuya açıklanmamış bir vergi ve kamuya devredilmiş bir borçtur. Bu yüklenim, finansal tabloda görünür hâle gelmedikçe "kamu yararı" testinin çevre ayağı eksik kalır.

5.4. Faaliyet Raporu Kaynaklı Operasyonel Göstergeler (Değişken 8–10)

Değişken 8 – Üretim Hacmi ve Fiyat Bağımlılığı

Yıllık üretim miktarı, ortalama gerçekleşen satış fiyatı ve birim nakit maliyet, faaliyet raporundan doğrulanabilen üç temel veridir. Bu değişkenin amacı, hasılat artışının hacimsel büyümeden mi yoksa fiyat artışından mı kaynaklandığını ayrıştırmaktır. Eğer hasılat artışı büyük ölçüde fiyatın küresel yükselişine bağlıysa, bu artışın "şirket performansı" ya da "ülkeye katkı" olarak sunulması analitik olarak yanıltıcıdır; çünkü temel sürükleyici küresel piyasadır ve kamunun bu artıştan elde ettiği pay esas ölçüt olmaya devam eder.

Değişken 9 – Nakit Birikimi ve Kâr Dağıtım Politikası

Dönem sonu nakit pozisyonu, geçmiş yıllar birikmiş kârları ve dağıtılan temettü tutarı bir arada değerlendirildiğinde, zenginliğin nerede biriktiği sorusu yanıtlanabilir hâle gelir. Şirket bünyesinde yüksek bir nakit birikimi, ısrarla düşük tutulan temettü dağıtım oranı ve buna eşlik eden düşük efektif vergi yükü; yaratılan değerin kamuya yansımayan bölümünün şirket içi sermaye birikimine dönüştüğünü gösterir. Bu da gelir dağılımı tartışmasını şirket dışı paydaşlardan şirket içi sermaye sahibine doğru kaydırır.

Değişken 10 – Toplumsal Rıza Göstergesi

Danıştay'ın "kamu yararı" testinde toplumsal rızanın varlığı belirleyici bir kriterdir. (Danıştay 6. Daire, Esas No: 2022/8054, Karar No: 2023/187) Bu kapsamda faaliyet raporlarında listelenen ÇED iptal davaları, dava açan kurumların sayısı ve niteliği (belediyeler, meslek odaları, barolar, üniversiteler, sivil toplum kuruluşları, yöre dernekleri) önemli bir ampirik veri kümesi oluşturur. Birden fazla kamusal nitelikli aktörün dava açtığı projelerde toplumsal rıza karinesi zayıflar; bu durum, hukuki test bakımından lehte değil aleyhte bir parametredir.

5.5. Madenin Niteliği ve Nesiller Arası Adalet Göstergeleri (Değişken 11–12)

Değişken 11 – Madenin Stratejik Niteliği ve İkame Edilebilirliği

Kamu yararı değerlendirmesi, salt mali bir hesaplamaya indirgenemeyecek kadar çok boyutlu bir mesele olup, üretilen madenin niteliği de bu değerlendirmenin ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır. Bu çerçevede üç alt boyut öne çıkmaktadır: (a) üretimi yapılan madenin kamu açısından mutlak bir menfaat taşıyıp taşımadığı; (b) söz konusu madenin ulusal ya da küresel ölçekte ikame edilebilir nitelikte olup olmadığı; (c) madenin üretilmemesi hâlinde kamunun yoksun kalacağı menfaatin niteliği ve büyüklüğü.

Stratejik önemi haiz, ikamesi bulunmayan ya da arz güvenliği bakımından kritik nitelikteki madenler ile yaygın biçimde bulunabilen ve kolayca ikame edilebilen madenlerin kamu yararı açısından aynı ölçütlerle değerlendirilmesi isabetli olmayacaktır. Altın özelinde bu sorgulama özellikle anlam kazanmaktadır: sanayide kritik bir girdi olmaktan çok, büyük ölçüde değer saklama ve mücevher amacıyla kullanılan altının üretilmemesi hâlinde kamunun katlanacağı fırsat maliyeti, stratejik madenlerle kıyaslandığında oldukça sınırlı kalmaktadır. World Gold Council (WGC), *Gold Demand Trends Report*, 2025. (Rapora göre sanayi ve teknoloji kullanımının toplam talep içindeki payı yüzde 8'in altındadır. https://www.gold.org/goldhub/research/gold-demand-trends)

Değişken 12 – Nesiller Arası Adalet Göstergesi

Madenlerin yenilenemeyen ve tükenebilir doğal kaynaklar olduğu gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, kamu yararı kavramının yalnızca bugünkü nesillerin menfaati ile sınırlı tutulamayacağı açıktır. Nesiller arası adalet ilkeleri gereği, gelecek nesillerin aynı madenden yararlanma hakkı da değerlendirmenin esaslı bir unsuru olarak dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda; yıllık üretim hacminin toplam rezerve oranı (rezerv tüketim hızı), mevcut üretim temposuyla madenin kalan ekonomik ömrü ve elde edilen gelirin gelecek nesillere aktarılmak üzere ne ölçüde dönüştürüldüğü (örneğin egemen varlık fonu, altyapı yatırımı, eğitim fonu gibi kalıcı kamusal değerlere kanalize edilen pay) ölçülebilir göstergeler olarak ele alınmalıdır. Bugünün yüksek üretim hacmiyle elde edilen mali katkı, gelecek nesillerin aynı kaynaktan tamamen mahrum bırakılması pahasına sağlanıyorsa, bu durum kamu yararı testinin nesiller arası adalet boyutunda aleyhte bir parametre oluşturur.

6. SINIRLILIKLAR VE OLASI ELEŞTİRİLER

Bu bölümde, önerilen çerçevenin veri kaynağı, muhasebe uygulamaları ve ölçüm yöntemine ilişkin sınırlılıkları açıkça ortaya konmakta ve bu sınırlılıkların çerçevenin geliştirilmesi bakımından taşıdığı anlam tartışılmaktadır.

Önerilen çerçevenin bilinen sınırlılıkları, dürüst bir analitik tutumun gereği olarak açıkça ortaya konmalıdır.

- **Veri kaynaklarına bağımlılık:** Tüm değişkenler, kamuya açık finansal tablolar ve faaliyet raporları üzerinden hesaplanmakta; halka açık olmayan ya da şeffaflığı düşük şirketler için çerçeve doğrudan uygulanamamaktadır.
- **Muhasebe tercihlerinin etkisi:** Karşılıkların ayrılma politikası, değerleme yöntemleri ve dipnot ayrıntılandırma düzeyi şirketten şirkete farklılaşmakta; bu da karşılaştırılabilirliği sınırlamaktadır.
- **Çevre maliyetinin örtük niteliği:** Çevresel zararın parasal karşılığını tahmin etmek, doğası gereği bir aralık tahminidir; tek bir nokta değeri olarak sunulması yanıltıcı olabilir.
- **Toplumsal rızanın indirgenmesi riski:** Dava sayısı ve davacı niteliği önemli bir göstergedir, ancak rızanın yokluğunu tek başına ölçemez; nitel saha araştırmaları ile desteklenmelidir.
- **Stratejik nitelik değerlendirmesinin öznelliği:** Bir madenin stratejik önemi, dönemin teknolojik ve jeopolitik koşullarına göre değişebilir; bu nedenle değerlendirme statik değil, dinamik bir perspektifle yapılmalıdır.

Buna karşın bu sınırlılıklar, çerçevenin reddedilmesi için değil geliştirilmesi için bir gerekçe oluşturur. Mevcut "söylem temelli" tartışmaya kıyasla, on iki değişkenli çerçeve; açık eksikliklerine rağmen denetlenebilir, eleştirilebilir ve geliştirilebilir bir yapı sunmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde çalışmanın temel savı özetlenmekte ve çerçevenin uygulanabilirliğini artıracak beş politika önerisi sıralanmaktadır.

Bu çalışma, madencilikte "kamu yararı" tartışmasının ancak somut, kamuya açık ve doğrulanabilir verilerden türetilen değişkenler üzerinden yürütüldüğünde anlamlı bir hukuki denetim ölçütüne dönüşebileceğini ileri sürmektedir. Önerilen on iki değişkenli çerçeve; mali yük, gelir dağılımı, çevresel maliyet, madenin stratejik niteliği, nesiller arası adalet ve toplumsal rıza boyutlarını birlikte ele

alarak; yargısal ve idari değerlendirmeye, kamuoyu tartışmasına ve akademik çalışmalara aynı zeminde hizmet edebilecek bir analitik şema sunmaktadır.

Bu çerçeveden hareketle beş politika önerisi sıralanabilir:

- Madencilik şirketleri için, mevcut finansal tablo dipnotlarına ek olarak; ödenen devlet hakkı, ayrılan rehabilitasyon karşılığının hesaplama varsayımları, üst yönetim menfaatleri ve ÇED davaları gibi kalemleri standartlaştıran sektörel bir kamuyu aydınlatma rehberinin hazırlanması,
- Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğünün (MAPEG), şirketlerin ödediği devlet hakkı oranlarını ve tutarlarını, ticari sır kapsamına girmediği için açıklaması,
- Çevre rehabilitasyonu karşılıklarının, bağımsız ve uluslararası karşılaştırmaya açık bir metodolojiyle güncellenmesi; karşılığın hesaplanmasında kullanılan varsayımların ÇED raporları ile entegre biçimde kamuoyu denetimine sunulması,
- ÇED süreçlerinde, "kamu yararı" iddiasının yalnızca söylem düzeyinde değil; en azından bu çalışmanın önerdiği türden ölçülebilir göstergelerle desteklenmesi şartının aranması,
- İdari yargıda bilirkişi incelemeleri için, çatışan kamu yararlarının somut göstergelerle değerlendirilmesini sağlayacak ortak bir metodolojik çerçevenin oluşturulması; böylece tartışmanın her davada sıfırdan kurulmaması.

8. SON SÖZ

Kamu yararı, ölçülebilir bir kavram hâline getirildiği ölçüde kabul edilebilir ve hukuki bir test olarak işlevini yerine getirebilir. Bu çalışma, tartışmayı slogan düzleminden veri düzlemine taşıyan bir başlangıç adımı olarak değerlendirilmelidir.

Madenler; milyonlarca yılda oluşan, tüketildiğinde yerine konulamayan, hiçbir kişi ve zümrenin emeği olmayan, doğanın insanlığa sunduğu ortak değerlerdir. Bu nedenle insanlığın gerçek ihtiyaçları doğrultusunda plânlı bir biçimde üretilmeleri zorunludur.

Bu değerlendirmeler ışığında; öncelikle insanlık için gerekliliği ile çevresel ve diğer alanlardaki etkileşimleri de dikkate alınarak yapılacak maden işletmeciliğinde kamu/toplum yararı bulunup bulunmadığının detaylı şekilde irdelenmesi ve buna göre karar verilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

2872 Sayılı Çevre Kanunu 1983. *T.C. Resmî Gazete*, Sayı: 18132, 11 Ağustos 1983.

3213 Sayılı Maden Kanunu 1985. *T.C. Resmî Gazete*, Sayı: 18785, 15 Haziran 1985.

5520 Sayılı Kurumlar Vergisi Kanunu 2006. *T.C. Resmî Gazete*, Sayı: 26205, 21 Haziran 2006.

Çakmak, N.M. 2013. *İdare Hukukunda Kuramsal Olarak Kamu Yararı*, Seçkin Yayınevi, Ankara, 123 s.

Foster, J.B. 2001. *Marx'ın Ekolojisi: Materyalizm ve Doğa* (çev. E. Özkaya), Epos Yayınları, Ankara, 38 s.

(Özgün baskı: *Marx's Ecology: Materialism and Nature*, Monthly Review Press, New York, 2000.)

Günay, Ö. 2025 *Jeotermal Kaynaklar Hukuku*,Seçkin Yayınevi

Günay, Ö. 2025 *Maden Hukuku*, 3. Baskı, Seçkin Yayınevi, Ankara, .

International Council on Mining and Metals (ICMM) [2026yıl].

https://im-mining.com/2026/03/10/new-icmm-report-shines-light-on-mining-industrys-greenhouse-gas-emissions/

Kayadelen, M. 2008. Madencilik Yatırım Projelerinde Temel Kavramlar, Madencilik Yatırım Projelerinin Hazırlanması ve Değerlendirilmesi Semineri, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Sürekli Eğitim Merkezi, Ankara, 20 s.

Marx, K. 2011. *Ekonomi Politiğin Eleştirisine Katkı* (çev. S. Belli), 7. Baskı, Sol Yayınları, Ankara, s. (Özgün baskı: *Zur Kritik der Politischen Ökonomie*, 1859; Önsöz için bkz. s. 23-28.)

Özuslu, M.T. Yayımlanmamış notlar.

T.C. Anayasası 1982. *T.C. Resmî Gazete*, Sayı: 17863 (Mükerrer), 9 Kasım 1982.

Yatırımlarda Devlet Yardımları Hakkında Karar 2025. 9903 sayılı Cumhurbaşkanı Kararı, *T.C. Resmî Gazete*, 30 Mayıs 2025. (Uygulama Tebliği: 2025/1, *T.C. Resmî Gazete*, Sayı: 32933, 21 Haziran 2025.)

Türk Dil Kurumu 2026. *Güncel Türkçe Sözlük*, "kamu yararı" maddesi, https://sozluk.gov.tr, Erişim: 25.08.2026.

Madencilikte Vergi Yönetimi ve Tahsilat Çerçevelerinin İyileştirilmesi Kılavuzu (2013) https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/576391468330004326

TÜRK MADEN HUKUKUNDA RÖDÖVANS SÖZLEŞMELERİNİN YAPISAL ÇÖKÜŞÜ: ANAYASAL, İDARİ VE DOKTRİNER BÜTÜNCÜL BİR ELEŞTİRİ

THE STRUCTURAL COLLAPSE OF ROYALTY AGREEMENTS IN TURKISH MINING LAW: A COMPREHENSIVE CONSTITUTIONAL, ADMINISTRATIVE, AND DOCTRINAL CRITIQUE

Ömer GÜNAY*

Maden Mühendisi & Hukukçu, Ankara, Türkiye

ÖZET Maden ruhsatı, Anayasa'nın 168. maddesi uyarınca mülkiyeti Devlete ait olan tabii servetlerin işletilmesi için idare tarafından verilen "kişiye bağlı" bir kamusal statüdür. Ancak rödövans sözleşmeleri, bu kamusal iznin arkasından dolanarak madencilik sektöründeki idari denetimi yapısal olarak çökertmekte ve sektörü bir sömürü kurgusuna dönüştürmektedir. Bu çalışmada, rödövans uygulamasının; mülkiyetin gayriliği, hakların bölünmezliği ve ahde vefa gibi temel hukuk ilkelerini nasıl ihlal ettiği, karşılaştırmalı hukuk ekseninde ve Soma ile Ermenek facialarındaki nedensellik bağı ışığında incelenmektedir. Rödövansın tarihsel evrimi, doktriner savunuların yapısal çelişkileri ve idari ehliyet süzgeçlerini nasıl bertaraf ettiği bütüncül olarak ele alınmıştır. Sonuç olarak, devletin anayasal gözetim yetkisini sönümleyen bu asimetrik sömürü kurgusunun Türk Borçlar Kanunu'nun 27. maddesi kapsamında kesin hükümsüz kabul edilmesi ve yeni alternatif işletme modellerine geçilmesi gerekliliği ortaya konmuştur.

ABSTRACT A mining license is a personal public status granted by the administration for the operation of natural resources owned by the State in accordance with Article 168 of the Constitution. However, royalty agreements circumvent this permission, structurally collapse administrative control in the mining sector, and transform the sector into an exploitation structure. In this study, how the royalty practice violates fundamental legal principles such as the non-ownership of property, the indivisibility of rights, and pacta sunt servanda is examined in the light of comparative law and its causal link in the Soma and Ermenek disasters. The historical evolution of royalties, the structural contradictions of doctrinal defenses, and how they eliminate administrative competence filters are discussed holistically. Consequently, it has been demonstrated that this asymmetric exploitation structure, which dampens the state's constitutional oversight authority, must be considered absolutely void under Article 27 of the Turkish Code of Obligations, necessitating a transition to alternative operational models.

1. GİRİŞ

Bu çalışma, 13 Mayıs 2014 tarihinde Soma'da yer altında hayatını kaybeden 301 maden işçisinin ve Ermenek'te su baskını sonucu yitirdiğimiz 18 emekçinin anısına ithaf edilen "Maden Haklarının Ticarileşmesi ve Rödövans Sözleşmeleri" adlı eserin temel paradigmalarına dayanmaktadır. Madencilik faaliyetinin doğasından kaynaklanan münferit iş kazaları olarak değerlendirilemeyecek olan bu facialar, Anayasa'nın 168. maddesi uyarınca mülkiyeti Devlete ait bulunan kaynakların işletilmesinde, rödövans uygulamasının yarattığı yapısal sonuçlardır. Eserin içerdiği tüm doktriner, idari, teknik ve tarihsel bulgular, rödövans sözleşmelerinin Türk Borçlar Kanunu kapsamında ehlileştirilebilir bir "hasılat kirası" olmadığını, aksine mutlak butlanla malul bir kanuna karşı hile (fraus legis) organizasyonu olduğunu kanıtlamaktadır. (Amiklioğlu 2016, Çevikçelik, M. 2017, Erdoğan, K. 2017)

2. RÖDÖVANSIN KAVRAMSAL TEMELLERİ VE TARİHSEL DÖNÜŞÜMÜ

2.1. Atipik Nitelik ve Kanunilik İlkesi Sorunu

Maden hukukunun temel taşlarından biri haline gelen rödövans sözleşmesi, Türk özel hukuku ve idare hukuku disiplinlerinin kesişim noktasında, nev'i şahsına münhasır bir statü arz etmektedir. Rödövans, Türk Borçlar Kanunu'nda özel olarak düzenlenmeyen, atipik (isimsiz) bir sözleşmedir. Yargıtay ve doktrinin bir kısmı bu sözleşmeyi "hasılat kirası" hükümlerine kıyasen ayakta tutmaya çalışsa da, madencilikte işletmecinin bizzat madenin "özünü" söküp alarak tüketmesi (substanzverzehr), klasik hasılat kirasındaki "özü koruma" borcu ile açıkça çelişmektedir.

2.1.1. Kanunilik ilkesinin ihlali

Rödövans müessesesi, kanunilik ilkesi yönünden yapısal bir sakatlık barındırmaktadır. Maden Kanunu metninde "rödövans" kelimesi geçmesine rağmen, asıl tanımı idari bir tasarrufa, yani Maden Yönetmeliği'ne (m. 4) bırakılmıştır. Anayasa m. 168 kapsamında Devlete ait tabii servetlerin işletilmesine ilişkin temel esasların yönetmelikle belirlenmesi, yürütme organının bu alanı kanuni denetimden kaçırma arzusunun bir göstergesidir.

2.2. Tarihsel Dönüşüm ve Piyasalaşma Evreleri

Türkiye'de madenlerin işletilmesinde rödövans kurgusu üç farklı evrimsel aşamadan geçmiştir. 1985 öncesi mülga 6309 sayılı Kanun döneminde kamu kurumlarının (TKİ, TTK, Etibank) hizmet alımı şeklinde uyguladıgı istisnai "fiili

durum" dönemi, 1980'lerde neoliberal esnekliklerle madenlerin piyasalaştırılması sürecine evrilmiştir.

2.2.1. "Meşrulaşma" eşiği ve reaksiyoner dönüşüm

2004 yılındaki 5177 sayılı Kanun değişiklikleri ve Yargıtay kararları ile "ehlileştirilen" rödövans, 2014 Soma faciasının yarattığı infialin ardından 2015 yılında 6592 sayılı Kanun'la reaksiyoner bir değişikliğe uğramıştır. Kanun koyucu, Ek Madde 7 ile rödövansı doğrudan MAPEG iznine tabi kılmış, ancak sorumluluğu fiili işletmeciye yıkarak asıl ruhsat sahibine hukuki bir kalkan yaratmıştır.

3. DOKTRİNER TASNİFLER VE YARGISAL EHLİLEŞTİRMENİN ELEŞTİRİSİ

3.1. Üçlü Tasnif ve "İade Kaydı" Kriteri

Türk doktrininde Prof. Dr. Mustafa Topaloğlu tarafından 2001 yılında geliştirilen rödövans tasnifi; (i) Klasik Rödövans, (ii) Lisans Devri Niteliğinde Rödövans ve (iii) Devir İçeren Rödövans olarak üçlü bir yapı arz eder. Yargıtay 14. Hukuk Dairesi, bu kategorileri birbirinden ayırmak için "iade kaydı" kriterini esas almıştır. Eğer sözleşmede ruhsatın tekrar devredene döneceğine ilişkin bir hüküm varsa bu "kira", yoksa "vadeli satım" sayılmıştır.(Topaloğlu, M. 2001)

3.1.1. Yargısal ehlileştirme eleştirisi

Bu yaklaşım, kamu malı üzerindeki idari iznin özel hukuk sözleşmesine konu edilmesinin anayasal mülkiyet rejimine (AY m. 168) ve idare hukukuna olan mutlak aykırılığını örtbas etmektedir. Hukuki imkânsızlığı borçlar hukuku diline tercüme ederek normalleştiren bu yaklaşım, yargısal bir ehlileştirme çabasıdır.

3.2. Pragmatist Savunuların ve "Haydi Haydi İzin" Tezinin Çöküşü

Özel hukukçu doktrinin kurucu metinlerinde bile (Topaloğlu, Çitil, Amıklıoğlu) rödövansın asıl amacının Maden Kanunu'ndaki "bölünmezlik yasağını aşmak" (fraus legis) ve "etrafından dolanmak" olduğu açıkça itiraf edilmiştir. Öte yandan Erdoğan'ın, Ek m. 7'deki sorumluluk düzenlemesine dayanarak ileri sürdüğü "kanun sorumluluk yüklüyorsa, evleviyetle (*a fortiori*) izin de vermiş sayılır" yönündeki savunusu mantıksal bir hataya dayanmaktadır; zira hukukta bir fiile sorumluluk bağlanması, o fiili meşru ve geçerli kılmaz (Erdoğan, K. 2017).

4. ANAYASAL MÜLKİYET REJİMİ VE İDARE HUKUKU EKSENİNDE BUTLAN

4.1. Madenlerin "Res Publicae" Niteliği ve Spekülasyon Yasağı

Anayasa'nın 168. maddesi uyarınca tabii servetler and kaynaklar Devletin hüküm ve tasarrufu altındadır. Ruhsat sahibi, yer altındaki cevherin maliki değil, sadece bir idari izin (imtiyaz) sahibidir. Maliki olmadığı bir varlığı rödövansla kiraya veren ruhsat sahibi, evrensel "Nemo plus iuris" (Kimse sahip olduğundan daha fazla hakkı devredemez) kuralını ihlal etmektedir.

4.1.1. Üretimsiz rant ve spekülasyon tuzağı

Kamu hukukundaki spekülasyon yasağı ilkesi gereği; maden hakları pazar dalgalanmalarından faydalanılarak salt bir rant aracı gibi ticarileştirilemez. Rödövans, elitlerin ruhsat kapatıp hiçbir risk almadan küçük işletmecilere yüksek paylarla pazarladığı bir hava parası ve rant aracına dönüşmüştür. Bu asimetrik risk dağılımında nimet (rant) ruhsat sahibinde kalırken, tüm operasyonel riskler rödövansçıya yıkılmaktadır.

4.2. Ruhsatın Şahsiliği (Intuitu Personae) ve Kamusal Süzgeçlerin Bertarafı

Maden ruhsatı, idare hukuku bakımından liyakati bizzat denetlenmiş belirli bir kişiye verilen "şahsına bağlı" (intuitu personae) bir statü işlemidir. Ancak rödövans sözleşmeleri, Maden Kanunu'nun tesis ettiği ihale, teminat ve ehliyet incelemesi gibi birbirini tamamlayan üç kamusal süzgeci birden özel bir sözleşmeyle bertaraf etmektedir.

4.2.1. İdari denetimin sönümlenmesi

Rekabetçi ihale prosedüründen geçmeyen, idareye doğrudan teminat vermeyen ve mali kapasitesi MAPEG tarafından sınanmayan "gölge işletmeci" konumundaki rödövansçı, kanunun emredici yetkilendirme kapısını yan kapıdan dolanarak sahaya mutlak hakim olmaktadır. Anayasa'nın 128. ve 7. maddelerindeki yetki devri yasağıyla da çelişen bu yapı, rödövansın idari düzlemde yok hükmünde olduğunu kanıtlamaktadır.

4.3. Mali Asimetri ve Devlet Hakkının Devredilemezliği

Maden Kanunu m. 14'te düzenlenmiş olan "devlet hakkı", muhatabı kanunla belirlenmiş kamu hukuku kaynaklı bir mali yükümlülüktür. Uygulamada, rödövansçıların bu kamusal borçları özel sözleşmeler yoluyla üstlenmesi hukuken geçersiz bir devirdir. Ruhsat sahibinin, kamu malını işletme yetkisinden doğan bu

asli mali külfeti bile alt-işletmeciye yıkması, "Cuius commoda, eius incommoda" (Nimet kiminse külfet de ona aittir) ilkesinin mali düzlemde ters yüz edilmesidir.

5. HAKLARIN BÖLÜNMEZLİĞİ, TEKNİK İMKÂNSIZLIK VE REZERV STERİLİZASYONU

5.1. Jeolojik Bütünlük ve Rasyonel İşletmecilik Paradoksu

3213 sayılı Maden Kanunu'nun 5. maddesi "Maden hakları ve ruhsatları hisselere bölünemez" hükmünü amirdir. Ancak rödövans sözleşmeleri, ruhsatı kağıt üzerinde tek parçada tutup sahanın koordinat, kat ve derinlik bazında dilimlenmesine (gölge işletmeciliğe) yol açmaktadır. Doğal bir süreklilik ve jeolojik bütünlük arz eden maden yatağının bu şekilde parçalanması, havalandırma kısa devrelerine ve galeri çakışmalarına neden olarak rasyonel işletmeciliği yok etmektedir.

5.1.1. Anayasa mahkemesinin çelişkili yaklaşımı

Anayasa Mahkemesinin E.2019/47, K.2021/16 sayılı kararı, TTK ve TKİ sahalarının bölünerek rödövansa verilmesini "madenciliğin mutlak kamu yararı" safsatasıyla onaylamış; ancak bu durum ÇED süreçlerini işlevsizleştiren (salata dilimi taktiği) ve havza madenciliğini hiçe sayan fıkhi bir isabetsizlik örneği olarak tarihe geçmiştir.

5.2. Seçici Madencilik (High-Grading) ve Teknik Nezaretin Çöküşü

Rödövans sözleşmeleri, rödövansçıyı kısa sözleşme süresi içinde maksimum kâr elde etmeye zorlar. Bu durum "seçici madencilik" (high-grading) pratiğini tetikleyerek sadece yüksek tenörlü zengin damarların yağmalanmasına neden olur. Düşük tenörlü cevher pasaya terk edilir ve maden rezervleri ebediyen "sterilize edilerek" kısırlaştırılır; bu da Anayasa m. 168'deki rasyonel işletme emrinin ihlalidir.

5.2.1. Yönetim ve komuta karmaşası

Sahadaki "Teknik/Daimi Nezaretçi", hukuken ruhsat sahibine bağımlı olsa da ekonomik olarak rödövansçıdan maaş aldığı için bağımsız denetim gücünü kaybetmektedir. Emir-komuta zincirinin bu şekilde üç başlı bir karmaşaya sürüklenmesi, ocak acil durumlarında tahliye kararının "üretim durursa zarar ederiz" ticari baskısı altında ezilmesine yol açmaktadır.

6. SOMA VE ERMENEK FACİALARI IŞIĞINDA SOSYAL VE HUKUKİ YIKIM

6.1. Üretim/Maliyet Baskısı ve İşçi Ölümleri

Soma (301 can) ve Ermenek (18 can) facialarının ardından yayımlanan TMMOB, TBB,[1] TBMM Araştırma Komisyonu Raporu [2] ve IndustriALL raporları[3]; bu kazaların teknik ihmallerden değil, doğrudan rödövansın "üretim zorlaması" (hadi hadi düzeni) ve "maliyet sıkıştırması" sarmalından kaynaklandığını ampirik olarak tescillemiştir. Rödövans bedelini ödemek ve kâr etmek zorunda olan işletmeci, İSG yatırımlarını feda etmiş ve jeomekanik sınırları aşmıştır.

6.1.1. Devletin pozitif koruma yükümlülüğünün ihlali

Anayasa m. 17 ve 56 bağlamında devletin, tehlikeli faaliyetlerden doğan riskleri önleme (pozitif koruma) ödevi vardır. Ancak rödövansın oluşturduğu nispîlik perdesi, MAPEG ve müfettişlerin sahadaki gerçek riskleri görmesini engelleyerek "kamusal körlük" (regulatory blindness) yaratmıştır.

6.2. Tabela Şirketleri, Muvazaa ve Kolektif Hakların Sönümlenmesi

Rödövans, ruhsat sahipleri için operasyonel ve insani enkazlardan kaçınma kalkanı işlevi görmektedir. Kaza veya tasfiye anlarında karşılaşılan "tabela şirketleri" (sermayesiz, varlıksız paravan yapılar), işçi ailelerinin kazandığı tazminat davalarını icra edilemez birer "Pirus Zaferi"ne dönüştürmektedir. İşçi hukuku bakımından asıl işveren-alt işveren ilişkisi perdelenerek (veiling) yapısal bir muvazaa karinesi oluşturulmaktadır.

6.2.1. Anayasal sendikal hakların tasfiyesi

Rödövans yapısının yarattığı tüzel parçalanma, Anayasa'nın 51, 53 ve 54. maddelerindeki sendika, TİS ve grev haklarını fiilen işlevsiz kılmakta; uluslararası ILO standartlarını (87 ve 98 No.lu sözleşmeler) yapısal olarak ihlal etmektedir.

7. KARŞILAŞTIRMALI HUKUK VE YASAL REFORMLARIN DİYALEKTİĞİ

---

[1] https://www.barobirlik.org.tr/Haberler/soma-maden-faciasi-raporu-61927

[2] TBMM, *Manisa'nın Soma İlçesinde Başta 13 Mayıs 2014 Tarihinde Olmak Üzere Meydana Gelen Maden Kazalarının Araştırılarak… Meclis Araştırması Komisyonu Raporu*, Dönem 24, Sıra Sayısı 680, Ankara 2014,

[3] https://www.industriall-union.org/wp-content/uploads/documents/emergency_resolution_on_soma_bkandgm_edit.pdf

7.1. Uluslararası Hukukta Rödövansın Karşılıkları (Fransa, Avustralya, Gana)

Dünya maden hukuku rejimleri, kamusal kaynakların rödövans benzeri sözleşmelerle istismar edilmesine sert kısıtlamalar getirmiştir:

• Fransa (Amodiation): Fransız modelinde işletme devri mutlak bir idari izin koşuluna (autorisation d'amodiation) ve alt işletmecinin bizzat liyakat denetiminden geçmesi kuralına (équivalence de capacité) bağlıdır.
• Avustralya (Sub-letting): Bakanlığın mutlak yazılı onayı zorunludur. Dahası "use it or lose it" (kullan ya da kaybet) prensibi ve müteselsil asli sorumluluğun devamlılığı ilkesiyle spekülatif rantiye sınıfının doğuşu yasaklanmıştır.
• Peru/Şili ve Gana: Latin Amerika'daki "Amparo Minero" sistemi ve Gana'daki kayıt dışı işletmeciliği (Galamsey) tasfiye eden ağır cezai müeyyideler, kamu mallarının nispî sözleşmelerle delinemeyeceğinin küresel standartlarını ortaya koymaktadır.

7.1.1. Kanada NSR ve İngiliz Tribute Geleneği

Kanada'daki Net Smelter Returns (NSR) modelinde rödövans hak sahibi sahaya operasyonel müdahalede bulunmazken, Türkiye'deki yapı ortaçağ İngiliz "Tribute" (haraç/pay) sisteminin sömürücü çekirdek mantığıyla birebir örtüşmektedir.

7.2. Ek Madde 7 Değişiklikleri ve "Nimet-Külfet" Dengesinin İhlali

7164 sayılı Kanun ile Maden Kanunu Ek Madde 7'de yapılan değişiklikle rödövansçılara doğrudan ruhsat alma imkânı tanınması; yasa koyucunun, rödövansın yarattığı yapısal sakatlığı ve sorumluluk sönümlenmesini zımnen itiraf etmesi (confessio legislatoris) demektir. Buna karşın 7257 sayılı Kanun ile ÇED ve mülkiyet izinlerinin sadece soyut bir "kapasite taahhüdüne" endekslenerek devredilebilmesi, liyakat denetimini tamamen işlevsizleştiren bir risk barındırmaktadır. Kamu kurumu niteliğindeki Türk Altın İşletmeleri A.Ş.'nin dahi ihalelerde liyakati bir kenara bırakıp sadece rödövans teklif %'si üzerinden sahaları e-posta yoluyla pazarlaması, nimet-külfet simetrisini yok ederek hakların finansallaştığının somut vesikasıdır.

7.3. Alternatif Modeller ve Yeni Paradigmanın İnşası

Rödövans sisteminin sınıfsal ve tarihsel evrimi, artık bu sistemin borçlar hukuku düzleminde "hasılat kirası" olarak sürdürülemeyeceğini kanıtlamıştır. Yapılması gereken reformlar şunlardır:
• Topyekûn Yasaklama: Rödövans sözleşmeleri Maden Kanununda yapılacak açık bir değişiklikle mutlak olarak yasaklanmalıdır.

• Saf Hizmet Alımı: Risk ve rödövans payı paylaşımı içermeyen, tamamen fiziki iş hacmine (m3 kazı vb.) dayalı hizmet alımlarına (eser sözleşmesi) geçilmelidir.
• Tescilli Ortaklık/Konsorsiyum: Birden fazla aktörün yer alacağı projelerde MAPEG nezdinde müteselsilen sorumlu olacak tescilli konsorsiyumlar ihdas edilmelidir.
• Ruhsatın Tam Devri: İşletilmeyen (atıl) sahalar liyakatli aktörlere bütünüyle devredilmeli veya kamu eliyle doğrudan işletilmelidir.

8. SONUÇ

Anayasal, idari, teknik ve ampirik eksende gerçekleştirilen bu çok katmanlı dekonstrüksiyon çalışması neticesinde; geleneksel rödövans sözleşmelerinin, Mülkiyetin Gayriliği İlkesini (Anayasa m. 168), Hakların Bölünmezliği ve Ruhsatın Şahsiliği İlkelerini (Maden Kanunu m. 5 ve m. 6) dolanmak kastıyla kurgulandığı, "seçici madencilik" yoluyla rezerv bütünlüğünü sterilize ettiği ve işçi ölümlerini yapısal bir maliyet mekanizmasına tahvil ettiği ispatlanmıştır. Özü itibarıyla üretimi değil, üretimsiz rant transferini amaçlayan; sorumluluğu özel sözleşmelerle alt aktörlere ihale ederken idari denetim ve ihale-liyakat güvencelerini bertaraf eden bu sözleşmeler, Türk Borçlar Kanunu m. 27 uyarınca konu yönünden hukuki imkânsızlık ve kamu düzenine mutlak aykırılık teşkil etmektedir. Bu nedenlerle rödövans sözleşmeleri akdedildikleri andan itibaren kesin olarak hükümsüz (batıl) sayılmalı ve madencilik sektörü, yetki ile sorumluluğun birleştiği, insan ve doğa odaklı meşru işletme modellerine acilen devredilmelidir.

KAYNAKLAR

Amıklıoğlu, H. 2016. Rödövans Sözleşmeleri, Seçkin Yayınevi, Ankara.

Çevikçelik, M. 2017. Türk İdare Hukukunda Maden İşletme ve Rödövans Sözleşmeleri, Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Çitil, B. 2021. Maden Hukuku, 2. Baskı, Seçkin Yayınevi, Ankara.

Copur, H., Ozdemir, L., Rostami, J. 1998. Roadheader Applications in Mining and Tunneling, Mining Engineering, 50, 3, pp. 38-42.

Erdoğan, K. 2017. Rödövans Sözleşmeleri, Seçkin Yayınevi, Ankara.

Eren, F. 2022. Borçlar Hukuku Özel Hükümler, Yetkin Yayınları, Ankara.

Emil, M. K. 2010. Land Degradation Assesment For an Abondoned Coal Mine with Geospatial Information Technologies, https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12612627/index.pdf (Ocak 2010).

ILİ, 2013. Ilgın Linyitleri İşletmesi-ILİ, http://www.ili.gov.tr (Eylül 2023).

IndustriALL Global Union. 2014. Türkiye Madencilik Sektörü Raporu (Prekarizasyon ve İş Güvenliği), Cenevre.

https://www.industriall-union.org/wp-content/uploads/documents/emergency_resolution_on_soma_bkandgm_edit.pdf

Kayserili, Y. / Topaloğlu, M. 1990. Türk Maden Hukuku ve Yeraltı Zenginlikleri Mevzuatı, Kazancı Hukuk Yayınları (No: 75), İstanbul.

Lewis, G. R. 1908. The Stannaries: A Study of the Medieval Tin Miners of Cornwall and Devon, Harvard Economic Studies, Vol. III, Harvard University Press, Cambridge, MA.

Özdamar, K. 2004. Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi 1, Kaan Kitabevi, Eskişehir, 649 s.
Özdoğan, M. 2002. Elektrikli Yerkazı Makinalarının Kazı Gücü Etkileyicileri ve Karşılaştırma Ölçütleri, Madencilik Dergisi, 41, 4, s. 3-10.
Özdoğan, M., Güngör Ö. 2014. Gevşetilmiş Linyit Örtü Katmanı Basamaklarında Çalışan Elektrikli Maden Yerkazı Araçlarında Özgül Kazı-Yükleme Erkesi, Türkiye 19. Kömür Kongresi, Zonguldak, s. 105-114.
Paşamehmetoğlu, A. G., Bilgin, H. A. 1990. Galerilerde Optimum Patlatma Düzeninin Saptanması, TTK Genel Müdürlüğü Asma İşletmesi Kömür ve Kayaların Kaya Mekaniği ve Dizayn Parametrelerinin Çıkartılmasının Araştırılması, Proje No. 88-03-05-01-04, Ankara, 64 s.
Pehlevan, M., Kır, N., Saka, A. 2008. Zonguldak Kozlu TY-1, TY-2 ve TY-3 Sondajlarının Jeoloji Raporu, MTA Raporu, Derleme No :11083, Ankara.
Suiçmez, T. 2007. Kömür Petrografik Bileşenlerinin Seçimli Olarak Ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, 63 s.
Tandoğan, H. 1985. Özel Borç İlişkileri, C. I/1, Ankara.
TBB (Türkiye Barolar Birliği). 2015. Soma ve Ermenek Maden Facialarına İlişkin Hukuki Değerlendirme Raporu, Ankara.
https://www.barobirlik.org.tr/Haberler/soma-maden-faciasi-raporu-61927
TBMM. 2014. Soma Maden Faciasını Araştırma Komisyonu Raporu, Ankara.
TBMM, *Manisa'nın Soma İlçesinde Başta 13 Mayıs 2014 Tarihinde Olmak Üzere Meydana Gelen Maden Kazalarının Araştırılarak… Meclis Araştırması Komisyonu Raporu*, Dönem 24, Sıra Sayısı 680, Ankara 2014,
TMMOB. 2014. Soma Maden Faciası İnceleme Raporu, Ankara.
https://www.tmmob.org.tr/yayin/soma-maden-faciasi-inceleme-raporu

Topaloğlu, M. 2001. Rödövans Sözleşmesi: Hukuksal Sorunlar ve Yapısal Çözüm Önerileri, 17. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildirisi, Ankara, 249-253.
Topaloğlu, M. 2014. Maden Hukuku, Adana.
TS 330, 1966. Maden Kömüründe Kül Tayini, TSE, Ankara, 4 s.
TS 711, 2002. Taşkömürü ve Kok-Uçucu Madde Tayini. TSE, Ankara, 8 s.
Yavuz, C. 2014. Türk Borçlar Hukuku Özel Hükümler, 6098 Sayılı TBK'ya Uyarlanmış Baskı, Beta Yayıncılık, İstanbul.

TÜRKİYE LİNYİT MADENCİLİĞİ SEKTÖRÜNÜN YAPISAL VE FİNANSAL DÖNÜŞÜMÜ (2009-2023): BİR SEKTÖREL ANALİZ

STRUCTURAL AND FINANCIAL TRANSFORMATION OF THE TURKISH LIGNITE MINING SECTOR (2009-2023): A SECTORAL ANALYSIS

Ömer GÜNAY

Avukat, Maden Mühendisi

ÖZET Bu çalışma, Türkiye linyit madenciliği sektörünün 2009-2023 yılları arasındaki yapısal değişimini ve finansal performansını Merkez Bankası sektörel bilanço verileri ışığında incelemektedir. Analiz sonuçları, sektörün son 15 yılda öz kaynak ağırlıklı bir yapıdan yabancı kaynak bağımlılığına evrildiğini ve kârlılık oranlarında ciddi dalgalanmalar yaşandığını göstermektedir. Özellikle 2023 yılı itibarıyla kısa vadeli borçların pasif toplamı içindeki payının dramatik artışı, sektörün finansal sürdürülebilirliği açısından kritik bir eşiği temsil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Linyit madenciliği, sektörel bilanço analizi, finansal yapı, borçluluk, kârlılık.

ABSTRACT *This study examines the structural change and financial performance of the Turkish lignite mining sector between 2009 and 2023, drawing on the sectoral balance sheet data of the Central Bank of the Republic of Türkiye. The findings show that over fifteen years the sector shifted from an equity-weighted structure toward dependence on short-term borrowing, while profitability deteriorated from profit to persistent loss. The pronounced rise in the share of short-term liabilities within total liabilities by 2023 marks a critical threshold for the sector's financial sustainability and points to an urgent need for financial restructuring.*

Keywords: *Lignite mining, sectoral balance sheet analysis, financial structure, leverage, profitability.*

1. GİRİŞ

Linyit madenciliği, Türkiye'nin enerji arz güvenliği ve yerli kaynak kullanım stratejilerinin temel taşlarından biridir. Ülkenin elektrik üretiminde yerli kömürün payını koruma ve ithal enerji bağımlılığını azaltma hedefleri, linyit havzalarının ekonomik değerini sürekli gündemde tutmaktadır. Bununla birlikte, küresel enerji piyasalarındaki volatilite, döviz kurlarındaki dalgalanmalar ve yeşil dönüşüm baskıları altında, sektörün finansal dayanıklılığı her zamankinden daha önemli hale gelmiştir.

2009-2023 dönemi, Türkiye linyit madenciliği açısından hem yatırım hem de maliyet yapısı bakımından önemli kırılmaların yaşandığı bir aralıktır. Bu dönemde sektör; küresel emtia fiyatlarındaki iniş çıkışlar, 2018 sonrası belirginleşen kur şokları, 2021-2022 küresel enerji krizi ve karbonsuzlaşma hedeflerinin yarattığı yapısal belirsizlik gibi çok katmanlı baskılarla karşılaşmıştır. Bu baskıların işletme bilançolarına yansıması, sektörün finansal sürdürülebilirliğini değerlendirmek bakımından kritik bir inceleme alanı oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye linyit madenciliği sektörünün aktif (varlık) ve pasif (kaynak) yapısında 2009-2023 döneminde meydana gelen değişimleri Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB) sektör bilançoları verileri üzerinden ortaya koymak ve bu değişimlerin sektörün finansal riskliliği ile sürdürülebilirliği açısından anlamını tartışmaktır. Çalışma, tekil firma analizleri yerine sektörün toplulaştırılmış bilanço görünümünü esas alarak makro düzeyde bir sektörel okuma sunması bakımından alan yazınına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Makale şu şekilde kurgulanmıştır: İkinci bölümde veri kaynağı ve yöntem açıklanmakta; üçüncü bölümde sektörün aktif yapısı ve varlık dağılımı; dördüncü bölümde finansman yapısı ve borçluluk; beşinci bölümde kârlılık ve risk değerlendirmesi ele alınmaktadır. Altıncı bölümde bulgular bütünleşik biçimde tartışılmakta, yedinci bölümde ise sonuç ve politika önerilerine yer verilmektedir.

2. VERİ VE YÖNTEM

Çalışmanın veri tabanını, TCMB tarafından düzenli olarak yayımlanan Sektör Bilançoları verileri oluşturmaktadır. TCMB sektör bilançoları, reel sektör firmalarının bilanço ve gelir tablosu kalemlerini faaliyet kollarına göre toplulaştırarak sunmakta ve böylece sektör genelinin finansal görünümünü izleme imkânı sağlamaktadır. Bu çalışmada, linyit madenciliği faaliyet koluna ilişkin toplulaştırılmış bilanço ve gelir tablosu kalemleri 2009-2023 dönemi için derlenmiştir.
Analizde üç yöntem birlikte kullanılmıştır. Dikey analiz (yüzde yöntemi) ile her bir bilanço kaleminin aktif veya pasif toplamı içindeki payı hesaplanmış; böylece yıllar arasında karşılaştırılabilir bir yapı oranı elde edilmiştir. Yatay analiz ile

seçili kalemlerin yıllar içindeki seyri ve trend yönü değerlendirilmiştir. Oran analizi ile de finansal yapı (öz kaynak/pasif, yabancı kaynak/pasif) ve kârlılık göstergeleri yorumlanmıştır. Karşılaştırmalarda 2009 (dönem başı), 2015 (ara dönem) ve 2023 (dönem sonu) yılları referans alınmıştır.

Çalışmanın temel sınırlılığı, kullanılan değerlerin nominal Türk Lirası cinsinden olması ve özellikle 2018 sonrası yüksek enflasyon ortamında reel karşılaştırmaların güçleşmesidir. Bu nedenle parasal büyüklükler yerine yapı oranlarına (yüzde paylara) ağırlık verilmiştir. Ayrıca sektör kapsamındaki firma sayısının ve örneklemin yıllar içinde değişebilmesi de toplulaştırılmış verilerin yorumlanmasında dikkate alınması gereken bir kısıttır.

3. SEKTÖRÜN AKTİF YAPISI VE VARLIK DAĞILIMI

Sektörün aktif yapısı incelendiğinde, dönen varlıkların toplam aktifler içindeki payının 2009 yılında %53,09 seviyesinden 2023 yılında %57,23'e yükseldiği görülmektedir. Bu artış, işletmelerin likidite ihtiyacının ve stok maliyetlerinin arttığına işaret etmektedir. Duran varlıkların payı ise aynı dönemde %46,91'den %42,77'ye gerilemiştir.

Çizelge 1. Sektörün aktif yapısının dağılımı (TCMB 2024).

Varlık Grubu	**2009 (%)**	**2023 (%)**
Dönen Varlıklar	53,09	57,23
Duran Varlıklar	46,91	42,77
Aktif Toplamı	**100,00**	**100,00**

Dönen varlıkların payındaki artış, tek başına olumlu bir gelişme olarak okunmamalıdır. Bu artışın kompozisyonu belirleyicidir: Eğer söz konusu yükseliş büyük ölçüde stoklardaki birikme ve ticari alacaklardaki uzamadan kaynaklanıyorsa, bu durum nakde dönüşüm hızının yavaşladığına ve işletme sermayesinin verimsizleştiğine işaret edebilir. Yüksek enflasyon ortamında stok değerlerinin nominal olarak şişmesi de bu payın artışında etkili olabilmektedir.

Duran varlık payındaki gerileme ise, yeni sabit kıymet yatırımlarının görece sınırlı kalması, mevcut varlıkların amortismanla erimesi ve sektörün yatırım iştahındaki zayıflama ile ilişkilendirilebilir. Sermaye yoğun bir faaliyet kolu olan madencilikte duran varlık payının düşmesi, orta-uzun vadede üretim kapasitesinin yenilenmesi açısından dikkatle izlenmesi gereken bir göstergedir.

4. FİNANSMAN YAPISI VE BORÇLULUK ANALİZİ

Sektörün finansman modelinde yaşanan değişim, çalışmanın en dikkat çekici bulgusudur. 2009 yılında öz kaynakların pasif içindeki payı %47,86 iken, bu oran

2023 yılında %20,02'ye kadar gerilemiştir. Aynı dönemde kısa vadeli yabancı kaynakların payı %42,03'ten %67,56'ya fırlamıştır. Bu durum, sektörün uzun vadeli yatırımları dahi kısa vadeli borçlarla finanse etmeye başladığını, bir başka deyişle ciddi bir vade uyumsuzluğu (maturity mismatch) ile karşı karşıya kaldığını göstermektedir.

Çizelge 2. Sektörün finansman yapısı ve dönem sonucu göstergeleri (TCMB 2024).

Finansal Gösterge	**2009**	**2015**	**2023**
Öz Kaynaklar / Pasif Toplamı (%)	47,86	36,36	20,02
Kısa Vadeli Yabancı Kaynaklar / Pasif (%)	42,03	31,08	67,56
Uzun Vadeli Yabancı Kaynaklar / Pasif (%)*	10,11	32,56	12,42
Dönem Net Kârı/Zararı (Bin TL)	549.970	-66.128	-213.492

(*) Uzun vadeli yabancı kaynak payı, pasif toplamından öz kaynak ve kısa vadeli yabancı kaynak paylarının çıkarılmasıyla elde edilen tamamlayıcı (artık) değerdir.

Çizelge 2'de görüldüğü üzere, öz kaynak payı 15 yıllık dönemde yaklaşık 28 puan gerileyerek üçte birinden daha düşük bir seviyeye inmiştir. Bu öz kaynak erozyonu, hem birikmiş zararların öz kaynakları aşındırmasından hem de büyümenin ağırlıklı olarak borçla finanse edilmesinden kaynaklanabilir. Öz kaynak tabanının zayıflaması, sektörün dış şoklara karşı kendi kaynaklarıyla direnme kapasitesini düşürmektedir.

Kısa vadeli yabancı kaynak payının 2023 itibarıyla pasifin üçte ikisini aşması, finansal yapı açısından en kritik bulgudur. Ara dönem olan 2015'te uzun vadeli kaynak payının görece yükselmiş olması, sektörün bir dönem borç vadesini uzatmaya çalıştığına işaret etse de, 2023'te tablonun yeniden ve daha keskin biçimde kısa vade lehine dönmesi, finansmana erişim koşullarının sertleştiğine ve sektörün kısa vadeli borç çevirme baskısı altında kaldığına işaret etmektedir.

Bu finansman yapısı üç temel riski beraberinde getirmektedir. Birincisi likidite riskidir: Kısa vadeli yükümlülüklerin ağırlığı, dönen varlıkların bu yükümlülükleri karşılama gücünü sürekli gündemde tutmaktadır. İkincisi faiz ve yeniden finansman riskidir: Sık vadelenen borçların yenilenmesi, yükselen faiz ortamında finansman maliyetlerini doğrudan artırmaktadır. Üçüncüsü, borçların döviz cinsinden olması hâlinde belirginleşen kur riskidir; kur şoklarının yaşandığı bir dönemde bu risk, borç yükünü TL bazında hızla büyütebilmektedir.

5. KÂRLILIK VE RİSK DEĞERLENDİRMESİ

Sektörün kârlılık performansı, dönem boyunca dalgalı ve genel olarak bozulan bir seyir izlemiştir. 2009 yılında yaklaşık 550 milyon TL düzeyinde net kâr üreten sektör, 2015 yılında 66 milyon TL'lik bir net zarara geçmiş, 2023 yılında ise zarar

213 milyon TL'ye yükselmiştir. Bu görünüm, dönem başındaki kârlı yapının dönem sonunda kalıcı bir zarar dinamiğine dönüştüğünü ortaya koymaktadır.

Kârlılıktaki bu bozulmanın arkasında birden çok etken bulunmaktadır. Üretim ve girdi maliyetlerindeki artış, enerji ve işçilik giderlerindeki yükseliş faaliyet kârlılığını baskılarken; artan borçluluğun doğurduğu finansman giderleri net sonucu doğrudan aşağı çekmektedir. Özellikle kısa vadeli ve faize duyarlı bir borç yapısında, faiz giderlerinin faaliyet kârını eritmesi olasıdır. Buna kur kaynaklı kambiyo zararları da eklendiğinde, faaliyet düzeyinde elde edilen olumlu sonuçların dahi net zarara dönüşebildiği bir tablo ortaya çıkmaktadır.

Kârlılık ile finansman yapısı arasındaki ilişki, sektörün risk profilini belirginleştirmektedir. Öz kaynakların erimesi ve net zararların sürmesi karşılıklı olarak birbirini besleyen bir döngü oluşturmaktadır: Zarar öz kaynağı aşındırmakta, zayıflayan öz kaynak daha fazla borçlanmayı zorunlu kılmakta, artan borç ise finansman giderleri yoluyla kârlılığı yeniden baskılamaktadır. Finansal kaldıracın bu biçimde yükselmesi, sektörün makroekonomik şoklara karşı kırılganlığını artırmakta ve finansal sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir.

Bu çerçevede 2023 yılı, hem kısa vadeli borç payının pasifin üçte ikisini aşması hem de net zararın derinleşmesi nedeniyle sektör açısından kritik bir eşik niteliği taşımaktadır. Söz konusu eşik, finansal yapının kendiliğinden iyileşmesinden çok, aktif bir yeniden yapılandırma ihtiyacına işaret etmektedir.

6. GENEL DEĞERLENDİRME

Çalışmanın bulguları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, Türkiye linyit madenciliği sektörünün 2009-2023 döneminde üç eksende eşzamanlı bir dönüşüm yaşadığı görülmektedir. Aktif tarafında dönen varlıklar lehine ılımlı bir kayma, pasif tarafında öz kaynaktan yabancı kaynağa ve özellikle kısa vadeli borca doğru keskin bir geçiş, gelir tablosunda ise kârdan kalıcı zarara doğru bir bozulma söz konusudur. Bu üç eğilim birbirinden bağımsız değildir; finansman yapısındaki bozulma ile kârlılıktaki gerileme karşılıklı olarak birbirini güçlendirmektedir.
Bu yapısal dönüşüm, yalnızca işletme düzeyinde bir finansal yönetim sorunu olarak değil, enerji politikası bağlamında da ele alınmalıdır. Linyitin elektrik üretiminde ve enerji arz güvenliğinde üstlendiği rol göz önüne alındığında, sektörün finansal kırılganlığı arz güvenliği riskine dönüşme potansiyeli taşımaktadır. Öte yandan, küresel ölçekte hızlanan karbonsuzlaşma ve yeşil dönüşüm süreçleri, linyite dayalı yatırımların uzun vadeli getiri belirsizliğini artırmakta ve sektörün finansmana erişim koşullarını daha da zorlaştırabilmektedir.

Dolayısıyla sektörün geleceği, kısa vadeli finansal istikrarın sağlanması ile orta-uzun vadeli stratejik konumlandırmanın eşgüdümlü biçimde ele alınmasına bağlıdır. Borç yapısının sürdürülebilir bir vadeye yayılması ve öz kaynak

tabanının güçlendirilmesi, sektörün hem mevcut likidite baskısından çıkması hem de dönüşüm sürecine uyum sağlayabilmesi için ön koşul niteliğindedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye linyit madenciliği sektörünün 2009-2023 dönemindeki yapısal ve finansal dönüşümü TCMB sektör bilançoları verileri üzerinden incelenmiştir. Bulgular, sektörün öz kaynak ağırlıklı bir yapıdan kısa vadeli yabancı kaynak bağımlısı bir yapıya evrildiğini, öz kaynak payının %47,86'dan %20,02'ye gerilediğini, kısa vadeli borç payının %42,03'ten %67,56'ya yükseldiğini ve dönem sonucunun kârdan kalıcı zarara döndüğünü ortaya koymaktadır. Bu görünüm, sektörün finansal sürdürülebilirliği açısından kritik bir eşiğe ulaşıldığına işaret etmektedir.

Bu çerçevede sektörün finansal dayanıklılığını güçlendirmeye yönelik olarak şu öneriler geliştirilebilir: Borç yapısının vade kompozisyonu yeniden düzenlenmeli ve kısa vadeli yükümlülüklerin bir kısmı uygun maliyetli uzun vadeli kaynaklara dönüştürülerek vade uyumsuzluğu azaltılmalıdır. Öz kaynak tabanı; sermaye artırımı, kâr dağıtım politikalarının gözden geçirilmesi ve gerektiğinde yeni ortaklık modelleriyle güçlendirilmelidir. Maliyet yönetimi ve işletme sermayesi verimliliği önceliklendirilmeli; stok ve alacak yönetimi iyileştirilerek nakde dönüşüm hızı artırılmalıdır. Kur ve faiz risklerine karşı riskten korunma araçları ve finansal planlama mekanizmaları etkin biçimde kullanılmalıdır. Enerji politikası düzeyinde ise sektörün finansal kırılganlığı arz güvenliği boyutuyla birlikte ele alınmalı; yeşil dönüşüm sürecine uyumu kolaylaştıracak geçiş ve finansman mekanizmaları değerlendirilmelidir.

Gelecek çalışmalarda, sektörün likidite, faaliyet ve kaldıraç oranlarının daha geniş bir gösterge setiyle ve enflasyondan arındırılmış (reel) verilerle incelenmesi; ayrıca firma düzeyinde verilerle desteklenmiş karşılaştırmalı analizlerin yapılması, burada ortaya konan toplulaştırılmış bulguların derinleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

TCMB, 2024. Sektör Bilançoları (2009-2023), Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası, Ankara, https://www.tcmb.gov.tr (10.02.2025)

TKİ, 2023. Kömür (Linyit) Sektör Raporu, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu, Ankara.

ETKB, 2023. Türkiye Enerji Görünümü, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.

MAPEG, 2023. Maden İşleri İstatistikleri, Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

TÜİK, 2023. Madencilik ve Taş Ocakçılığı İstatistikleri, Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara.

TÜRKİYE'DE MADENCİLİK SEKTÖRÜNÜN EKONOMİDEKİ ETKİSİNİN ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

AN EXAMINATION OF THE IMPACT OF THE MINING SECTOR ON THE TURKISH ECONOMY USING TIME SERIES ANALYSIS

Gülnaz Daloğlu*
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

Fatih Çemrek
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İstatistik Bölümü, Eskişehir

ÖZET Günümüz yönetim politikalarını etkileyen en önemli iki konu "madencilik ve ekonomidir". Bu iki konunun birbiriyle olan ilişkisi, dünya politikasına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu çalışmada, Türkiye'deki 1996-2024 yılları arasında madencilik ile ilgili ihracat ve ithalat göstergeleri verileri Zaman Serileri ile analiz edilecektir. Bunun için ARIMA Modelleri kullanılacaktır. Madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı zaman serisi için uygun model ARIMA (1,1,0), ithalat için en uygun modelin ARIMA (2,1,0) ve ihracatın ithalatı karşılama oranı zaman serisi için ARIMA (1,1,1) olduğu belirlenmiştir. Madencilik alanında ithalat ve ihracat değerlerinin birbirini dengelemesi ve dünya politikasından etkilenmemesi için hammadde temin edilerek, yatırım eksikliği minimuma indirilmeli ve "döngüsel ekonomi" gibi diğer endüstrilere fayda veren bir yöntem üzerinde durulmalıdır. Döngüsel ekonomi, atık ve kirliliği azaltır. Ayrıca, ülkemizin başlıca eksiği olan enerji kaynağı sağlamada son teknolojik metotlar kullanılarak, ithalat-ihracat politikasına yön verilmelidir.

ABSTRACT The two most important issues determining today's governance policies are "mining and the economy." This comprehensive relationship changes depending on world politics. This was achieved by analyzing mining-related export and import data in Türkiye between 1996 and 2024 using Time Series. ARIMA models were used for this purpose. For the time series of mining exports as a share of total exports, the appropriate model was ARIMA (1,1,0), for imports the most appropriate model was ARIMA (2,1,0), and for the export-import coverage ratio time series, ARIMA (1,1,1). Increased investments in the mining sector lead to increased exports and decreased imports. To address the interplay of mining import and export values and their susceptibility to global politics, the issues of raw material sourcing and underinvestment must be minimized, and focus should be placed on methods that benefit other

* *gdaloglu@ogu.edu.tr.*

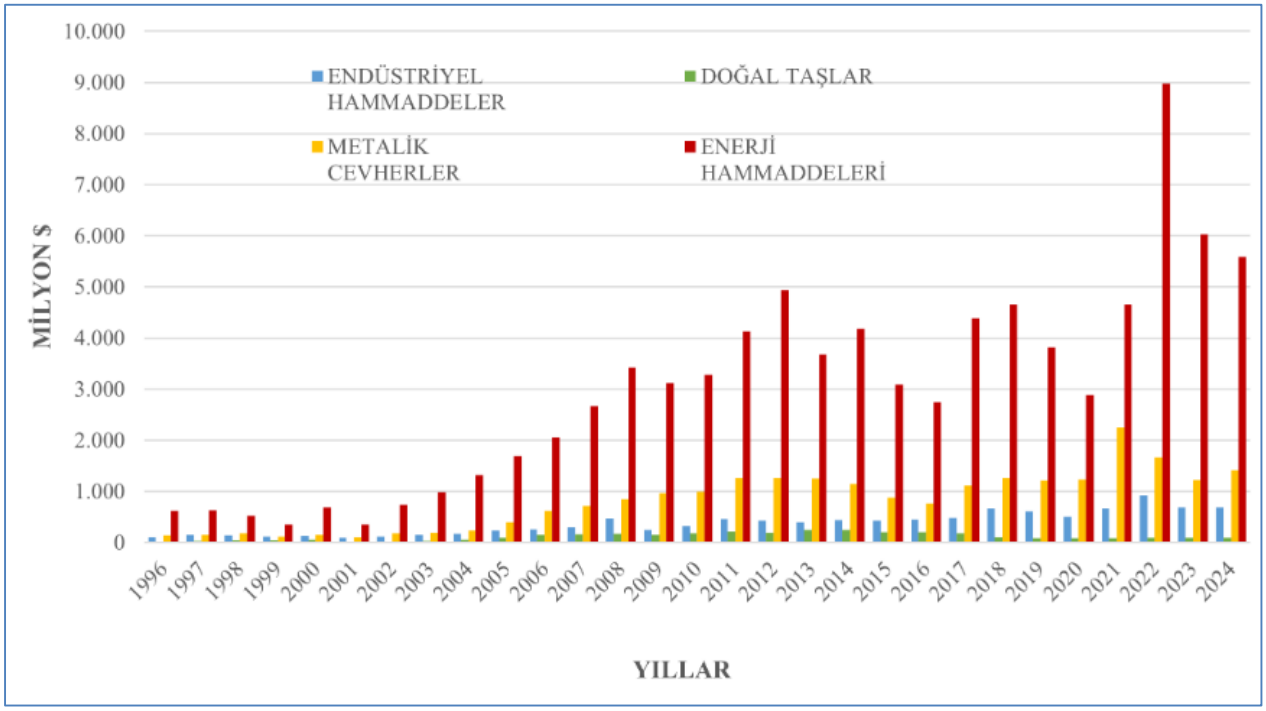
industries, such as the “circular economy. The circular economy reduces waste and pollution. Furthermore, the import-export policy should be shaped by employing the latest technological methods to address the country's primary shortcoming: the provision of energy sources.

1. GİRİŞ

Madencilik endüstrisi, hızla gelişen teknoloji ve enerji ihtiyacını gidermek için dünya ekonomisinde ön sırada yer almaktadır. Artan küresel populasyon ile mineral kaynakları ve madencilik, gelişen ülkelerde artmaktadır. Covid-19 pandemi ve 2022 Rusya-Ukranya savaşı metal, doğalgaz, kömür ve petrol fiyatlarını arttırırken, küresel madencilik, 2026 yılında 3,3 trilyon $' a çıkmıştır. Asya, küresel rezervin % 30' dan fazlasına sahip; bor ve galyumun % 90'nı, krom, doğalgaz, barit, nadir elementler, antimon % 70'inden fazlası, petrol, tantalyum, manganez ve vanadyumun % 50'den fazlasına sahiptir. Suudi Arabistan, BAE, Çin, Irak, Hindistan ve Endonezya, Asya' nın % 50' den fazla mineral üretimini sağlamaktadır. Çin, Asya' nın en çok mineral üreten ülkesidir. Enerji mineralleri % 12, metal mineralleri % 23, değerli mineraller % 21; bakır, nikel, demir, manganez, krom ve boksitin % 50' den fazlası, petrol, doğalgaz ve kömürün % 10' dan fazlasını üretir. Bu yüzden, Asya küresel maden endüstrisinin ekonomik merkezi olmaktadır. Çin' den sonra Rusya, Suudi Arabistan, Hindistan, İran, Endonezya, Irak, Kazakistan ve BAE, mineral üretiminde ilk 10 sırayı takip etmektedir. Asya, küresel ithalat % 47.82 ve ihracat % 38.7 mineral üretimine sahiptir. Yakıt minerallerde ithalat ve ihracat değerleri sırasıyla % 47.21, % 41.7; metal minerallerde % 49.64 ve % 32.34; değerli minerallerde % 51.26 ve % 49.28 olmaktadır. Namibia (Afrika), 4. en büyük mineral üreticisi ve en büyük sektör madencilik olarak % 12 gayrı safi yurtdışı hasılata katkı sağlar. Ayrıca, maden mineral artıkları küresel gayri safi yurtdışı hasılatı % 0.5 ve % 4-7 yeşil ev gaz emisyonuna yılda 1,9-5,1 (ggtons CO2 eşdeğerlik) katkı sağlamaktadır (Kahupi 2024, Upadhyay 2021, Chen 2026).

Dünyada maden üretiminin % 10'nu metalik, % 15 endüstriyel ve % 75' i enerji hammaddelerini karşılamaktadır. Türkiye, maden üretiminde 168 ülke arasında 22'nci, fiyat olarak 28'inci ($) ve çeşitlilikte 8'nci sıradadır (Delibalta 2023). Türkiye maden ihracatında 2021 yılına kadar doğaltaşlar ilk sıradayken, 2021 yılından sonra bakır, çinko ve krom metalik madenleri almaktadır. 2021 yılı Türkiye maden ihracatı % 38.4 oranında artarak 4 milyar ton ve ithalat % 79.4 oranında artarak 40 milyar dolara ulaşmıştır. Yaklaşık ülke ihracatı, ithalatı % 10.1 olarak karşılamıştır (Özçelik, 2022). 2025 yılı madencilik ihracat değerlerine baktığımızda, metalik madenler ilk sırada, doğaltaş ve endüstriyel mineraller sırayı takip etmektedir. Enerji hammadde ihracatı yok denecek kadar azdır (https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik). Ülkemiz 2025 yılı ithalat verilerine göre; % 65.6 hammadde (ana mallar), % 17.9 yatırım malları ve % 16.2 tüketim malları ile dış ticaret açığını meydan getirmektedir. İthalat payı ilk sırada imalat sanayi sektöründe (% 80.9), ikinci madencilik ve taş ocaklığı sektöründe (% 12.4) ve son sırada tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe (%4.3) olmaktadır (T.C. Ticaret Bakanlığı Dış ticaret Veri Bülteni 2025). Yıllara göre maden grupları ithalat değerlerini incelediğimizde, enerji kaynakları ilk sırayı

alırken, metalik ve endüstriyel hammaddeler bunu takip etmektedir (Şekil 1) (https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-gruplari-ithalat).



Şekil 1. Yıllara göre maden grupları ithalat değerleri

Türkiye, doğalgazda % 99, petrolde % 93, kömür % 60, demir cevheri % 55, çinko % 98, alüminyum % 95, altın % 85 ve bakır % 75 oranında dışa bağımlıdır (Maden Politikaları 2023). Ekonominin geliştirilmesinde doğalgaz, kömür ve diğer madenlerin ham maddelerinin temin edilmesi, yüksek verimlilik ve katma değer sağlanması, değişen politikadan minimum etkilenecek bir sistem kurulmalıdır. Bu sebeple, yeni ekonomi modellerinden biri olan "döngüsel ekonomi" isimli bir kavram ortaya çıkmıştır. Bu, lineer ekonomiye ters birçok endüstri ile iç içedir. Döngüsel ekonomi 2000 yılında madencilik sektöründe başladı. Stratejileri dörde ayrılır: 1) atık yönetiminde yenilik, 2) düzenleme ve hükümet engelleri, 3) tasarım ve ocak kapama iyileştirmesi, 4) devam edilebilirlik fiyat zincirlerinde teknolojiler. Döngüsel ekonomide eko-verimlilik, ekonomik ve çevresel verimliliğin birleşimidir. Çin, 20 yıldır kömür madenlerinde döngüsel ekonomi modeli olarak "veri örtme analizi", devamlılığı geliştirmede bir karar-alma aracıdır. Eko-verimlilik, Çin' de kömür ocağında çevresel verimlilikten daha fazladır. Bu modelin amacı, enerjiyi kazanmak, gaz emisyonunu azaltmak, temiz havayı arttırmak ve yeniden dönüştürülen malzemelerin yaşam ömrünü yaymaktır (Cotrina-Teatino ve Marquina-Araujo 2025, Liu 2019).

Bu çalışmada, 1996-2024 yılları arasındaki dönemini kapsamak üzere Türkiye için madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı (%), madencilikte yapılan ithalatın genel ithalat içindeki payı (%) ve madencilik alanında yapılan

ihracatın ithalatı karşılama oranı (%) yıllık verileri kullanılarak zaman serileri analizi ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ARIMA modelleri kullanılmış ve bu değişkenlerin 2025-2029 dönemi için alacağı değerler öngörülmeye çalışılmıştır. Bunun için zaman serileri analizi yöntemlerinden birisi olan ARIMA modelleri kullanılmıştır.

2. ARIMA MODELLERİ

Bir zaman serisinin özelliklerini belirlemede ve bu zaman serisinin gelecek dönemlerde alacakları değerlerin ne olacağını belirlemek (ileriye yönelik tahmin ya da öngörü) amacıyla ARIMA modelleri (Box–Jenkins tekniği) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. ARIMA modelinde incelenen zaman serisinin bugün (t döneminde) aldığı değer geçmiş dönemde (t-1, t-2,t-3, … dönemde) aldığı değerlerin ağırlıklı toplamı ve bir rassal hata teriminin doğrusal toplamsal birleşimi olarak ifade edilmektedir (Özmen 1989, Kutlar 2005, Gujarati 1999).

ARIMA modellerinde en önemli varsayımı, analizi yapılacak zaman serisinin incelendiği dönem içerisinde ortalamasının, varyansının ve otokovaryansının değişmemesidir. Bu varsayım sağlanmazsa incelenen zaman serisinin durağan olmadığı anlaşılır ve bu zaman serisinin rassal bir yapıda olduğu ifade edilir. Durağanlığı sağlamayan zaman serilerinin en önemli özelliklerinden birisi zaman serisi uzun dönemde ortalama değerlerine dönme eğilimi göstermemesidir. ARIMA (p,d,q) modeli, orijinal zaman serisi verisi halinde gösterimi ($\delta \neq 0$ varsayımı ile) Eşitlik (1)'teki gibi ifade edilmektedir(Akgül 2003, Kadılar 2005).

$$\Delta^d y_t = \delta + \gamma_1 \Delta^d y_{t-1} + \gamma_2 \Delta^d y_{t-2} + \ldots + \gamma_p \Delta^d y_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \ldots - \theta_q a_{t-q} \qquad (1)$$

Burada;

p: AR modelin derecesi, d: kaç kere fark alındığını ve q:(MA) modelinin derecesini göstermektedir. Analizi yapılacak zaman serisinin, d kere farkı alınarak, durağan hale getirilmesiyle, ARIMA (p,d,q) modeline ilişkin olarak AR ve MA sürecine ait p ve q katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle ARIMA modelleri için en önemli aşama p ve q derecesinin belirlenmesidir.

2.1. Box-Jenkins, ARIMA Modelinin Seçilmesi için Aşamalar

ARIMA Modelinde yer alan p ve q değerlerinin belirlerken, AFF ve PACF (otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarından) yararlanılmaktadır. AR modelinin p derecesini belirlemede kısmi otokorelasyon fonksiyonu (PACF) ve MA modelinin derecesini belirlemede ise otokorelasyon fonksiyonu (ACF)

kullanılmaktır (Sevüktekin ve Nargeleçekenler 2005). Model belirlemede ilk adım olarak geçici bir ARIMA modeli belirlenmektedir. İkinci adımda bu geçici uygun modele ait parametreler tahmin edilmektedir. Daha sonra bu geçici modelin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı belirlenmektedir. Eğer zaman serisi için uygun olduğuna karar verilen birden fazla geçici model varsa, bu modeller için hesaplanan Hata kareler ortalaması (MSE) değerinin en küçük olduğu model en uygun model seçilmektedir.

Geçici model uygun model olarak kabul edilmişse, bu model kullanılarak zaman serisi için kısa dönemli tahmin (öngörüler) yapılmaktadır. ARIMA modellerinde bu yapılacak öngörü işlemi için ek bir bilgiye ihtiyaç duyulmamaktadır. ARIMA Modelleri ile yapılan kısa dönemli tahminlerde öngörü başarısının oldukça yüksek olduğu belirtilmektedir (Kutlar 2005, Akgül 2003).

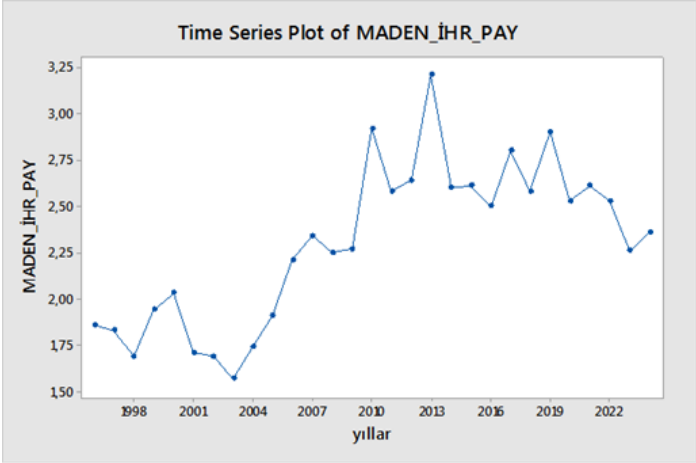
3. BULGULAR

1996-2024 yılları arasındaki dönemini kapsamak üzere Türkiye için yıllık olarak madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı (%), madencilikte yapılan ithalatın genel ithalat içindeki payı (%) ve madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı (%) verileri kullanılarak zaman serileri analizi ile incelenmesi amaçlanmıştır. Veriler Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Dış Ticareti web sitesinden (https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-dis-ticaret) elde edilmiştir.

Bu amaç zaman serileri analizi doğrultusunda ARIMA modelleri kullanılmış ve bu değişkenlerin 2025-2029 dönemi için alacağı değerler öngörülmeye çalışılmıştır. Bunun için zaman serileri analizi yöntemlerinden birisi olan ARIMA modelleri kullanılmıştır. Veri setinde bazı göstergeler için 2025 yılı verisi olmadığından analizde 1996-2024 dönemi veriler analiz edilmiştir. Veriler yıllık olduğundan dolayı mevsimsellik içermemektedir. Verilerin durağanlık araştırması, incelenen seriler arasında nedensellik ilişkisi araştırılmayacağı, ileri dönük tahmin (öngörü) yapılacağı için, durağanlık araştırması yapılmamıştır. Model seçimlerinde AIC (Akaike Information Criteria) esas alınmıştır.

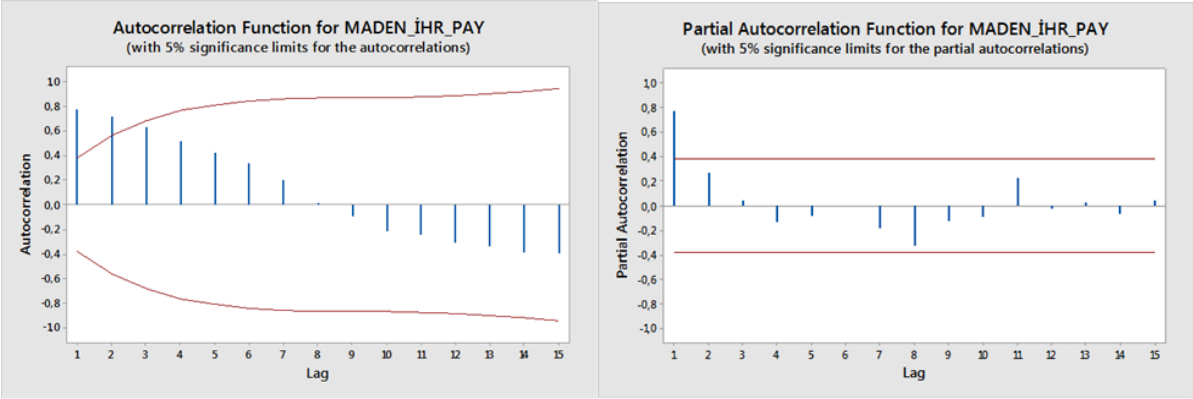
3.1. Madencilikte Yapılan İhracatın Genel İhracat İçindeki Payı Zaman Serisi İçin Öngörü

Madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı zaman serisinin kartezyen grafiği Şekil 2'de verilmiştir.



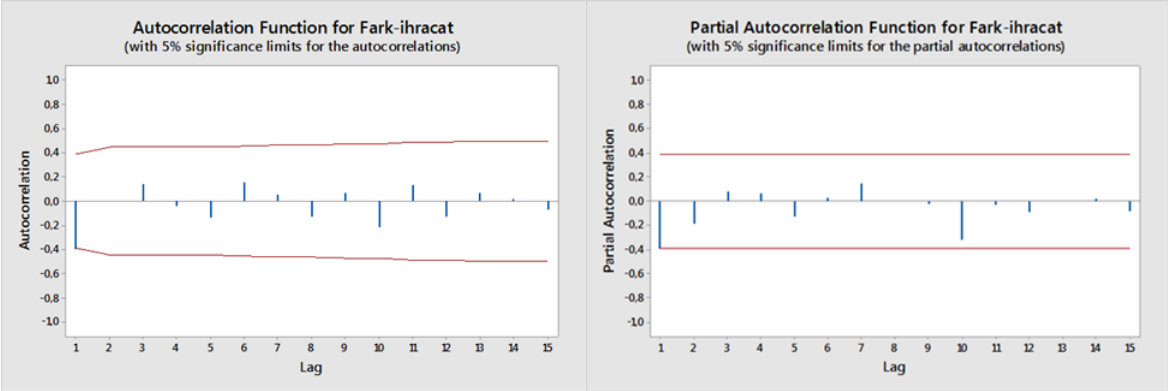
Şekil 2. Madencilikte Yapılan İhracatın Genel İhracat İçindeki Payı Zaman Serisinin Kartezyen Grafiği

Madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı zaman serisi için otokorelasyon fonksiyonu ve kısmi otokorelasyon fonksiyon grafikleri Şekil 3(A-B)'de verilmiştir.



Şekil 3. A)Madencilikte Yapılan İhracatın Genel İhracat İçindeki Payı Zaman Serisinin Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği B) Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği

Şekil 2-3(A-B) incelendiğinde; madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı zaman serisinin artan trend yapısına (zaman ilerledikçe Madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payının artış gösterdiği) sahip olması nedeniyle durağanlık özelliğini sağlamadığı görülmektedir. Madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı zaman serisinin birinci farkı alınmış hali için otokorelasyon fonksiyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyon grafikleri Şekil 4 (A-B)'te verilmiştir.



Şekil 4. A) Madencilikte Yapılan İhracatın Genel İhracat İçindeki Payı Zaman Serisinin Birinci Derece Farkı Alınmış Halinin Otokorelasyon Fonksiyon Grafiği B) Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği

Yukarıdaki grafiklerden madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı zaman serisinin birinci derece farkının alınmasıyla durağanlaştığı görülmektedir. Bu nedenle bu seri için durağan olmayan ARIMA model grubu içerisinden geçici bir uygun model belirlenir. Madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı zaman serisine ilişkin olarak incelenen geçici uygun ARIMA modelleri ve sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Madencilikte Yapılan İhracatın Genel İhracat İçindeki Payı Zaman Serisi İçin ARIMA Modeli Sonuçları.

Model	Parametre	Katsayı	Sta.Hata	t ist.	p değeri	MSE
ARIMA (1,1,0)	**AR(1)**	**-0,392**	**0,178**		**-2,21**	**0,036**
0,0660540						
ARIMA(1,1,1)AR(1)	-0,189	0,469		-0,40	0,690	0,0673440
	MA(1)	0,253	0,463		0,55	0,589
ARIMA(2,1,0)AR(1)	-0,461	0,193		-2,39	**0,025**	0,0664354
	AR(2)	-0,180	0,196		-0,92	0,368
ARIMA(2,1,1)AR(1)	0,508	0,469		1,08	0,289	0,0707283
	AR(2)	0,325	0,317		1,02	0,316
	MA(1)	0,919	0,442		2,08	**0,048**

Çizelge 1 incelendiğinde; Madencilikte Yapılan İhracatın Genel İhracat İçindeki Payı zaman serisi için belirlenen geçici en uygun modelin ARIMA (1,1,0) modeli olduğu belirlenmiştir (AR (1) katsayısı istatistiksel olarak anlamlı ve durağanlık koşulunu sağlamaktadır). AR(1) katsayısının değeri -0,32 olup bunun anlamı 1 dönem geçmiş dönem değerinin güncel dönem değer üzerindeki etkisinin 0,392 birim azaltıcı yöndedir. Bu model kullanılarak zaman serisinin 2025-2029 yılları arasında alacağı değerler için öngörü yapılmıştır. Öngörü sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

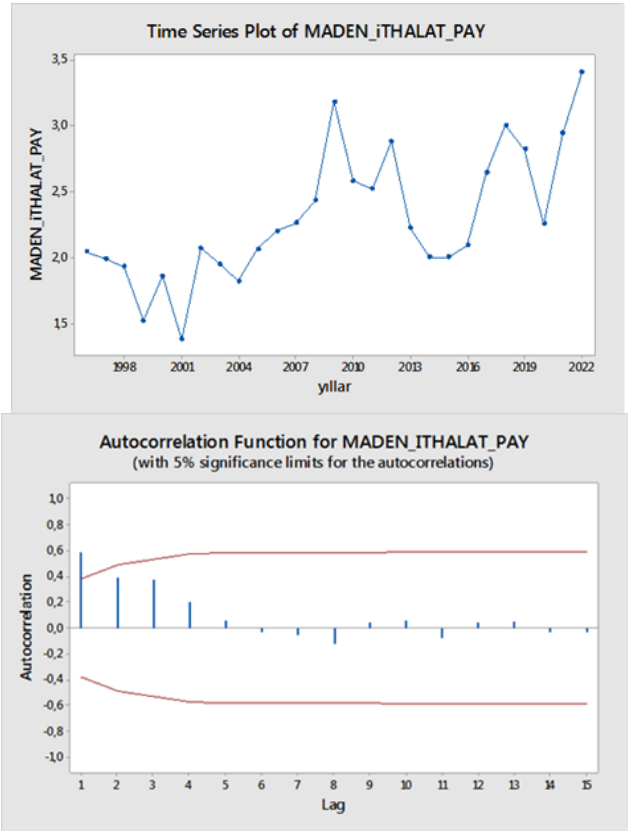
Çizelge 2. Madencilikte Yapılan İhracatın Genel İhracat İçindeki Payı Zaman Serisi İçin 2025-2029 Dönemi Tahmin Değerleri.

Yıllar	İhracatın Genel İhracat İçindeki Payı	%95 Alt Güven Sınırı	%95 Üst Güven Sınırı
2025	2,32078	1,81694	2,82462
2026	2,33616	1,74655	2,92577
2027	2,33013	1,62664	3,03362
2028	2,33250	1,54526	3,11974
2029	2,33157	1,46372	3,19942

Bu durumda, Madencilikte Yapılan İhracatın Genel İhracat İçindeki Payı artış göstermeye devam edeceği ifade edilebilir.

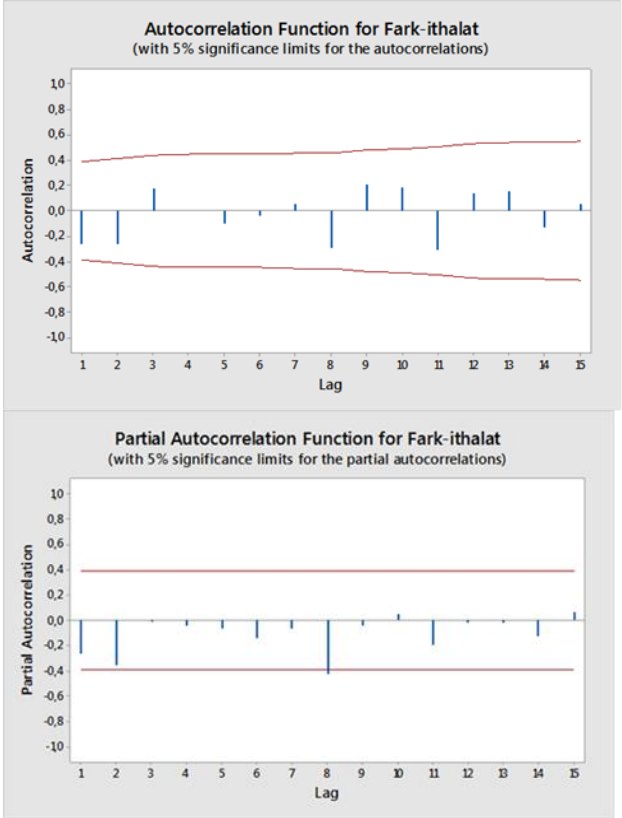
3.2. Madencilikte Yapılan İthalatın Genel İthalat İçindeki Payı Zaman Serisi için Öngörü

Madencilikte yapılan İthalatın Genel İthalat İçindeki Payı zaman serisinin kartezyen grafiği ve otokorelasyon fonksiyonu grafiği Şekil 5 (A-B)'de verilmiştir.



Şekil 5. A) Madencilikte Yapılan İthalatın Genel İthalat İçindeki Payı Zaman Serisinin Kartezyen Grafiği B) Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği

Şekil 5(A-B) incelendiğinde; madencilikte yapılan ithalatın genel ithalat İçindeki payı zaman serisinin artan trent yapısına sahip olması nedeniyle durağanlık özelliğini sağlamadığı görülmektedir. Madencilikte Yapılan İthalatın Genel İthalat İçindeki Payı zaman serisinin birinci farkı alınmış hali için otokorelasyon fonksiyonu ve kısmi otokorelasyon fonksiyon grafikleri Şekil 6 (A-B)'de verilmiştir.



Şekil 6. A) Madencilikte Yapılan İthalatın Genel İthalat İçindeki Payı Zaman Serisinin Birinci Derece Farkı Alınmış Serinin Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği B) Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği

Yukarıdaki şekle göre, madencilikte yapılan ithalatın genel ithalat içindeki payı zaman serisinin birinci derece farkının alınmasıyla durağanlaştığı görülmektedir. Bu nedenle bu seri için durağan olmayan ARIMA model grubu içerisinden geçici bir uygun model belirlenir. Madencilikte Yapılan İthalatın Genel İthalat İçindeki Payı zaman serisine ilişkin olarak incelenen geçici uygun ARIMA modelleri ve sonuçları Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Madencilikte Yapılan İthalatın Genel İthalat İçindeki Payı Zaman Serisi İçin ARIMA Modeli Sonuçları.

Model	Parametre	Katsayı	Sta.Hata	t ist.	p değeri	MSE

ARIMA (1,1,0)	AR(1)	-0,264	0,186	-1,42	0,166	0,180801
ARIMA(1,1,1)AR(1)		0,389	0,285	1,36	0,184	0,163471
	MA(1)	0,837	0,169	4,94	**<0,05**	
ARIMA(2,1,0)	AR(1)	-0,376	0,182	-2,07	**0,046**	**0,159118**
	AR(2)	-0,441	0,204	-2,16	**0,040**	
ARIMA(2,1,1)AR(1)		-0,408	0,441	-0,87	0,395	0,165463
	AR(2)	-0,450	0,263	-1,91	0,068	
	MA(1)	-0,338	0,512	-0,07	0,942	

Çizelge 3 incelendiğinde, Türkiye'ye ilişkin madencilikte yapılan ithalatın genel ithalat içindeki payı zaman serisi için belirlenen ARIMA modelleri arasında en uygun modelin ARIMA (2,1,0) olduğu belirlenmiştir (AR (1) ve AR(2) katsayısı istatistiksel olarak anlamlı ve durağanlık koşulunu sağlamaktadır). AR(1) katsayısının değeri -0,376 olup bunun anlamı 1 dönem geçmiş dönem değerinin güncel dönem değer üzerindeki etkisinin 0,376 birim azaltıcı yöndedir. AR(2) katsayısının değeri -0,441 olup bunun anlamı 1 dönem geçmiş dönem değerinin güncel dönem değer üzerindeki etkisinin 0,441 birim azaltıcı yöndedir. Bu model kullanılarak, madencilikte yapılan ithalatın genel ithalat içindeki payı zaman serisinin 2025-2029 yılları arasında alacağı değerler için öngörü yapılmıştır. Öngörü sonuçları Çizelge 4'de verilmiştir.

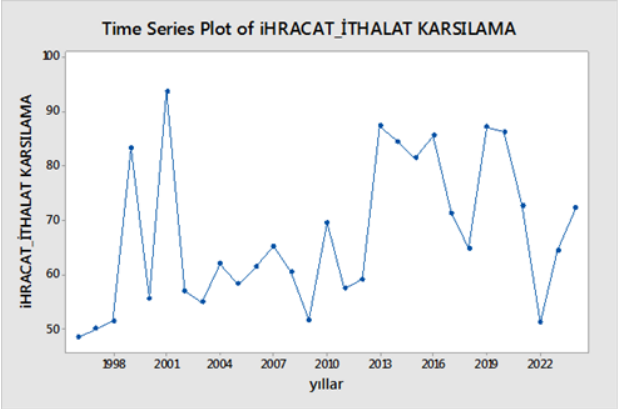
Çizelge 4. Madencilikte Yapılan İthalatın Genel İthalat İçindeki Payı Zaman Serisi İçin 2025-2029 Dönemi Tahmin Değerleri.

Yıllar	İthalatın Genel İthalat İçindeki Payı	%95 Alt Güven Sınırı	%95 Üst Güven Sınırı
2025	2,85603	2,07403	3,63802
2026	2,66582	1,74388	3,58775
2027	2,54500	1,58877	3,50123
2028	2,67424	1,60814	3,74034
2029	2,67897	1,50438	3,85357

Bu durumda, madencilikte yapılan ithalatın genel ithalat içindeki Payı azalmaya devam edeceği ifade edilebilir. Bu da yerli üretimin artmasıyla ithalatın azalmasıyla mümkün olabilir.

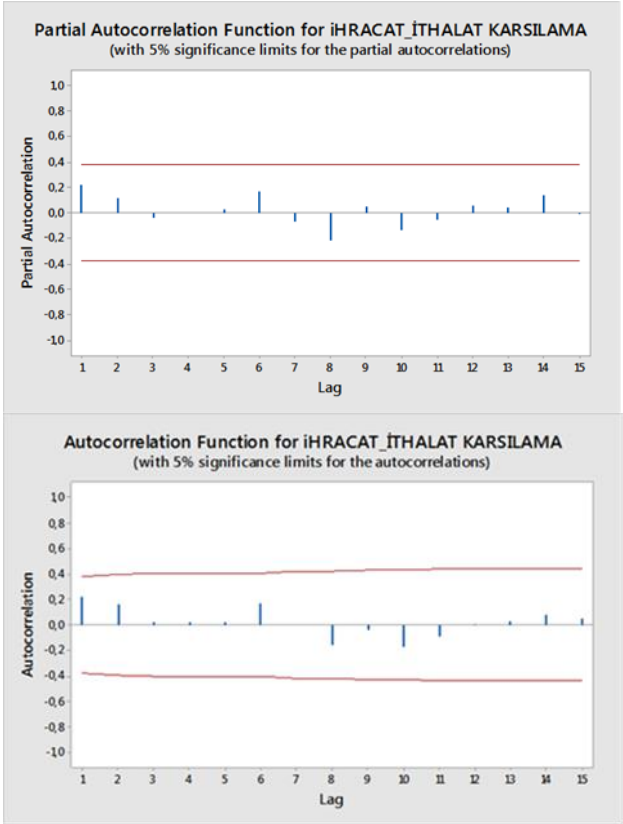
3.3. Madencilik Alanında Yapılan İhracatın İthalatı Karşılama Oranı Zaman Serisi İçin Öngörüsü

Madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı (%) zaman serisi grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



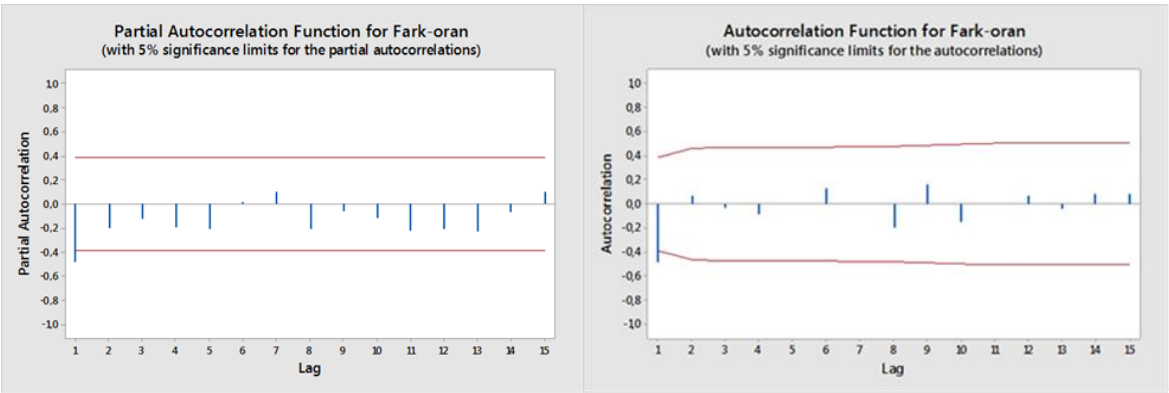
Şekil 7. Madencilik Alanında Yapılan İhracatın İthalatı Karşılama Oranı Zaman Serisinin Kartezyen Grafiği

Madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı (%) zaman serisi için kısmi otokorelasyon fonksiyonu ve otokorelasyon Fonksiyonu grafiği Şekil 8 (A-B)'de verilmiştir.



Şekil 8. A) Madencilik Alanında Yapılan İhracatın İthalatı Karşılama Oranı Zaman Serisinin Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği B) Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği

Şekil 7-8 (A-B) incelendiğinde; madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı zaman serisinin artan trent yapısına sahip olduğundan durağanlık özelliğini sağlamadığı görülmektedir. Madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı zaman serisinin birinci derece farkı alınarak oluşturulan yeni seri için kısmi otokorelasyon fonksiyonu ve otokorelasyon fonksiyonu grafiği Şekil 9 (A-B)'da verilmiştir.



Şekil 9. A) Madencilik Alanında Yapılan İhracatın İthalatı Karşılama Oranı Zaman Serisinin Birinci Derece Farkı Alınmış Halinin Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği B) Otokorelasyon Fonksiyonu Grafiği

Yukarıdaki şekle göre, madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı zaman serisinin birinci derece farkının alınmasıyla durağanlaştığı görülmektedir. Bu nedenle bu seri için durağan olmayan ARIMA model grubu içerisinden geçici bir uygun model belirlenir. Madencilik alanında Yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı için ARIMA modelleri sonuçları Çizelge 5' de verilmiştir.

Çizelge 5. Madencilik Alanında Yapılan İhracatın İthalatı Karşılama Oranı Zaman Serisi İçin ARIMA Modeli Sonuçları.

Model	Parametre	Katsayı	Sta.Hata t ist.	p değeri	MSE
ARIMA (1,1,0)	AR(1)	-0,480	0,170	-2,83	**0,009**
220,070					
ARIMA(1,1,1)	AR(1)	0,203	0,226	0,94	0,357
186,369					
	MA(1)	0,936	0,093	10,10	**<0,05**
ARIMA(2,1,0)AR(1)	-0,591	0,195	-3,04	**0,005**	217,566
	AR(2)	-0,225	0,197	-1,14	**0,263**
ARIMA(2,1,1)AR(1)	-1,403	0,238	-5,90	**<0,05**	224,927
	AR(2)	-0,543	0,174	-3,12	**0,005**
	MA(1)	-0,881	0,207	-4,25	**<0,05**

Çizelge 5 incelendiğinde, Türkiye'deki Madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı zaman serisi için belirlenen ARIMA modelleri arasında en uygun modelin ARIMA (1,1,1) olduğu belirlenmiştir AR (1) ve MA(1) katsayıları istatistiksel olarak anlamlı). AR(1) katsayısının değeri 0,203 olup bunun anlamı 1 dönem geçmiş dönem değerinin güncel dönem değer üzerindeki etkisinin 0,203 birim artırıcı yöndedir. Bu model kullanılarak Madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı zaman serisinin 2025-2029 yılları arasında alacağı değerler için öngörü yapılmıştır. Öngörü sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Madencilik Alanında Yapılan İhracatın İthalatı Karşılama Oranı Zaman Serisi için 2025-2029 Dönemi Tahmin Değerleri.

Yıllar	İhracatın ithalatı karşılama oranı	%95 Alt Güven Sınırı	%95 Üst Güven Sınırı
2025	68,4706	39,3887	97,553
2026	70,2506	37,4700	103,031
2027	69,3965	30,0159	108,777
2028	69,8064	26,2501	113,363
2029	69,6097	21,6176	117,602

Bu durumda; Madencilik Alanında Yapılan İhracatın İthalatı Karşılama Oranı 2025-2029 döneminde artmaya devam edecektir. Bu da İshracatın artmaıyla ve ithalatın azalmasıyla mümkündür.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Türkiye için 1996-2024 yıllarına ait madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı (%), madencilikte yapılan ithalatın genel ithalat içindeki payı (%) ve madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı (%) yıllık verileri zaman serilerinin gelecekte alacağı değerlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu serilerin 2025-2029 döneminde alacağı değerlerin tahmininde Box-Jenkins tekniğinden (ARIMA modellerinden) yararlanılmıştır. Madencilikte yapılan ihracatın genel ihracat içindeki payı zaman serisi için uygun model ARIMA (1,1,0) olarak belirlenmiştir. Madencilikte yapılan ithalatın genel İthalat içindeki payı zaman serisi için en uygun modelin ARIMA (2,1,0) olduğu belirlenmiştir. Madencilik alanında yapılan ihracatın ithalatı karşılama oranı zaman serisi için belirlenen ARIMA modelleri arasında en uygun modelin ARIMA (1,1,1) olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, madencilik alanında ekonomik faaliyetlerin (ihracat ve ithalat dengesinin) iyileştirilmesi için, dünya enerji ve politikasının izlenmesi gerekmektedir. Örneğin; bakır, tantalyum, kobalt, lityum ve neodyum gibi metaller 2050'e kadar elektrikli araçların üretiminde artacağı için, Dünya Bankası (2017) projeleri düşük-karbon ekonomisinde (Solar PV, nükleer ve elektrik araçları) büyük artış beklenmektedir. Bu yüzden, madencilik endüstrisi düşük-karbon ekonomisine

geçişte ve spesifik mineral kaynaklarının talebinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, 21. yy' da, yeniden kullanılabilir madencilik atığı ve yeniden dönüştürülebilir malzemelerde devamlılık ve verimli kaynak yönetimine odaklanan bu yöntem, temiz kömür teknolojisi, kömür-sıvı ve karbon yakalama ve depolama gibi enerji teknolojilerini desteklemektedir.

KAYNAKLAR

Delibalta, M.S. 2023. Türkiye Madencilik Sektöründe Verimlilik ve Ekonomik Katkı Analizi, MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 35,1.

Özçelik, G.E. 2022. Madencilik Sektör Raporu, Konya Ticaret Odası, Mart, Konya, 21.

T.C. Ticaret Bakanlığı Dış ticaret Veri Bülteni, 2025.

https://www.utikad.org.tr/Images/DosyaYoneticisi/09012026aylikdisticaretveribulteni_aralik_.pdf.

Maden Politikaları, 2023. T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, Onikinci Kalkınma Planı 2024-2028 Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara, 228.

Kahupi, I., Yakovleva N., Okorie, O., Hul, C.E. 2024. Implementation of Circular Economy in a Developing Economy's Mining Industry using Institutional Theory: the Case of Namibia, Journal of Environmental Management, 368, 122145.

Chen, X-F., Wang, G., Mei, Y-X, Zhao, H-J, Ma, Y-Y. 2026. Mineral Resources of Asia Contient: Resource Endowment, Mining Industry Pattern, and Contributions to the World Economy, China Geology, 9, pp. 1-24.

Upadhyay, A., Laing T., Kumar, V., Dora M. 2021. Exploring Barriers and Drivers to the Implementation of Circular Economy Practices in the Mining Industry, Resources Policy, 72, 102037.

Cotrina-Teatino, M.A., Marquina-Araujo, J.J. 2025. Circular Economy in the Minig Industry: a Bibliometric and Systematic Literature Review, Resources Policy, 102, 10513.

Liu, X., Guo, P., Guo, S. 2019. Assessing the Eco-efficiency of a Circular Economy System in China's Coal Mining Areas: Emergy and Data Envelopment Analysis, Journal of Cleaner Production, 206, 1101-1109.

Akgül, I. 2003. Zaman Serilerinin Analizi ve ARIMA Modelleri, Der Yayınları, İstanbul.

Gujarati, D. 1999. Temel Ekonometri, 2.Baskı.

Kadılar, C. 2005. SPSS Uygulamalı Zaman Serileri Analizine Giriş, Bizim Büro Basımevi, Ankara.

Kutlar, A. 2005. Uygulamalı Ekonometri, Nobel Yayınları, Ankara.

Özmen, A. 1989. Mevsimsel Dalgalanmalar İçermeyen Zaman Serilerinde Kısa Dönem Öngörü Amaçlı Box-Jenkins (ARIMA) Modellerinin Kullanımı, Fen-Edebiyat Fakültesi Dergisi, 2, 1, 105–120.

Sevüktekin, M., Nargeleçekenler, M. 2005. Zaman Serileri Analizi, Nobel Yayınları Ankara.

https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik.

https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-gruplari-ithalat.

https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-dis-ticaret (Erişim Tarihi: 18.05.2026)

ZONGULDAK'TA KAÇAK KÖMÜR MADENCİLİĞİ: OLGULAR, DİNAMİKLER VE ÇÖZÜM ARAYIŞLARI

ILLEGAL COAL MINING IN ZONGULDAK: FACTS, DYNAMICS AND SEARCH FOR SOLUTIONS

Caner Özdemir*
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Çalışma Ekonomisi ve Endüstri İlişkileri Bölümü, Zonguldak

Sadık Kılıç
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Çalışma Ekonomisi ve Endüstri İlişkileri Bölümü, Zonguldak

ÖZET Zonguldak'taki kaçak kömür madenciliği, 1980'lerden itibaren uygulanan neoliberal politikaların bir yansıması olarak ortaya çıkmış ve yaygınlaşmıştır. TTK'nın küçültülmesi, redevans sisteminin yaygınlaştırılması ve Türkiye'nin artan kömür ihtiyacı ile TTK ve redevans sahalarındaki üretim arasındaki uçurum, kaçak madenciliğin temel tetikleyicileridir. Ancak bu faaliyetlerin sürmesinde, Zonguldak halkının madencilikle tarihsel ve kültürel bağları, başka iş imkânlarının sınırlı olması ve kaçak madenciliğin bölge ekonomisindeki merkezi rolü ve kaçak ocaklardan çıkan kömürün özel sektör için düşük maliyetli bir seçenek olması da etkilidir.
Zonguldak'taki kaçak kömür madenciliği, sadece yasa dışı bir faaliyet olmanın ötesinde, neoliberal politikaların yerel toplumsal ve ekonomik yapılarla çelişkili etkileşiminin bir ürünüdür. Bu nedenle, sorunun çözümü de sadece güvenlik önlemleriyle veya yasal düzenlemelerle değil, bölgenin sosyoekonomik yapısını dönüştürecek bütüncül politikalarla mümkün olacaktır.

ABSTRACT Illegal coal mining in Zonguldak emerged and became widespread as a reflection of the neoliberal policies implemented from the 1980s onwards. The downsizing of the Turkish Coal Enterprises (TTK), the expansion of the royalty system, and the gap between production at TTK and royalty-based mining sites—coupled with Turkey's growing demand for coal—are the key drivers of illegal mining. However, the continuation of these activities is also influenced by the people of Zonguldak's historical and cultural ties to mining, the limited availability of alternative employment opportunities, the central role of illegal mining in the regional economy, and the fact that coal extracted from illegal mines represents a low-cost option for the private sector.
Illegal coal mining in Zonguldak is more than just an unlawful activity; it is a product of the conflicting interaction between neoliberal policies and local social and economic structures. Consequently, a solution to the problem will not be achieved through security measures or legal regulations alone, but rather through comprehensive policies that transform the region's socio-economic structure.

* *canerozdemir@beun.edu.tr*

1. GİRİŞ

Zonguldak’ta 1840'lı yıllarda başlayan kömür üretimi, kentin kuruluşuna, gelişimine ve toplumsal yapısına yön vermiştir. Ancak son kırk yılda, bu köklü madencilik geleneğinin yanında yaygın bir kaçak kömür madenciliği olgusu ortaya çıkmıştır. Bu çalışma, Zonguldak'taki kaçak kömür ocaklarının hangi koşullarda ortaya çıktığını, nasıl yaygınlaştığını, kendi içinde nasıl çeşitlendiğini ve bu faaliyetlerin önlenmesinin mümkün olup olmadığını incelemektedir.

Çalışmamızın temelini 2019 ve 2024 yıllarında Zonguldak'ın Kilimli ilçesinde yürüttüğümüz saha çalışmaları ve bu verilerle hazırladığımız makaleler (Kılıç vd., 2020; Özdemir & Kılıç, 2026) oluşturmakla beraber, burada konunun geniş bir özetini verip potansiyel çözüm önerilerini tartışmaya açmak istiyoruz.

2. KAÇAK MADENCİLİĞİN ORTAYA ÇIKIŞI VE YAYGINLAŞMASI

Zonguldak'ta kaçak kömür madenciliğinin geçmişi, kömürün evlerde yakıt olarak kullanılmaya başlanmasına kadar uzanmaktadır. 1980'ler öncesinde, insanlar kendi arazilerinden veya ormanlık alanlardan yüzeye yakın kömürleri kendi ihtiyaçları veya komşularına satmak üzere çıkarıyordu. Ancak bu faaliyetler istisnaiydi ve sistematik bir nitelik taşımıyordu.

Asıl dönüm noktası, 24 Ocak 1980 kararları ve 12 Eylül 1980 askeri darbesiyle başlayan neoliberal politikalardır. 1980 öncesinde, Ereğli Kömür İşletmeleri (EKİ) Zonguldak'ta yaklaşık 40 bin kişiye istihdam sağlıyor ve yıllık 8 milyon tonun üzerinde üretim yapıyordu. 1980-1987 arasında ise reel ücretler neredeyse yarı yarıya azaldı. Aynı dönemde, EKİ'nin yerine kurulan Türkiye Taşkömürü Kurumu'nun (TTK) kapatılması tartışılmaya başlandı.

İşçilerin bu sert dönüşüme tepkisi gecikmedi. 1990 yılının sonunda Genel Maden-İş Sendikası TTK'da grev kararı verdi ve 4 Ocak 1991'de sendika başkanı Şemsi Denizer’in öncülüğünde "Büyük Madenci Yürüyüşü" başladı. Yaklaşık 100 bin kişinin katıldığı bu yürüyüş, Ankara'ya ulaşmak üzere Zonguldak'tan yola çıktı ancak 100 kilometre sonra kolluk güçleri tarafından durduruldu. Sendika liderlerinin Ankara'da hükümet yetkilileriyle görüşmesi sonucunda işçilere önemli ücret artışları sağlayan bir toplu sözleşme imzalandı.

Ancak bu kazanım, TTK'nın kaderini değiştirmedi. Tam tersine, hükümet TTK'yı küçültme ve taşeronlaştırma politikalarını hızlandırdı. 1990'ların başında işçiler erken emekli edildi, yeni işçi alımları durduruldu ve "redevans" sistemi devreye sokuldu.

Redevans sistemi (kiralama yoluyla özel sektöre işletme hakkı verme), TTK'ya ait sahaların bir kısmının özel şirketlere kiralanması anlamına geliyordu. 2002'de AKP iktidara geldikten sonra bu sistem daha da yaygınlaştı: 2002'de havzadaki taşkömürü üretiminin sadece %3,2'si özel sektör tarafından yapılırken, bu oran 2025'te %31,5'e çıktı (TTK, 2026). TTK'nın üretimi ise 7,5 milyon tondan 700 bin ton dolaylarına kadar düştü (TTK, 2025, s. 41); işçi sayısı 40 binden 8 binlere indi (TTK, 2025, s. 17).

TTK'daki bu daralma ile Türkiye'nin artan kömür ihtiyacı arasındaki uçurum, kaçak madenciliğin yaygınlaşmasının temel nedenidir. Türkiye'nin taşkömürü tüketimi 1985'te 4 milyon tonun altındayken, 2025'te 44 milyon tonun üzerindedir (TTK, 2026, s. 39). Bu tüketimin önemli bir kısmı, Zonguldak'taki Erdemir ve Kardemir demir-çelik fabrikaları ile ZETES ve ÇATES termik santralleri tarafından gerçekleştirilmektedir.

Bunun yanında kaçak kömür madenciliğinin ortaya çıkması, yaygınlaşması ve halen sürdürülebilmesini sağlayan birkaç önemli etmen sıralanabilir:

Bunlardan birincisi yerel işgücünün madencilik deneyimidir. 19. yüzyıldan itibaren madencilikle uğraşan Zonguldak halkı için başka bir iş deneyimi neredeyse yoktu. Görüştüğümüz kaçak madencilerin tamamı dedelerinin EKİ/TTK'da çalıştığını, yarıya yakını ise babalarının da TTK veya özel/kaçak ocaklarda çalıştığını belirtti. Dolayısıyla, Zonguldak'ta işgücü piyasasına girmek isteyen bir kişi için akla gelen ilk seçenek kömür madenciliği oluyor.

Bununla paralel başka bir etmen ise TTK'nın işe alım politikalarıdır. TTK'ya işçi alımları genellikle kura ile yapılmaktadır. Saha görüşmelerinde, kaçak ocaklarda çalışan pek çok kişi TTK'ya başvurduğunu ancak kurada çıkmadığını veya sağlık koşullarını karşılayamadığını belirtmiştir. 1980 öncesi ile karşılaştırıldığında neredeyse sekizde birine düşmüş olan işçi sayısı ve azalan işçi alımlarının yanı sıra madenci alımlarında madencilik tecrübesi olanların önceliklendirilmemesi de bu işgücünün kayıt dışı sektörde devam etmesini pekiştiren bir unsur.

İşgücü piyasasında olduğu gibi bölge ekonomisinde de kömür ve kaçak madencilik merkezi bir rol oynuyor. Kilimli ilçesinde kaçak ocak sayısına ilişkin tahminler 700 ile 1.000 arasında değişmektedir. 2025 yılı sonunda Zonguldak Valiliği, bir yıl içinde 228 kaçak maden ocağının tespit edilip imha edildiğini/mühürlendiğini açıklamıştır. Kaçak ocaklarla mücadele kapsamında 3213 sayılı Maden Kanunu'na izinsiz ocak işletenlere üç yıldan beş yıla kadar hapis ve infazın tamamlanmasını takiben on yıl boyunca madencilik faaliyetinden men öngören hükmün 2018 yılında eklenmesine rağmen geçmişten bu yana mühürlenen veya giriş kısımları imha edilen ocakların kısa sürede tekrar faaliyete geçtiği bilinmektedir. Aynı yıl içerisinde aynı ocağın mükerreren kapatılması da

olasıdır. Yine de bu kadar sayıda ocağın, doğrudan çalışanlar ve ailelerinin yanı sıra, taşımacılık, kömür ve ahşap direk satışı yapan depo hizmetleri, alet-ekipman satışı, tamir-bakım hizmetleri ve ormancılık gibi yan sektörleri de beslemektedir. Bu durum da kaçak kömür madenciliğinin bitmesinin bölge ekonomisi için bir zafiyet oluşturacağına işaret etmektedir.

3. KAÇAK MADENCİLİK PRATİKLERİNİN ÇEŞİTLİLİĞİ

Zonguldak'taki kaçak kömür ocakları kendi içinde önemli farklılıklar göstermektedir. Yaptığımız çalışmalarda iki ana tip tanımladık:

3.1. Küçük-Orta Ölçekli Kaçak Ocaklar:

Genellikle 15-50 kişi arasında işçi çalıştıran küçük-orta ölçekli ocaklar çoğunlukla redevans sahalarında bulunurlar veya eski redevans ocaklarında faaliyet gösterirler. Bu ocakların bir kısmı yarı-legal statüdedirler; bazı durumlarda redevans şirketleri bu ocaklardan çıkan kömürü düşük fiyatla satın alıp resmi kanallardan pazarlar. Martopikör, martoperfaratör, kompresör, havalandırma sistemleri ve gaz ölçüm cihazları gibi ekipmanların bu ocaklarda bulunması şaşırtıcı değildir. Küçük-orta ölçekli ocaklarda ücretler düzenli ödenir, sınırlı da olsa iş güvenliği önlemleri alınır. Çalışma süresi günlük 8-12 saat arasında değişir, denetimlerin gündüz saatlerinde yapılmasından dolayı gece vardiyası yaygındır.

3.2. Mikro Ölçekli Kaçak Ocaklar

Zonguldak’ta sıkça karşılaştığımız başka bir kaçak kömür madenciliği işletmesi ise mikro ölçekli ocaklardır. Bu ocaklarda 2-3 kişiden 10-12 kişiye kadar değişen işçi sayısı görülmektedir. Genellikle aile işletmesi veya birkaç arkadaşın ortaklığı şeklinde işletilirler. Ocaklar, özel mülk, hazine veya orman arazilerinde açılır. İlkel ekipman kullanır: kazma, kürek, el arabası, basit vinçler. Havalandırma gibi güvenlik önlemleri çoğunlukla yoktur. Gelir düzensizdir; iyi bir kömür damarı bulunduğunda yüksek kazanç elde edilebilirken, bazen günlerce kömür çıkarılamadan çalışılır. Kolluk kuvvetlerinin baskıları daha çok bu tip ocaklar üzerinde yoğunlaşır.

Bu ocak tipleri arasındaki farklılıklar bunlarla sınırlı değildir. Önemli bir farklılık yerel otoritelerle ilişkilerde ortaya çıkmaktadır. Küçük ve orta ölçekli ocaklar, yerel ekonomideki ağırlıkları ve istihdam sağlamaları nedeniyle daha az baskıya maruz kalır. Hatta bazı durumlarda valilik, kaçak ocak temsilcileriyle sorunların çözümüne yönelik toplantılar yapmaktadır. Mikro ölçekli ocaklar ise ölümlü kaza durumlarında hedef haline gelir.

İki ocak tipinin pazarlama kanalları da ayrışmaktadır. Küçük ve orta ölçekli ocaklardan çıkan kömür, genellikle redevans şirketleri veya yasal kömür tüccarları aracılığıyla termik santrallere (özellikle ÇATES) satılır. Mikro ölçekli ocaklardan çıkan kömür ise yakın zamana kadar doğrudan hane halkına veya küçük tüccarlara satılıyordu. Zonguldak genelinde konutların ısıtılmasında doğalgazın taş kömürünün yerini almasıyla hane halkına satış oldukça azalmış durumda. Mikro ölçekli ocaklar da küçük tüccarlara daha fazla satış yapıyorlar. Ancak, kömürün son tüketicisi küçük ve orta ölçekli ocaklarda olduğu gibi çoğunlukla bölgedeki termik santraller.

4. TÜRKİYE'DE VE DÜNYADA KAÇAK MADENCİLİK PRATİKLERİ

Zonguldak, Türkiye'de kaçak madenciliğin yaşandığı tek bölge değildir. Şırnak'taki asfaltit madenlerinde benzer bir süreç yaşanmaktadır. Önceleri Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) tarafından işletilen bu sahalar, 2000'lerde redevans yoluyla özel sektöre devredilmiş, özel sektör için cazibesini kaybettikçe yerini kaçak ocaklara bırakmıştır. Zonguldak'ta olduğu gibi, Şırnak'taki ocaklar da sadece ölümlü kazalar gerçekleştiğinde kamuoyunun gündemine gelmekte, ardından gelen baskılar kısa süreli olmakta ve faaliyetler kısa sürede eski haline dönmektedir.

Zonguldak'taki kaçak madencilik pratikleri, dünyanın çeşitli bölgelerindeki benzer faaliyetlerle de önemli paralellikler göstermektedir:

Afrika'da Gana, Tanzanya, Zimbabwe, Mozambik, Nijerya, Güney Afrika, Burkina Faso, Mali, Demokratik Kongo, Gine, Madagaskar ve Ruanda'da küçük ölçekli kaçak madencilik yaygındır. Bu ülkelerde de Zonguldak'ta olduğu gibi, 1980'ler öncesinde devlet tarafından işletilen sahaların küçülmesi veya kapanması sonrasında kaçak madencilik yaygınlaşmıştır.

Asya'da Hindistan, Çin ve Moğolistan'da da kömür madenciliğinde benzer örnekler görülmektedir. Hindistan'da Lahiri-Dutt'un (2016) belirttiği gibi, devlet işletmelerinin küçülmesi, kaçak madenciliğin yaygınlaşmasına yol açmıştır.

Latin Amerika'da Peru ve Kolombiya'daki altın madenlerinde, büyük ölçekli madencilikten küçük ölçekli ve kaçak madenciliğe geçiş benzer dinamiklerle gerçekleşmiştir.

Zonguldak'a çok benzeyen bir örnekte Verbrugge (2015), Filipinler'deki altın madenlerinde üç aşamalı bir dönüşüm tanımlamaktadır:

1. 1980'ler öncesi: Büyük ölçekli şirketler tarafından işletilen madencilik

2. 1980'ler: Büyük ölçekli üretimin küçük işletmelere taşerone edilmesi
3. 1990'lar: Taşeron sahalarında enformel madenciliğin yaygınlaşması
Bu dönüşüm, Zonguldak'taki süreçle neredeyse birebir örtüşmektedir.

Ancak Türkiye örneğinin uluslararası literatürde yeterince yer almadığı görülmektedir. Uluslararası kuruluşların (IGF, ILO, Dünya Bankası) raporlarında ve ASM (zanaatkar ve küçük ölçekli madencilik) haritalarında Türkiye genellikle yer almamakta veya "hakkında yeterli bilgi bulunmuyor" şeklinde geçmektedir.

5. KAÇAK KÖMÜR MADENCİLİĞİ ÖNLENEBİLİR Mİ?

Kaçak kömür madenciliğinin önlenmesi konusunda altı farklı senaryo değerlendirilebilir:

1. Güç kullanarak tamamen kapatma: Devlet, yeterli kararlılıkla kaçak ocakların tamamını birkaç gün içinde kapatabilir veya kullanılmaz hale getirebilir. Ancak bu yöntem, büyük lojistik zorlukların yanı sıra ciddi sosyoekonomik ve politik riskler taşımaktadır. Kaçak ocaklar, yalnızca yasa dışı yapılar değil, aynı zamanda bir geçim stratejisi, bölgesel ekonomiyle iç içe geçmiş bir pratik ve tarihsel olarak şekillenmiş bir toplumsal gerçekliktir. Bu nedenle, hiçbir siyasal iktidar bu yöntemi uygulamamıştır.

2. TTK'nın yüzeye yakın kömür damarlarını kendisinin çıkarması: TTK, teknik uzmanlığı ve ekipmanıyla yüzeye yakın damarları daha verimli çıkararak kaçak madenciliğin maddi zeminini ortadan kaldırabilir. Ancak bu, TTK'nın 1990'lara kadar bilinçli olarak çıkarmadığı bu damarların tüketilmesi anlamına gelir. Ayrıca, bu yöntem de ilk seçenekteki sosyoekonomik ve politik riskleri taşır. Dahası yüzeye yakın damarların önemli bir kısmı EKİ ve TTK tarafından geçmişte işlenmiş bölgelerdir. İşletilebilir alanlar için ise zaten redevans sistemi uygulamaya konulmuştur. Ancak, yukarıda değinildiği gibi redevans işletmeleri ile kaçak ocakçılık faaliyetleri de bazı örneklerde iç içe geçmiştir. Ayrıca, bu yöntem de ilk seçenekteki sosyoekonomik ve politik riskleri taşır.

3. Kaçak ocakların resmileştirilmesi: Mevcut kaçak ocakların hızlı bir şekilde yasal statüye kavuşturulması önerilebilir. Ancak bu, fiilen mevcut iş sağlığı ve güvenliği mevzuatının askıya alınması anlamına gelir. Soma faciası sonrasında artan maliyetler nedeniyle bazı özel ocakların zaten kaçak veya yarı-legal alanlara kaydığı düşünüldüğünde, bu seçeneğin ciddi sakıncaları

vardır. İlaveten, yasal işletmeler olarak bu ocakların karlılığı çok daha düşük olacaktır. Zira, 2007 yılında uygulamaya konulan bu tür girişimler sonuç vermemiştir.

4. TTK'nın eski "ihtişamlı" günlerine dönmesi: TTK'nın yaklaşık 40 bin işçi çalıştırdığı döneme dönmesi politik-ekonomik açıdan oldukça zordur. TTK bugün tarihinin en düşük verimlilik düzeylerinde faaliyet göstermektedir. Ayrıca, Zonguldak'taki kömür damarlarının yapısı tam mekanizasyonu zorlaştırmakta; mevcut 23 ayakta tam mekanizasyona geçişin maliyetinin milyar dolar düzeyinde olacağı tahmin edilmektedir. Son dönemde bu yönde bazı adımlar atılmış olsa da bu seçenek makro düzeydeki politik ekonomik tercihlerle ilişkilidir.

5. Seçici işe alım stratejisi: TTK'nın özellikle kaçak ocakçılığın yoğun olduğu bölgelerden deneyimli işçi alması, kısmi bir çözüm sunabilir. Ancak mevcut işe alım süreci kura sistemine dayanmakta ve bu sistem zamanla siyasal bir pazarlık nesnesine dönüşmüştür. Bu yöntem kaçak ocakçılığı tamamen ortadan kaldıramaz, sadece sınırlı etkiler yaratabilir.

6. Seyirci kalma ve bekleme stratejisi: Bugün fiilen uygulanan bu strateji, yüzeye yakın kömür damarlarının zamanla tükenmesini ve sosyoekonomik dönüşümlerin (turizm, üniversiteleşme, Filyos projesi gibi) kaçak madenciliğin cazibesini azaltmasını beklemektedir. Ancak bu, belirsiz bir zaman ölçeğine yaslanmakta ve politikayı ertelemek anlamına gelmektedir.

6. SONUÇ

Zonguldak'taki kaçak kömür madenciliği, 1980'lerden itibaren uygulanan neoliberal politikaların bir yansıması olarak ortaya çıkmış ve yaygınlaşmıştır. TTK'nın küçültülmesi, redevans sisteminin yaygınlaştırılması ve Türkiye'nin artan kömür ihtiyacı ile TTK ve redevans sahalarındaki üretim arasındaki uçurum, kaçak madenciliğin temel tetikleyicileridir. Ancak bu faaliyetlerin sürmesinde, Zonguldak halkının madencilikle tarihsel ve kültürel bağları, başka iş imkanlarının sınırlı olması ve kaçak madenciliğin bölge ekonomisindeki merkezi rolü ve kaçak ocaklardan çıkan kömürün özel sektör için düşük maliyetli bir seçenek olması da etkilidir.

Kaçak ocaklar kendi içinde önemli farklılıklar göstermektedir. Küçük-orta ölçekli ocaklar, daha profesyonel ekipmanlara sahip, yarı-legal statüde ve yerel

otoritelerle daha karmaşık ilişkiler içindeyken; mikro ölçekli ocaklar daha ilkel, tamamen yasa dışı ve kolluk kuvvetlerinin baskılarına daha açıktır.

Zonguldak örneği, dünyadaki diğer kaçak madencilik örnekleriyle önemli benzerlikler göstermektedir: Devlet işletmelerinin küçülmesi, taşeronlaşma, ekonomik krizler ve bu süreçlerin kaçak madenciliği tetiklemesi bunlara örnek olarak sıralanabilir. Ancak Türkiye'nin uluslararası literatürde yeterince yer almaması, bu çalışmanın önemini artırmaktadır.

Kaçak kömür madenciliğinin önlenmesi konusunda net ve uygulanabilir bir çözüm bulunmamaktadır. Altı farklı senaryo değerlendirildiğinde, her birinin ciddi sakıncaları olduğu görülmektedir. Mevcut fiili durum, sorunun zaman içinde kendiliğinden çözülmesini bekleyen bir "seyirci kalma" stratejisine dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşım, iş güvenliği, sosyal adalet ve bölgesel kalkınma açısından ciddi sorunlar barındırmaktadır.

Zonguldak'taki kaçak kömür madenciliği, sadece yasa dışı bir faaliyet olmanın ötesinde, neoliberal politikaların yerel toplumsal ve ekonomik yapılarla çelişkili etkileşiminin bir ürünüdür. Bu nedenle, sorunun çözümü de sadece güvenlik önlemleriyle veya yasal düzenlemelerle değil, bölgenin sosyoekonomik yapısını dönüştürecek bütüncül politikalarla mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

Kılıç, S., Özdemir, C., Yavuz, K. 2020. Reflections of desynchronized neoliberalism in artisanal and small-scale mining: Evidence from Zonguldak, Turkey. Extractive Industries and Society, 7, 4, pp. 1385-1391.

Lahiri-Dutt, K. 2016. The diverse worlds of coal in India: Energising the nation, energising livelihoods. Energy Policy, 99, pp. 203-213.

Özdemir, C., Kılıç, S. 2026. Neoliberalizmin Zonguldak’taki Alacalı Biçimleri: TTK’nın Gölgesinde Kaçak Madencilik. İçinde İ. Gündoğdu & S. Kılıç (Ed.), Büyük Madenci Yürüyüşü Sonrası Zonguldak: Geleneksel Bir Sanayi Kentinin Neoliberal Kapitalizmle İmtihanı (pp. 83-106). Nika Yayınevi, Ankara.

TTK. 2025. TTK Genel Müdürlüğü Faaliyet Raporu 2025. Türkiye Taşkömürü Kurumu. https://www.taskomuru.gov.tr/ttk/2025-faaliyet-raporu

TTK. 2026. 2025 Yılı Taşkömürü Sektör Raporu. Türkiye Taşkömürü Kurumu. https://www.taskomuru.gov.tr/ttk/2025-sektor-raporu/

Verbrugge, B. 2015. The Economic Logic of Persistent Informality: Artisanal and Small-Scale Mining in the Southern Philippines. Development and Change, 46, 5, pp. 1023-1046.

ZONGULDAK TAŞKÖMÜRÜ HAVZASINDA RÖDÖVANS UYGULAMASI

ROYALTY AGREEMENTS IN THE ZONGULDAK HARD COAL BASIN

Av. Meral ÇOLAK
Zonguldak Barosu

ÖZET Zonguldak Taşkömürü Havzasında kömür üretimi TTK Genel Müdürlüğü tarafından yapılmakta iken 1980'li yılların sonlarında, TTK Genel Müdürlüğü uhdesindeki ruhsat sahası içerisinde belirlenen alanlar, rödövans sözleşmesi olarak adlandırılan sözleşmelerle 3. kişilere işlettirilmeye başlanmıştır. Ancak bu sözleşmelerle yürütülen faaliyetler birçok soruna sebebiyet vermiştir. Zaman içinde mevzuatta yapılan değişikliklere rağmen uygulamanın yarattığı sorunlar çözüme kavuşturulamamıştır.

Bu bildiride, TTK Genel Müdürlüğü ile 3. kişiler arasında 2004 yılında yapılan ve süre uzatım protokolleri ile devam ettirilen, kurumun 1 Nolu ruhsat sahası içinde olup ayrı ruhsatı olmayan koordinatlarda yürütülen madencilik faaliyetlerine ilişkin sözleşmelerin, Maden Kanunu ve Borçlar Kanunu kapsamında geçerli rödövans sözleşmesi olmadıkları, kurulan ilişkilerin İş Kanunu 2. maddesi kapsamında asıl-alt işveren ilişkisi olduğu üzerine değerlendirme yapılmıştır.

ABSTRACT While coal production in the Zonguldak Hard Coal Basin was being carried out by the General Directorate of the Turkish Hard Coal Authority (TTK), certain areas within the licensed area under the authority of the TTK General Directorate began to be operated by third parties in the late 1980s under agreements referred to as "royalty agreements" (rödövans agreements). However, the activities carried out under these agreements have given rise to numerous problems and resulted in various forms of hardship and grievance. Despite legislative amendments introduced over time, the problems arising from this practice have not been resolved.

In this paper, an evaluation was conducted regarding the contracts concerning mining activities carried out within the coordinates of the institution's License Area No. 1, which do not possess a separate license, executed between the General Directorate of TTK (Turkish Hard Coal Enterprise) and third parties in 2004 and maintained through time-extension protocols. The evaluation establishes that these contracts do not constitute valid royalty (rödövans) contracts under the Mining Law and the Code of Obligations, and that the relationships established therein fall within the scope of the principal employer-subcontractor relationship under Article 2 of the Labor Law."

1.GİRİŞ

TTK Genel Müdürlüğü tarafından işletilmesi ekonomik olmayan yüzeye yakın ve düşük kalorili kömürlerin ekonomiye kazandırılması düşüncesi ile 1988 yılından itibaren özel sektöre işlettirilmesi yani rödövans uygulaması başlatılmış vedaha sonra kurum, IR: 8030 (s: 72582) numarası ile sicile kayıtlı olan tüm maden ruhsat sahasında işletme hakkını kendi kullanmaya devam ederken aynı zamanda bu hakkı farklı firmalara da devretmiştir.

İlk yıllarda MadenKanununda rödövansla ilgili düzenleme olmamasının yanında kurumun Maden Kanunu kapsamında olmayıp tabi olduğu Ana Statüsü sebebi ile uzun bir süre yasal dayanağı olmadan yapılan uygulama, taşkömür havzasında tek ruhsat sahibi TTK Genel Müdürlüğü açısından hukuki sorunların çıkmasına sebep olmuştur. Bu sorunlara çözüm bulmak amacıyla 3213 sayılı Maden Kanunu'nda birçok kez düzenleme yapılmış, TTK Genel Müdürlüğü Maden Kanunu kapsamına alınmış ve en son kanunun Ek 1. Maddesinde yapılan değişiklikle Türkiye Taşkömürü Kurumu ile Türkiye Kömür İşletmeleri, uhdelerinde bulunan maden ruhsatlarını işletmeye, işlettirmeye, bunları bölerek yeni ruhsat talep etmeye ve bu ruhsatları ihale etmeye yetkili kılınmıştır.

Böylece, 3213 sayılı Maden Kanunun 5. Maddesindeki "işletme ruhsatı haklarının hiçbiri hisselere bölünemez" hükmüne uygun olacak şekilde, TTK Genel Müdürlüğü adına "yeni ruhsatlı sahalar" oluşturulmak suretiyle bu sahalarda geçerli rödövans sözleşmeleri yapılarak 3. kişilerin üretim faaliyetleri yapmalarına olanak sağlanması amaçlanmıştır.

Ancak bu düzenlemeler, TTK Genel Müdürlüğünün tek işletme ruhsatı ve tek işletme izni sahibi olduğu IR: 8030 (s: 72582) sayı ile kayıtlı olan 1 Nolu maden ruhsat sahasının tamamında, kendi işçileri ile üretim faaliyetine devam ederken, aynı anda birden fazla firmanın da, yapılan sözleşmelerde koordinatları belirlenen ancak ayrı işletme ruhsatı ve izni olmayan alanlarda üretim yapmalarını sağlayan mevcut sözleşme ve süre uzatım protokolleri ile bunların dayanağı olan önceki sözleşmeleri hukuka uygun hale getirmemiştir.

Ayrıca, bu uygulama kapsamında faaliyetlerine devam eden firmalarda çalışan işçilerin, iş sözleşmesinden ve kanunlardan doğan alacaklarının tahsili, iş sağlığı ve güvenliğine ilişkin tedbirler alınarak güvenli çalışma ortamlarının sağlanması, kayıt dışı üretim ve istihdamın önlenmesi, eşit işe eşit ücret ve sosyal hakların sağlanması, kamu alacaklarının (sigorta prim, vergi ve sair) tahsiline ilişkin mevcut sorunların çözümüne de katkı sağlamamıştır.

Bu çalışmada, yaşanan adli ve sosyal sorunlara çözüm bulunması amacıyla TTK Genel Müdürlüğü'nün 1 Nolu maden ruhsat sahasındaki uygulamalarının, geçerli bir rödövans uygulaması olmadığı ve yapılan sözleşmelerin kanunda belirtilen "hakların

bölünmezliği" ilkesinin ihlali niteliğinde olduğu hususlarına dikkat çekmek ve yaşanan sorunların iş hukuku ve sosyal alanda çözümü için öneriler sunulması amaçlanmıştır. Açıklamalar, bölgede yaşanan sorunları yargıya taşıyan kent sakinlerinin vekili ve Zonguldak Barosu Maden Komisyonu çalışmalarıyla edinilen bilgi ve deneyimlere dayanmaktadır.

2. RÖDÖVANS SÖZLEŞMELERİ -MADEN HAKLARININ BÖLÜNMEZLİĞİ İLKESİ

Maden Hukukuna göre rödövans, maden sahalarının işletme hakkının, hukuku kendi uhdesinde kalmak koşuluyla ruhsat sahibi tarafından sözleşme ile gerçek veya tüzel bir kişiye, madenin işletilmesi amacıyla ve belirli bir süre ile bırakılmasıdır (Özsoy, H.).

Mevzuat anlamı bakımından rödovans sözleşmesi, ruhsat sahalarındaki madenlerin üretilerek değerlendirilmesi amacıyla üçüncü kişilere veya kuruluşlara tasarruf hakkı sağlamak üzere ruhsat sahasının tamamı ya da bir kısmı için ruhsat sahiplerinin bu kişilerle yapmış oldukları sözleşmeleri ifade eder (Madencilik Faaliyetleri Uygulama Yönetmeliği, m. 4/r).

Bazı yargı kararlarında, rödövans sözleşmesinin, maden ruhsat sahibi ya da diğer bir deyişle işletme hakkı sahibi ile bu hakları bir süreliğine devralan rödövansçı arasında yapıldığı ifade edilmektedir. Bu ifadeye göre rödövans sözleşmesi, ruhsat sahibinin sahadaki tasarruf hakkını kendisi kullanmayıp 3. kişiye devrini düzenleyen sözleşmedir.

3213 sayılı Maden Kanunu 5. Maddesine göre maden arama ve işletme haklarının devri mümkündür. Ancak Kanunun 5/1 maddesinde "*maden haklarının bölünmezliği*" ilkesi kabul edilmiştir. 3213 sayılı Maden Kanunu'nda madenlerin devletin hüküm ve tasarrufu altında olduğu belirtildikten sonra 5. maddede hakların bölünmezliği ilkesine yer verilmiştir. Buna göre madenlerde arama, ön işletme ve işletme ruhsatlarından hiç birisinin hisselere bölünemeyeceği, bu ruhsatların tek bir tüzel ve gerçek kişiye ait olacağı kabul edilmiştir.

Buna göre geçerli bir rödövans sözleşmesi olması için hem ruhsat sahibi hem de 3. kişiler aynı ruhsat sahasında birlikte üretime yönelik faaliyette bulunamazlar. Bu düzenlemeye göre işletme hakkının tek bir gerçek veya tüzel kişi üzerinde toplanması gerekir. Buradaki amaç, işletilmesinde kamusal yarar olan madenlerin rasyonel ve ekonomik olarak değerlendirilmelerinin sağlanmasıdır.

Literatürde ve yargı kararlarında, işletme hakkının devrine ilişkin sözleşmelerin geçerli rödövans sözleşmesi olarak kabul edilebilmesi için devrin iki şekilde olması gerektiği kabul edilmektedir.

“Maden ruhsat sahipleri iki şekilde maden işletme ruhsatlarını üçüncü kişilere devretmektedirler. Birincisi, ruhsat sahibi ruhsat sahasında işletme ve üretim yönünden bir faaliyette bulunmadan işletme ruhsatını üçüncü kişiye rödövans sözleşmesi ile devretmektedir. Rödövanscı işyerine bizzat işçi alarak işletme faaliyetine başlamakta ve sürdürmektedir. Ruhsat sahibinin işletme faaliyeti bulunmadığından işçi çalıştırması ve iş sözleşmesi sebebiyle yükümlülüğü doğmamaktadır. İkinci halde ise ruhsat sahibi maden sahasını işletmeye açmış, işyerinde işçi çalıştırmış ancak bu safhada işletme ruhsatını üçüncü kişiye rödövans sözleşmesi ile devretmiş, devir sırasında işletmede bulunan alet ve makinaları da rödövanscıya kullanması için vermiş, devrettiği yerden elini çekmiştir. Yalnız rödövans sözleşmesi karşılığı ürünü denetlemek teslim almak ve maden kanununun ruhsat sahibine yüklediği yükümlülükler yönünden (üretime yönelik olmayan) işçi bulundurmaktadır” (Çankaya, O. G.).

Buna göre yapılan sözleşmelerin geçerli rödövans sözleşmesi olarak kabul edilebilmesi için ruhsat sahibi ve rödövansçı firma, aynı ruhsat sahasında aynı anda üretime yönelik faaliyette bulunamazlar ve üretime yönelik işçi istihdam edemezler.

Ruhsat sahibi ile firma arasında yapılan geçerli rödövans sözleşmeleri, maden ruhsat sahasında işletme hakkı verilen alanın bir kısmı veya tamamı için işletme hakkının devrine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda maden haklarının bölünmezliği ilkesi, işletme hakkı verilen alanda, maden işletme ruhsatı sahibinin üretime yönelik faaliyetine devam etmesini engellemektedir. Sahanın bir kısmının rödövans sözleşmesi ile devredilmesi halinde dahi sahanın geri kalan kısmında ruhsat sahibine üretim yapma hakkını vermediği gibi bu alanın rödövans sözleşmesi ile işletme hakkını başka bir kişiye devretme imkanını da vermemektedir.

Maden Kanunu’nun 5. maddesi, tek işletme hakkına sahip olunan maden ruhsat sahasında, ruhsat sahibi ile birlikte aynı anda başka bir firmanın faaliyetini ve ruhsat sahibi üretim faaliyetinde hiç bulunmasa veya devam eden faaliyetini sonlandırsa dahi çoklu rödövans uygulamasını yasaklamaktadır.

Maden Yönetmeliği’nin 101. Maddesinin 5. Fıkrasında 30.10.2025 tarihli yapılan değişiklikle “IV. Grup (c) bendi ruhsatlar ile kamu kurum ve kuruluşları ve iştiraklerine ait ruhsatlar hariç ruhsat sahası içinde birden fazla rödövans sözleşmesi yapılamaz. Koordinat bilgisi belirtilmeyen rödövans sözleşmeleri sicile şerh edilmez” düzenlemesi ile kamu kurum ve kuruluşlarına ait ruhsat sahalarında çoklu rödövans uygulaması yönüyle istisna getirilmiş ise de Kanunun açıkça yasaklamakta olduğu bir konuda Yönetmelik ile kamu kurumlarına istisna tanınması normlar hiyerarşisine ve hukukun genel ilkelerine aykırıdır. Normlar hiyerarşisi kuralı gereği bu düzenlemenin hukuken geçersiz olduğunun kabulü gerekmektedir.

Bu düzenleme tek maden işletme ruhsat sahasında işletme hakkının birden fazla firmaya devrine ilişkin yasaklanan duruma kamu kurum ve kuruluşları yönüyle istisna getirmiş ise de Maden Kanunun 5. Maddesi, açıkça hakların bölünmezliği ilkesini

kabul etmiş olmakla, yönetmelikte yapılan bu değişiklik anılan kanun maddesinin hem lafzına hem de ruhuna aykırıdır.

Kaldı ki Maden Yönetmeliği'nin 101. Maddesinin 5. Fıkrasında 30.10.2025 tarihinde yapılan değişiklik ile çoklu rödövans uygulaması yasağından kamu kurumlarının istisna tutulması, ruhsat sahibi kamu kurumunun, işletme ruhsat sahasında üretime yönelik madencilik faaliyetine ara vermeyip devam etmekte iken aynı işletme sahası içinde aynı anda 3. kişilerin madencilik faaliyeti yapmalarına yönelik uygulamaları, geçerli rödövans uygulaması haline getirmek için yeterli değildir.

3. ZONGULDAK HAVZASINDAKİ RÖDÖVANS UYGULAMASI

TTK Genel Müdürlüğü internet sitesinde (www.turkiyetaskomuru.gov.tr) yer aldığı üzere Zonguldak Taşkömürü Havza Sınırları 14.04.2000 tarih ve 525 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile yeniden saptanmış, Havza 1 ve 2 Nolu saha olarak iki bölgeye ayrılmıştır. Zonguldak Kandilli ile Bartın Kuruçaşile arasında kalan alan Kurumun IR:8030 (s:72582) sayılı "1 Nolu Saha" olarak isimlendirilmiş olan sahadır. 2 Nolu saha ise Kastamonu ile Azdavay arasındaki alanı kapsamaktadır. Bu durum MİGEM kayıtlarında sabittir.

TTK Genel Müdürlüğü'nün 1 Nolu maden ruhsat sahasının tamamında tek işletme ruhsatı ve tek işletme izni bulunmaktadır. Bu saha içerisinde TTK Genel Müdürlüğü beş müessese müdürlüğü ile organize olmuş ve buralarda istihdam ettiği üretim işçileri ile işletme faaliyetlerini halen sürdürmektedir.

14.2.2019 tarih 7164 sayılı Kanunun 20. Maddesi ile Maden Kanunu Ek Madde 1'de yapılan değişiklik sonrası IR:8030 (s:72582) sayılı 1 Nolu maden sahası bölünerek yeni ruhsatlı sahalar oluşturulmuştur. Bu sahalarda yapılan sözleşmeler bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

TTK Genel Müdürlüğü tarafından 'rödövans' olarak adlandırılan uygulamaya 1988 yılından itibaren başlanmıştır. Havzada özel sektörle yapılan sözleşmelerden ve özel sektör çalışanlarının işçilik alacakları ile kanundan kaynaklı tazminatlar ile sigorta primi ve vergi tahsilatına yönelik hukuki sorunlar ortaya çıkmaya başlamıştır.

2001 yılında kurumun Ana Statüsünde "işletir veya işlettirir" şeklinde değişiklik yapılmışsa da bu yeterli olmadığından yasal düzenleme ile kurum 2004 yılında Maden Kanunu kapsamına alınmıştır.

5 Haziran 2004 tarihinde Kömür Havzasının 'Maden Kanunu' kapsamına alınması ve Maden Kanunu'nun Ek 1. maddesinin *"Sınırları Bakanlar Kurulu kararı ile belirlenen Ereğli Kömür Havzasındaki taşkömürlerini işletmeye ve hukuku kalmak şartıyla işlettirmeye Türkiye Taşkömürü Kurumu yetkilidir"* şeklinde değiştirilmesi ile TTK Genel Müdürlüğünün 3. kişilerle sözleşme yapabilme hakkı yasal dayanağa kavuşmuş

ve buna dayalı olarak bu tarihten önce yapılmış olan sözleşmeler 2004 yılında yenilenmiştir. Ancak yine de bu sözleşmeler adları ne olursa olsun geçerli rödövans sözleşmesi şartlarını taşımamaktadırlar.

TTK Genel Müdürlüğü, tek maden işletme ruhsat ve iznine sahip olduğu 1 Nolu maden sahasının tamamında kendi işçileri ile üretime yönelik işletmecilik faaliyetine devam etmekteyken 2004 tarihli sözleşmelerle, koordinatları sözleşmelerde belirlenmiş olan alanlarda aynı anda birden fazla firmaya işletmecilik yapma hakkı vermiştir.

2004 tarihli bu sözleşmelerde bulunan, yeterli rezerv olduğu sürece sözleşmelerin uzatılacağına dair hüküm gereğince, bu sözleşmelerin devamına ilişkin yapılan protokollerle firmalar veya sözleşme ile tanınan hakları devir alan başka firmalar 2004 tarihli sözleşme hükümlerine göre işletmecilik faaliyetlerine halen devam etmektedirler.

Bu durum rödövans uygulaması olarak görünse de yukarıda açıklandığı şekilde işletme hakkının devrine olanak sağlayan sözleşmelerin geçerli rödövans sözleşmesi olarak kabul edilebilmesi için, işletme hakkının devrine ilişkin daha bahsedilen iki devir şeklinden hiçbirine uymamaktadır. Zira TTK Genel Müdürlüğü işletme ruhsatı sahibi olduğu sahadan çekilmemiş ve kendi işçileri ile üretim faaliyetine devam etmektedir. Yani 1 Nolu maden sahasının tamamını kapsaya tek işletme ruhsatlı saha sınırları içinde işletme hakkını kendisi kullanmaya devam etmekteyken aynı zamanda bu hakkını sözleşmelerde belirtilen koordinatlar içindeki hakkını sözleşmelerde üzere birden çok firmaya devir etmektedir.

Bu fiili durum "*maden haklarının bölünmezliği*" ilkesini düzenlemiş olan Maden Kanunu 5. Maddesine aykırıdır. Hakların bölünmezliği ilkesi, maden sahasının tamamında tek maden işletme ruhsatı ve izni bulunan ruhsat sahibi ile birlikte, sözleşmelerde belirlenen koordinatlar içinde farklı firmaların aynı anda işletmecilik yapmasını sağlayacak şekilde rödövans sözleşmesi yapılmasını yasaklamıştır.

2004 tarihli sözleşmelerin, işletme hakkının devrini mümkün kılan rödövans sözleşmesi olarak kabul edilebilmesi için, işletme ruhsatı sahibi TTK Genel Müdürlüğünün 1 Nolu maden sahasında üretime yönelik işçi istihdam etmemesi, sahada üretime yönelik faaliyetinin bulunmaması, sahadan tamamen çekilmesi gerekmektedir.

Hem ruhsat sahibi hem de rödövansçı firmaların aynı anda aynı ruhsatlı sahada üretim faaliyetinde bulunması, işletme hakkını kullanması, işletme ruhsatının bölünmesi anlamına gelmekte olup bu durum Maden Kanunu'nda belirtilen hakların bölünmezliği ilkesine aykırıdır.

Maden Kanunu Ek Madde 7'de (Ek fıkra: 4/2/2015 – 6592/22 md.) yer alan düzenleme ile yeraltı kömür işletmelerinde rödövans yasaklanmış ve kamu kurum ve kuruluşları

ile iştirakleri bu yasağın dışında tutulmuştur. Fakat anılan maddedeki "ruhsat sahalarının bir kısmında veya tamamında" şeklindeki tanım, kurumların Maden Kanunu 5. Maddesi ile düzenlenmiş olan hakların bölünmezliği ilkesine uyma zorunluluğunu ortadan kaldırmamaktadır. Kurumun işletirme hak ve yetkisinin bulunması da Maden Kanunu 5. Maddesine aykırı sözleşme yapma hakkını vermemektedir.

Yasa koyucunun, ancak birden çok işletme ruhsat sahası olan kurumların, kendisinin üretime yönelik faaliyet yapmadığı veya yapıp da faaliyetini sonlandırdığı sahalarına ait işletme hakkını 3. kişilere rödövans sözleşmesi ile devir edebileceklerini düzenlediği açıktır.

Maden Kanunu Ek Madde 1'de 14.2.2019 tarih 7164 sayılı yasanın 20. Maddesi ile yapılan değişiklik sonrasında TTK Genel Müdürlüğünün Ana Statüsünde de 5. Madde 'p' fıkrası ile "Uhdesinde bulunan maden ruhsatlarını bölerek yeni ruhsat talep etmek ve bu ruhsatları ihale etmek" şeklinde değişiklik yapılmıştır.

Bu değişikliklerden sonra kurumun 1 Nolu maden sahasının bölünmesi yönünde yapılan işlemler sonucunda yeni ruhsat sahaları oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni ruhsatlı sahalardan üretime yönelik faaliyetlerini sonlandırarak çekilen kurum, Amasra ve Armutçuk Müessese Müdürlükleri imtiyaz sahasında özel hukuk tüzel kişileri ile yeni sözleşmeler yapmak suretiyle, Maden Kanunu 5. Maddesine aykırılıklar bu şirketlerle yapılan sözleşmeler açısından kısmen sona erdirilmiştir.

Maden Kanunu Ek 1. Maddesinde 7164 sayılı yasanın 20. Maddesi ile yapılan değişikliğin Anayasa'ya aykırılık iddiası ile yapılan başvuru Anayasa Mahkemesinin 2019/47 E.2021/16 K sayılı ve 4.3.2021 tarihli kararıyla reddedilmiştir. Ancak kurumun 1 Nolu maden sahasını bölme ve yeni ruhsat talep etme yetkisine sahip olması, madenlerin ülke menfaatlerine uygun işletilmesinin programlanması başta olmak üzere yaşanabilecek sıkıntıların yanında ruhsat hukuku ve iş sağlığı ve güvenliği, madenlerin kontrol ve denetimi açısından sorunlar yaratabileceğinden, Anayasa Mahkemesinin kararında kabul edilen gerekçelere uygun şekilde çok titiz çalışmalar sonucunda bölünmelerin yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Yeni ruhsatlı sahalar için yapılmış olan sözleşmelerden kaynaklı sorunlar bu çalışmanın dışındadır. Bununla beraber kurumun 1 Nolu ruhsat sahası içinde bulunan 2005 tarihli sözleşme ile sözleşmede belirlenen koordinatlarda işletmecilik yapan firmanın faaliyet alanının, 1 Nolu ruhsat sahasından bölünerek ayrı ruhsatlandırılması ve yapılan yeni sözleşme ile bu sahanın işletme hakkının devredilmiş olmasının, 14.10.2022 tarihinde Amasra Müessese Müdürlüğü bünyesinde meydana gelen ve 43 madencinin ölümüne 3 madencinin ağır olmak üzere çok sayıda madencinin yaralanmasına sebep olan grizu faciasının nedenlerinden biri olup olmadığı, oluşturulan yeni ruhsat sahasının başka bir firma tarafından işletilmesinin kurumun işletmecilik faaliyetine devam ettiği bitişik 1 Nolu maden sahasının iş güvenliği

açısından risk faktörünü artırıp artırmadığı ve kazaya etkisinin olup olmadığı hususları çok ciddi bir çalışma ile araştırılması ve yasa maddesinde yapılan bu değişikliğin Anayasa Mahkemesi kararında belirtildiği şekilde uygulanıp uygulanmadığının ve uygulama sorunlarının incelenmesi gereklidir.

Kurum yasal değişiklikle 1 Nolu sahayı bölme yetkisine sahip olmasına rağmen, 2004 tarihli sözleşmeler ve süre uzatım protokolleri ile devam ettirilen işletmecilik faaliyetlerine konu olan koordinatların tümü için ayrı ruhsat alamamıştır. Dolayısıyla halen 1 Nolu işletme ruhsat sahası içinde devam eden sözleşmelerle yürütülen faaliyetler Maden Kanunu 5. Maddesine ve geçerli rödövans sözleşmesi şartlarına uygun hale getirilememiştir. Halen kurum ve bu firmalar aynı maden işletme ruhsat sahasında aynı anda çalışmaya devam etmektedirler.

Yani kurumun Maden Kanunu kapsamına alınması, Ana Statüsünün değiştirilmesi ve 3213 sayılı Maden Kanunu'na eklenen Ek Maddeler ve bu ek maddelerde zaman zaman yapılan düzenlemelere rağmen, yasa koyucu ve idareler, fiili uygulamanın meşruluğunu sağlamaya yönelik Maden Kanunu 5/1 maddesinde hakların bölünmezliği ilkesinde değişiklik yapma yoluna gitmemişlerdir. Maden kanunundaki hakların bölünmezliğine ilişkin hüküm saklı tutulmaktadır. Dolayısı ile Maden Kanunu'nun 5/1.maddesindeki 'hakların hisselere bölünmezliği' ilkesi kanuna eklenen ek maddeler ve bu maddelerde yapılan değişikliklerle aşılamamıştır. Kanun koyucu, 3213 sayılı Maden Kanunu 5. maddesine göre maden arama ve işletme haklarının devrini mümkün kılarken hakların bölünmesini yasaklamıştır.

Kamu kurum ve kuruluşları yönüyle kanunda değişiklik yapılarak istisna tutulma yoluna da gidilmediğinden, TTK Genel Müdürlüğünün 2004 tarihli sözleşmelere dayalı olarak devam eden fiili uygulamasının yasal dayanağı bulunmamaktadır.

4. HAVZADA DEVAM EDEN UYGULAMANIN ASIL-ALT İŞVEREN İLİŞKİSİ VE MUVAZAA YÖNÜYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Literatürde ve yargı kararında "geçerli bir rödövans sözleşmesi" olması halinden sıkça bahsedilmekte ve taraflar arasında yapılan sözleşmenin "geçerli rödövans sözleşmesi" olması durumunda, asıl işveren alt işveren ilişkisinden söz edilemeyeceği belirtilmektedir. Yargı kararlarında vurgulandığı gibi geçerli rödövans sözleşmesi olması halinde ruhsatlı sahada üretime yönelik faaliyet yapan iki ayrı işveren olamayacağı için, ruhsat sahibi ile rödövansçı arasında Asıl İşveren – Alt İşveren ilişkisi kurulamayacaktır. Bu durumda yine yargı kararlarında kabul edildiği gibi firma çalışanlarına karşı ruhsat sahibinin sorumluluğunun tespiti açısından rödövansı aşan bir faaliyeti olup olmadığının araştırılması yoluna gidilmesi gerekmektedir.

Ancak ortada geçerli bir rödövans sözleşmesi yoksa bu durumda kurulan ilişki rödövans ilişkisi olmayıp iş hukuku kapsamında asıl-alt işveren ilişkisi olduğunun kabulü gerekmektedir.

Bu kapsamda öncelikle TTK Genel Müdürlüğü ile 3. kişiler arasında aktedilen ve rödövans olarak adlandırılan, görünürde de bu şekilde algılanmaya sebep olan sözleşmelerle kurulan ilişkinin hukuka uygun geçerli rödövans sözleşmeleri olup olmadıklarının irdelenmesi gerekir.

Ancak uygulamada, yapılan sözleşmelere rödövans sözleşmesi denilmiş olması ve öyle anılıyor olmaları sebebiyle bu sözleşmelerin geçerliliği hususunda bir irdeleme yapılmadan "geçerli" olduğu kabul edilerek, sadece ruhsat sahibinin rödövansı aşan bir faaliyeti olup olmadığı inceleme konusu yapılarak sorumluluğu tespit edilmektedir. Birçok yargı kararı da bu doğrultudadır.

Oysa yapılan sözleşmelerin öncelikle geçerli rödövans sözleşmesi olup olmadığı irdelenmeli ve bu kapsamda sözleşme konusu olan koordinatlar içindeki alanın "saha" olarak adlandırılmış olmasına rağmen maden siciline kayıtlı ayrı ruhsatlı bir maden veya işletme ruhsatlı bir saha olup olmadığı ve Maden Kanunu 5. Maddesi dikkate alınarak kanunun yasakladığı veya kamu kurum ve kuruluşlarının istisna kapsamında tutulduğu bir durumun olup olmadığının incelenmesi şarttır.

TTK Genel Müdürlüğü'nün ayrı ruhsatı olmayan ve 1 Nolu işletme ruhsat sahası içinde yer aldığı halde sözleşmelerde koordinatları belirlenen alanların, kurum tarafından "Saha" olarak adlandırılması, bu koordinatların ayrı işletme ruhsatlı saha gibi algılanmasına ve yanlış değerlendirmeler yapılmasına yol açmıştır.

Yıllardır yargı kararları arasında karşılaşılan farklılıkların en önemli sebebi, maden hukukuna ait "saha" kelimesinin TTK Genel Müdürlüğü, bölge avukatları ve bilirkişiler tarafından hatalı kullanılmış olmasıdır.

Saha kelimesi Maden Dairesinde koordinatları belirlenerek tescil edilmiş haliyle ruhsatlandırılmış alanları ifade etmektedir. Maden işletme ruhsatı, maden sahasında üretim yapabilmek ve madeni yasal olarak çıkarabilmek için alınan yetki belgesi, işletme izni ise işletme ruhsatı sahibi olan kişilerin fiilen üretime geçebilmesi için alınması zorunlu belgedir. Sadece işletme ruhsatı sahibi olmak maden çıkarmak için yeterli olmayıp üretim için mutlaka işletme izni alınması gerekmektedir.

TTK Genel Müdürlüğü'ne ait 1 Nolu maden sahasının tamamında kurumun tek işletme ruhsatı ve işletme ruhsat sahasının tamamında işletme izni bulunmaktadır. Dolayısıyla sözleşme ile firmalara üretim faaliyeti izni verilen alanlar işletme ruhsatı ve izni bulunan alanlar değildir.

Ancak TTK Genel Müdürlüğünün 1 Nolu sahayı bölme yetkisi dahi olmadan ve koordinatları sözleşmelerde belirlenen ruhsata bağlanmamış ve 1 Nolu maden sahası içindeki alanlar, sözleşmelerde maden sicilinde kayıtlı olmaksızın keyfi numaralandırılma veya adlandırma yapılarak maden sahası olarak ifade edilmiştir.

Dolayısıyla Maden Kanunu'nda 14.2.2019 tarih 7164 sayılı yasanın 20. Maddesi ile Ek 1. maddesinde yapılan değişiklik ile kuruma ruhsatını bölme yetkisinin verilmesi ile birlikte IR: 8030 (s: 72582) numarası ile sicile kayıtlı olan ruhsatın bölünerek oluşturulan ve ayrı ruhsatlandırılan alanlar artık kayıtlı birer maden sahası iken, kurumun bölme yetkisi dahi olmaksızın 1 Nolu maden sahası içindeki ayrı ruhsat ve işletme izni bulunmayan alanlar 'maden sahası' değildir.

TTK Genel Müdürlüğü 1 Nolu ruhsat sahasında kendi işçisi ile üretim yaparken, aynı sahada rödövans adı altında sözleşmeler yaparak, diğer firmaların aynı anda çalışmasına izin vermiştir.

O halde 14.2.2019 tarih 7164 sayılı yasanın 20. Maddesi ile EK 1. maddesinde yapılan değişiklik tarihine kadar 1 Nolu maden sahasında belirlenen koordinatların yeni ruhsat alınmadan işlettirilmeye verilmesi, işletme ruhsatının sağladığı hakların bölünmesi olarak değerlendirilmesi ve yapılan sözleşmelerin Maden Kanunu 5. Maddesinde açıkça belirtilen 'ruhsatların bölünemeyeceği' hükmüne aykırı olduğunun da kabul edilmesi gerekir.

Bu durumda TTK Genel Müdürlüğü ile 3. kişiler arasında akdedilmiş olan ve "rödövans sözleşmesi" olarak isimlendirilen ancak rödövans sözleşmesi şartlarını sağlamayan sözleşmelerin, kanunun açık düzenlemesine aykırı olduğu ve Türk Borçlar Kanun 27. Maddesi (818 Sayılı Borçlar Kanunu 20. Maddesi) gereğince hükümsüz olduklarının kabul edilmesi gerekir.

Ancak bu sözleşmeler kapsamında çalışanların, iş aktinden ve kanundan doğan haklarının korunması için, bu sözleşmelerin İş Kanunu 2. Maddesi ve Alt İşverenlik Yönetmeliği kapsamında incelenmesi ve bu firmalarda çalışan işçiler açısından TTK Genel Müdürlüğünün taşeronluk hizmeti aldığının ve bu şirketlerin 'Alt İşveren', TTK Genel Müdürlüğünün ise 'Asıl İşveren' olduğunun kabul edilmesi ve İş Kanunu 2. Maddesinde yer alan muvazaa denetiminin yapılması uygun olacaktır.

Nitekim T.C. Soma İş Mahkemesi 2014/86 E. 2015/426 K sayılı 24.11.2015 tarihli kararı ve bu karara ilişkin Yargıtay 22.HD 2016/2311 E. 2016/14268 K sayılı 10.5.2016 tarihli onama ve Yargıtay 22.HD'nin 2015/3744 E. 2015/13328 K sayılı 13.4.2015 tarihli bozma ilamlarında da aynı kapsamda incelemeler yapılarak ilişkilerin tespitine ilişkin ilkeler kabul edilmiştir.

Yargıtay 22. H.D. kararlarında aynı maden ve işletme ruhsat sahası içinde faaliyette bulunan TKİ Genel Müdürlüğü ile şirket arasındaki fiili durumun rödövans olmayıp asıl-alt işveren ilişkisi olarak kabul edilerek muvazaa kriterlerine göre yapılan incelemede ilişkinin muvazaalı olmadığına yani geçerli asıl-alt işveren ilişkisi olduğuna karar verilmiştir.

TTK Genel Müdürlüğü'nün 1 Nolu maden işletme ruhsat sahasında asıl işi, taşkömürünün ülke ekonomisine katılımını sağlamaya yönelik üretim işidir. İş Kanunu ve Alt İşverenlik Yönetmeliği asıl işin alt işverene verilemeyeceğini ancak işin gereği ve teknolojik sebeplerle uzmanlık gerektirmesi halinde ihale edilebileceğini düzenlemiştir. Kurumun Ana Statüsü'nün 5. Maddesinde iştigal alanları sayılmış olup taşkömürü ile taşkömürü havzasındaki diğer madenlerin en iyi şekilde değerlendirerek yurt ekonomisine kazandırılmasını sağlamak kurumun asıl işidir. Kurum asıl işini, İş Kanunu 2. Maddesi ve Alt İşverenlik Yönetmeliğine aykırı olarak, işin gereği ve teknolojik sebeplerle uzmanlık gerektirmediği halde devir etmiş olmakla kurulan bu ilişkinin muvazaalı ve bu sözleşmeler kapsamında çalışan işçilerin de baştan itibaren TTK Genel Müdürlüğü işçisi olarak sayılmaları hukuki zorunluluktur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Zonguldak taşkömürü havzasında TTK Genel Müdürlüğü'nün IR:8030 (s:72582) sayılı "1 Nolu Saha" olarak isimlendirilmiş olan maden sahasının tamamı için sahip olduğu tek işletme ruhsatının sağlamış olduğu işletme hakkını, henüz ruhsatını bölme ve ihale etme yetkisi olmamasına rağmen, kendisi kullanmaya devam etmekte iken sözleşmelerde yer alan koordinatlar içinde firmalara kullandırmasına ilişkin sözleşmelerin geçerli rödövans sözleşmesi olarak kabul edilmesi mümkün değildir.

TTK Genel Müdürlüğü'nün 1 Nolu maden ruhsat sahasının tamamında kurumun sahip olduğu tek işletme ruhsat sahasından kurum çekilmeyip kendi üretim işçileri ile üretim faaliyetine devam etmekte iken aynı zamanda yapmış olduğu sözleşmelerde belirlenen koordinatların, ayrı işletme ruhsatı bulunmamasına rağmen firmaların da üretim faaliyetlerinde bulunmaları, yapılan sözleşmeleri rödövans sözleşmesi olarak kabul edilmelerini engellemektedir.

14.2.2019 tarih 7164 sayılı yasanın 20. Maddesi ile 3213 Sayılı Maden Kanunu Ek 1. Maddesinde yapılan değişiklik, kuruma ruhsatını bölme yetkisi vermiş ise de firmalarla 2004 tarihinden itibaren yapılan tüm sözleşmelere konu olan koordinatlar, 1 Nolu maden sahasından ayrılarak ayrı ruhsata bağlanılamamıştır. Buna rağmen bu sözleşmelerle yürütülen faaliyetler halen devam ettirilmektedir.

Bu sözleşmeler Kanunun 5/1'maddesinde düzenlenmiş olan maden haklarının bölünmezliği ilkesine aykırı olmakla beraber sözleşmenin tarafı olmayan kusursuz firma işçileri açısından iş hukuku kapsamında daha büyük sorunların ve mağduriyetlerin doğmasına engel olmak için bu ilişkinin asıl-alt işveren ilişkisi olduğunun kabul edilerek muvazaa denetimi yapılması zorunludur.
Asıl işveren olarak kurumun iş sözleşmesinden ve yasadan doğan alacaklardan sorumlu olmasının kuruma yükleyeceği külfet de firmalarla yapılan sözleşmelere sözleşme bedeli için alınan teminatlar gibi teminat alınması şartı ile aşılması mümkündür.

Böylece, 2004 yılından sonra yapılan sözleşmeler ile bu sözleşmelere dayalı süre uzatılmasına ilişkin protokollerle faaliyette bulunan firmaların çalıştırdığı işçilerin, iş sözleşmesinden ve yasalardan doğan alacaklarının tahsil imkanı sağlanmasının yanında, iş sağlığı ve güvenliğine ilişkin tedbirler alınarak güvenli çalışma ortamlarının sağlanılması, kayıt dışı üretim ve istihdamın önüne geçilebilmesi, denetimsiz kontrolsüz üretim yapılması engellenerek doğru rezerv bilgilerinin korunması ve gelecek kuşaklara sağlıklı rezerv ve bilgi aktarımı sağlanacaktır. Ayrıca kamu alacaklarının tahsili ile ilgili mağduriyet ve kayıplar engellenecektir.

KAYNAKLAR

Özsoy, H., hayriozsoy.com/rodovans-sozlesmeleri-ekim-2016,2,40453

TTK Genel Müdürlüğü, www.turkiyetaskomuru.gov.tr

Yeşilyurt, C, Madencilik Türkiye, www.madencilikturkiye.com

Çankaya, O. G. "Rödövans Alt İşverenlik Sözleşmesi midir**?"** Kamu-İş İş Hukuku ve İktisat Dergisi, 13(3), 2014, s.1-21.

FEEDBACK AND LESSONS LEARNED FROM FRENCH COALMINE

FRANSIZ KÖMÜR MADENİNDEN GERİ BİLDİRİM VE ÇIKARILAN DERSLER

Marwan Al Heib*
Ineris, Nancy, France

ABSTRACT: France mined coal and lignite seams for several centuries in different basins, with operations ceasing in 2004. The final mining panel reached depths exceeding 1,250 meters. Thus, mining operators, Charbonnage de France, faced extremely difficult mining conditions, particularly regarding ground pressure phenomena such as severe deformation observed in the main roadways, rock bursts, and the extension of the zones of influence of several seams. Ineris supported Charbonnages de France to improve operating conditions. The adopted planification methodology, developed by Ineris, is based on three main pillars: in-situ observations; design of panels and support system based on geological and geotechnical assessment (including stress measurements, destressing over stress zones) and continuous monitoring); and 3D numerical modeling to adjust operational planning according to geotechnical data. Today, post-mining hazards are monitored, and some sites have been designated as UNESCO World Heritage sites. In this paper Ineris shared experiences and lessons learned over years.

ÖZET: Fransa, yüzyıllar boyunca farklı havzalarda kömür ve linyit yatakları işletmiş ve bu faaliyetler 2004 yılında sona ermiştir. Son maden ocağı paneli 1.250 metreyi aşan derinliklere ulaşmıştır. Maden işletmecisi Charbonnage de France, özellikle ana yollarda gözlemlenen şiddetli deformasyon, kaya patlamaları ve birden fazla damarın çıkarılmasından kaynaklanan etki alanları gibi zemin basıncı olayları açısından son derece zorlu madencilik koşullarıyla karşı karşıya kalmıştır. Ineris, işletme koşullarını iyileştirmek için Charbonnages de France ile birlikte çalışmıştır. Ineris tarafından Charbonnages de France'ın desteğiyle geliştirilen ve üç ana sütuna dayanan benimsenen metodoloji: yerinde gözlemler; jeolojik ve jeoteknik değerlendirmeye (gerilim ölçümleri, gerilim bölgeleri üzerindeki gerilimin giderilmesi ve sürekli izleme dahil) dayalı panel ve destek sistemi tasarımı; ve jeoteknik verilere göre operasyonel planlamayı ayarlamak için 3 boyutlu sayısal modelleme. Bugün, madencilik sonrası tehlikeler izlenmekte ve bazı alanlar UNESCO Dünya Mirası alanı olarak belirlenmiştir. Bu makalede Ineris, yıllar boyunca edindiği deneyimleri ve dersleri paylaşmıştır.

* *marwan;alheib@ineris.fr; marwan.alheib@wanadoo.fr.*

1 INTRODUCTION

The extraction of coal and lignite in France dates back at least to the Middle Ages, but it underwent significant expansion in the late 18th century and, above all, during the Industrial Revolution in the second half of the 19th century. Coal-mining operations were nationalized in 1946, which established the public entity “Charbonnages de France”. Mining operations ceased nationwide in 2004 with the closure of Lorraine coal basin. Figure 1 presents the main location of the coal basins with main one: Lorraine Basin, Nord-Pas-de-Calais and centre and province basin. The geological age of coal deposits in France dates back to the **Carboniferous period** (about 359 to 299 million years ago), while its industrial "age" or era of major extraction spanned from **1720 to 2004.**

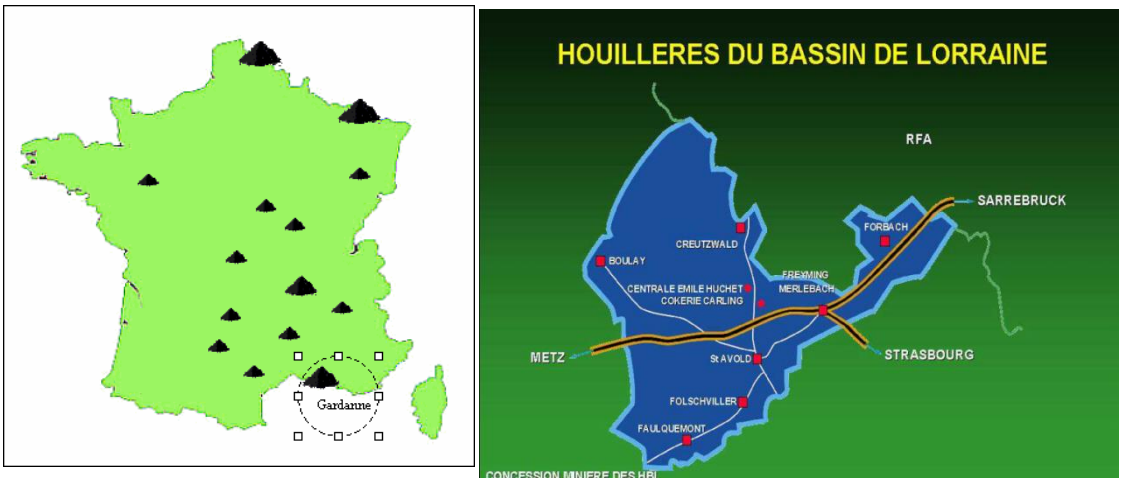


Figure 1 Principal deposit of coal and coalmines in France

1.1 Lorraine coal basin

Since the middle of the 19th century, the Houillères du Bassin de Lorraine (HBL) collieries have been extracting the biggest coal field in the eastern part of France near the German border (Figure 1). The exploitations of the coalfield are carried out in a very complex geological setting, characterized by two faulted anticlines separated, in the middle, by a syncline with asymmetric sides (Figure 2). The coal is extracted from two main clusters overlaid by 200 to 300 m thick sandstone layer. The deposit is geologically very complex marked by numerous faults. The coalfields are located on two levels, top and bottom of series of sandstones of twenty seams. The thickness of exploited seams varies between 1 and 5 m. The dip coal seams, because of geological folds, ranges from 10 ° to 70 °.

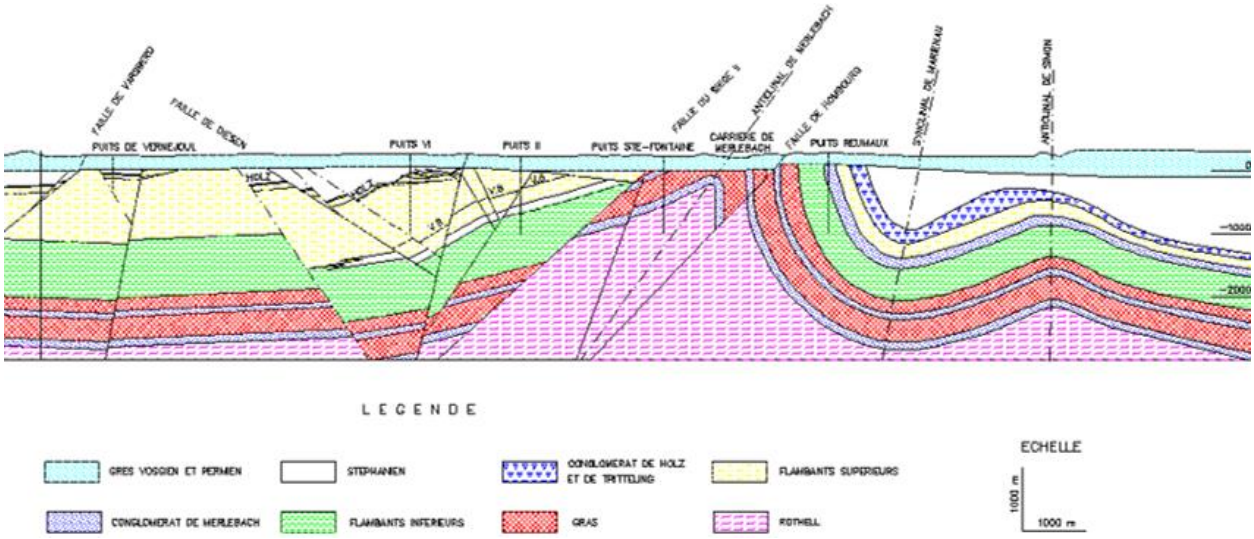


Figure 2. Section of the Lorraine coal basin, the section presents the complex geology structure with existing of several main faults and the very strength sandstone bedrock

1.2 Provence coal basin

The Provence colliery is situated in south-eastern France (Figure 1). The lignite deposit reaches a depth of 1450 m and is worked by the long-wall faces method. Only one seam, Grand Mine, was generally extracted during the life of the mine (Figure 3). An important feature of the mine is the exceptional stiffness of the overburden and sidewalls and the anisotropy of the initial stress. The limestone roof is characterized by high compression strength, close de 150 MPa. In addition, several main faults cross the coal deposit. Those conditions are the main factors in the occurrence of rock burst occurred by a sudden and explosive release of elastic energy stored in the strata when the natural and/or mining-induced stresses are relaxed.

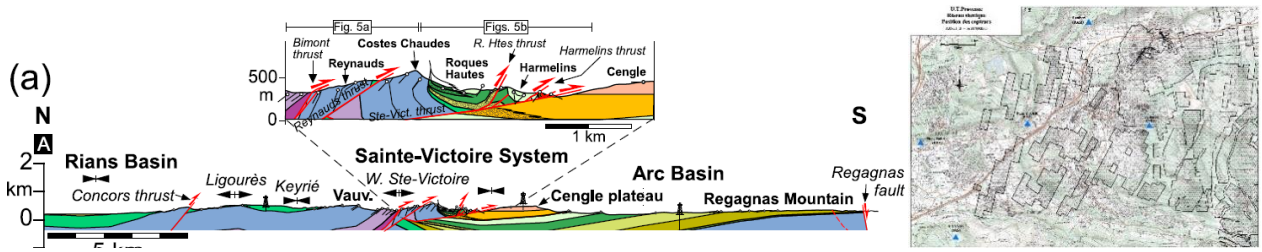


Figure 3. Provence coal basin, the section presents the complex geology structure with existing of several main faults and the very strength limestone bedrock (up). The Provence lignite basin starts with very shallow room and pillar mines to very deep long-wall panels (depth reach 1450 m)

1.3 Nord/Pas-de-Calais Basin

The Nord and Pas-de-Calais coalfield is located at the western end of the powerful coal zone (Figure 1), which brings together the Ruhr area (Germany) Kent (England). It stretches from west to east about 120 km (Figure 4). The mine operations began in

1720 and ended in 1990. The coal seams are exploited many, they are thick and low variable between 0.5 and 2 m. The depth of exploitation has increased as a function of time, from 200 m to 1100 m. The geology is characterized by the presence of several flaws releases more or less important. The land surface is made of marl-chalky layers (20 m depth), beyond that, there is the presence of a layer of white chalk to 50 m thick. The land is characterized by a plastic behaviour. The mining operations are being flooded, but the water level is very low. This basin confined numerous thin (1 m thick in average) carboniferous coal seams in between the three hercynian thrust sheets, highlighting the continuous subsidence due to the hercynian thrusts reactivation.

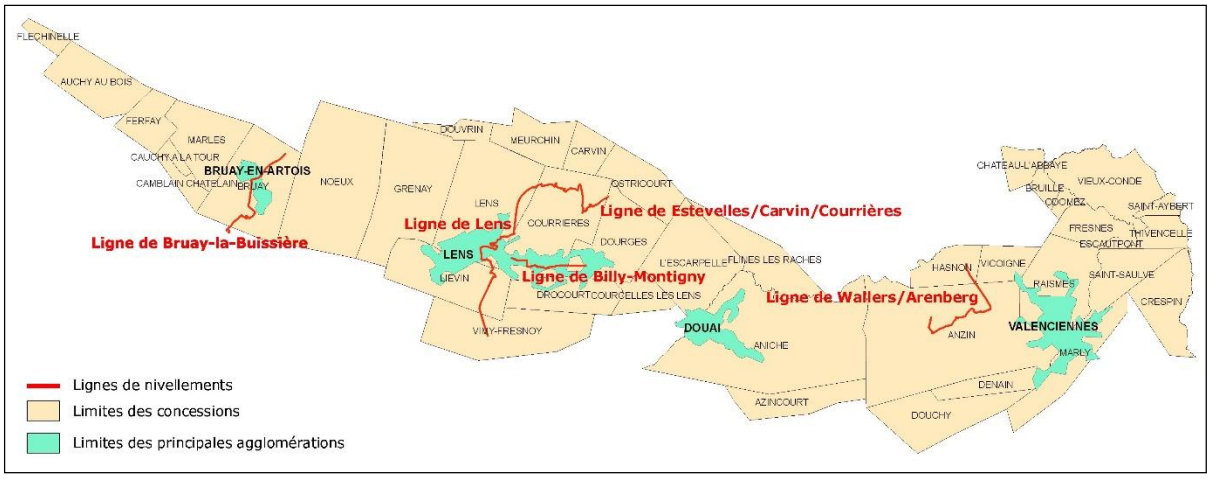


Figure 4. Schematic Representation of leveling lines - Nord/Pas-de-Calais

2 MINING METHODS

Coal mining in France relied primarily on underground extraction and secondarily on open-pit mining, two techniques adapted according to the depth of the deposits. Bench excavation is used when the coal seam was close to the surface (extending to depths of over 200 meters), requiring the removal of overburden via blasting. The main challenge of the open pit mine was the stability of the mine and the dumps. The paper will focus mainly on underground deep coal mines presenting technology and geotechnical challenges.

Underground coal mining in France has predominantly employed so-called "total extraction" methods (Figure 5). These methods involve extracting all the coal and filling the resulting underground voids—either through complete backfilling using materials from the surface or from underground waste rock, or by allowing the roof to collapse (caving) immediately behind the working face. This latter type of operation ensures comprehensive management of the voids (whether from total extraction or from partial extraction with backfilling or caving) and minimizes the risk of surface ground instability during the post-mining phase. Mining methods included backfilling: voids created by coal extraction were filled with waste rock or sand to limit surface subsidence. Longwall mining: this method allowed for the continuous working of large coal faces. The room-and-pillar method: used in certain configurations, it left pillars of coal in place to support the mine roof.

The caving longwall mining method was widely used in France (Figure 5). The zone of influence was extensive, given the presence of multiple seams mined over areas spanning kilometers; this resulted in stress concentration and destressing zones that far exceeded the theoretical model of a single, isolated panel. Numerical modelling and stress measurements were employed to monitor ground pressure, ensure miner safety, and prevent the hazards of collapses or rock bursts.

Figure 5. Logn-wall mining method using continuous miner machines (and powered support system, and redistribution of strata pressure in longwall mining

In Lorraine, a specific method developed for steeply inclined deposits. The coal seams are inclined at angles greater than 35°, sometimes even standing completely vertical. Mining these tilted layers in the Lorraine basin required a specific method designed to manage the effects of gravity and ensure miner safety. Principles of steep-seam mining: Slice-based extraction—coal was extracted from the bottom up (an ascending technique) in successive slices. Backfilling (stowing)—as coal was removed, the resulting void was immediately filled with sand or waste rock (extracted rock) to support the walls; this allowed the miner to work while standing on the backfill material.

3 CHALLENGING COAL DEPOSITS DRIVING UP OPERATING COSTS

The underground coal mines France faced numerous challenges to the depth but also due to the geology and the geotechnical constraints (Raffoux and Pentel, 2002). Thus, the planning for mining operations considers numerous factors related to site organization, ventilation, and ground pressures. As the mining operations go deeper, ground pressure becomes a key parameter that must be managed, particularly in areas affected by past mining activities.

Coal has been mined on an industrial scale since the mid-18th century—in the North (Nord-Pas-de-Calais, Anzin), in the Centre and South (Saint-Étienne and Carmaux), and in Lorraine—under conditions less favourable than those in Germany or Great Britain. Over time, mining operations have had to go increasingly deep into old, often highly irregular deposits to reach workable seams. From firedamp[1] or coal dust

[1] A firedamp explosion is a sudden, accidental explosion of gas in a coal mine. "Firedamp" refers to the methane that naturally escapes from coal; when mixed with air in concentrations between 5% and 15%, it becomes highly explosive upon contact with even a single spark.

explosions, flooding, and cave-ins to risks associated with daily handling and extraction operations and the movement of personnel and machinery underground, the mine is a hazardous environment where safety concerns are ever-present.

Following nationalization, the rapidly growing mining industry committed to an accident-prevention initiative. Major safety campaigns were organized to raise staff awareness regarding the need for strict adherence to regulations and procedures. Subsequently, the mechanization of work sites, the abandonment of the most difficult sectors, and the closure of the least profitable—and often most dangerous—mines helped improve safety standards.

Regarding collective safety, significant efforts were made to prevent coal dust explosions, control firedamp emissions, ensure electrical safety, and implement effective detection and remote monitoring systems. This unwavering commitment to safety led to a steady decline in the frequency of accidents resulting in lost work time: the rate fell threefold between 1960 and 1990 and was halved again between 1990 and 2003. While the modern mine has become much safer, it remains a hostile and unpredictable environment. Despite all measures taken, Charbonnages de France and the mining community suffered the loss of lives in several major accidents: a firedamp explosion at Liévin in 1974; a fire followed by an explosion at Merlebach in 1976; a firedamp explosion at the Simon shaft in Forbach in 1985; and a rock burst at Merlebach in 2001.

3.1 Rock burst management and methodology

While technological advances have made it possible to mine coal at ever-greater depths (operations that ceased in 2003 at Merlebach and Gardanne were located more than 1,200 meters underground), mining at such depths has driven up production and safety costs. The two basins well knowns with occurrence of induced seismicity. The magnitude of the seismic events can reach more 3.5 and induced very severe damages on the roadways and the panels. Figure 7 and associated photos present the consequences of the rock burst in the different roadways in Lorraine coal basin. Managing rock burst phenomenon involves several techniques of planning, prevention and prediction of risk zones. In this context, two important tools have been applied: microseismic monitoring and large-scale numerical modelling (Al heib, 2012). By analysing the mining-induced seismicity, it is possible to identify the particular failure mechanisms that underlie seismic activity.

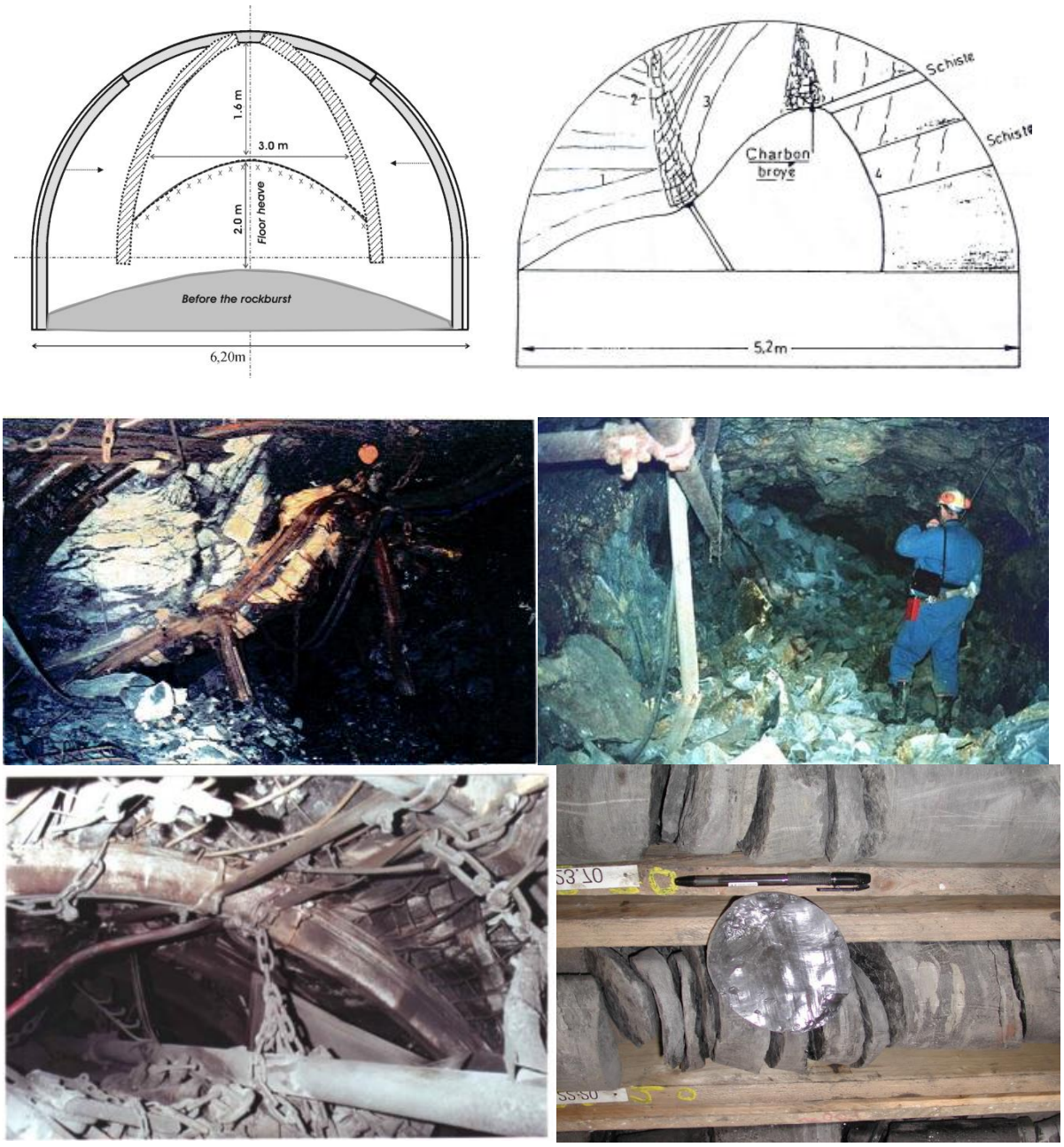


Figure 7. Schematic view of the floor heaving effect (dashed part) in the main gate of a long-wall panel after the rock burst occurrence (Lorraine basin)

To improve the control of the mining induced seismicity an operational methodology (Al Heib et al., 1996; Senfaute et al., 2001 et Sylla et al., 1999) had been developed for managing the seismic activities of the underground coalmines in the last ten years combines numerical modelling (Figure 8), seismic monitoring, stress measurements and back analysis of sever rock burst cases. The interaction between tools allows predicting seismicity and improving the surface installation and mine safety. Two important tools have been applied: seismic monitoring and large-scale numerical modelling. By analysing the mining-induced seismicity, it is possible to identify the particular failure mechanisms that underlie seismic activity. The numerical modelling and seismic analysis are used together to help the prediction and the evaluation of rock bursts or collapses occurrence due to fault slip burst. The methodology has the principal characteristics: a large-scale seismic network, a local scale seismic network, and in-situ stress measurements. The design of the seismic network and the in-situ stress

measurements depend on the historic of the mining behaviour of the previous panels and the experience. Large scale operational numerical modelling is also used continuously to predict the over stress zones and manage the destressing measures and the production of the coal. In the Lorraine Basin, two different micro-seismic monitoring systems are integrated:

- A seismic network capable of monitoring the mining operations at a regional scale and consisting of 14 recording stations (11 free-field and three underground) with vertical component geophones (natural frequency of 1 Hz). The seismic activity is recorded in the frequency band of 1 - 30 Hz.
- A seismoacoustic network monitoring the mining operations at a local scale in the vicinity of the coal face. It's composed of 14 high frequency geophones (natural frequency of 14 Hz) installed along the main and head gates. This network provides a continuous recording in the frequency band of 14 - 400 Hz and allows daily analysis of the released seismoacoustic energy.

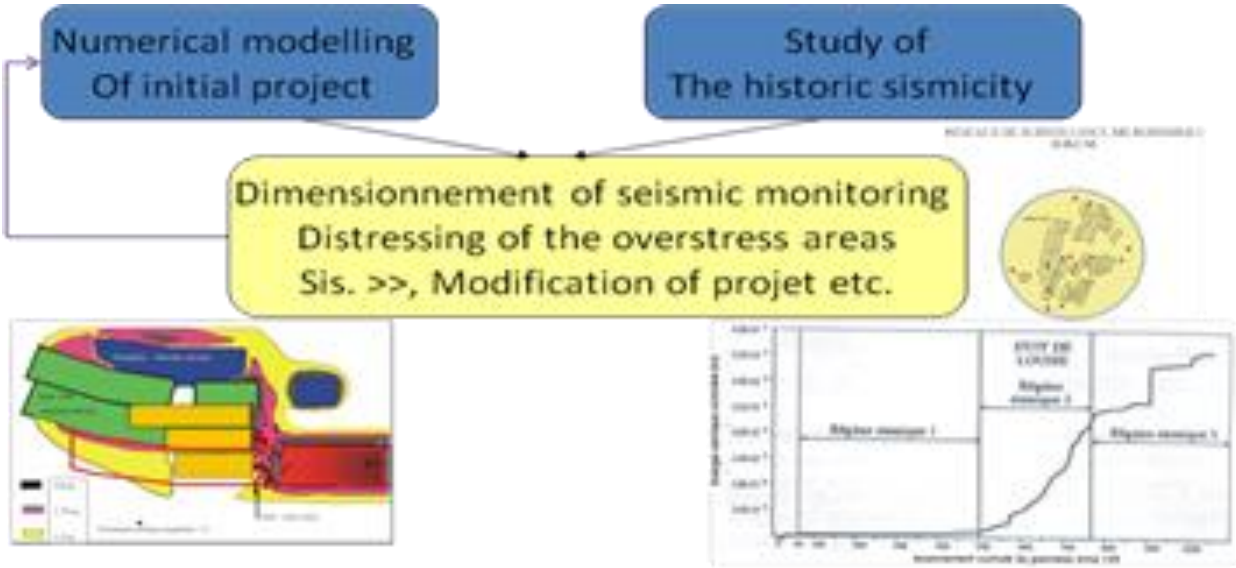


Figure 8. Methodology developed for the design and the planification of deep coalmines presenting complex geology and geometry due to the existing of several seams and several panels

In Provence coalmine, south of France, in-situ stress measurement using overcoring was used to determine the in-situ stress tensor: magnitude and orientation (Figure 9). The horizonal principal stress is much higher than the vertical stress. Ineris carried out in situ stress measurement every 200 to 400 m, corresponding one to two panels. The figure presents the map of the in-situ stress measurement. An interpretation effort was carried out using the geology and the geotechnical information for following the development of the mine and the destressing intervention.

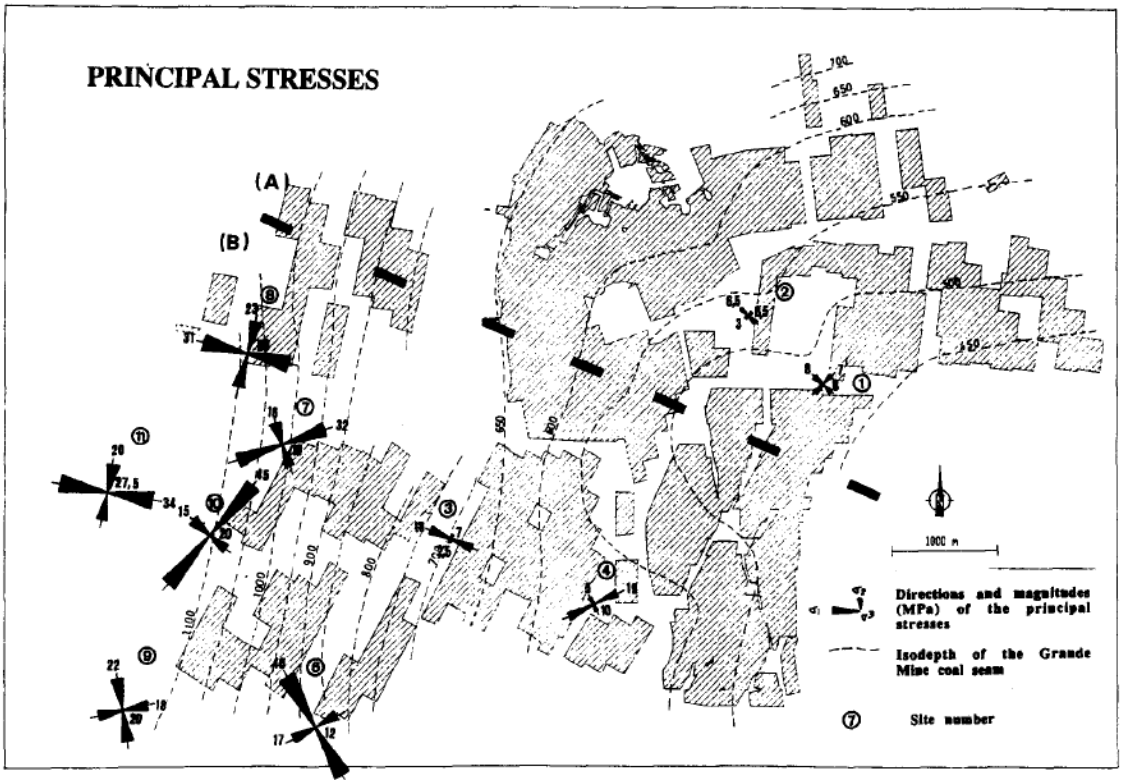
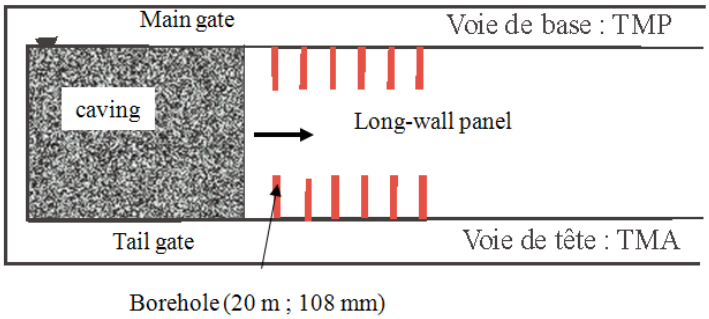
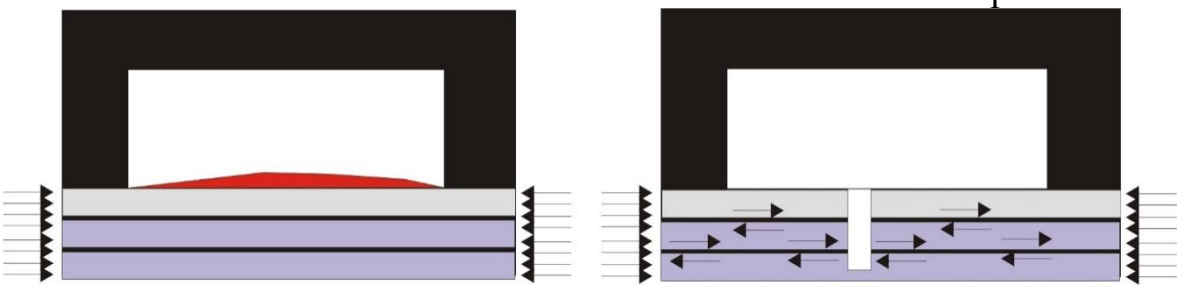


Figure 9. Provence coalmine, in-situ stress measurement for predicting and controlling the behaviour of the strata before and during the mining operation.

In addition to the design methodology, distressing methods were developed to reduce local seismicity near workers. The destressing operations concern mainly the coal seam and also the roof and the floor. Figure 8 shows the distressing or preconditioning methods used in the Provence coalmine: the first one (figure 9-a) concerned the front of the panel, a distance of 20 to 30 m before the panel was distressed with small boreholes. The borehole diameter was 100 mm, with distances varying by between 2 and 3 m. The second distressing method, very original one developed in France, was the slotting technique (figure 9-b) and concerned the floor of the roadways and the main gates. The method consists of making 15 cm wide and 1 m deep slots in the floor of the roadways. The slot was filled by soft material or keeping empty during the mining operations. The two methods enabled the reduction of local seismic events (small events). The big seismic events unfortunately continued to disturb mining operations leading to the mine's closure in May 2003.



a- Borehole installed in the front of the panel



a- Vertical slotting to distress the floor

Figure 9. Distressing methods to reduce induced seismicity

3.2 Adaptation of the support system for high tunnel deformation and reuse of tunnels

The roadways suffered also of high deformation during the mining operation. A specific methodology was also elaborated by Ineris for designing the support system for rectangular section used in Provence coal mine and iron horse section in Lorraine coalmine (Figure 10). The roadways were large and close to 5 m. Roof convergence can reach 2 to 3 meters and hinders the proper functioning of the operation. Thus, the traditional support system, in Lorraine and Provence coalmine, with short bolts, 2 m length, and arch steel presented a severe limitation for the safety and the security and ensuring the extraction of coal. The reinforcements with "double birdcage" cable-bolts were carried out in various works (roadway junction, cross-cut roadway) where we wanted to reinforce the roof without using additional carrying support.

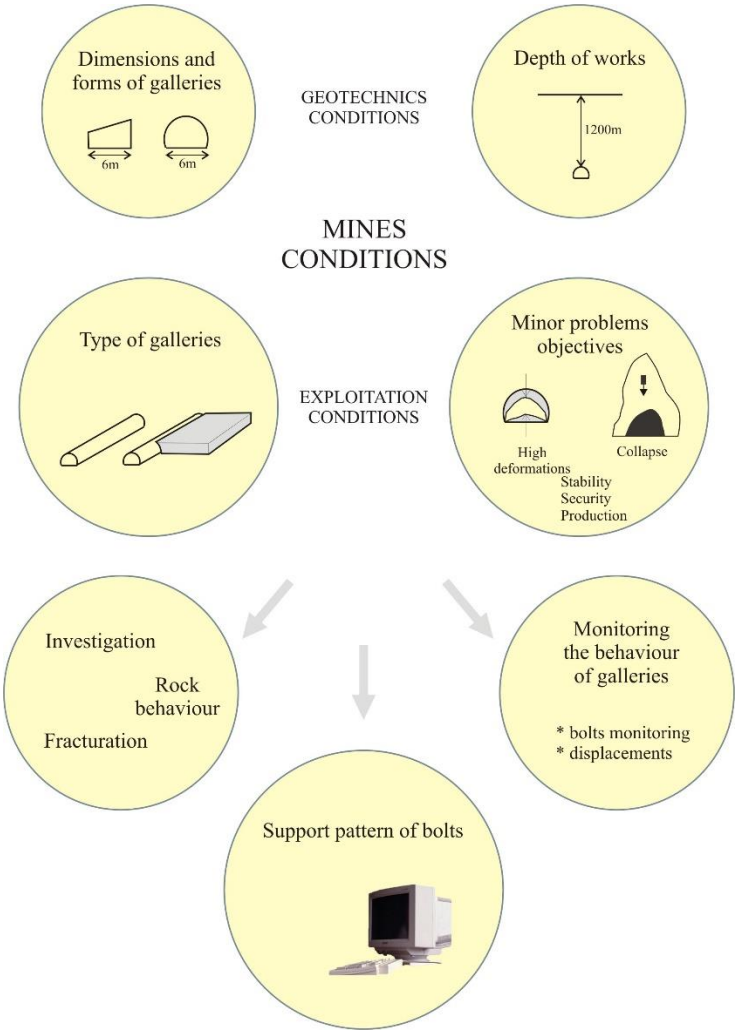


Figure 10. Methodology developed for the design the support system of the roadways of the panels

The method is now well controlled and gives whole satisfaction. In this optic, convergence measurements were taken to check if the use of long cable-bolts for the reinforcement of the standard support of the main gate when the face is approaching could allow to improve the security and reduce of painfulness of work at the face-end and to decrease the convergence at the face passage (to keep enough room to move the face equipment). Based on this improvement, using cable-bolts with lengths (5 and 6 m) was optimal. The effect of shorter cables is insufficient, and the additional profit obtained using very long cables (10 m) is not significant. In addition, when the geological and geotechnical context is good, the double use of roadway for two faces can be economically interesting for deep coalmine (1000 m) with very important deformation. Those modifications induce a reduction of the main-gate convergences; their allowed us to continue using one gate for 2 faces in good security and economic conditions (Figure 11).

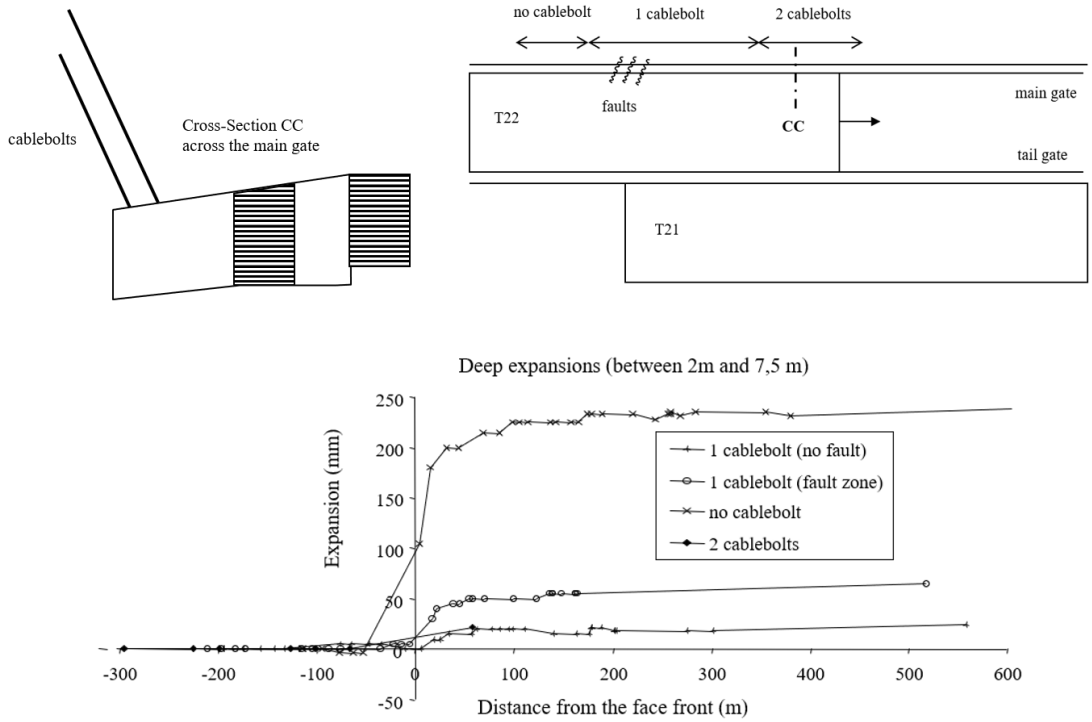


Figure 11. Improvement of the roadway behaviour thanks to the development of new support system using long bolt-cables

4 THE END OF COALMINING OPERATIONS

In 2004, the mining operation was stopped and start the period of closing mines and post-mining management. Charbonnages de France was started by the post-mining operation, the 261 concessions held by in 1946 spanned 8 regions, 18 departments, and 880 municipalities. In total, an inventory was made of 2,710 shafts, 750 spoil tips, 19 coking plants, 28 thermal power plants, and 66 water pumping stations. Preparing the files for the abandonment of operations made it possible to better define the scope of the work required. These files assess potential risks to water quality and public safety—such as firedamp and the stability of structures (shafts, spoil tips, open-pit mines)—and summarize the necessary work. A detailed work program for all sites was thus developed. As of February 1, 2004, 155 prefectural orders for the permanent cessation of operations and 88 orders regarding the relinquishment of concessions had been obtained. All files concerning the cessation of operations were scheduled to be submitted before the end of 2005. Carried out in compliance with regulations—specifically the Mining Code—and in close consultation with local authorities, these operations focus primarily on:

- sealing shafts and galleries that open to the surface,
- stabilizing spoil tips, settling ponds, and open-pit mine slopes,
- dismantling redundant buildings,
- reshaping and revegetating spoil tips and open-pit mines to protect against erosion (20 million cubic meters of earth will have been moved to rehabilitate former open-cast mine sites in the Centre-Midi region).

Charbonnages de France also implements monitoring and prevention systems (such as piezometric networks to monitor rising water levels in coal-bearing strata, pressure-

relief boreholes, and methane monitoring equipment) that will subsequently be transferred to the State or local authorities.
Leisure areas, industrial zones, and logistics hubs: mining sites—particularly in urban or semi-urban settings—can serve as key drivers for local redevelopment, as evidenced by several projects (the Dourges multimodal hub in Pas-de-Calais, Cap'Découverte in Carmaux/Tarn, and the Forbach Eurozone in Moselle).
In keeping with its commitment to the regions, Charbonnages de France aims to return industrial sites to the community in an environmental condition suitable for sustainable future use.
Achieving this goal requires regular communication with local authorities so that they can incorporate the work carried out by CdF into their own planning policies. Company representatives therefore participate in information meetings organized by government authorities for local elected officials.
Once safety works are complete, the Prefect formally acknowledges the cessation of operations; the site is then released from mining regulatory oversight and can be opened up to other activities. The point at which the mining operator's liability ends—upon the relinquishment of the concession—marks the beginning of the local authorities' responsibility for land-use planning.
The total cost of the work carried out by Charbonnages de France to secure and rehabilitate mining sites will amount to approximately €1.2 billion (in 2003 euros).
In 2012, UNESCO designated a significant body of movable, immovable, and cultural heritage. One way to showcase this heritage is to continue the scientific study of the elements that comprise it—including the archives. Scientists in the region could still make this a specialty—a field of expertise already in demand elsewhere in the world (Figure 12).

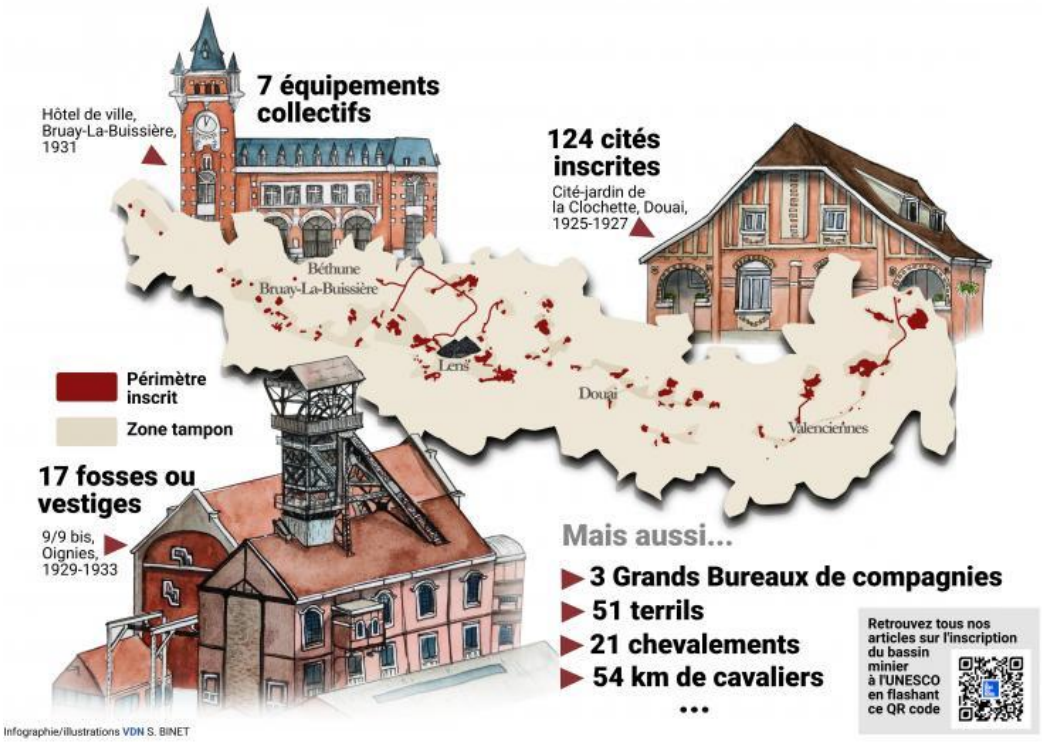


Figure 12. Nord-Pas-Calais caol basin designated by the UNESCO a significant body of movable, immovable, and cultural heritage

5 CONCLUSION

France mined coal and lignite seams for several centuries in different basins, with operations ceasing in 2004. The final mining panel reached depths exceeding 1,250 meters. Mining operators, Charbonnage de France (CdF), faced extremely difficult mining conditions, particularly regarding ground pressure phenomena such as severe deformation observed in the main roadways, rock bursts, and zones of influence due the extraction of several seams. Ineris, as mining expert, supported CdF and mining authorities to minimize the mining consequences. Ineris worked alongside Charbonnages de France to improve operating conditions, suggested new development, carrying out laboratory and in-site tests, elaborating recommendations and operational guidelines. The adopted methodologies developed by Ineris for improved the behaviour and control the strata responses, with support of Charbonnages de France, based on three main pillars: in-situ observations; design of panels and support system based on geological and geotechnical assessment (including stress measurements, destressing over stress zones) and continuous monitoring); and 3D numerical modeling to adjust operational planning according to geotechnical data. Ineris accompanied CdF to prepare the closer phase: identification of post-mining hazards, proposed mitigation solution and strategies, etc. Today, post-mining hazards are monitored, and some sites have been designated as UNESCO World Heritage sites. In this paper Ineris shared experiences and lessons learned over years.

6 REFERENCES

Al Heib M. 2012. International Numerical and Geophysical Tools Applied for the Prediction of Mine Induced Seismicity in French Coalmines. Journal of Geosciences, 2012, 3, 834-846 http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.324084.

Al Heib M., Piguet J-P, Noirel J.F., Josien J-P., ALinkov L.M. 1996. La planification des travaux miniers assistée par des modèles prévisionnels des états de contraintes dans les massifs rocheux. 11. Colloque Franco-Polonais en Mécanique des Sols et des Roches, Sep 1996, Gdansk, Poland

Raffoux J-F., Pentel R. 2002. Gérer l'impact environnemental des exploitations de charbon : Une priorité récente, un problème durable. International Conference on Technology for Coal Mining / Preparation and Utilisation Result of the ECSC Coal Research Programme, Jun 2002, Luxembourg, Luxembourg. pp.100-114.

Senfaute G, Al Heib M., Josien J-P., and Noirel J-F. Detection and monitoring of high stress concentration zones induced by coal mining using numerical and microseismic methods, "Rockburst and Seismicity in Mines", Sandton, 17-20 September 2001.

Sylla M. Senfaute G. Al Heib M. Derrien Y. Josien J.P. 1999. Prevision du comportement des terrains sous l'influence des failles par méthodes numériques et micor-sismique. The 28 International Conference of the Safety in Mines Research Institutes.

COMBATING THE IMPACT OF SPONTANEOUS COMBUSTION IN AN OPENCAST COAL MINE

Kgomotso Mokone
University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa

Bekir Genc*
University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa

ABSTRACT Spontaneous combustion of coal (SPONCOM) continues to be a major operational, safety and environmental hazard in opencast pits affected by previous bord-and-pillar mining. This study used a quantitative and qualitative approach combining thermocouple and infrared temperature monitoring, production and safety records to investigate causes of SPONCOM and evaluate mitigation measures. Five practices namely highwall cladding, buffer blasting and levelling, water spraying, re-drilling and a foam treatment were assessed against temperature reduction, safety improvement, and operational persistence. Cladding effectiveness was constrained by unmined floor coal due to water ingress rather than application quality, while levelling and water spraying proved highly sensitive to scheduling and mining advance rates. Comparative analysis showed that foam treatment is the most robust intervention, delivering considerable temperature reductions and proved to be more effective than other practices.

• INTRODUCTION

SPONCOM occurs when coal reacts with oxygen, generating heat that builds until ignition. Particularly in opencasts, previously mined bord-and-pillar areas intensify this risk. Pressure changes in pillared coal accelerate oxidation and heat buildup. Visible signs include coal discoloration, smoke, radiation waves, venting, and open flames. These indicate active SPONCOM conditions. Ongoing SPONCOM leads to major operational, safety, and environmental difficulties (Pone et al., 2007; Vo Thanh et al., 2025). The combustion of coal inventory results in material losses. It releases hazardous gases such as methane and carbon monoxide, which present health risks to employees. Other consequences include equipment damage, compromised blasting safety due to premature ignition of explosives and production interruptions. Without a sustainable SPONCOM management strategy, these issues threaten work efficiency, safety and the lasting stability of the mining site.

To mitigate SPONCOM, several control practices are used, but their effectiveness has not been carefully measured under local conditions. There is limited data on how well these practices reduce temperatures, improve safety, or minimise production disruptions. Testing and monitoring the use of one-seven foam for burning or high-temperature coal has not been conducted on a large-scale production basis.

* *Bekir.Genc@wits.ac.za*

This research is conducted at a coal mine situated in South Africa. The mine operates as a surface coal mine utilising opencast strip mining. The sites contain both pillared coal from previous underground operations and virgin coal. This research aims to evaluate the impact of SPONCOM on mining operations, and to assess the effectiveness of both existing and alternative mitigation strategies. By monitoring temperature variations and operational parameters, the study intends to provide practical recommendations to improve the management of SPONCOM, enhance drilling and blasting safety, and support more stable, efficient production.

• LITERATURE REVIEW

Coal remains one of the most widely used fossil fuels globally, underpinning electricity generation, fuel provision, and metallurgical processes such as steel production, despite growing debates over sustainability and climate change (International Energy Agency, 2025). In South Africa, coal mining supports national electricity generation and provides substantial rural employment (Mamabolo, 2025). In South Africa, both underground methods (bord-and-pillar mining and stooping) and open-cast strip mining are employed, with surface operations often returning to extract pillars left behind underground to maximise resource recovery (Snyman & Botha, 1993).

A critical hazard in coal mining is SPONCOM, arising from the interaction of heat, fuel, and oxygen. When coal is exposed to oxygen at low temperatures, heat is generated faster than it can dissipate by convection or conduction, causing the coal to self-heat (Genc et al., 2018; Onifade & Genc, 2020). Mining-induced rock disturbance increases pressure on remaining rock and exposes it to air, with air leakage supplying the oxygen that drives the reaction (Liu et al., 2025). Stenzel (2023) identifies five stages in this process:

- Latent Stage: Temperature rise due to oxidation;
- Heat Accumulation Stage: Chemical absorption and oxidation heat accumulate;
- Evaporation Stage: Internal moisture begins to evaporate;
- Active Stage: Between 100°C to 115°C, heat drives an active temperature rise rather than evaporation; and
- Hypoxic Stage: Ignition point reached around 170°C.

At the molecular level, oxygen adheres to coal surfaces below 30°C to 50°C, chemical bonding dominates at 50°C to 120°C forming unstable peroxy complexes, and these decompose rapidly at the self-heating temperature (SHT), ~70°C, releasing heat and gases including CO, CO_2, and water vapour; combustion accelerates sharply above ~150°C (Pone et al., 2007). Gases such as C_2H_4 and C_2H_6 serve as indicators for monitoring the combustion stage (Liu et al., 2025).

Both intrinsic and extrinsic factors influence SPONCOM liability. Intrinsic seam factors include moisture, volatile matter, ash and mineral matter content, coal rank,

sulphur content, particle size and surface area, porosity, maceral type, thermal conductivity, pyrite content, and geological factors such as seam thickness, gradient, depth, friability, and faulting. Extrinsic mining factors include pillar and roof stability, mining rate, ventilation, mining method, and abandoned workings, while environmental factors include air pressure, humidity, wind, oxygen concentration, and sunlight exposure (Onifade & Genc, 2018). This complex interaction complicates estimation and management of SPONCOM in surface mining (Onifade & Genc, 2020).

Coal can hold over 20% moisture by weight, and as it dries, expanding cracks and pore spaces increase oxygen penetration and self-heating risk (Pone et al., 2007). Two competing processes, heat-removing evaporation and heat-releasing water vapour adsorption compete depending on humidity, coal rank, and heating stage. Whether coal reaches SHT before stabilising depends on coal-gas reaction behaviour, gas diffusion, and heat dissipation rate. Liu et al. (2025) estimate roughly 8.12 kg of water at 25°C is needed to absorb the heat from burning 1 kg of coal, underscoring that prevention is far more cost-effective than extinguishment.

Several techniques exist for assessing SPONCOM liability, including crossing point temperature (XPT), differential thermal analysis (DTA), differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), the R70 index, wet oxidation potential (WOP), and the Wits-Ehac and Wits-CT indices. However, no single method has achieved universal acceptance (Onifade & Genc, 2020). Statistical analysis shows no single property independently predicts liability; rather, volatile matter, ash, carbon, hydrogen, nitrogen, and sulphur correlate with liability indices, with inertinite macerals (fusinite, inertodetrinite) showing stronger relationships than vitrinite or liptinite (Onifade & Genc, 2018, 2020). Coal shales in spoil heaps and highwalls also manifest significant SPONCOM potential (Onifade et al., 2020).

Prevention and control techniques include excavation, flooding and quenching, bulk filling, surface sealing, inert gas injection, chemical treatment, and burnout control (Onifade & Genc, 2020). Liu et al. (2025) propose a five-step framework of detection, direct extinguishment, sealing and containment, inert gas or foam injection, and pressure adjustment. Detection combines indirect radon-gas grid mapping with direct borehole temperature and CO monitoring. For smaller fires, sodium silicate gels and compound muds are used for sealing and cooling. Polymer-modified gels, such as konjac glucomannan with expandable graphite, and gel-stabilised foams (xanthan gum, guar gum, crosslinking agents) outperform conventional systems: Plastogel achieved CO below 10 ppm and treated-area temperatures of 27°C to 29°C, while XG/GG/HPAM gel foam achieved a 74.48% inhibition rate at 100°C, 43.63 points above conventional foam (Aklotsoe et al., 2025).

Inert gas injection (nitrogen and carbon dioxide) is widely used for its affordability, with sealing plus inert gas injection increasing effectiveness by raising pressure and reducing air leakage; optimal nitrogen injection depth, greater volume, and lower injection temperature further improve suppression (Aklotsoe et al., 2025). Chemical

inhibitors including lignin-based hydrogels, polyacrylamide/silica aerogel composites, and sustained-release microcapsule foams, passivate reactive coal surfaces and reduce CO, CO_2, and CH_4 emissions, with one microcapsule inhibitor achieving an 83.8% inhibition rate. However, a gap remains between laboratory and field-scale performance (Aklotsoe et al., 2025). As a final measure, positive-pressure ventilation, maintaining static pressure ~50 Pa above the fire zone is used only where methane accumulation, explosion risk, and roof collapse are unlikely and evacuation plans exist (Liu et al., 2025).

Although the literature provides comprehensive knowledge of SPONCOM's chemical, mineralogical, and mechanistic foundations, as well as a range of laboratory-validated prevention techniques, a substantial gap remains between this knowledge and its deployment in continuously operating, open-pit bord-and-pillar environments. Most research on chemical inhibitors, gel foams, and inert gas injection has been developed and validated primarily at laboratory or controlled-trial scale (Aklotsoe et al., 2025; Liu et al., 2025), with few studies evaluating these interventions under the operational demands of active mining pits, where equipment scheduling, production deadlines, and dragline movement constrain the feasibility and timing of mitigation practices. This study conducts field tests to address this gap.

• RESEARCH METHODS

This research uses an exploratory and applied design to examine SPONCOM in the pit, combining direct observation, instrumental monitoring, and records analysis. The quantitative component uses thermocouples and infrared sensors to monitor drilled holes for hot holes without visible external signs of combustion, alongside statistical analysis of production, blasting, and safety records. The qualitative component draws on field observation to capture frontline knowledge not evident in quantitative data. This design reflects the double nature of SPONCOM as both a measurable physical process and an operational, human safety issue.

A controlled section-based experiment with baseline measurements is used to compare treated and untreated areas across five established mitigation practices (Phillips et al., 2011); levelling of the blast profile and compaction, highwall cladding, buffer blasting, sealing of exposed drilled holes, and water spraying. A one-seven foam intervention is also tested on a matched set of hot holes against untreated controls, supported by a time study assessing its effectiveness. Each intervention is assessed against three indicators; temperature reduction, safety improvement, and operational persistence. Quantitative data are analysed statistically for correlations with combustion events, and field notes are thematically coded; both strands are cross-validated with each other and with the literature review to strengthen the reliability of conclusions.

The incorporation of baseline measurements, controlled pit sections, and cross-validation between quantitative and qualitative data augments the reliability. This methodology lays a firm foundation for data collection, analysis, and interpretation,

supporting the development of practical, evidence-based outcome for SPONCOM mitigation at the mining site and similar bord-and-pillar operations.

- **RESEARCH DATA**

The study collected both quantitative and qualitative data concurrently to support the mixed-methods design described above. Quantitative data primarily include temperature readings from thermocouples and infrared sensors inserted into drilled holes throughout the pit. These readings were recorded continuously to monitor heat trends and to identify hot holes and blocks that do not exhibit visible signs of SPONCOM. Baseline measurements were taken before each mitigation practice and at defined intervals during and after implementation, alongside production, drilling and blasting schedules, plant efficiency figures, and safety incident reports to correlate combustion events with operational disturbances and safety outcomes. In the one-seven foam experiment, data on temperature decline rate, cooling time and blasting delays were collected from matched treated and untreated hot holes during December 2025.

Qualitative data were gathered through field notes from site visits and a review of peer-reviewed literature, technical reports, and regulatory guidelines. Data was organised by pit section (treated versus untreated), intervention type, and time, with a consistent thematic coding scheme supporting cross-validation across sources. Sampling was purposive throughout; hot holes and pit sections were selected to isolate each mitigation method's effects, foam treatment and control holes were matched for comparability. Key limitations include possible confounding between concurrent operational changes and interventions, constrained foam-experiment sample sizes and measurement uncertainty from sensor placement and calibration.

- **ANALYSIS AND OBSERVATION**

A field study is conducted to observe the current practices the mine uses to prevent and control the impact SPONCOM has on production. The study concentrates on the persistence and impact of practices. These are then compared to identify the most effective practice.

5.1 One Seven Foam

The one-seven foam is a fire-extinguishing foam concentrate that is intended for use on Class A fires involving solid combustible material. The product is an aqueous mixture of a surfactant, a solvent, and additives.

An experiment was then conducted on hot holes to test the ability of a chemical reactant to intervene with the latent stage of SPONCOM onwards, reducing the temperature of the hot holes to 50°C or below to ensure safe blasting practices. The foam is dispensed using a water bowser truck, transformed to integrate the foam. It is equipped with a water cannon and a 5m pipe. The truck carries 15,000 liters of water and 1,000 liters

of foam concentrate. The foam truck was deployed to hot blocks with temperatures of 50°C and above. The foam was tested on the inter-burden and filler holes.

• ***Inter-Burden Treatment***

A hot inter-burden block is recognised through drilled wirelines throughout the block, used for strata control reports before drilling the block for blasting. Two breakthrough holes were selected for treatment as their initial temperatures went above 200°C. Treatment of the wirelines took place for two days prior to the block being drilled for production. Figure 1 illustrates the temperature decrease of the wirelines until they were sealed.

Date	Hole ID	Temp (°C)	Time
10-12-25	W-A02 BB	317	N/A
11-12-25		190	08:43
		FOAM IN	09:13
		FOAM OUT	09:22
		FOAM IN	10:00
		91.8	10:30
		96.1	11:03
		FOAM IN	12:00
		91.5	13:00
		80.0	13:40
	W-A03 BB	216	N/A
		FOAM IN	09:22
		FOAM OUT	10:00
		142	11:08
		150	12:00
		165	13:00

Figure 1: Timekeeping template

The temperatures observed within the treated wireline radius are shown in Table 1 and Table 2. The temperatures indicate that the treated area remained under 60°C, with a few outliers. This shows significant results as the aimed temperature is 50°C for blasting. Only 9 out of 25 of the holes stayed above the target temperature.

Table 1. A-to-B line hole temperatures (°C) affected by wireline treatment

Hole ID	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	**A7**	**A8**	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**
Day 1	48	39	48	46	40	42	49	48	61	59	40	49	37	63	57
Day 2	50	38	52	46	42	45	53	48	57	61	42	51	41	66	59
Day 3	46	46	55	46	43	53	55	48	57	70	47	56	43	70	62
Day 5	41	45	54	46	39	50	50	45	57	67	48	55	46	65	61
Day 6	39	54	52	46	36	49	48	44	61	66	46	50	40	63	52

Table 2: C-to-D line hole temperatures (°C) affected by wireline treatment

Hole ID	C1	C2	C3	C4	C5	C6	D1	D2	D3	D4
Day 1	60	55	37	40	88	55	47	41	47	54
Day 2	54	50	39	39	87	60	45	43	44	57
Day 3	53	50	49	39	87	67	56	44	44	60
Day 5	54	47	36	38	88	52	50	45	45	51
Day 6	58	52	38	39	77	48	47	43	46	47

The study then used two drilled rows in the out-of-radius area to treat and compared them to two untreated rows, not in proximity to the treatment. Temperature observations indicated in Tables 3 and 4 show that the untreated holes continued to increase in temperature. In contrast, most were sealed (indicated by the asterisk) and re-drilled to reduce the temperatures over the six days. The treated holes showed a fluctuation between increased and decreased temperatures after treatment. However, compared to the holes drilled after the treatment to the wirelines, there is an obvious difference that a temperature below 50°C can be achieved.

Table 3: Table 1. A-to-B line hole temperatures (°C) used for in-hole treatment

Hole ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Day 1	65	83	86	100	76	80	82	82	95	78	89	86	92	95
Day 2	66	85	86	65	77	75	84	80	94	70	76	73	88	90
Day 3	70	85	88	68	86	99	92	91	93	76	78	72	89	90
Day 5	86	94	92	76	84	97	90	89	86	88	94	85	84	89
Day 6	67	77	91	75	79	79	92	84	91	87	96	80	90	90

Table 4: I-to-J line untreated hole temperatures (°C) used as control

Hole ID	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	J1	J2	J3	J4	J5
Day 1	77	100	143*	149*	161*	191*	175*	87	173*	100	103	193*
Day 2	101	102	106	103	103	98	105	86	101	101	106	105
Day 3	110	102	105	103	121*	121*	110	98	90	126*	125*	102
Day 5	90	97	98	103	90	87	112	98	91	90	96	103
Day 6	86	77	90	103	87	86	130	100	77	85	94	105

*Indication of sealed hole for re-drilling

The inter-burden results indicate that gradient plays a meaningful role in treatment effectiveness. Temperature data (Tables 1 and 2) from the treated holes showed that the declining gradient of the inter-burden section gives an advantage in effectively cooling an area and keeping temperatures below 60°C. An unexpected pattern emerged: nine out of 25 holes that increased in temperature were consistently

associated with pillar holes. This anomaly suggests that pillar holes may retain heat differently from the surrounding material, possibly due to differences in coal density, structural confinement, or oxygen exposure, and warrants closer investigation in future trials.

• ***Filler Treatment***

The filler block, categorised as extremely hot with temperatures above 120°C, is used to investigate the effectiveness of re-drilling compared to foam treatment. After 52 failed attempts at re-drilling, the treatment showed a higher chance of reducing the temperature of the filler holes. Because filler holes have already been blasted, cracks are present; making re-drilling to reduce temperatures challenging. After treatments, a comparable pattern to the inter-burden results was observed, with heat concentrating in the centre of the block and around cracked sections, again coinciding with centre pillar holes. Figure 2 represents the temperature changes. Despite this concentration of residual heat, the treatment achieved an overall reduction in temperature across 87% of the filler holes, reduced to below 120°C, indicating that the foam treatment was largely effective even under extreme initial temperature conditions, with the center pillar holes representing the primary exception to this trend.

Figure 2. Temperature reduction visuals from initial (A) to final (C) reading

5.2 Comparative Analysis for SPONCOM Mitigation

An analysis was conducted to determine which operational variables most strongly influence the effectiveness of each SPONCOM mitigation practice and to establish which practice offers the most effective performance relative to the resources it consumes. This analysis considers the extent to which small variations in key parameters such as timing and rate translate into meaningful changes in mitigation outcomes.

Regarding buffer blasting and levelling, the practice was found to be highly sensitive to timing. Given that an active SPONCOM reaction was observed to develop within a single day of an unlevelled heave, while levelling itself required between one and three days to complete at a rate of 250 BCM per hour, the outcome of this practice is highly sensitive to even small delays in dozer deployment. This sensitivity is compounded by the divergence between dozer availability, which remained consistently high and actual utilisation, which remained low. This gap indicates that levelling outcomes are considerably more sensitive to scheduling and allocation decisions than to equipment

availability itself, meaning that modest improvements in utilisation efficiency would be likely to produce a disproportionately significant reduction in the window during which unlevelled heaves remain exposed to SPONCOM risk.

Water spraying was found to be equally sensitive to the rate of mining advance rather than to the water sprayer's design or positioning. Given that the sprayer's intended repositioning cycle allows for only a 15-metre advance every two days, while actual mining advance ranged between 41 and 61 metres over the same period, this practice's effectiveness is highly sensitive to mining pace, with the protective barrier falling further behind as advance rates increase. Because the shortfall between intended and actual advance widened when floor coal was left unmined, the sensitivity of this practice to floor coal management is compounded, indicating that water spraying effectiveness cannot be assessed in isolation from broader mining sequencing decisions.

Cladding, by contrast, demonstrated sensitivity primarily to the prior removal of floor coal and to the presence of water, rather than to the cladding process itself. Because cladding can only be applied once floor coal has been mined, and because water was identified as an influencing factor in floor coal extraction, the effectiveness of this practice is highly dependent on upstream mining decisions. This positions cladding as a practice whose sensitivity lies largely outside the direct control of the cladding operation itself, in contrast to levelling and water spraying, whose sensitivities are tied more directly to equipment scheduling and mining rate.

The results from the inter-burden and filler treatments reveal three distinct sensitivities affecting the efficiencies of foam-based cooling compared to conventional re-drilling. First, treatment effectiveness is highly sensitive to the timing of intervention. Early application is critical; delayed treatment allows the affected radius to expand and temperatures to rise beyond the range that foam sealing can efficiently control. Second, the effectiveness of re-drilling is sensitive to the physical state of the hole. In cases where filler holes had already been blasted and exhibited extensive cracking, re-drilling did not reliably reduce temperatures. In one case, foam treatment achieved an 87% reduction of temperature to below 120°C, regardless of hole condition. This finding indicates that re-drilling is highly dependent on hole integrity, whereas foam treatment remains effective across varying conditions. Third, a consistent positional sensitivity was observed in both inter-burden and filler blocks; holes situated on a declining gradient cooled more effectively and remained within the target temperature range. In contrast, temperature increases were concentrated around center pillar holes. This positional effect, where heat retention correlates with pillar location rather than treatment method, suggests that structural or material factors such as coal density, confinement, or oxygen exposure may limit treatment effectiveness. This represents the primary exception to otherwise strong treatment outcomes in both blocks.

Table 5. Comparative analysis summary

Mitigation Practice	Primary Sensitivity Driver	Robustness Ranking
Buffer blasting & levelling	Timing and dozer deployment delay	Vulnerable due to being highly sensitive to day-to-day scheduling
Water spraying	Rate of mining advance	Vulnerable due to being highly sensitivity to day-to-day scheduling
Cladding	Upstream floor coal removal and water presence	Effective once implemented, but not directly controllable through operational adjustment
Foam treatment	Timing of intervention	Most robust due to consistent, controllable outcomes across varying conditions
Re-drilling	Physical state of the hole	Less robust because the effectiveness depends on the drilled hole integrity

When compared across all four practices as shown in Table 5, levelling and water spraying are the most vulnerable to disruption as their effectiveness is acutely sensitive to timing and scheduling factors that fluctuate on a day-to-day basis within an active mining environment. Cladding, despite being effective once implemented, is sensitive to factors upstream of the practice itself and is therefore less directly controllable through operational adjustment alone. Foam treatment, by comparison, demonstrated the most consistent and controllable outcome with decreasing temperatures, identifying it as the most robust of the four practices evaluated within varying field conditions. It is important to highlight that while the foam treatment is evidently the favourable practice, costs should be considered of all the practices to evaluate their feasibility to the operation.

Collectively, these findings build on the study's earlier answers to the research questions by rooting them in measurable data. The timing mismatch between SPONCOM onset and levelling completion, the shortfall in water sprayer advancement relative to mining rate, and the demonstrated empirical support for the practical methods identified as necessary to minimise SPONCOM within the pit environment. Similarly, the temperature data associated with the foam trial offer concrete measures of mitigation success, addressing the study's research question regarding how such success can be evaluated in terms of temperature reduction and operational persistence.

• CONCLUSION

This study investigated SPONCOM within the bord-and-pillar workings, its causes, its effects on drilling and blasting operations, and the available mitigation practices. Among the mitigation practices evaluated, cladding, levelling, and foam treatment were identified as key practices requiring further refinement, with wireline temperature monitoring particularly below 60°C, serving as a practical indicator of mitigation success. Water spraying was also found to lag against the mining progress, advancing only 15m over two days.

Based on the results, cladding should be prioritised through backloading with a backhoe to clear a 15-metre area, dozer availability should be prioritised for levelling, and the face water sprayer should advance at a rate consistent with mining progress. A comprehensive testing procedure should be developed for foam application via wirelines, with temperatures above 50°C reported for immediate treatment and monitoring integrated into the foam trial process.

The main limitation of the study was the continuous nature of mining operations which restricted trials to a maximum of five days due to dragline scheduling, preventing assessment of prolonged effectiveness for measures such as foam treatment. Future research needs to secure longer, uninterrupted observation periods through closer coordination with mine planning, and further examination of the extended efficacy of foam beyond this window.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work presented here is part of a BSc Project Report in the School of Mining Engineering at the University of the Witwatersrand.

• REFERENCES

Aklotsoe, Y.K., Anim, E.A., Amartey, E.N.L. 2025. Technologies for mitigating spontaneous combustion: a systematic review and meta-analysis, International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT), 13, 8, pp. 883-905.

Genc, B., Onifade M., Cook, A. 2018. Spontaneous combustion risk on South African coalfields: Part 2, Proceedings of the 21st International Coal Congress of Turkey 'ICCET', 11-13 April, 2018, Zonguldak, Türkiye.

International Energy Agency, 2025. Global Coal Consumption 2000-2026, https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-coal-consumption-2000-2026 (April, 2026).

Liu, Q., Zhu, C., Liu, T., Ma, D., Lai, Y. 2025. Experimental study of temperature and gas concentration evolution law during coal spontaneous combustion in the goaf, Scientific Reports, 15, Article 12688.

Mamabolo, D. 2025. A Just Energy Transition: Challenges and Benefits in the South African Coal Mining Industry, Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.

Onifade, M., Genc, B. 2020. A review of research on spontaneous combustion of coal, International Journal of Mining Science and Technology, 30, 3, pp. 303-311.

Onifade, M., Genc, B., Bada, S. 2020. Spontaneous combustion liability between coal seams: A thermogravimetric study, International Journal of Mining Science and Technology, 30, 5, pp. 691-698.

Onifade, M., Genc, B. 2018. Spontaneous combustion liability of coal and coal-shale: a review of prediction methods, International Journal of Coal Science & Technology, 6, 3, pp. 243-256.

Phillips, H., Uludag, S., Chabedi, K. 2011. Prevention and control of spontaneous combustion: Best practice guidelines for surface coal mines in South Africa, Coaltech Research Association, https://coaltech.co.za/wp-content/uploads/2019/10/Prevention-and-control-of-spontaneous-combustion-Best-Practice-Guidelines-for-Surface-Coal-Mines-2011.pdf.

Pone, D., Hein, K., Finkleman, R., Annegarn, H., Stracher, G., Blake, D., Schroeder, P., McCormack, J. 2007. The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa, International Journal of Coal Geology, 72, 2, pp. 124-140.

Snyman, C.P., Botha, W.J. 1993. Coal in South Africa, Journal of African Earth Sciences (and the Middle East), 16, 1/2, pp. 171-180.

Stenzel, G.J. 2023. Best Practice Guidelines for the Management of Spontaneous Combustion in Opencast Coal Mines, Coaltech Research Organisation, South Africa.

Vo Thanh, H., Zhang, H., Xu, Y., Wang, B., Wang, Y., Dai, Z. 2025. Advancing risk prediction of coal spontaneous combustion: Intelligent gas index models for accurate self-ignition temperature forecasting towards low-carbon energy systems, Process Safety and Environmental Protection, 202, pp. 107676.

CHALLENGES AND PERSPECTIVES OF LIGNITE UTILIZATION IN KOSOVO: BALANCING ENERGY SECURITY, ADVANCED CONVERSION TECHNOLOGIES AND SUSTAINABLE TRANSITION

Kemajl Zeqiri
Faculty of Geosciences, University "Isa Boletini" in Mitrovica, Kosovo, Department of Mining Engineering

ABSTRACT Kosovo possesses approximately 12.5 billion tonnes of lignite reserves, making it one of Europe's most significant indigenous energy resources. Lignite currently provides the dominant share of domestic electricity generation and remains fundamental to national energy security. However, the sector faces significant challenges associated with ageing infrastructure, environmental protection requirements and the transition towards low-carbon energy systems. This paper reviews the present role of lignite in Kosovo and evaluates future opportunities for its sustainable utilization. Particular attention is given to advanced technologies including coal gasification, briquetting, beneficiation and circular utilization of coal combustion residues. The paper further discusses the importance of maintaining secure domestic electricity generation during the energy transition while progressively introducing cleaner technologies and higher-value coal utilization pathways. Finally, an Integrated Sustainable Lignite Utilization Framework is proposed as a strategic approach for balancing energy security, technological innovation and environmental sustainability.

Keywords: Lignite; Energy Security; Coal Gasification; Coal Briquetting; Circular Economy; Kosovo.

1. INTRODUCTION

Coal has been the driving force of industrial development for more than two centuries and continues to play an important role in the global energy system. Despite the increasing deployment of renewable energy technologies and international commitments to reduce greenhouse gas emissions, coal remains one of the world's most important primary energy resources. According to the International Energy Agency (IEA), coal continues to account for approximately one-third of global electricity generation and remains indispensable for many countries because of its affordability, availability and reliability (IEA, 2024).

The transition towards carbon-neutral energy systems represents one of the greatest challenges facing the global energy sector. While renewable energy sources are expanding rapidly, their intermittent nature requires reliable dispatchable generation capable of ensuring electricity system stability. Consequently, many countries continue to rely on domestic fossil fuel resources to maintain energy security while

simultaneously investing in cleaner technologies and progressively reducing carbon emissions (IEA, 2021).
The geopolitical developments following the Russia–Ukraine war have further demonstrated the strategic importance of domestic energy resources. The disruption of natural gas supplies, increased electricity prices and uncertainty in international energy markets forced several European countries to temporarily increase coal-fired electricity generation to ensure secure electricity supply. These developments illustrated that energy transition policies must remain sufficiently flexible to respond to unexpected geopolitical and economic circumstances. Therefore, energy security has become an equally important objective alongside environmental protection and climate neutrality (IEA, 2023).

Kosovo represents one of the most coal-dependent countries in Europe. The country possesses approximately 12.5 billion tonnes of lignite reserves, mainly concentrated within the Kosovo Basin, while smaller deposits occur in the Dukagjini and Drenica basins (Zeqiri.K, et.al, 2024). These resources have supported electricity generation for more than six decades and currently provide more than 90% of domestic electricity production (KEK, 2024). Consequently, lignite represents not only the country's principal energy resource but also one of the most important factors contributing to national energy independence.

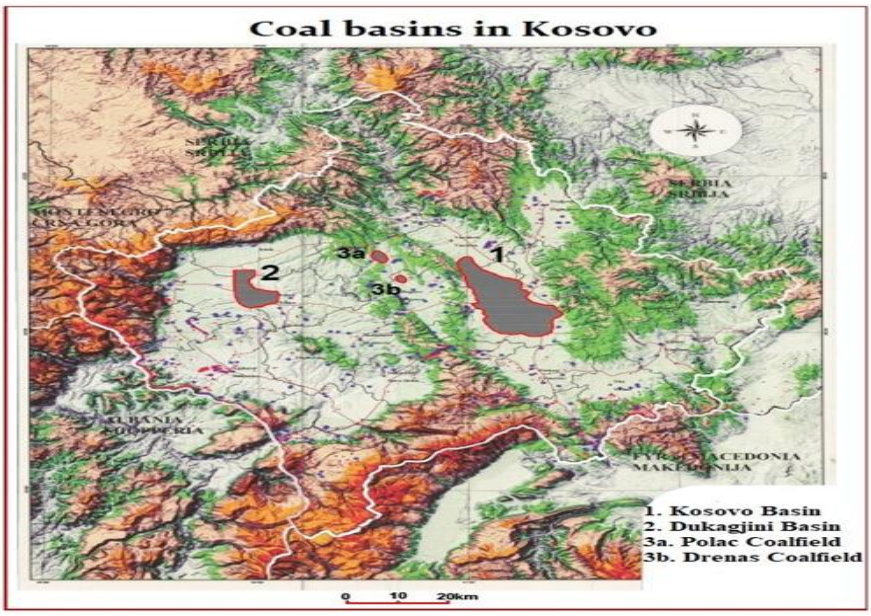


Figure 1. Kosovo's coal basins

Beyond electricity generation, lignite exploitation has significantly contributed to Kosovo's socio-economic development. Previous studies by the author demonstrated that investments originally undertaken to support thermal power generation have produced substantial indirect benefits through the construction of strategic infrastructure, particularly the Batllava and Ujmani (Gazivoda) reservoirs, which today represent critical sources of drinking water, irrigation, industrial supply and regional

development (Zeqiri, 2022). These examples illustrate that the overall contribution of lignite development extends considerably beyond electricity production alone.

Nevertheless, Kosovo's lignite sector faces multiple challenges. Existing thermal power plants are approaching the end of their operational lifetime, environmental regulations are becoming increasingly stringent, greenhouse gas emissions require substantial mitigation measures, and significant investments are necessary for modernization of both mining operations and electricity generation facilities (European Commission, 2021). Simultaneously, Kosovo's future integration into the European energy market will require gradual alignment with European climate and environmental objectives (Government of the Republic of Kosovo, 2022).

These challenges should not necessarily be interpreted as an argument for abandoning lignite, but rather as an opportunity to transform its utilization. While reliable electricity generation must remain the primary function of Kosovo's lignite sector during the transition period, substantial opportunities exist for introducing advanced utilization technologies capable of increasing resource efficiency, reducing environmental impacts and creating higher-value products. Technologies such as coal gasification, coal beneficiation, coal briquetting, coal-to-chemicals processes, carbon capture, utilization and storage (CCUS), and the recovery of valuable materials from coal combustion residues represent promising pathways towards more sustainable utilization of domestic lignite resources (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2022; Zhou et al., 2021).

The objective of this paper is to evaluate the current challenges facing Kosovo's lignite sector and to assess future technological perspectives for its sustainable development. Particular emphasis is placed on balancing three strategic priorities: energy security, technological modernization, and environmental sustainability. Based on the analysis, the paper proposes an Integrated Sustainable Lignite Utilization Framework (ISLUF) that combines reliable electricity generation with advanced conversion technologies, circular economy principles and progressive decarbonisation measures. Rather than considering these objectives as mutually exclusive, the proposed framework demonstrates that they can complement each other in supporting Kosovo's long-term energy transition while preserving the strategic value of its indigenous lignite resources.

2. KOSOVO'S LIGNITE RESOURCES AND CURRENT UTILIZATION

Kosovo possesses one of the largest lignite reserves in Europe, estimated at approximately 12.5 billion tonnes, making lignite the country's most important indigenous energy resource. The reserves are primarily distributed within three sedimentary basins: the Kosovo Basin, Dukagjini Basin, and Drenica Basin, with the Kosovo Basin containing more than 80% of the economically exploitable reserves. Favourable geological conditions, including thick lignite seams, relatively shallow

overburden, and a low stripping ratio, have enabled economically viable surface mining for more than six decades (Thomas, 2021).

Lignite from the Kosovo Basin is classified as a low-rank coal characterized by relatively high moisture content (40–50%), ash content ranging from 14 to 18%, sulphur content generally below 1%, and an average lower heating value of approximately 7.5–8.0 MJ kg^{-1} (Speight, 2019). Although these characteristics limit its economic transportation over long distances, they make lignite particularly suitable for mine-mouth electricity generation through large-scale thermal power plants, even though it was demand to by the coal from North Macedonia. Consequently, the development of Kosovo's mining and energy sectors has historically been closely interconnected.

Commercial lignite exploitation began during the second half of the twentieth century and has continuously supplied the thermal power plants Kosovo A and Kosovo B. Today, mining activities are concentrated in the Sibovc South-West mining field, which has progressively replaced the exhausted Mirash and Bardh open pits. Continuous surface mining is performed using bucket-wheel excavators, conveyor belts, and spreader systems, allowing relatively low production costs and stable fuel supply to the power plants (Zeqiri, 2022).

According to the KEK Annual Report 2024, lignite remains the dominant domestic fuel for electricity generation and continues to represent the foundation of Kosovo's electricity sector (KEK, 2024). Despite periodic maintenance and operational challenges associated with ageing generating units, domestic lignite continues to supply the overwhelming majority of electricity demand, reducing dependence on imported electricity and contributing significantly to national energy security.

The strategic importance of Kosovo's lignite became particularly evident during the European energy crisis following the Russia agression to Ukraine. Electricity price volatility and disruptions in regional energy markets highlighted the vulnerability of countries heavily dependent on imported energy. In contrast, Kosovo's extensive domestic lignite resources provided an important degree of energy independence, although operational limitations within the existing generation fleet occasionally required electricity imports during periods of high demand or maintenance outages (World Bank, 2023).

Beyond electricity generation, lignite exploitation has significantly influenced Kosovo's industrial and socio-economic development. Mining activities have directly created employment opportunities and stimulated the development of transport infrastructure, mechanical engineering, equipment maintenance, and supporting industries. Furthermore, investments undertaken to secure water supplies for thermal power plants resulted in the construction of strategic reservoirs, particularly Batllava and Ujmani (Gazivoda), which today serve multiple purposes including drinking water supply, irrigation, industrial water supply, flood protection, fisheries, and recreation

(Zeqiri, 2022). These indirect benefits demonstrate that the contribution of lignite exploitation extends well beyond energy production and has become embedded within Kosovo's broader socio-economic development.

However, although the country's geological reserves are sufficient to ensure electricity generation for several decades, future utilization cannot rely exclusively on conventional combustion technologies. Existing generating units have exceeded their original design lifetime, while increasingly stringent environmental standards require substantial investments in modernization and emission reduction (European Commission, 2021). Consequently, future development of Kosovo's lignite sector should combine secure electricity generation with cleaner and more efficient technologies capable of increasing resource utilization, reducing environmental impacts, and generating higher-value products.

The transition towards sustainable lignite utilization should therefore be viewed as an evolutionary process rather than a complete replacement of coal. During the coming decades, lignite is expected to remain Kosovo's principal source of baseload electricity while progressively supporting advanced utilization technologies, including gasification, briquetting, beneficiation, and the production of industrial chemicals (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2022). Such an approach would strengthen national energy security while facilitating gradual alignment with European climate and environmental objectives.

3. CHALLENGES FACING KOSOVO'S LIGNITE SECTOR

Despite its strategic importance, Kosovo's lignite sector faces a number of interconnected technical, environmental, economic, and institutional challenges that will determine its future role in the national energy system. These challenges do not diminish the significance of lignite as an indigenous energy resource; rather, they highlight the need for modernization, technological innovation, and integrated resource management.

3.1 Ageing Power Generation Infrastructure

The most significant challenge is the ageing condition of the existing thermal power plants. Kosovo A, commissioned between 1962 and 1975, is among the oldest lignite-fired power plants still in operation in Europe. Although continuous maintenance and rehabilitation have enabled extended operation, the facility operates with relatively low thermal efficiency and requires substantial investments to comply with modern environmental standards (European Commission, 2021).
Kosovo B, commissioned in the early 1980s, remains considerably more efficient but also requires modernization to improve reliability, increase efficiency, and reduce emissions of particulate matter, sulphur dioxide (SO_2), nitrogen oxides (NO_x) and carbon dioxide (CO_2). Ensuring the long-term operational reliability of these facilities

is essential for maintaining secure electricity supply during Kosovo's energy transition (KEK, 2024).

3.2 Environmental Protection

Environmental performance represents one of the principal challenges for Kosovo's lignite sector. Surface mining inevitably alters landscapes, requires relocation of settlements and infrastructure, and disturbs large land areas. In addition, lignite combustion produces emissions of carbon dioxide (CO_2), sulphur dioxide (SO_2), nitrogen oxides (NO_x) and particulate matter, together with substantial quantities of fly ash and bottom ash (IPCC, 2023).

Although significant investments have already been made to improve electrostatic precipitators and reduce dust emissions, continued modernization is necessary to comply with progressively stricter environmental standards. Future investments should include improved flue gas treatment systems, continuous emission monitoring, optimized combustion control and progressive rehabilitation of mined areas (European Commission, 2021).

Environmental protection should not be considered solely as a regulatory obligation but as an integral component of sustainable mining development. Progressive rehabilitation, biodiversity restoration and long-term environmental monitoring must become standard elements of mining operations (Mills et al., 2024).

3.3 Energy Security

The European energy crisis following the Russia–Ukraine war clearly demonstrated the importance of secure domestic electricity generation. Interruptions in natural gas supplies, fluctuations in electricity prices and increased dependence on imported electricity exposed the vulnerability of many European countries (IEA, 2023).

For Kosovo, where domestic lignite represents the principal indigenous energy resource, maintaining reliable electricity production remains a strategic national priority. Renewable energy sources, particularly solar and wind, will continue expanding; however, their intermittent nature requires reliable dispatchable generation capable of maintaining grid stability. Consequently, lignite-fired electricity generation is expected to remain an essential component of Kosovo's energy system during the transition period (Kopač et al., 2023).

Rather than considering energy security and decarbonisation as conflicting objectives, future energy policy should integrate both through gradual modernization of existing power plants, diversification of energy sources and introduction of cleaner lignite utilization technologies (IEA, 2021).

3.4 Economic Challenges

The lignite sector contributes significantly to Kosovo's economy through electricity production, employment and industrial development. Nevertheless, future investments required for mine expansion, environmental protection and power plant modernization are substantial (World Bank, 2023).

Additional challenges include increasing carbon pricing mechanisms, competition from renewable energy technologies and the necessity to improve overall energy efficiency. Consequently, increasing the value obtained from each tonne of lignite becomes increasingly important.

Diversification of lignite utilization beyond electricity production offers significant opportunities for increasing economic value while reducing dependence on a single end-use application (Zeqiri, 2022).

4. ADVANCED LIGNITE UTILIZATION TECHNOLOGIES

4.1 General Perspective

Historically, Kosovo's lignite has been utilized almost exclusively for electricity generation. While this approach has successfully supported national energy security, modern technological developments demonstrate that lignite can also serve as an important raw material for producing gaseous fuels, industrial chemicals, hydrogen and value-added solid fuels (Speight, 2019; Thomas, 2021).

Instead of considering lignite solely as a combustion fuel, future development should adopt an integrated resource utilization concept in which electricity generation remains the primary function while additional technologies maximize resource efficiency and economic value.

The principal advanced technologies applicable to Kosovo include coal beneficiation; coal drying; coal briquetting; coal gasification; coal-to-chemicals technologies; hydrogen production; and utilization of coal combustion residues within a circular economy (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2022; Zhou et al., 2021). These technologies should complement rather than replace conventional electricity generation.

4.2 Coal Beneficiation

Coal beneficiation represents the first step towards improving lignite quality before utilization. Beneficiation includes crushing, screening, classification, dewatering and removal of mineral impurities to reduce ash content and improve combustion characteristics (Speight, 2019).

Although Kosovo lignite contains relatively low sulphur concentrations, its high moisture content significantly reduces thermal efficiency. Therefore, mechanical and thermal upgrading technologies can substantially improve fuel quality before combustion or conversion (Zhang et al., 2022).

Potential benefits include increased calorific value; reduced transportation costs; improved combustion efficiency; lower specific emissions; and improved suitability for briquetting and gasification. Beneficiation should therefore be considered an important preparatory stage for future advanced utilization technologies.

4.3 Coal Briquetting

Coal briquetting is one of the most practical technologies for improving the utilization of Kosovo's lignite, particularly considering its high moisture content and the large quantities of fine coal generated during mining and handling operations. Briquetting consists of compressing fine coal particles under high pressure, with or without binders, into uniformly shaped solid fuel products possessing improved mechanical strength, reduced dust generation and enhanced combustion characteristics (Zhang et al., 2022).

The production process generally includes crushing, drying, screening, mixing with appropriate binders (where necessary), high-pressure compaction and curing. Modern briquetting technologies enable the production of high-density fuel suitable for domestic heating, industrial boilers, district heating systems and selected industrial applications (Speight, 2019).

For Kosovo, briquetting presents several advantages: utilization of coal fines that are otherwise underutilized; reduction of dust emissions during storage and transport; improved fuel handling and transportation; increased energy density compared with raw lignite; and opportunities for decentralized heating systems and small industrial consumers (Zhang et al., 2022).

4.4 Coal Gasification

Coal gasification represents one of the most promising advanced technologies for Kosovo's lignite, offering a pathway to produce synthetic gas (syngas), hydrogen, ammonia, methanol and other industrial chemicals directly from domestic coal resources. Gasification involves the partial oxidation of coal at elevated temperatures in the presence of a controlled amount of oxygen and steam, producing a combustible gas mixture rich in carbon monoxide and hydrogen (Liu et al., 2021; Zhou et al., 2021).

Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) technology combines gasification with a combined cycle power plant, achieving significantly higher thermal efficiencies than conventional pulverized coal combustion while simultaneously facilitating carbon capture. The suitability of Kosovo's lignite for gasification requires detailed

characterization of its chemical composition, reactivity, ash properties and thermal behaviour (Liu et al., 2021).

Coal gasification offers several strategic advantages for Kosovo: diversification of coal utilization beyond electricity; production of hydrogen for industrial applications and potential future energy storage; manufacture of synthetic fuels and chemicals; reduced local air pollutant emissions compared with direct combustion; and compatibility with carbon capture, utilization and storage technologies (Liu et al., 2021; Zhou et al., 2021; UNECE, 2021).

4.5 Circular Economy and Utilization of Coal Combustion Residues

Coal combustion residues, primarily fly ash and bottom ash, represent significant material streams generated by Kosovo's thermal power plants. Rather than treating these residues as wastes requiring disposal, circular economy principles advocate their recovery and utilization as secondary raw materials in construction, mining and industrial applications (World Coal Association, 2023).

Fly ash possesses pozzolanic properties that make it suitable for partial replacement of Portland cement in concrete production, road base construction, and the manufacture of geopolymer materials. Bottom ash can be utilized as aggregate in road construction, mine backfilling and engineered fill applications. International studies have also demonstrated that coal ash may contain economically significant concentrations of critical and strategic elements, including rare earth elements (REEs), gallium, germanium, scandium and other valuable metals (European Commission, 2023).

Although comprehensive characterization of Kosovo's coal combustion residues is still limited, systematic investigation of their mineralogical and geochemical composition represents an important research priority. Recovery of valuable secondary raw materials from ash deposits could simultaneously reduce environmental liabilities and create new economic opportunities (World Coal Institute, 2019). The application of circular economy principles should therefore become an integral component of Kosovo's long-term lignite strategy, linking mining, energy production, waste management and advanced materials recovery into a unified resource management framework.

5. INTEGRATED SUSTAINABLE LIGNITE UTILIZATION FRAMEWORK FOR KOSOVO

The future of Kosovo's lignite sector should not be evaluated through the traditional dichotomy of maintaining or abandoning coal. Instead, a gradual transition is required in which lignite continues to provide reliable electricity generation while progressively supporting cleaner technologies, higher-value products, and sustainable resource management. Based on the analysis presented in this paper, an Integrated Sustainable Lignite Utilization Framework (ISLUF) is proposed as a strategic model for balancing

energy security, economic development and environmental sustainability (Zeqiri, 2024).

The framework is built upon five complementary strategic pillars. Pillar I – Secure Electricity Generation: Reliable electricity production should remain the primary role of Kosovo's lignite resources during the energy transition. Recent geopolitical events, particularly the European energy crisis following the Russia–Ukraine war, demonstrated that countries possessing indigenous energy resources are more resilient to supply disruptions and market volatility. Therefore, maintaining domestic baseload generation remains essential until renewable energy sources, energy storage technologies and transmission infrastructure are sufficiently developed to ensure long-term system reliability. Future development should focus on modernization of existing generating units; improvement of thermal efficiency; reduction of specific emissions; digitalization of plant operation; and strengthening operational reliability. Rather than replacing electricity generation, advanced technologies should complement it while maintaining national energy security.

Pillar II – Advanced Conversion Technologies: In parallel with conventional electricity generation, Kosovo should progressively investigate advanced lignite conversion technologies capable of increasing the economic value of domestic coal resources. Priority technologies include coal gasification; Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC); hydrogen production; methanol production; ammonia synthesis; and coal-derived industrial gases. Initially, these technologies should be introduced through laboratory investigations, pilot-scale demonstration projects and international research cooperation before considering commercial implementation.

Pillar III – Coal Upgrading and Value Addition: Improving lignite quality before utilization represents one of the most practical opportunities for increasing resource efficiency. Coal beneficiation, drying and briquetting can significantly improve fuel properties while expanding potential applications beyond conventional thermal power generation. Future investments should encourage utilization of coal fines; production of commercial briquettes; reduction of transportation losses; higher combustion efficiency; and development of industrial fuel markets. Such measures would increase economic value while reducing unnecessary waste generation.

Pillar IV – Circular Economy and Secondary Resource Recovery: Coal combustion residues should be regarded as secondary mineral resources rather than waste materials. Fly ash and bottom ash possess considerable potential for utilization in cement production, road construction, mine backfilling, geopolymers and advanced construction materials. Furthermore, international experience indicates that coal ash may represent an important secondary source of critical raw materials, including rare earth elements and strategic metals (European Commission, 2023; World Coal Association, 2023

Pillar V – Sustainable Transition and Human Capacity Development: Successful modernization of Kosovo's lignite sector depends not only on technological innovation but also on institutional capacity, scientific research and workforce development. Universities, research institutions, government agencies and industry should cooperate in developing multidisciplinary research programmes focused on sustainable mining, advanced coal technologies, environmental protection and energy transition. The transition should be gradual, evidence-based and socially responsible, ensuring that technological development supports employment, regional economic stability and long-term national energy security. The proposed ISLUF demonstrates that electricity generation, cleaner technologies and renewable energy should not be considered competing alternatives but complementary components of a diversified national energy strategy.

6. RECOMMENDATIONS FOR SUSTAINABLE LIGNITE DEVELOPMENT

Based on the analysis presented in this study, the following recommendations are proposed:

Maintain lignite as Kosovo's principal source of secure baseload electricity during the energy transition while progressively increasing the share of renewable energy sources.

Replace Kosovo A with a new high-efficiency lignite-fired generating unit based on Best Available Techniques (BAT), while modernizing Kosovo B to improve efficiency, operational flexibility, reliability and environmental performance. Develop a national research programme on advanced lignite utilization, focusing on coal gasification, coal beneficiation, briquetting and coal-to-chemicals technologies.

Prepare a national feasibility study for coal gasification, including technical, economic and environmental assessments of pilot-scale implementation Promote industrial utilization of fly ash and bottom ash through partnerships between the energy, construction and mining sectors.

Investigate the recovery of critical raw materials from coal combustion residues to support circular economy initiatives and improve resource efficiency.

Strengthen cooperation between KEK, universities and international research institutions to accelerate technology transfer and innovation. Integrate lignite modernization within Kosovo's long-term energy strategy, ensuring compatibility with European climate objectives while preserving national energy security.

Expand scientific research on post-mining land use and environmental rehabilitation to maximize the long-term socio-economic benefits of mining.

Establish a national roadmap for sustainable lignite utilization (2025–2050), integrating electricity generation, advanced conversion technologies, circular economy and renewable energy development.

7. CONCLUSIONS

Kosovo possesses one of Europe's largest lignite reserves, which have provided the foundation for national electricity generation, energy security and socio-economic development for more than six decades. Although the global transition towards low-carbon energy systems and increasingly stringent environmental requirements present significant challenges, lignite is expected to remain Kosovo's primary source of reliable baseload electricity during the transition period. The European energy crisis following the Russia–Ukraine war further highlighted the strategic importance of domestic energy resources in ensuring energy security and reducing dependence on imported electricity. Consequently, the modernization of mining operations and thermal power generation should be accompanied by improved environmental performance, higher operational efficiency and the gradual introduction of cleaner coal technologies.

This paper demonstrates that the sustainable future of Kosovo's lignite sector depends on integrating conventional electricity generation with advanced utilization technologies, including coal beneficiation, briquetting, gasification, coal-to-chemicals processes and the circular utilization of coal combustion residues. The proposed Integrated Sustainable Lignite Utilization Framework (ISLUF) provides a strategic approach for balancing energy security, technological innovation and environmental sustainability while supporting the gradual transition toward a more diversified energy system. Future policy should prioritize replacing Kosovo A with a new high-efficiency lignite-fired generating unit based on Best Available Techniques (BAT), modernizing Kosovo B, strengthening research and innovation, and promoting circular economy principles to maximize the long-term economic and strategic value of Kosovo's indigenous lignite resources.

REFERENCES

BP. 2024. Statistical Review of World Energy 2024. Energy Institute, London, UK.

European Commission. 2023. Critical Raw Materials Act. Brussels, Belgium.

European Commission. 2021. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Joint Research Centre, Seville, Spain.

Government of the Republic of Kosovo. 2022. Energy Strategy of the Republic of Kosovo 2022–2031. Ministry of Economy, Prishtina.

Government of the Republic of Kosovo. 2018. Kosovo Mining Strategy 2012–2025. Ministry of Economic Development, Prishtina.

International Energy Agency (IEA). 2023. Electricity Market Report 2023. Paris, France.

International Energy Agency (IEA). 2024. Coal 2024: Analysis and Forecast to 2027. Paris, France.

International Energy Agency (IEA). 2021. Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris, France.

International Panel on Climate Change (IPCC). 2023. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Geneva, Switzerland.
KEK J.S.C. 2024. Annual Report 2024. Kosovo Energy Corporation, Obiliq, Kosovo.
Kopač, J., & others. 2023. Energy transition in the Western Balkans: Challenges and opportunities. Energy Policy, 177, 113553.
Liu, H., et al. 2021. Coal gasification technologies and their environmental performance: A review. Fuel Processing Technology, 214, 106708.
Mills, S. J., et al. 2024. Sustainable mine transition and resource efficiency in the mining sector. Mining, 4(3), Article 34. https://doi.org/10.3390/mining4030034
Mills, S., et al. 2024. Sustainable mining and resource management under the energy transition. Mining, 4(3), 34.
Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2024. Sustainable approaches in coal mining and post-mining management. 39(3). https://doi.org/10.17794/rgn.2024.3.4
Speight, J. G. 2019. The Chemistry and Technology of Coal (4th ed.). CRC Press.
Thomas, L. 2021. Coal Geology (3rd ed.). Wiley-Blackwell.
United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). 2021. Best Practice Guidance for Effective Methane Recovery and Use from Coal Mines. Geneva.
World Bank. 2023. Western Balkans Regular Economic Report. Washington, DC.
World Coal Association. 2023. The Role of Coal in Sustainable Development. London.
World Coal Institute. 2019. The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal. London.
Zeqiri, K. 2022. An Introduction on Assessment of the Lignite Price: Case Study of Kosovo's Lignite. PODEK-POVEKS. Ohrid, North Maceodnia.
Zeqiri, K. 2022. The indirect impact of mining on social well-being: Case study of Kosovo's surface coal mines. Rumeli 1ST International Scientific Research Conference on Sustainable Engineering and Technology (ISRCSET’22) Istanbul.
Zeqiri, K., Dogan, T., Möllerherm. S., Kasmaeeyazdi. S., 2024. Examining Sustainable Transition and Post-Mining Management in the Ruhr Region and the Prospective Evaluation of Knowledge Transfer to Kosovo’s Mining Sector
Zhang, Y., Li, X., & Wang, J. 2022. Advances in lignite upgrading and briquetting technologies: A review. Fuel, 318, 123620.
Zhou, Z., et al. 2021. Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC): Current status and future perspectives. Energy Conversion and Management, 245, 114612.
Zeqir.K, Uka.,U, Dmbov R., Ferati. B., 2024. A Global Sustainable Perspective on Surface Coal Mining Technology - Analytical Insight from Kosovo’s Context - Rudarsko-geološko-naftni zbornik(The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)UDC: 622.2DOI: 10.17794/rgn.2024.3.4