

ÇOK DİSİPLİNLİ JEO-SİSTEMLER:

MİKRO MİNERAL
KARAKTERİZASYONUNDAN
MAKRO MADENCİLİK VE
KAYNAK DEĞERLENDİRMESİNE

Editör:

Doç. Dr. Özer Ören



BİDGE Yayınları

**Çok Disiplinli Geo-sistemler: Mikro Mineral
Karakterizasyonundan Makro Madencilik ve Kaynak
Değerlendirmesine**

Editör: Doç. Dr. Özer ÖREN

ISBN: 978-625-5474-22-3

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-10-14

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Yer ve kaynak mühendisliği disiplinleri, günümüzde geleneksel yöntemlerin ötesine geçerek veri odaklı, analitik ve dijital bir yapıya bürünmüştür. Yeraltı kaynaklarının aranması, karakterizasyonu ve üretimi süreçlerinde karşılaşılan karmaşık problemler, artık fiziksel modellemelerden yapay zekâ destekli analizlere kadar uzanan geniş bir teknolojik yelpazede çözüme kavuşturulmaktadır.

Elinizdeki bu eser, maden mühendisliği ve jeoloji temelindeki bu köklü dönüşümü, spesifik araştırma alanları üzerinden okuyucuya sunmayı hedeflemektedir. Kitabımız, yeraltı yapılarının makro ölçekli mekanik davranışlarından, mikro ölçekteki petrografik süreçlere kadar uzanan çok disiplinli bir perspektif ile kurgulanmıştır.

Kitabın ilk bölümünde, petrografik ince kesit görüntülerinin dijital analizleri ve yapay zekâ algoritmaları ile mineral tanımlama yöntemleri tartışılarak, mikroskobik incelemelerde otonom ve akıllı sistemlerin geleceğine dair önemli ipuçları verilmektedir. İkinci bölümde, kaya kütlelerindeki süreksizlik ölçümlerinin geleneksel yöntemlerden İHA ve LiDAR tabanlı dijital teknolojilere evrimi incelenmekte; saha çalışmalarındaki dijitalleşmenin boyutları gözler önüne serilmektedir.

Üçüncü bölümde, göçertmeli uzunayak madenciliğinde tavan kömürü çekim mekanizması fiziksel modelleme yaklaşımıyla ele alınarak, karmaşık yeraltı üretim dinamiklerine ışık

tutulmaktadır. Son bölümde ise magmatik petrolojide nadir toprak elementlerinin kullanımına odaklanılarak, magma kaynağı ve evrim süreçlerinin yorumlanması derinlemesine bir jeokimyasal vizyon sunulmaktadır.

Bu eserin, maden ve jeoloji bilimleri başta olmak üzere, uygulamalı ve analitik sistemler üzerine çalışan akademisyenler, mühendisler ve geleceğin meslektaşları olan değerli öğrencilerimiz için ufuk açıcı bir referans kaynak olmasını temenni ediyorum. Kitabın ortaya çıkmasında emeği geçen, kıymetli bilgi ve birikimlerini büyük bir özveriyle paylaşan tüm meslektaşlarıma yürekten teşekkür ederim.

Doç. Dr. Özer Ören

Kütahya, Ekim 2026

İÇİNDEKİLER

Petrografik İnce Kesit Görüntülerinde Dijital Görüntü Analizi ve Yapay Zekâ ile Mineral Tanımlama	1
--	---

RECEP UĞUR ACAR

Süreksizlik Ölçümlerinin Geleneksel Yöntemlerden İha ve Lidar Tabanlı Dijital Dönüşüme Evrimi	22
--	----

MEHMET ÖZDEMİR

Göçertmeli Uzunayak Madenciliğinde Tavan Kömürü Çekim Mekanizması: Fiziksel Modelleme Yaklaşımı	68
--	----

ARİF ÇELİK

Nadir Toprak Elementlerinin Magmatik Petrolojide Kullanımı: Magma Kaynağı ve Evrim Süreçlerinin Yorumlanması	102
--	-----

RECEP UĞUR ACAR

BÖLÜM 1

PETROGRAFIK İNCE KESİT GÖRÜNTÜLERİNDE DİJİTAL GÖRÜNTÜ ANALİZİ VE YAPAY ZEKÂ İLE MİNERAL TANIMLAMA

RECEP UĞUR ACAR¹

Giriş

Petrografik ince kesit incelemeleri, kayaçların mineralojik bileşiminin, dokusal özelliklerinin ve oluşum süreçlerinin anlaşılmasında temel yöntemlerden biridir. Düzlem polarize ışık (PPL) ve çapraz polarize ışık (XPL) altında gözlenen renk, pleokroizma, rölyef, dilinim, ikizlenme, girişim rengi, sönme ve izotropi gibi optik özellikler mineral tanımlamasının ana dayanağını oluşturur. Bununla birlikte klasik ince kesit tanımlaması uzmanlık gerektirir, zaman alır ve özellikle çok sayıda örneğin değerlendirilmesi gerektiğinde gözlemciye bağlı farklılıklar ortaya çıkabilir (Nesse, 2012; Deer vd., 2013).

Sayısal kameralar ve bilgisayarlı gözü yöntemleri, ince kesitlerin otomatik veya yarı otomatik analizine olanak vermektedir. Renk ve doku gibi elle tasarlanmış özniteliklerle çalışan yöntemleri,

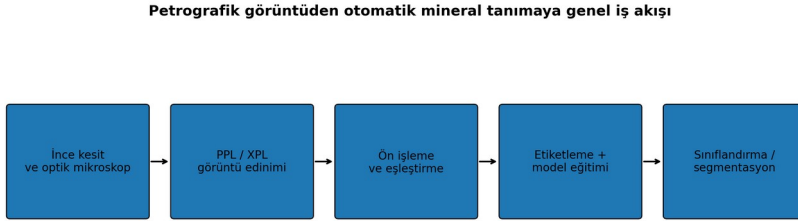
¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-0420-6263

evrişimli sinir ağları ve piksel ya da nesne düzeyinde segmentasyon yaklaşımları izlemiştir (Aligholi vd., 2015; Rubo vd., 2019; Koeshidayatullah vd., 2020). Bu yöntemlerin görevi önceden tanımlanmalıdır: mineral sınıfını tahmin etmek, tane sınırlarını çizmek, modal bileşimi ölçmek ve karbonat dokusunu tanımlamak farklı etiketlere ve doğrulama ölçütlerine ihtiyaç duyar. Ortak amaç, tekrarlı ölçümleri hızlandıran ve uzman yorumunu destekleyen nicel çıktılar üretmektir.

Açık veri kaynakları, yöntemlerin yeniden uygulanmasını ve karşılaştırılmasını kolaylaştırmaktadır. LITHOS, eşlenik PPL-XPL görüntülerinde tane sınıflandırması; MUMDMC2025 ise seçilmiş minerallerin farklı tabla açılarındaki görünümüleri için veri sağlamaktadır (Chacon vd., 2025; Amer vd., 2025). BGS ve USGS arşivlerinde de ince kesit görüntüleri bulunur (British Geological Survey [BGS], t.y.; Parks vd., 2025). Ancak görüntü sayısının artması bağımsız jeolojik örnek sayısının arttığı anlamına gelmez. Cihaz, kesit hazırlama ve mineral birlikteliği farklılıkları nedeniyle bir veri kaynağındaki başarının başka bir kaynağa taşınması ayrıca sınanmalıdır.

Bu bölüm, petrografik ince kesit görüntülerinde dijital görüntü analizi ve yapay zekânın temel kavramlarını açıklamaktadır. Optik mineralojik özelliklerin sayısal temsili, klasik görüntü işleme, sınıflandırma, segmentasyon ve sonuçların petrografik değerlendirilmesi ele alınmaktadır. Literatürdeki uygulamalar ve açık veri kaynakları, yöntemlerin kullanım alanlarını ve sınırlarını göstermek amacıyla sunulmaktadır. Yapay zekâ çıktılarının anlamı, kullanılan görüntülerin niteliği ve uzman denetimiyle birlikte değerlendirilmektedir.

Şekil 1. Petrografik görüntüden otomatik mineral tanımaya genel iş akışı



Uzman petrograf doğrulaması tüm aşamalarda kalite kontrolün temelidir.

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Petrografik Görüntülerde Mineral Tanımanın Optik Temeli

Düzlem polarize ışık (PPL) görüntüleri

PPL görüntülerinde mineral tanımlamasında en yararlı özellikler doğal renk, pleokroizma, rölyef, dilinim, tane biçimi, alterasyon dokusu ve opaklıktır. Renkli minerallerde biyotit ve hornblend gibi fazlar RGB veya CIELab renk uzaylarında belirgin kümeler oluşturabilir. Buna karşılık kuvars, feldispatlar ve birçok renksiz silikatın PPL görünümü birbirine benzeyebilir. Bu nedenle yalnızca PPL kullanan bir algoritma, bazı mineral çiftlerinde renk ve dokudan yeterli ayırt edici bilgi çıkaramayabilir (Aligholi vd., 2015).

Sayısal bir PPL renk görüntüsü, genellikle kırmızı, yeşil ve mavi kanallardan oluşan bir matris olarak temsil edilir. Klasik görüntü işlemede renk histogramı, yerel ikili örüntü (LBP), kenar yoğunluğu ve biçim ölçüleri gibi öznitelikler hesaplanabilir. Derin öğrenme modelleri ise görüntüden ayırt edici temsilleri eğitim sırasında öğrenir. Öğrenilen örüntüler mineralin optik özellikleriyle ilişkili olabileceği gibi aydınlatma veya kameraya özgü ipuçlarını da

içerebilir. Bu nedenle sayısal temsilin petrografik anlamı ayrıca değerlendirilmelidir (Aligholi vd., 2015; He vd., 2016).

Çapraz polarize ışık (XPL) görüntüleri

XPL altında girişim renkleri, ikizlenme ve sönme davranışı mineral ayrımını destekler. Plajiyoklazdaki polisintetik ikizlenme, mikroklindeki kafes ikizlenmesi ve kuvarsın çoğunlukla birinci sıra girişim renkleri yararlı özelliklerdir; ancak bunlar her tane ve yönelimde aynı açıklıkta görülmez. Girişim rengi, etkin çift kırılma ile kesit kalınlığının ortak sonucudur. Anizotrop bir mineral sönme konumunda ya da optik eksene yakın kesildiğinde karanlık görünebilir; tek bir karanlık XPL görüntüsü izotropiyi kanıtlamaz. İzotropi, opaklık ve anizotrop sönme PPL görünümü ve tabla dönüşüyle birlikte değerlendirilmelidir (Nesse, 2012; Deer vd., 2013).

Aynı görüş alanının PPL ve XPL görüntülerini birlikte kullanmak tamamlayıcı optik bilgiyi değerlendirmeyi sağlar. Bunun için aynı objektif, odak, piksel ölçeği ve tabla açısı korunmalı; polarizasyon değişiminden doğan kayma ya da dönüş kontrol edilmelidir. Tabla hareket ettirilmeden görüntü alınması iyi bir başlangıçtır, fakat piksel düzeyinde eşleşmeyi tek başına garanti etmez. Segmentasyonda görüntüler gerektiğinde geometrik olarak kaydedilmeli ve eşleşme tane sınırları üzerinden doğrulanmalıdır.

Tablo 1. Optik mineral özelliklerinin sayısal görüntü analizindeki karşılıkları.

Optik özellik	PPL/XPL	Sayısal karşılık	Yapay zekâ açısından kullanım
Doğal renk / pleokroizma	PPL	RGB, HSV, CIELab dağılımları	Renk tabanlı ayırım ve veri artırma kontrolü

Optik özellik	PPL/XPL	Sayısal karşılık	Yapay zekâ açısından kullanım
Rölyef ve tane sınırı	PPL	Kenar, kontrast, gradyan	Tane tespiti ve segmentasyon
Dilininim	PPL/XPL	Yönlü çizgisel örüntüler	Dilininim açıları ve yönleriyle destekleyici ayırım
Girişim rengi	XPL	Renk histogramı ve çok ölçekli özellikler	Kalınlık ve yönelimle birlikte değerlendirme
İkizlenme	XPL	Tekrarlayan çizgisel / kafes dokusu	Feldspat gruplarında güçlü ayırt edici özellik
Sönme / izotropi	XPL	Parlaklık değişimi veya çok açılı görüntü dizisi	Tek görüntü yeterli değildir; PPL ve açılı dizisiyle denetim
Tane biçimi / doku	PPL/XPL	Alan, çevre, eksen oranı, CNN özellikleri	Mineral ve litolojik bağlamın birlikte değerlendirilmesi

Kaynak: Nesse (2012) ve Aligholi vd. (2015) temel alınarak yazar tarafından derlenmiştir.

Dijital Görüntü İşleme ve Klasik Makine Öğrenmesi

Görüntü edinimi sırasında numune ve ince kesit kimliği, görüş alanı, objektif, piksel boyutu, tabla açısı, polarizasyon, kesit kalınlığı, pozlama ve beyaz ayarı kaydedilmelidir. Özgün görüntüler saklanmalı; odak kaybı, aşırı pozlama, çizik, hava kabarcığı ve homojen olmayan aydınlatma kalite kontrolünde işaretlenmelidir. Kırpma, yeniden boyutlandırma, geometrik kayıt ve sınırlı yoğunluk düzeltilmesi uygulanabilir. Aşırı yumuşatma dilininim ve tane sınırlarını; kuvvetli renk dönüşümleri ise tanısallık optik bilgiyi bozabilir. Kullanılan ön işlemler ve parametreleri raporlanmalıdır (Aligholi vd., 2015; Rubo vd., 2019).

Etiketleme protokolü mineral tanısının hangi optik kanıtlara dayandığını belirtmelidir. Tek bir PPL veya XPL görünümünde ayırt edilemeyen fazlar zorla tür düzeyinde etiketlenmemelidir. İkinci uzman incelemesi, farklı tabla açıları veya kimyasal analiz, özellikle altere ve ince taneli bölgelerde referans tanıyı güçlendirebilir (Nesse, 2012; Rubo vd., 2019).

Klasik yaklaşımda renk istatistikleri, doku, kenar ve biçim ölçüleri araştırmacı tarafından seçilir. Aligholi vd. (2015), CIELab renk uzayı ve yerel ikili örüntü (LBP) yaklaşımını optik özellikleri temsil etmek için kullanmıştır. Rubo vd. (2019), karbonat ince kesitlerinde mineral ve gözenek ayrımı için yapay sinir ağları ile rastgele orman modellerini değerlendirmiştir. Çalışmanın stratigrafik bağlam ve bağımsız kimyasal karşılaştırmalara ilişkin bulguları, iç doğrulama başarısının tek başına tüm kayalara genellenemeyeceğini göstermektedir. Destek vektör makineleri, k-en yakın komşu ve rastgele orman gibi yöntemler, derin ağlarla aynı veri bölünmesinde karşılaştırılabilecek başlangıç modelleridir.

Eşikleme ve morfolojik işlemler belirgin kontrastlı fazlarda kullanılabilir; temas eden taneler işaretçi denetimli watershed veya bölge büyümeyle ayrılabilir. Ancak bir sınırın bulunması mineral türünün tanındığı anlamına gelmez. Tane içindeki çatlaklar ve ikizlenme çizgileri yanlış bölünmeye, benzer renkli komşu taneler ise birleşmeye yol açabilir. Bu nedenle sınır kalitesi ve sınıf doğruluğu ayrı değerlendirilmelidir. Elle tasarlanmış öznitelikler görece az veriyle çalışabilir; başarıları görüntü koşullarına ve sınıfların optik ayrılabilirliğine bağlıdır.

Dijital nokta sayımı ve ölçüm, otomatik modeller için karşılaştırılabilir bir uzman referansı oluşturmakta kullanılabilir. İnce kesit görüntüleri için geliştirilmiş JMicroVision; dijital nokta sayımı, nesne ölçümü, görüntü anotasyonu ve geometrik düzeltme araçları sunmaktadır (Roduit, t.y.). Bu araçların kullanılması mineral tanısını kendiliğinden doğrulamaz. Noktaların seçimi, incelenen

alan, piksel ölçeği ve uzman sınıflandırma kuralları kayıt altına alınmalı; modelin alan oranları aynı alan üzerinde elde edilen referansla karşılaştırılmalıdır.

Derin Öğrenme ile Mineral Tanıma

Görüntü sınıflandırma

Görüntü sınıflandırmada kırılmış bir tane veya seçilmiş bölgeye sınıf etiketi atanır. Evrişimli sinir ağları (CNN), eğitim sırasında renk, doku ve biçim örüntülerini öğrenir. ResNet artık bağlantılarla derin ağların eğitimini kolaylaştırır (He vd., 2016). Vision Transformer (ViT), görüntü yamaları arasındaki ilişkileri dikkat mekanizmasıyla işler; Swin Transformer ise hiyerarşik ve kaydırılmış pencere yapısı kullanır (Dosovitskiy vd., 2021; Liu vd., 2021). Bu mimariler genel bilgisayarlı görü yöntemleridir; özgün yayınlarındaki başarı değerleri petrografik başarı olarak kullanılamaz. Petrografik uygulamadaki uygunluk bağımsız verilerle ölçülmelidir.

Görüntü sınıflandırma, seçilmiş bir tane veya bölgeye sınıf etiketi verilmesini sağlar. Tüm görüş alanına tek bir mineral etiketi atanması, çok mineralli ince kesitlerin bileşimini açıklamak için yeterli değildir. Tek mineral tanesini içeren kırpmalar bu görevi daha belirgin hâle getirebilir; ancak sınıflandırma çıktısı tane sınırını veya modal mineral oranını doğrudan vermez.

Nesne tespiti ve nesne bazında segmentasyon

Nesne tespiti, bir tanenin konumunu sınırlayıcı kutu ve sınıf etiketiyle verir; kutu, gerçek tane sınırını temsil etmez. Nesne bazında segmentasyon (instance segmentation) ise her taneye ayrı maske üretir. Böylece aynı mineral sınıfındaki komşu taneler ayrılabilir ve kalibre edilmiş görüntülerde iki boyutlu alan, eşdeğer çap ve eksen oranı ölçülebilir. Koeshidayatullah vd. (2020), karbonat petrografik bileşenlerinin otomatik tanımlanmasında nesne tespitini

kullanmıştır. Koh vd. (2021), Mask R-CNN ve SOLOv2 yaklaşımlarını karşılaştırmıştır; bu örneğin cevher mineralleri ve yansıma özellikleri bağlamı, geçirgen ışıktaki çok mineralli PPL-XPL analizinden ayrılmalıdır.

Etiketleme maliyeti nesne bazında segmentasyonun önemli bir sınırlamasıdır. Sınırlayıcı kutu, tane merkezi veya eksen çizgisi, tam tane maskesiyle aynı denetimi sağlamaz. Yarı otomatik sınırlar uzman tarafından düzeltilmeli; ikizlenme, kapanım, alterasyon ve temas eden taneler için ortak anotasyon kuralları belirlenmelidir. Birbirine bağlı aynı sınıf piksellerini tek tane saymak güvenilir değildir. Ölçülen çaplar kesitteki iki boyutlu tane profillerine aittir; üç boyutlu kristal boyut dağılımı ek stereolojik değerlendirme gerektirir.

Semantik segmentasyon

Semantik segmentasyonda her piksele mineral veya faz sınıfı atanır; aynı sınıfa ait ayrı tanelerin kimliği korunmaz. U-Net ve DeepLabV3+ bu amaçla kullanılabilen mimarilerdir (Ronneberger vd., 2015; Chen vd., 2018). Saxena vd. (2021), kumtaşı ince kesitlerinde piksel düzeyinde petrografik sınıflandırma uygulamıştır. Buna karşılık yaygın YOLO segmentasyon çıktıları nesne maskeleridir; bunlar semantik sınıf haritasına dönüştürülebilse de görev tanımı ve çakışan maskelerin birleştirilmesi açıkça belirtilmelidir. Mineral haritasının güvenilirliği, sınırların yanı sıra sınıf etiketlerinin doğruluğuna da bağlıdır.

Belirli bir faza odaklanan uygulamalara örnek olarak Külekçi vd. (2025), ince kesit görüntülerinde kuvarsın segmentasyonu için PSPNet, U-Net, FPN ve LinkNet modellerini karşılaştırmıştır. Tek bir hedef mineralin segmentasyonu, çok sınıflı mineral haritalama ile aynı problem değildir. Bu nedenle çalışma, kuvars için görev odaklı bir uygulama olarak değerlendirilmelidir; bildirilen model

sıralaması başka kayaç birlikteliklerine veya bütün minerallere doğrudan aktarılmamalıdır.

Modal hesaplama için görüntünün kullanılabilir alanı tanımlanmalıdır. Cam, boşluk, gözenek, reçine, opak faz, kesit dışı alan ve belirsiz pikseller aynı kategoriye toplanmamalıdır. Alan oranı seçilmiş bir görünümün iki boyutlu bileşimini verir; kayaç bütünü için temsili görüş alanları veya tüm kesit analizi gerekir. Alan oranını hacim oranı olarak yorumlamak örneklemenin temsil gücüne ve stereolojik varsayımlara bağlıdır; kütle yüzdesi elde etmek için ayrıca faz yoğunlukları gerekir (Rubo vd., 2019; Koh vd., 2021).

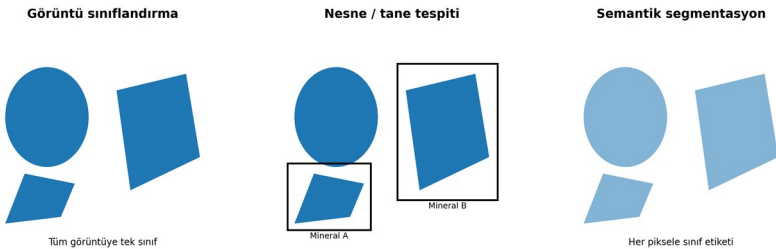
Kullanılabilir alan içindeki c sınıfının alan yüzdesi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$a_c = 100 \times \frac{N_c}{N}$$

Burada N_c , c sınıfına atanmış piksel sayısı; N, önceden tanımlanan kullanılabilir alanın toplam piksel sayısıdır. Gözenek veya belirsiz alan paydadan çıkarılıyorsa elde edilen değer bütün kesit yüzdesi değil, kalan tanımlı alan içindeki orandır. Hariç tutulan alan ve belirsiz piksel yüzdesi ayrıca verilmelidir.

Şekil 2. Petrografik yapay zekâ çalışmalarında sınıflandırma, nesne/tane tespiti ve semantik segmentasyonun kavramsal farkı

Petrografik yapay zekâ çalışmalarında üç temel görüntü analizi görevi



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

PPL-XPL veri birleştirme ve çoklu görüntü kullanımı

PPL ve XPL görüntüleri, aynı tane veya görüş alanına ait olduklarında tamamlayıcı bilgi sağlar. Kayıtlı RGB görüntüleri altı kanallı bir girdide birleştirmek veya her polarizasyon için ayrı kodlayıcı kullanmak olası yaklaşımlardır. Altı kanallı bir girdinin üç kanallı görüntülerle önceden eğitilmiş bir ağa verilmesi, giriş katmanının uyarlanması gerektirir. LITHOS çalışması, iki polarizasyonun ortak değerlendirilmesine yönelik bir örnek sunmaktadır (Chacon vd., 2025). Birleştirmenin katkısı, kullanılan veri ve görüntü eşleşmesinin niteliğine bağlıdır.

Çok açılı görüntüleme yönelime bağlı optik özellikleri örnekler. Pleokroizma PPL altında; sönme ve girişim rengi değişimleri XPL altında izlenir (Nesse, 2012). Sabit ışık koşullarında bir görüntüyü bilgisayarda döndürmek yalnızca geometrisini değiştirir; mikroskop tablasını döndürerek oluşan yeni renk ve sönme bilgisini üretmez. Döndürülerek alınan görüntülerde aynı tane izlenmeli ve aynı fiziksel tanenin bütün açıları aynı veri grubunda tutulmalıdır. Çok açılı veri toplamanın yararı, edinim ve kayıt maliyetiyle birlikte değerlendirilmelidir.

Tablo 2. İnce kesit analizinde yaygın yapay zekâ görevleri ve uygun çıktılar.

Görev	Tipik giriş	Çıktı	Avantaj	Temel sınırlama
Sınıflandırma	Kırılmış tane / görüntü	Tek sınıf etiketi	Etiketleme kolay, hızlı başlangıç	Modal oran ve tane sınırı vermez
Nesne tespiti	Tam görüş alanı	Kutu + sınıf	Taneleri sayabilir	Tane sınırı yaklaşık kalır
Nesne bazında segmentasyon	Tam görüş alanı	Her tane için maske	Tane boyutu ve şekli ölçülebilir	Yoğun etiketleme gerekir

Görev	Tipik giriş	Çıktı	Avantaj	Temel sınırlama
Semantik segmentasyon	Tam görüş alanı	Piksel sınıf haritası	Modal mineral oranı için uygundur	Aynı sınıftaki taneleri ayrı tutmaz
Çok-modlu füzyon	PPL + XPL / çok açılı XPL	Birleştirilmiş tahmin	Tamamlayıcı optik bilgiyi birlikte değerlendirir	Eşleştirilmiş veri ve daha karmaşık model gerekir

Kaynak: Ronneberger vd. (2015), Chen vd. (2018), Koeshidayatullah vd. (2020) ve Koh vd. (2021) temel alınarak yazar tarafından derlenmiştir.

Açık Veri Setleri ve Veri Kaynakları

Veri kalitesi, model seçiminden önce gelir. Anotasyon şemasında mineral türü veya grubu, kayaç parçası, fosil, matris ve gözenek gibi farklı düzeydeki kategoriler ayrılmalıdır. Özellikle hornblend ile bütün amfibol grubunu veya K-feldispat ile tüm feldispatları eşdeğer saymak yanlış sınıf eşleştirmesi üretir. Belirsiz taneler için uzman uzlaşması ve gerektiğinde kimyasal doğrulama kullanılmalı; çözülmeyen örnekler belirsiz olarak kaydedilmelidir. Görüntü düzeyinde etiket, piksel düzeyinde referans maske yerine geçmez.

LITHOS, eşlenik polarizasyon görüntülerinden elde edilen tane kırpmalarını ve uzman anotasyonlarını içeren bir açık veri kaynağıdır. Mineral sınıflarının yanında kayaç parçaları ve biyoklastik bileşenler de yer alır. Tane merkezi ve eksen çizgisi gibi geometrik anotasyonlar, tam piksel maskesiyle aynı bilgi değildir. Bu kaynak özellikle tane sınıflandırması ve PPL-XPL bilgilerinin birlikte değerlendirilmesi açısından bir literatür örneğidir (Chacon vd., 2025).

MUMDMC2025, biyotit, hornblend, plajiyoklaz, K-feldispat ve kuvarsın farklı tabla açılarındaki görünümünü konu alan bir görüntü veri yayınıdır (Amer vd., 2025). BGS BRITROCKS ve

USGS arşivleri de numune bilgileriyle birlikte petrografik görüntülere erişim sağlar (BGS, t.y.; Parks vd., 2025). Görüntü arşivi, sınıf etiketi taşıyan veri seti ve piksel maskeleriyle hazırlanmış segmentasyon veri seti birbirinden farklı kaynak türleridir. Bir koleksiyonun içeriği, erişilebilir sürümü ve anotasyon kapsamı incelenmeden aynı amaçlarla kullanılabileceği varsayılmamalıdır.

DeepCarbonate, karbonat ince kesit görüntülerini petrografik kategorilerle ilişkilendiren bir sınıflandırma veri kaynağıdır. Mineral türü ile doku, bileşen ve gözenek kategorileri farklı kavramsal düzeyleri temsil eder; bu etiketler genel mineral maskeleriyle eşdeğer değildir (Li vd., 2026). Açık veri kaynaklarının değerlendirilmesinde sınıf sözlüğü, görüntü edinim koşulları, numune bilgileri, sürüm ve yeniden kullanım lisansı dikkate alınmalıdır.

Model Eğitimi, Veri Bölme ve Performans Değerlendirmesi

Değerlendirme ölçütü göreve göre seçilmelidir. Sınıflandırmada doğrulukla birlikte sınıf başına kesinlik (precision), duyarlılık (recall), F1 ve karışıklık matrisi raporlanmalıdır. Makro F1, sınıf F1 değerlerinin eşit ağırlıklı ortalamasıdır; makro kesinlik ile makro duyarlılığın harmonik ortalaması değildir. Segmentasyonda sınıf bazlı kesişimin birleşime oranı (IoU) ve sınıflar üzerinden ortalama IoU (mIoU) uygundur. Nesne tespitinde ve nesne maskelerinde ortalama kesinlik (AP) ile mAP raporlanabilir; kutu ve maske ölçümleri ve kullanılan IoU eşikleri ayrı belirtilmelidir (scikit-learn geliştiricileri, t.y.; Koh vd., 2021).

Çok sınıflı değerlendirmede her c sınıfı diğer sınıflara karşı ele alınır. TP_c doğru pozitif, FP_c yanlış pozitif ve FN_c yanlış negatif örnek veya piksel sayısını ifade eder. Doğruluk, doğru tahmin sayısının değerlendirilen toplam örnek veya piksel sayısına oranıdır. Sınıf ölçütleri aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır (scikit-learn geliştiricileri, t.y.):

$$Accuracy = \frac{\text{doğru tahmin sayısı}}{\text{toplam örnek veya piksel sayısı}}$$

$$Precision_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c}$$

$$Recall_c = \frac{TP_c}{TP_c + FN_c}$$

$$F1_c = \frac{2 \times TP_c}{2 \times TP_c + FP_c + FN_c}$$

$$IoU_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c + FN_c}$$

$$mIoU = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C IoU_c$$

C, değerlendirmeye alınan sınıf sayısıdır. Makro F1 ve mIoU her sınıfa eşit ağırlık verir; baskın fazların sonucu belirlediği piksel doğruluğundan farklı bilgi taşır. Paydanın sıfır olduğu sınıflar, referansta bulunmayan fazlar ve arka planın ortalamaya dahil edilip edilmediği için kullanılan kural açıkça belirtilmelidir. Nesne AP değeri, piksel IoU veya görüntü doğruluğuyla aynı başarı ölçütü değildir.

Modal oran hedefinde sınıflandırma ölçütlerine ek olarak modelin ve uzman referansının alan yüzdeleri karşılaştırılmalıdır. Her mineral için yüzde puanı farkı, örnekler arasındaki sistematik fazla veya eksik tahmin ve sınır hataları verilmelidir. Piksel düzeyinde iyi sonuç, temsili olmayan birkaç görüş alanından kayaç

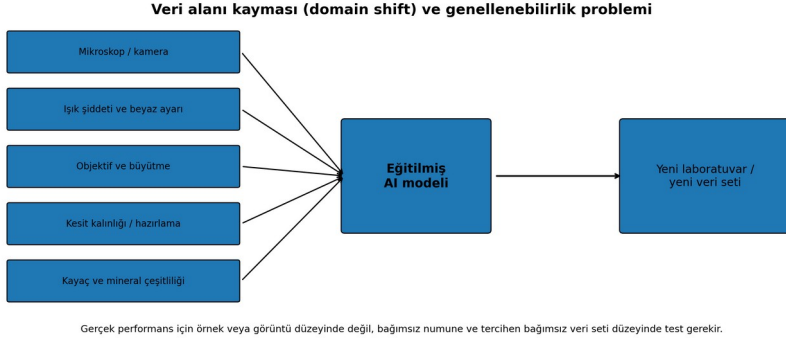
bütünü için doğru modal bileşim üretildiğini göstermez (Rubo vd., 2019).

Veri sızıntısını önlemek için aynı numune veya ince kesite ait tüm görüş alanları, kırpmalar, polarizasyon çiftleri, dönüş açıları ve artırılmış kopyalar aynı grupta tutulmalıdır. Bölme işlemi kırpma ve veri artırmadan önce yapılmalıdır. Grup kimliği bilinmeyen bir koleksiyonda rastgele görüntü bölmesi, bağımsız numunelere genellenebilirlik kanıtı olarak sunulmamalıdır. Ön işleme parametreleri, sınıf ağırlıkları ve model ayarları eğitim ve doğrulama verilerinde belirlenmeli; test kümesi son değerlendirme için kapalı tutulmalıdır.

Transfer öğrenmesi, sınırlı petrografik veride uygulanabilir bir başlangıçtır. Pires de Lima ve Duarte (2021), çamurtaşı ince kesit sınıflandırmasında farklı ön eğitim kaynaklarını karşılaştırmıştır; bu çalışma semantik mineral segmentasyonu deneyi değildir. Bir ağı ImageNet üzerinde önceden eğitilmiş olması petrografik üstünlüğünü garanti etmez. Yeni görev başlığı önce eğitilebilir, ardından uygun katmanlar doğrulama verisiyle seçilen öğrenme hızıyla ince ayarlanabilir. Verinin azlığı tek başına daha büyük bir model seçme gereksesi değildir.

Veri artırma yalnızca eğitim verisinde uygulanmalıdır. Kırpma, geometrik döndürme, yansıtma ve sınırlı parlaklık değişimleri hedef göreve göre değerlendirilebilir (Shorten ve Khoshgoftaar, 2019). Ancak bunlar gerçek tabla dönüşüyle optik çeşitlilik toplamının yerine geçmez. Eşlenik PPL-XPL görüntüleri ve etiket maskesi aynı geometrik dönüşüme uğramalı; sınıf maskeleri yeniden boyutlandırılırken ara sınıf değerleri üretilmemelidir. Renk artırmasının tanısal renkleri bozup bozmadığı, uzman kontrolü ve artırmaz başlangıç deneyiyle sınanmalıdır.

Şekil 3. Petrografik görüntülerde laboratuvarlar ve veri setleri arasında veri alanı kaymasına neden olan başlıca etmenler



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Açıklanabilir Yapay Zekâ ve Petrografik Doğrulama

Yapay zekâ modelinin doğru sınıfı tahmin etmesi, tahminin doğru nedene dayandığını göstermeyebilir. Bir model, mineralin ikizlenmesini veya dilinimini öğrenmek yerine görüntünün kenarındaki ölçek çubuğu, belirli bir kamera gürültüsü ya da laboratuvara özgü renk tonu gibi istenmeyen ipuçlarını kullanabilir. Bu nedenle petrografik uygulamalarda açıklanabilirlik önemlidir.

Grad-CAM, sınıflandırma kararına etkili bölgeleri yaklaşık olarak gösteren bir yöntemdir (Selvaraju vd., 2017); tek başına mineralojik nedenselliği veya doğru karar gerekçesini kanıtlamaz. Morales vd. (2025), andaluzit, biyotit ve ooid örneklerinde renk değişimleri, aktivasyon haritaları ve tekil değer ayrışımıyla görüntü bozma deneyleri uygulamıştır. Ooid bir mineral türü değil, dokusal bir bileşendir. Bulgular seçilen modellerin renk, biçim ve kontrast duyarlılığını gösterir; tüm mineraller veya mimariler için aynı davranış varsayılmaz. Açıklanabilirlik, bağımsız test ve uzman incelemesine ek kanıt sağlar.

Uzman değerlendirmesinde hata haritaları ve karışıklık matrisi birlikte incelenmelidir. Kuvars-feldispat, piroksen-amfibol

veya alterasyon-matris karışmaları; yönelim, ikizlenme, dilinim ve sınır görünürlüğüyle ilişkilendirilebilir. Uzmanlar arasındaki anotasyon uyumsuzluğu ayrıca kaydedilmeli ve mümkünse bağımsız ikinci bir etiketleme ile değerlendirilmelidir. Yüksek tahmin olasılığı doğru mineral tanısını garanti etmez; düşük güvenli ve eğitim sınıfları dışında kalabilecek taneler için insan incelemesine yönlendirme kuralı tanımlanmalıdır.

Başlıca Sınırlamalar ve Gelecek Yönelimler

Petrografik yapay zekânın başlıca sınırlamalarından biri, görüntülerin laboratuvar ve cihaz koşullarına duyarlılığıdır. Aynı mineral, farklı kamera sensörü, beyaz ayarı, objektif veya polarizatör ayarında farklı sayısal renk değerleri verebilir. Kesit kalınlığındaki değişimler de XPL girişim renklerini etkiler (Nesse, 2012). Bu nedenle tek laboratuvardaki başarı, farklı görüntü edinim koşullarında aynı performansın korunacağını göstermez.

Sınıf dengesizliği özellikle nadir aksesuar minerallerin değerlendirilmesini güçleştirir. Sınıf ağırlıkları, dengeli örnekleme veya aktif öğrenme değerlendirilebilir; ancak az sayıda bağımsız tane için güvenilir dış başarı iddiası kurulamaz. Heterojen “diğer” sınıfı ile tanısı belirsiz sınıf ayrılmalıdır. Eğitimde bulunmayan bir minerali bilinen sınıflardan birine zorlamak yerine belirsiz tahminlerin uzman denetimine aktarılması daha uygun olabilir.

Optik görüntü yorumları, aynı örneğe ait kimyasal analizler veya otomatik mineraloji verileriyle desteklenebilir. Wet Mountains veri yayını, ince kesit görüntüleri ile otomatik mineraloji taramalarını birlikte sunan bir örnektir (Magnin vd., 2024). Farklı yöntemlerin karşılaştırılmasında incelenen fiziksel alan, çözünürlük ve mineral sınıflandırma kuralları eşleştirilmelidir. SEM-EDS temelli otomatik mineraloji de mutlak hatasız bir referans değildir; benzer kimyasal bileşimler ve sınırdaki karışık sinyaller yorumlamayı güçleştirebilir (Koh vd., 2021).

Önceden eğitilmiş büyük modeller, az etiketli öğrenme ve çok açılı görüntü birleştirme yeni araştırma olanakları sunmaktadır. Bununla birlikte genel görüntülerden öğrenilmiş temsilin petrografiye aktarılması uygulamaya bağlıdır (Pires de Lima ve Duarte, 2021). Daha karmaşık bir mimari, daha doğru mineral tanısını tek başına sağlamaz. Gelecek çalışmaların önceliği; açık ve iyi belgelenmiş etiketler, bağımsız jeolojik örnekler, cihazlar arası doğrulama ve belirsizliği görünür kılan çıktıların geliştirilmesi olmalıdır.

Sonuç

Petrografik görüntülerde yapay zekâ ile analiz, optik gözlemi nicel sınıflandırma ve segmentasyonla tamamlar. PPL ve XPL tamamlayıcı bilgi sağlar; gerçek tabla dönüşü de yönelime bağlı özellikleri örnekler. Sınıflandırma, nesne tespiti, nesne bazında segmentasyon ve semantik segmentasyon farklı görevlerdir. Hedef mineral etiketi, tane geometrisi veya modal bileşim olduğunda veri ve model seçimi bu ayrım üzerinden yapılmalıdır.

Güvenilir sonuç için numune düzeyinde veri ayrımı, sınıf bazlı başarı ölçütleri, bağımsız dış test ve petrografik denetim gereklidir. Görüntü sayısı bağımsız örnek sayısının; yüksek doğruluk da doğru karar gerekçesinin yerine geçmez. Açık veri kaynakları önemli olanaklar sunsa da etiket kapsamı, erişilebilir sürüm ve görüntü eşleşmesi her uygulamada yeniden kontrol edilmelidir.

Dijital analiz, mineral ve dokusal bileşenlerin tanımlanması, tane geometrisinin ölçülmesi ve modal bileşimin değerlendirilmesi için yararlı araçlar sunar. Bu araçların değeri, ürettikleri çıktının petrografik anlamıyla birlikte ele alınmasına bağlıdır. Yapay zekâ, uzman gözlemine destekleyen; veri kapsamı, hata kaynakları ve belirsizliği açıkça belirtilmiş bir nicel değerlendirme aracı olarak kullanılmalıdır.

Kaynakça

Aligholi, S., Khajavi, R., & Razmara, M. (2015). Automated mineral identification algorithm using optical properties of crystals. *Computers & Geosciences*, 85, 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.014>

Amer, B. G., Mousa, H. M., Dawoud, M., & Youssef, A. (2025). A photomicrographic dataset of rocks for the accurate classification of minerals. *Scientific Data*, 12, Article 1775. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05879-9>

British Geological Survey. (t.y.). *BRITROCKS: Mineralogy and petrology collections database*. Erişim tarihi: 9 Ekim 2026. <https://www.bgs.ac.uk/technologies/databases/bgs-rock-collections/>

Chacon, I. D., Ruiz Puentes, P., Pearse, J., & Arbelaez, P. (2025). Towards automated petrography. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 38, 124124–124143. <https://doi.org/10.52202/085713-3740>

Chen, L.-C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., & Adam, H. (2018). Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. İçinde *Computer Vision – ECCV 2018* (ss. 801–818). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_49

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals* (3. baskı). Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2021). *An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale*. International Conference on Learning Representations. <https://arxiv.org/abs/2010.11929>

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *İçinde Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (ss. 770–778). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>

Koeshidayatullah, A., Morsilli, M., Lehrmann, D. J., Al-Ramadan, K., & Payne, J. L. (2020). Fully automated carbonate petrography using deep convolutional neural networks. *Marine and Petroleum Geology*, 122, Article 104687. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104687>

Koh, E. J. Y., Amini, E., McLachlan, G. J., & Beaton, N. (2021). Utilising convolutional neural networks to perform fast automated modal mineralogy analysis for thin-section optical microscopy. *Minerals Engineering*, 173, Article 107230. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107230>

Külekçi, G., Hacıefendioğlu, K., & Başağa, H. B. (2025). Enhancing mineral processing with deep learning: Automated quartz identification using thin section images. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 32(4), 802–816. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-3048-8>

Li, K., Song, J., Zhang, Z., Ren, S., Lan, Y., Yang, D., Li, Z., Liu, S., Yan, C., Jin, X., Yang, S., & Guo, J. (2026). A dataset and benchmark of carbonate thin-section images for deep learning. *Scientific Data*, 13, Article 340. <https://doi.org/10.1038/s41597-026-06633-5>

Liu, Z., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., Wei, Y., Zhang, Z., Lin, S., & Guo, B. (2021). Swin Transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows. İçinde *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (ss. 10012–10022). <https://arxiv.org/abs/2103.14030>

Magnin, B. P., Pfaff, K., & Kuiper, Y. D. (2024). *Thin section images, automated mineralogy scans, lithogeochemistry, and Nd-Sr-Pb isotopic analysis of samples from a mostly buried layered mafic intrusion, Wet Mountains, Colorado 2022–2024* [Veri seti]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P1ACWNBP>

Morales, J., Saldivia, C., Lobo, R., del Pino, M., Muñoz, M., Caniggia, G., Catalán, J., Hayde, R., & Poblete, V. (2025). Visual analysis of deep learning semantic segmentation applied to petrographic thin sections. *Scientific Reports*, 15, Article 14612. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99767-2>

Nesse, W. D. (2012). *Introduction to optical mineralogy* (4. baskı). Oxford University Press.

Parks, H. L., Lawrence, J. M., Jenkins, M. C., Zieman, L. J., Zientek, M. L., & Leonard, M. R. (2025). *Thin section images of hand samples and drill core from mafic to ultramafic rocks* (Sürüm 2.0, Ağustos 2025) [Veri seti]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P1SUMMMI>

Pires de Lima, R., & Duarte, D. (2021). Pretraining convolutional neural networks for mudstone petrographic thin-section image classification. *Geosciences*, 11(8), Article 336. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080336>

Roduit, N. (t.y.). *JMicroVision: Image analysis toolbox* [Bilgisayar yazılımı]. Erişim tarihi: 9 Ekim 2026. <https://jmicrovision.github.io/>

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *İçinde Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015* (ss. 234–241). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Rubo, R. A., Carneiro, C. C., Michelon, M. F., & Gioria, R. S. (2019). Digital petrography: Mineralogy and porosity identification using machine learning algorithms in petrographic thin section images. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 183, Article 106382. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106382>

Saxena, N., Day-Stirrat, R. J., Hows, A., & Hofmann, R. (2021). Application of deep learning for semantic segmentation of sandstone thin sections. *Computers & Geosciences*, 152, Article 104778. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104778>

scikit-learn geliştiricileri. (t.y.). *Metrics and scoring: Quantifying the quality of predictions*. Erişim tarihi: 9 Ekim 2026. https://scikit-learn.org/stable/modules/model_evaluation.html

Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2017). Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. *İçinde Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (ss. 618–626). <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.74>

Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data*, 6, Article 60. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>

BÖLÜM 2

SÜREKSİZLİK ÖLÇÜMLERİNİN GELENEKSEL YÖNTEMLERDEN İHA VE LİDAR TABANLI DİJİTAL DÖNÜŞÜME EVRİMİ

MEHMET ÖZDEMİR¹

Giriş

Süreksizlikler, kaya kütlelerinin süreksiz ve anizotropik doğasını belirleyerek, kütlenin genel mukavemetini ve deformasyon davranışını kontrol eden temel unsurlardır (Rasti vd., 2021). Bu yapısal düzlemlerin yönelim, aralık ve süreklilik gibi karakteristik özellikleri, kaya kütlesi içindeki blok boyutlarını doğrudan etkileyerek kazı stabilitesini ve potansiyel yenilme mekanizmalarını şekillendirir (Ling vd., 2022). Özellikle, süreksizlik düzlemlerinin kayma direnci ve dolgu malzemesi özellikleri, kaya kütlesi içerisindeki gerilme dağılımını doğrudan yöneterek tasarım kararlarında temel girdi oluşturmaktadır (Chen vd., 2026). Bu verilerin dijital ortamda hassas bir şekilde tanımlanması, kaya kütlesi sınıflandırma sistemlerinin daha güvenilir uygulanmasını sağlayarak tasarım aşamasındaki hata payını minimize etmektedir

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8164-8874

(Mehrishal vd., 2025; Zimbardo vd., 2024). Daha kapsamlı ve otomatikleştirilmiş bu veri toplama süreci, karmaşık jeolojik yapıların 3B modeller üzerinden analiz edilmesine olanak tanıyarak, saha kısıtlamalarından kaynaklanan hataları azaltmakta ve mühendislik projelerinde optimizasyonu güçlendirmektedir (Zhang vd., 2023; Umili vd., 2018).

Kaya kütlesi süreksizliklerinin hassas karakterizasyonu, maden işletmelerinde yapısal sürekliliğin sağlanması ve operasyonel güvenliğin korunması açısından kritik bir mühendislik gerekliliğidir (Hurtgen ve Detert, 2024). Geleneksel yöntemler olan pusula ve şerit metre ile yapılan manuel ölçümler, özellikle erişimi kısıtlı veya tehlikeli yüksek şev bölgelerinde hem iş güvenliği riskleri taşımakta hem de veri toplama sürecinde zaman kısıtlamalarına yol açmaktadır (Alabede, 2024; Rodríguez-Servín vd., 2025). Buna karşılık, insansız hava aracı (İHA) destekli fotogrametri ve LiDAR teknolojileri, geniş kaya yüzeylerinden yüksek çözünürlüklü nokta bulutu verileri elde ederek manuel ölçümlerin doğasından kaynaklanan örnekleme yanlılıklarını minimize etmekte ve operasyonel verimliliği artırmaktadır (Bernardini vd., 2022; Wu vd., 2026). Bu dijital yaklaşımlar, özellikle karmaşık geometrilere sahip yeraltı galerilerinde jeolojik pusula kullanımının pratik olmadığı durumlarda, 3B nokta bulutları üzerinden süreksizlik setlerinin uzaktan ve otomatik olarak tanımlanmasına olanak tanıyarak mühendislik analizlerinin güvenilirliğini pekiştirmektedir (Caccia vd., 2021; Patra vd., 2025). Söz konusu yöntemler, jeolojik süreksizliklerin yönelim, sıklık, devamlılık ve yüzey geometrisi gibi temel parametrelerinin üç boyutlu ortamda istatistiksel olarak modellenmesine imkân tanıyarak saha kısıtlamalarını aşmaktadır (Bamford vd., 2020; Monsalve vd., 2018).

Geleneksel manuel yöntemlerin doğasında bulunan nitel ve subjektif değerlendirme süreçlerini, bu ileri teknolojiler sayesinde nesnel ve tekrarlanabilir sayısal veri setlerine dönüştürmek, kaya kütlesi sınıflandırma sistemlerinin daha doğru bir şekilde uygulanmasını mümkün kılmaktadır (Menegoni vd., 2025; Nizar vd., 2024). Bu bağlamda dijital teknikler, kaya kütlesinin mekanik davranışını öngörmek için gerekli olan süreksizlik özelliklerinin daha kapsamlı biçimde analiz edilmesine olanak tanıyarak mühendislik tasarım süreçlerini optimize etmektedir (Kekeç vd., 2021; Santa vd., 2024). Bununla birlikte, uzaktan algılama sistemlerinin sağladığı yoğun veri hacmi, manuel yöntemlerin aksine kaya kütlesi geometrisinin bütüncül olarak temsil edilmesini sağlayarak, jeomekanik kararlılık analizlerinde hata payını önemli ölçüde düşürmektedir (Yonli vd., 2023; BaKun-Mazor vd., 2024). Ayrıca, madencilik faaliyetleri esnasında oluşan şev sorunları ve buna bağlı süreksizlik genişliklerindeki değişimler, geleneksel yöntemlerle anlık olarak takip edilemezken, periyodik dijital taramalar bu dinamik değişimlerin geometrik karakterizasyonunda kesintisiz veri akışı sağlamaktadır (Cerekwicki vd., 2026; Allen vd., 2023). Bu teknolojik dönüşüm, manuel haritalamanın aksine erişilemez veya tehlikeli bölgelerin bile temassız bir şekilde haritalanmasına olanak tanıyarak iş güvenliği risklerini azaltmaktadır (Salvini vd., 2018; Yousefi vd., 2019). Bu sayede, hem saha operasyonlarında iş gücü verimliliği artırılmakta hem de elde edilen yüksek doğruluklu dijital modeller, karmaşık jeolojik yapıların kinematik analizlerinde güvenilir bir temel oluşturmaktadır (Perozzo vd., 2024; Ribas vd., 2023). Özellikle derin açık işletmelerde zemin emniyeti açısından kritik olan ancak doğrudan ölçülemeyen sınırlı görüş alanına sahip şev yüzeyleri, bu sistemlerin sağladığı temassız veri toplama kapasitesi sayesinde artık tam kapsamlı olarak modellenabilmektedir (Francioni vd., 2015;

Menegoni vd., 2019). Bu yöntemlerin entegrasyonu, kaya kütlesinin anizotropik özelliklerinin ve blok yapısının daha net anlaşılmasını sağlayarak, yeraltı kazılarında karşılaşılabilecek potansiyel göçme mekanizmalarının çok daha hassas bir şekilde öngörülmesine olanak tanımaktadır (Huang vd., 2020). Sonuç olarak, bu yöntemlerin sağladığı dijital arşivleme imkânları, jeolojik verilerin zaman içindeki değişimini izlenebilir kılmakta ve karmaşık maden sahalarında karar alma süreçlerini destekleyen güvenilir bir veritabanı oluşturmaktadır (Duarte vd., 2021; Lee vd., 2024).

Bu çalışmada, madencilik faaliyetlerinde süreksizlik ölçümlerinin mühendislik tasarımındaki rolü ve geleneksel saha yöntemlerinin başlıca sınırlılıkları ele alınarak, İHA ve LiDAR tabanlı dijital tekniklere geçişin gerekliliği ortaya konacaktır. Dijital modeller, erişimi kısıtlı şev ve galeri yüzeylerini yüksek çözünürlükle temsil ederek süreksizliklerin yönelimi, aralığı, devamlılığı ve yüzey geometrisi gibi temel parametrelerin geniş alanlarda güvenli, sistematik ve tekrarlanabilir biçimde belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Giordan vd., 2020; Menegoni vd., 2019). Bununla birlikte, uzaktan algılama yöntemleri geleneksel saha gözlemlerinin tamamen yerine geçen araçlar olarak değil; arazi doğrulaması ve jeolojik yorumla birlikte kullanıldığında en yüksek mühendislik değerini sunan tamamlayıcı teknikler olarak değerlendirilmelidir (Perozzo vd., 2024; Umili vd., 2018). Bu doğrultuda, sonraki bölümlerde öncelikle süreksizliklerin maden işletmelerinde tasarım açısından jeolojik önemi ele alınacak; ardından geleneksel ölçüm yöntemlerinin uygulanma biçimleri ve sınırlılıkları incelenecek; son olarak da İHA ve LiDAR tabanlı dijital dönüşümün mühendislik uygulamalarına sağladığı katkılar değerlendirilecektir. Bu çerçevede, entegre veri toplama ve analiz yaklaşımlarının operasyonel süreçlerde veri doğruluğunu artırarak

madencilikte kinematik kontrol mekanizmaları ile stabilite analizlerinin etkinliğini nasıl geliştirdiği ortaya konacaktır.

Metodoloji

Geleneksel Ölçüm Yöntemleri

Geleneksel saha çalışmaları, jeologların kaya yüzeyine doğrudan temas ederek pusula ve şerit metre yardımıyla "scanline" (tarama hattı) ve "window mapping" (pencere haritalama) tekniklerini uyguladığı manuel ölçüm süreçlerine dayanmaktadır (Dong vd., 2019). Bu süreçte, jeolojik pusula ve klinometre, çelik şerit metre, Schmidt çekici, Barton tarağı ve sürmeli kumpas gibi temel ekipmanlar kullanılarak süreklilik, aralık, açıklık ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler tek tek kaydedilir (Giordan vd., 2020). Bu geleneksel yaklaşımda, süreksizlik düzlemlerinin geometrik özellikleri doğrudan saha gözlemlerine ve mühendisin subjektif yorumuna dayandığından, erişilemeyen veya sarp yamaçlardaki veri toplama süreçleri çoğu zaman ya zorlaşmakta ya da tamamen imkânsız hale gelmektedir (Gigli vd., 2012; Yalcin vd., 2023). Ayrıca, bu manuel yöntemler yalnızca erişilebilir şev seviyelerinde uygulanabildiğinden, kaya kütlelerinin bütününe dair verilerin temsil kabiliyeti sınırlı kalmakta ve büyük ölçekli alanlarda süreksizlik ağının sürekliliği gözden kaçabilmektedir (Noroozi vd., 2015; Umili vd., 2024).

Geleneksel saha tekniklerinin temelini oluşturan pusula ölçümleri, süreksizlik düzlemlerinin doğrultu ve eğim değerlerinin yerinde belirlenmesi sürecinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bordehore vd., 2023; Mosch vd., 2010). Bu süreçte, jeologlar pusula ve klinometre yardımıyla süreksizlik düzlemlerinin konumunu tanımlarken, genellikle "scanline" (hat ölçümü) yöntemine başvurarak belirli bir hat boyunca karşılaşılan

süreksizliklerin yönelim ve aralık verilerini sistematik olarak kaydederler (Madear vd., 2023). Bu ölçümlerde kullanılan cetveller, şerit metre, jeolog çekici, lazerli su terazisi, schmidt çekici, jeolog pusulası ve yüzeylerdeki eklemleri ve mesafeleri işaretlemek için renkli boya Şekil 1’de sunulmuştur.

Şekil 1. Geleneksel süreksizlik ölçüm ekipmanları (Madear vd., 2023)



Hat ölçümü yöntemi, önceden belirlenmiş bir referans hattı boyunca rastlanan süreksizliklerin yönelim değerlerinin yanı sıra, bu düzlemlerin kaya kütlesi içindeki sıklığını ve fiziksel özelliklerini kantitatif olarak belirlemek için temel bir mekanizma sunar (Gómez vd., 2023; Ivanovski vd., 2023). Bu yöntemde jeologlar, pusula klinometreleri veya dijital tabanlı sensörlü cihazları süreksizlik düzlemi üzerine yerleştirerek, yapının eğim ve eğim yönü

değerlerini doğrudan sahada ölçümleyip stereonet üzerinde projeksiyonlarını alırlar (Biber vd., 2018). Hat ölçümü yöntemi kapsamında, seçilen bir doğrultu boyunca kesişen tüm süreksizliklerin sistematik olarak kaydedilmesi, kaya kütlesi içindeki yapısal verilerin istatistiksel olarak anlamlı bir örnekleme temsil edilmesini sağlamaktadır (Yetkin, 2012; Tuan, 2015; Gerstner vd., 2023) (Şekil 2). Ancak bu uygulamalarda karşılaşılan en büyük kısıt, sarp veya yüksek şevlerin güvenli olmayan yapısı nedeniyle ölçüm hattının yalnızca erişilebilir alt seviyelerle sınırlandırılmasıdır (Beni vd., 2022).

Şekil 2. Şev aynasında yapılan hat etüdü



Süreksizlik Parametreleri

Dijital yüzey modelleri üzerinden süreksizlik yönelimlerinin belirlenmesi, nokta bulutlarındaki yerel normal vektörlerin analizi veya üçgenleştirilmiş düzensiz ağ (TIN) yüzeylerinin düzlemsel geometrilerinin hesaplanması ile gerçekleştirilmektedir (Guill vd., 2016). Bu yöntemlerde, birbirine benzer normal vektörlere sahip komşu noktalar kümelenerek süreksizlik düzlemlerinin yönelimleri

istatistiksel olarak hesaplanırken, yüzeylerin pürüzlülüğü ve süreklilik parametreleri ise nokta bulutlarının yerel varyasyonları ve düzlemsel uyum sapmaları üzerinden nicel olarak değerlendirilmektedir (Oppikofer vd., 2009). Ayrıca, süreksizliklerin aralık ve açıklık değerleri, düzlemsel kümelenme sonuçlarının birbirine paralel olan setler arasındaki ortalama mesafelerin hesaplanmasıyla belirlenirken, pürüzlülük ise yüzey üzerindeki yerel sapmaların teorik düzlemden uzaklığı baz alınarak sayısal olarak ortaya konulmaktadır (Battulwar vd., 2021; Buyer ve Schubert, 2017). Söz konusu pürüzlülük analizlerinde, nokta bulutu yoğunluğunun yeterli seviyede olması, yüzeydeki küçük ölçekli düzensizliklerin tespit edilmesinde ve dolayısıyla kayma direnci parametrelerinin doğru hesaplanmasında kilit bir rol oynamaktadır (Jaboyedoff vd., 2010; Utlu vd., 2021). Bununla birlikte, süreksizliklerin devamlılığı ise nokta bulutundaki düzlemsel segmentlerin mekânsal kapsamının izlenmesiyle elde edilerek kaya kütlelerinin blok yapısının ve potansiyel göçme mekanizmalarının belirlenmesinde kritik veriler sağlamaktadır (Abellán vd., 2013; Yakar vd., 2022).

Geometrik Parametreler

Üç boyutlu verilerden elde edilen doğrultu ve eğim açıları, süreksizlik düzlemlerinin kinematik analizlerinde temel girdi teşkil ederek şev duraylılığını belirleyen geometrik yönelim setlerinin tanımlanmasına olanak tanımaktadır (Gu vd., 2024; Wang vd., 2024). Bu veriler, kümeleme algoritmaları ve temel bileşenler analizi aracılığıyla süreksizlik setlerinin mekânsal dağılımını analiz ederek kaya kütlesi içindeki blok boyutlarını ve potansiyel zayıflık zonlarını haritalandırmada kritik bir rol oynamaktadır (Ji vd., 2024; Wu vd., 2026). Öte yandan, süreksizlik setlerine ait bu istatistiksel veriler stereonetik izdüşümler üzerinde görselleştirilerek, kaya kütlelerinin

mekanik davranışını etkileyen dominant yapısal unsurların doğrulanmasına yardımcı olmaktadır (Mammoliti vd., 2022).

İHA ve LiDAR Teknolojileri

İHA tabanlı fotogrametrik sistemler, geleneksel ölçüm yöntemlerinin aksine, ulaşılması tehlikeli veya imkânsız olan sarp ve engebeli maden sahalarında yüksek doğrulukla veri toplama kapasitesi sunmaktadır (Kabadayı, 2022a; Yiğit vd., 2023). Bu platformlar, fotogrametrik ölçümler ve hava fotoğrafları aracılığıyla maden sahasının detaylı yüzey ve yükseklik modellerini oluşturarak geleneksel yersel tarama sistemlerinin topografik kısıtlamalarını aşmaktadır. İHA'lar, önceden tanımlanmış uçuş planları sayesinde insan faktöründen kaynaklanan hataları minimize ederken, milimetrik hassasiyette yoğun nokta bulutları üreterek karmaşık jeolojik yapıların bütünsel analizine olanak tanımaktadır (Kun ve Özcan, 2019) (Şekil 3).

Şekil 3. Maden sahalarında İHA kullanımı (Kun ve Özcan, 2019)



Öte yandan, LiDAR teknolojisi entegre edilen bu sistemler, lazer darbeleri sayesinde yoğun bitki örtüsü veya gölgelenme gibi zorlu koşullarda dahi yüzey topografyasını yüksek çözünürlüklü mekânsal verilerle karakterize edebilmektedir (Ağca vd., 2020). Bu lazer tabanlı yöntemler, doğrudan mesafe ölçümü yaparak yüzey pürüzlülüğünü ve süreksizlik geometrisini geleneksel yöntemlere

kıyasla daha yüksek bir doğrulukla dijital ortama aktarabilmektedir (Kun ve Güler, 2019; Yüksel, 2022). Lazer tarama teknolojisi, karmaşık kaya kütlelerinin geometrik karakterizasyonunda ihtiyaç duyulan üç boyutlu (3B) topografik modellemeyi hızlı ve ekonomik bir şekilde sağlayarak madencilik faaliyetlerinin dokümantasyon sürecine önemli katkılarda bulunmaktadır (Kabadayı, 2022b; Gül, 2019). Bununla birlikte, LiDAR sensörlerinin sunduğu bu yüksek yoğunluklu veri seti, yeraltı maden ocakları gibi sınırlı görüş alanına sahip veya tehlike arz eden bölgelerde dahi güvenli ve hızlı jeoteknik değerlendirmelerin yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu ileri teknoloji sistemleri, özellikle düzgün olmayan zemin yüzeyleri ve dik şevlerin yarattığı geometrik zorlukları aşarak, süreksizliklerin yönelim ve yapısal özelliklerinin hassas bir şekilde haritalanmasını mümkün kılmaktadır (Tsachouridis vd., 2025). Ayrıca bu sistemler, maden sahasındaki arazi değişimlerini düzenli olarak izleme, çevresel etkileri analiz etme ve üretim süreçlerini optimize etme noktasında stratejik bir rehberlik sunmaktadır (Önal vd., 2024; Yücel ve Yücel, 2017). Bu teknolojilerin sunduğu esnek hareket kabiliyeti ve yüksek verimlilik, özellikle yersel ekipmanların risk teşkil ettiği dengesiz yeryüzü şekillerinde operasyonel güvenliği maksimize ederek sörveyörlerin dokümantasyon süreçlerini iyileştirmektedir (Atici vd., 2024; An vd., 2024). Özellikle kapalı kanopi veya yoğun bitki örtüsü altında Structure from Motion - Hareketten Yapı Oluşturma (SfM) fotogrametrisine kıyasla avantaj sağlayan LiDAR, maden sahalarında yüzey topografyasının daha hassas izlenmesine olanak tanırken, LiDAR nokta bulutlarından süreksizlik düzlemlerinin otomatik olarak çıkarılmasına yönelik çalışmalarda Principal Component Analysis - Temel Bileşen Analizi (PCA), kümeleme ve Random Sample Consensus-Rastgele Örneklem Mutabakatı (RANSAC) tabanlı yöntemlerle karmaşık kaya kütlesi süreksizliklerinin yönelimleri belirlenebilmekte (Liu vd., 2024),

ayrıca şevlerde gerçekleştirilen Terrestrial Laser Scanning-Yersel Lazer Tarama (TLS) uygulamalarında geleneksel ölçümlerde gözden kaçan süreksizlik setleri ortaya çıkarılabilmektedir (Stead vd., 2019). Bu entegre sistemler, geleneksel ölçüm tekniklerinin aksine büyük veri hacimlerini hızlı bir şekilde işleyerek, maden sahalarındaki yapısal kararsızlıkların sürekli izlenmesi ve operasyonel verimliliğin artırılması adına kritik öneme sahip dinamik jeoteknik veriler sağlamaktadır (Ren vd., 2019). Ayrıca bu otonom sistemler, tehlikeli bölgelere fiziksel erişimi ortadan kaldırarak iş güvenliği risklerini en aza indirmekte ve özellikle yeraltı madenlerinde otonom yönetim ile yüksek çözünürlüklü 3B yüzey temsilleri oluşturulmasına imkân tanımaktadır (Canales ve Sellers, 2020; Järvenpää vd., 2026). Buna ek olarak, bu teknolojilerin sunduğu yüksek örnekleme yoğunluğu, kaya kütlesi içindeki küçük ölçekli yapısal süreksizliklerin ve detaylı geometrik anomalilerin daha hassas tespit edilmesine imkân vererek, mühendislik projelerinde risk analizlerinin güvenilirliğini artırmaktadır (Shahmoradi vd., 2020). Buna ek olarak, söz konusu teknolojiler maden sahalarındaki yapısal süreksizliklerin zamansal değişimlerini sürekli olarak izleyerek, jeoteknik kararsızlıkların erken safhada belirlenmesine ve operasyonel güvenliğin proaktif bir şekilde yönetilmesine katkı sağlamaktadır (Alabede, 2017).

Veri Toplama Platformları

İHA platformlarının görev planlaması, operasyonel ihtiyaçlara göre optimize edilen otonom uçuş güzergahları ve yüksek irtifa hassasiyeti sağlayan uçuş kontrol sistemleri ile desteklenmektedir (Shrivastava, 2025). Bu platformlar, görsel-eylemsel (visual-inertial) Simultaneous Localization and Mapping-Eşzamanlı Konumlandırma ve Haritalama (SLAM) teknolojileri ve sensör füzyonu sayesinde Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) sinyallerinin zayıf veya tamamen kesik olduğu yeraltı maden galeri

sistemlerinde dahi çevresel farkındalık geliştirerek güvenli navigasyon sağlamaktadır (Alabede ve Maimako, 2021). Bu insansız platformlar, maden sahasının topografik karmaşıklığına uyum sağlayan değişken hız ve sensör odaklama kabiliyetleri sayesinde, özellikle şev stabilitesi ve saha güvenliğinin kritik olduğu bölgelerde yüksek verimlilikle veri toplamaktadır. Gelişmiş sensör teknolojileri ve otonom sistemler, insan müdahalesini en aza indirerek tehlikeli çalışma ortamlarındaki riskleri azaltırken, veri analitiği süreçlerini hızlandırarak mühendislerin sahadaki kaya kütlesi özelliklerini daha ayrıntılı anlamalarına olanak tanır (Jones vd., 2019). Bununla birlikte, LiDAR sensörlerinin arazi modellemedeki entegrasyonu, yeryüzü topografyasının dijital ikizlerini oluştururken yüzeyin mikroskobik deformasyonlarını ve yerel ölçekli yapısal süreksizlikleri yüksek doğrulukla yakalamak için vazgeçilmez bir yöntem sunmaktadır (Soares vd., 2024). Söz konusu sensörler, özellikle geniş ölçekli açık ocak operasyonlarında yüzeydeki mikrokırıkların ve şev duvarı deformasyonlarının erken teşhisinde kritik bir rol oynamaktadır (Alabede, 2017). Bu süreç, elde edilen bulut verilerinin işlenmesiyle elde edilen yüksek sadakatli 3B yüzey modelleri sayesinde, patlatma sonrası stres dağılımının ve şev davranışının dinamik olarak izlenmesine olanak tanımaktadır (Alabede, 2025). Böylelikle, operasyonel sürekliliği sağlayan bu dijital iş akışları, maden sahasındaki karmaşık jeolojik yapıların daha güvenli ve ekonomik bir şekilde yönetilmesine stratejik destek sunmaktadır (Li ve Zhan, 2025; Tariq, 2021). İHA'ların sunduğu bu esnek veri toplama imkânları, özellikle ulaşılması güç şev yüzeylerinde ve stok sahalarında yapılan hacimsel hesaplamaların hassasiyetini artırarak maden planlama süreçlerini optimize etmektedir (Park ve Choi, 2020; Singh vd., 2024). Ayrıca, LiDAR veri toplama görevlerinde kullanılan özelleştirilmiş yazılımlar, sensörün araziye olan mesafesini ve uçuş yüksekliğini topografik

değişimlere göre dinamik biçimde ayarlayarak nokta bulutu yoğunluğunun homojenleştirilmesine ve geniş maden sahalarında yüksek doğruluklu üç boyutlu jeouzamsal verilerin elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Banerjee ve Raval, 2022; Singh vd., 2023). El tipi LiDAR sistemleri, SLAM tabanlı konumlandırma sayesinde Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) sinyalinin bulunmadığı yeraltı galerilerinde hızlı ve taşınabilir üç boyutlu nokta bulutları üreterek süreksizliklerin, galeri geometrisinin ve kaya kütlesi deformasyonlarının ayrıntılı biçimde belgelenmesini sağlamakta; ancak düşük eğimli süreksizliklerin tespitinde nokta bulutu yoğunluğu ve tarama doğruluğu bakımından dikkatli doğrulama gerektirmektedir (Ellmann vd., 2021; Eyre vd., 2016). Örneğin, el tipi LiDAR ile elde edilen SLAM nokta bulutları TLS referans taramaları ve kontrol noktalarından sağlanan ölçümlerle ortak bir koordinat sisteminde birleştirilerek çok kaynaklı bir veri seti oluşturulabilir; kapalı döngü güzergâhları ise bu verilerin hizalanmasını ve modelin doğrulanmasını güçlendirmektedir (Koyuncu Teknik Cihazlar, 2025; Sun vd., 2024; Fahle vd., 2022; Ellmann vd., 2021; Eyre vd., 2016) (Şekil 4).

Şekil 4. El tipi LiDAR cihazı ile elde edilen nokta bulutu ve 3B tasarım (Koyuncu Teknik Cihazlar, 2025)



Nokta Bulutu İşleme

Ham nokta bulutu verileri, öncelikle gürültü filtreleme algoritmaları kullanılarak hatalı yansılardan ve atmosferik etkilerden arındırılmakta, ardından arazi ve bitki örtüsü gibi sınıflandırma yöntemleriyle jeolojik unsurlar jeometrik özelliklerine göre ayrıştırılmaktadır (Wu, 2025). Bu sınıflandırma aşamasının ardından, bitki örtüsü ve diğer dış faktörlerin ayıklanmasıyla elde edilen temizlenmiş nokta bulutları üzerinde yüzey normali kestirimi ve kümeleme analizleri gerçekleştirilerek süreksizlik yüzeylerinin geometrik karakterizasyonu hassas bir şekilde tanımlanmaktadır (Madjid vd., 2018). Özellikle İHA ve LiDAR sistemlerinden elde edilen nokta bulutlarında gürültülerin filtrelenmesi, nokta yoğunluğunun dengelenmesi ve yüzey normallerinin hesaplanması,

süreksizlik düzlemlerinin güvenilir biçimde ayrıştırılabilmesi için temel işlem adımlarını oluşturmaktadır (Daghigh vd., 2022; Yi vd., 2024). ShahepeMatrix, Discontinuity Set Extractor ve CloudCompare gibi yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilen bu analizlerde, nokta yoğunluğu, yüzey normalleri ve yansıma şiddeti gibi parametreler birlikte değerlendirilerek süreksizlik setlerinin eğim yönü, eğim açısı, aralık ve süreklilik özellikleri belirlenebilmektedir (AlBarelli vd., 2021; Daghigh vd., 2022). İHA-LiDAR verileri geniş ve erişimi güç şev yüzeylerinin hızlı biçimde modellenmesini sağlarken, el tipi LiDAR sistemleri SLAM tabanlı konumlandırma sayesinde yeraltı galerilerinde taşınabilir nokta bulutları üretmekte; ancak düşük açılı süreksizliklerin tanımlanmasında nokta yoğunluğunun yetersiz kalabilmesi nedeniyle sonuçların TLS ölçümleri veya kontrol noktalarıyla doğrulanması gerekmektedir (Ellmann vd., 2021; Eyre vd., 2016). Bu nedenle, farklı platformlardan elde edilen nokta bulutlarının ortak bir koordinat sisteminde birleştirilmesi, filtreleme ve sınıflandırma parametrelerinin saha koşullarına göre uyarlanması ve otomatik olarak çıkarılan süreksizliklerin uzman değerlendirmesiyle kontrol edilmesi, jeometrik karakterizasyonun doğruluğunu artırmaktadır (Daghigh vd., 2022; Sun vd., 2024).

Madencilik Uygulamaları

İHA ve LiDAR tabanlı yüksek çözünürlüklü nokta bulutları, özellikle kaya düşmesi riski taşıyan heterojen şev yüzeylerinin üç boyutlu olarak modellenmesine olanak tanıyarak, geleneksel iki boyutlu (2-B) analizlerin yetersiz kaldığı durumlarda topoğrafik düzensizliklerin yarattığı riskleri daha hassas bir şekilde ortaya koymaktadır (MUtluhan vd., 2018; Yousefi vd., 2019). Bu teknolojiler, operasyonel süreçlerde mühendislerin tehlikeli alanlara doğrudan girmeksizin stabilite analizi yapmasına ve geoteknik

modelleri hızla güncellemesine imkân tanıyarak saha güvenliğini ve verimliliğini artırmaktadır (Ribas vd., 2023). Ayrıca bu dijital süreksizlik verileri, şev geometrisi ile süreksizlik setleri arasındaki etkileşimi simüle ederek, potansiyel göçme mekanizmalarının erken teşhisinde ve güvenli kazı stratejilerinin belirlenmesinde kritik bir karar destek mekanizması işlevi görmektedir (Rodríguez-Servín vd., 2025; Salvini vd., 2018). Bu veriye dayalı yaklaşımlar, kinematik analizlerde kama tipi kayma veya düzlemsel göçme risklerinin önceden kestirilmesini sağlayarak, şev tasarımında ve patlatma dizaynında iyileştirici operasyonel kararlar alınmasını mümkün kılmaktadır (Karahan vd., 2024; Minh ve Dung, 2023). Süreksizliklerin sayısal karakterizasyonu, operasyonel süreçlerde şev açılarının optimize edilmesine ve kaya kütlesi sınıflandırmalarının dinamik olarak revize edilmesine imkân tanıyan kantitatif bir zemin oluşturmaktadır (Alabede, 2024; Perozzo vd., 2024). Özellikle, yapısal jeoloji verilerinin üretim takvimine entegrasyonu, sahadaki anlık yapısal değişimlerin jeoteknik modellemelere hızla yansıtılmasına olanak tanıyarak maden işletmelerinde proaktif risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini desteklemektedir (Chen vd., 2026).

Süreksizlik geometrisinin üç boyutlu sayısal modeller üzerindeki hassas karakterizasyonu, kinematik analizlerin şev duraylılığı üzerindeki belirleyici etkisini nicel olarak ortaya koymaktadır (Francioni vd., 2015). Özellikle, süreksizliklerin şev yüzeyi ile yaptığı açısız etkileşimler, kama ve düzlemsel yenilme modlarının olasılıksal yöntemlerle kestirilmesine olanak tanıyarak stabilitenin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır (Arzu vd., 2018; Menegoni vd., 2025). Bu bağlamda, dijital yüzey modelleri üzerinde gerçekleştirilen geometrik analizler, süreksizlik kesişimlerinin yarattığı kama oluşumlarının ve potansiyel kayma düzlemlerinin 3B ortamda tanımlanmasını sağlayarak jeoteknik tasarımın

doğruluğunu artırmaktadır (Boileau vd., 2025). Bu tür dijital tespit süreçleri, saha gözlemlerine dayalı geleneksel yaklaşımların aksine, ulaşılamayan dik ve engebeli yamaçlarda dahi kaya düşme potansiyelini ve potansiyel kama geometrilerini güvenli bir şekilde analiz etme imkânı sunar (Cirillo vd., 2024; Peralta vd., 2024). Böylece, elde edilen hassas yapısal veriler, kama tipi yenilme analizlerinde kinematik risk bölgelerinin daha güvenilir bir şekilde modellenmesine ve şev güvenliğini tehlikeye atan blok geometrilerinin önceden tespit edilmesine olanak tanımaktadır (Ananin vd., 2025; Zhang vd., 2026). Ayrıca, nokta bulutlarından elde edilen bu geometrik veriler, 3 boyutlu kaya düşme analizlerinde kaynak blokların boyutlarını ve şekillerini belirlemek için kullanılarak blok enerjisi ve sıçrama yüksekliği gibi dinamik parametrelerin daha gerçekçi hesaplanmasını sağlar (Ersoy vd., 2024). Bu yaklaşım, özellikle karmaşık tektonik yapıya sahip açık ocak madenlerinde, süreksizlik ağlarının ve buna bağlı kama mekanizmalarının sayısal olarak doğrulanmasını kolaylaştırarak mühendislik tasarımındaki belirsizlikleri minimize etmektedir (Li vd., 2024; Tomás vd., 2020). Bununla birlikte, dijital ortamda türetilen bu yüzey normalleri ve süreksizlik setleri, farklı yazılım araçları kullanılarak blok boyutlarının geometrik analizine ve nihayetinde şev duraylılığını modelleyen süreksiz deformasyon analizlerine doğrudan entegre edilmektedir (Kayen ve Russo, 2024). Bu entegrasyon süreci, süreksizliklerin mekânsal dağılımındaki belirsizlikleri azaltarak, kaya kütlesi içindeki potansiyel kama mekanizmalarının ve devrilme türü yenilmelerin limit denge analizleriyle çok daha hassas bir şekilde doğrulanmasını mümkün kılar (Alemdağ vd., 2015). Ayrıca, bu süreçte elde edilen sayısal verilerin açık kaynaklı yazılımlarla işlenmesi, karmaşık kaya kütlesi yapılarının gerçeğe yakın 3B simülasyonlarının oluşturulmasına

imkân vererek mühendislik projelerinde operasyonel kararların bilimsel bir temele oturtulmasını desteklemektedir.

Tartışma

Klasik yöntemlerin uygulanmasında, özellikle erişilemeyen sarp yamaçlarda veri toplama süreçleri hem ciddi iş güvenliği riskleri doğurmakta hem de ekipmanların taşınması sırasında fiziksel engellerle karşılaşılmasına neden olmaktadır (Medici vd., 2023). Bu kısıtlamalar, doğrudan erişim gerektiren noktalarda ölçüm yapamayan personelin, şevin tamamı yerine sadece güvenli alt kotlarda örneklem almasına zorlayarak jeolojik temsil kabiliyetini düşürmektedir (Hellmy vd., 2019). Ayrıca, manuel ölçüm süreçleri jeoloğun yüzeydeki süreksizlikleri tanımlarken sergilediği kişisel yorum farklılıklarına açık olduğundan, gözlemci kaynaklı subjektif hatalar veri setinin hassasiyetini ve tekrarlanabilirliğini tehlikeye atmaktadır (Andrews vd., 2019). Buna ek olarak, ekstrem hava koşulları veya zorlu topografik yapı gibi dış etkenler, manuel veri toplama sürecini kesintiye uğratarak veya personeli zorlayarak süreksizlik tanımlama hassasiyetini olumsuz yönde etkilemektedir (Sturzenegger ve Stead, 2009). Özellikle sarp veya dik yüzeylerin oluşturduğu lojistik zorluklar, veri toplama stratejilerinde manuel yöntemlerin verimliliğini kısıtlayarak kapsamlı bir jeolojik modelin oluşturulmasını zorlaştırmaktadır (Fazio vd., 2019). Özellikle yüzey pürüzlülüğü veya dolgu malzemesi gibi süreksizlik parametrelerinin manuel olarak tespiti, arazi koşullarının kötüleştiği durumlarda ölçüm doğruluğunda sapmalara neden olabilmektedir (Benrabah vd., 2025; Fener ve Varol, 2024). Bu bağlamda, manuel veri toplama sürecinde gözlemcilerin bakış açısı, konumlandırma hataları ve yorgunluk gibi faktörler, özellikle çok sayıda süreksizlik setinin bulunduğu karmaşık kaya kütlelerinde önemli ölçüde sistematik belirsizliklere yol açabilmektedir (Medinac ve Esmaceli, 2020).

Ayrıca, veri toplama aşamasındaki bu sınırlı örnekleme kapasitesi, kaya kütlesi içindeki büyük ölçekli süreksizlik ağlarının ve yapısal heterojenliğin tam olarak karakterize edilememesine, dolayısıyla zemin davranışının olduğundan farklı tahmin edilmesine neden olabilmektedir (Alejano, 2024; Palamakumbura vd., 2020). Arazi koşullarının zorlukları ve kısıtlı zaman dilimleri, saha jeologlarının gözlemlerine dayalı veri toplama kalitesini doğrudan etkileyerek, ofis ortamındaki modelleme sürecine hatalı veya eksik metadata aktarılmasına zemin hazırlamaktadır (Shipton vd., 2019).

Uzaktan algılama teknolojileri, geleneksel haritalama yöntemlerinin aksine, personeli tehlikeli şev yüzeylerine yaklaştırmaksızın yüksek çözünürlüklü verilerin güvenli bir şekilde toplanmasını sağlayarak iş kazası risklerini minimize etmektedir (Nguyen vd., 2023; Menegoni vd., 2019). Ayrıca bu dijital iş akışları, geleneksel manuel ölçümlerle günler süren veri toplama ve analiz süreçlerini önemli ölçüde kısaltarak, maden sahalarında hızlı ve eş zamanlı karar alma mekanizmalarının etkinliğini artırmaktadır (Giordan vd., 2020; Şener, 2019). Buna ek olarak, söz konusu verilerin dijital bir arşiv olarak depolanması, sahadaki jeoteknik değişimlerin geçmişten günümüze karşılaştırmalı olarak izlenmesine ve gerektiğinde verilerin yeniden incelenmesine olanak tanımaktadır (Bamford vd., 2020). Böylece, sahadaki süreksizliklerin zamansal değişimi periyodik LiDAR taramaları ile izlenerek, yapısal deformasyonlar henüz kritik boyuta ulaşmadan tespit edilebilmekte ve proaktif müdahale stratejileri geliştirilebilmektedir (Robiati vd., 2019). Bu teknolojilerin sağladığı erişim kolaylığı ve yüksek veri tutarlılığı, özellikle konvansiyonel izleme araçlarının kurulumunda zorluk yaşanan yüksek maliyetli veya tehlikeli şevlerde, İHA ve benzeri platformların güvenilir bir alternatif olarak benimsenmesini teşvik etmektedir (Guerriero vd., 2024; Söğütçü, 2024). Bununla birlikte, manuel yöntemlere kıyasla veri toplama aşamasındaki

zamansal tasarruf, mühendislerin daha geniş alanları kapsamlı bir şekilde taramasına olanak tanıyarak maden sahasındaki jeolojik karakterizasyonun kalitesini ve kapsama alanını önemli ölçüde artırmaktadır (Hellmy vd., 2024; Fazio vd., 2019). Ek olarak, İHA destekli fotogrametrik yöntemlerin sunduğu düşük maliyetli ve hızlı veri işleme kapasitesi, jeolojik haritalama süreçlerinde verimliliği optimize ederken aynı zamanda mühendislik ekiplerinin saha içi erişim kısıtlamalarını ortadan kaldırmaktadır (Ulusoy vd., 2017).

Öte yandan, İHA verilerinin sağladığı sürekli ve tekrarlanabilir görsel kayıtlar, saha erişiminin tamamen kaybolduğu durumlarda dahi şev performansının tasarım hedefleriyle uyumunu denetlemeye ve zaman içindeki yapısal bozulmaları izlemeye olanak tanımaktadır (Medinac ve Esmaeili, 2020). Böylelikle, operasyonel sürekliliği sekteye uğratmadan elde edilen bu dijital veriler, madencilik faaliyetlerinin jeoteknik riskler doğrultusunda dinamik olarak revize edilmesini sağlayarak saha yönetiminde hata payını minimize etmektedir (Bar vd., 2020; Sun vd., 2024). Sonuç olarak, geleneksel manuel ölçümlerden dijital yöntemlere geçiş, maden işletmelerinde yalnızca güvenlik standartlarını yükseltmekle kalmayıp, aynı zamanda karmaşık jeolojik yapıların daha şeffaf ve analitik bir yaklaşımla yönetilmesini sağlayarak endüstriyel verimliliği optimize etmektedir (Ünlü ve Akçay, 2025; Yonli vd., 2023). Bu teknolojik dönüşüm, maden sahalarındaki yapısal süreksizliklerin dijital ikizler üzerinden daha doğru modellenmesini sağlayarak, jeoteknik risklerin önceden tahmin edilmesinde ve operasyonel kararların bilimsel temellere dayandırılmasında kritik bir rol oynamaktadır (Tsachouridis vd., 2022; Yiğit vd., 2023). Özellikle aktif ocaklarda karşılaşılan ve geleneksel yöntemlerle erişimi güç olan yüksek şevlerde, temassız veri toplama ve dijital haritalama teknolojileri, operasyonel sürekliliği sağlarken aynı zamanda stabilite analizlerinin doğruluğunu maksimize etmektedir

(Nilufer vd., 2024; Zapico vd., 2021). Bu bağlamda, dijital yüzey modelleri ve yoğun nokta bulutları üzerinden yürütülen geometrik analizler, patlatma tasarımları ve stok yönetimi gibi kritik operasyonel süreçlerde hata payını kabul edilebilir düzeylere çekerek ekonomik verimliliği desteklemektedir (Kun ve Güler, 2019; Yüksel, 2022). Ayrıca, bu yöntemler sayesinde sahadaki volümetrik değişimlerin hassas takibi, kazı ve döküm operasyonlarının daha kontrollü yürütülmesine ve kaynak yönetimi süreçlerinin optimize edilmesine doğrudan katkı sağlamaktadır (Yiğit ve Şenol, 2025).

Sonuç

Madencilik sektöründe İHA ve LiDAR tabanlı dijital teknolojilerin entegrasyonu, klasik yersel ölçümlerin yol açtığı iş gücü, zaman maliyeti ve üretim kesintisi gibi zorlukların büyük ölçüde aşılmasını sağlamaktadır. Bu çalışma, söz konusu dönüşümün yalnızca teknik bir yenilik olmadığını, aynı zamanda süreksizliklerin daha kapsamlı ve tekrarlanabilir biçimde değerlendirilmesini sağlayan bütünleşik bir mühendislik yaklaşımı sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, gelecekte geliştirilecek otomatik ölçüm ve karar destek sistemleri için bilimsel bir temel oluşturarak daha güvenli, sürdürülebilir ve veriye dayalı maden tasarım süreçlerinin geliştirilmesine olanak tanır.

Gelecekte yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmalarının İHA ve LiDAR tabanlı veri setleriyle bütünleştirilmesi, süreksizliklerin otomatik olarak tanımlanmasını ve jeoteknik karakterizasyonun gerçek zamanlı, daha hızlı ve daha tutarlı biçimde yürütülmesini sağlayarak karmaşık kaya kütlelerinin davranışının öngörülmesine katkıda bulunacaktır. Buna ek olarak, dijitalleşme süreçlerinin madencilik ekosisteminde yaygınlaşması, çalışanların yeni yetkinlikler kazanmasını zorunlu kılarak iş gücü profilinde

stratejik bir dönüşümü ve operasyonel standartların yüksek teknoloji doğrultusunda yeniden tanımlanmasını beraberinde getirecektir.

Bu evrim, maden sahalarının dijital ikizleri üzerinden yürütülen analitik modellemelerin endüstriyel standartları belirlediği yeni bir dönemin kapısını aralamaktadır. Önümüzdeki dönemde yapay zekâ destekli otomatik analizlerin İHA ve LiDAR verileriyle, dijital ikizler ve çok kaynaklı sensör sistemleriyle bütünleştirilmesi; yer altı ve yer üstü operasyonlarında kaynak verimliliğini artıran, güvenliği güçlendiren ve bilimsel karar alma süreçlerini destekleyen öngörücü bir mühendislik vizyonunun gelişmesini sağlayacaktır.

Bu doğrultuda geliştirilecek İHA ve LiDAR tabanlı otonom veri işleme çerçeveleri, geleneksel manuel ölçümlerin zaman ve erişim kısıtlarını azaltarak insan hatasını en aza indirecek, jeoteknik kestirimlerin doğruluğunu artıracak ve madencilikte otomatik ölçüm teknolojilerinin bilimsel temelli kullanımını hızlandıracaktır.

Kaynakça

Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N., Lim, M., & Lato, M. (2013). Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1), 80–97. <https://doi.org/10.1002/esp.3493>

Ağca, M., Gültekin, N., & Kaya, E. (2020). İnsansız Hava Aracından Elde Edilen Veriler ile Kaya Düşme Potansiyelinin Değerlendirilmesi: Adam Kayalar Örneği, Mersin. *Geomatik*, 5(2), 134–145. <https://doi.org/10.29128/geomatik.595574>

Alabede, L. (2024). Applying drone-based photogrammetry to optimize pit-wall stability, slope steepening, and geotechnical risk forecasting. *International Journal of Electronic Devices and*

Networking, 5(2), 60–71.
<https://doi.org/10.22271/27084477.2024.v5.i2a.88>

Alabede, L. A. (2017). Developing Optimized Drone Systems For Surface-Mine Slope Monitoring And Early-Stage Crack Detection. Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research). <https://doi.org/10.5281/zenodo.17706790>

Alabede, L. A. (2025). Using AI-integrated drones to evaluate blasting impacts on slope stability within open-pit mining operations. International Journal of Research in Civil Engineering and Technology, 6(2), 92–103.
<https://doi.org/10.22271/27078264.2025.v6.i2b.102>

Alabede, L. A., & Maimako, S. M. (2021). Deploying underground drones for real-time void detection, stope stability assessment, and predictive hazard analysis. Global Journal of Engineering and Technology Advances, 9(3), 170–186.
<https://doi.org/10.30574/gjeta.2021.9.3.0178>

Albarelli, D. S. N. A., Mavrouli, O., & Nyktas, P. (2021). Identification of potential rockfall sources using UAV-derived point cloud. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(8), 6539–6561. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02306-2>

Alejano, L. R. (2024). Rock Mass Classification Systems: A Useful Rock Mechanics Tool, Often Misused. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58(10), 11147–11167.
<https://doi.org/10.1007/s00603-024-04087-y>

Alemdağ, S., Gürocak, Z., & Oktay, C. Ö. (2015). Bağlarbaşı-Tekke (Gümüşhane) Karayolundaki Kaya Şevlerinin Kinematik ve Limit Denge Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 1, 1. <https://doi.org/10.21324/dacd.61132>

Allen, A., Paraskevopoulou, C., Smith, J., Bedi, A., & Invernici, M. (2023). Utilising remote sensing to digitally map discontinuities in tunnelling (pp. 2381–2389). <https://doi.org/10.1201/9781003348030-286>

An, S., Liang, Y., Xu, Y., Wang, X., & Zhou, D. (2024). Ground subsidence monitoring in based on UAV-LiDAR technology: a case study of a mine in the Ordos, China. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00762-0>

Ananin, A., Tungushbayeva, Z., Nurshaiykova, G., Akylbaeva, A., Imashev, A., Zeitinova, Sh., & Gabitova, A. (2025). Using Geoinformation Technologies for Evaluation and Resilience Forecast of Open Pit Walls. *Journal of Human Earth and Future*, 6(3), 571–584. <https://doi.org/10.28991/hef-2025-06-03-06>

Andrews, B., Roberts, J. J., Shipton, Z. K., Bigi, S., Tartarello, M. C., & Johnson, G. (2019). How do we see fractures? Quantifying subjective bias in fracture data collection. *Solid Earth*, 10(2), 487–516. <https://doi.org/10.5194/se-10-487-2019>

Arzu, A. K., Kerem, K., Mustafa, & Haluk, A. (2018). Mudurnu vadisi kompleks kinematik yenilme mekanizmalarının İHA teknolojisi ve hat etüdləri kullanılarak değ erlendirilmesi. *OpenMETU (Middle East Technical University)*. <https://hdl.handle.net/11511/87095>

Atici, A., Paksoy, M. F., & Kabadayı, A. (2024). Maden Sahalarındaki Stok Miktarının İHA Yardımıyla Belirlenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(1), 8–13. <https://doi.org/10.53030/tufod.1489122>

Bakun-Mazor, D., Ben-Ari, Y., Marco, S., & Ben-Dor, E. (2024). Predicting Mechanical Properties of Carbonate Rocks Using Spectroscopy Across 0.4–12 μm . *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(11), 8951–8968. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04035-w>

Bamford, T., Medinac, F., & Esmaeili, K. (2020). Continuous Monitoring and Improvement of the Blasting Process in Open Pit Mines Using Unmanned Aerial Vehicle Techniques. *Remote Sensing*, 12(17), 2801. <https://doi.org/10.3390/rs12172801>

Banerjee, B. P., & Raval, S. (2022). Mapping Sensitive Vegetation Communities in Mining Eco-space using UAV-LiDAR. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1). <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00509-w>

Bar, N., Kostadinovski, M., Tucker, M. S., Byng, G., Rachmatullah, R. I., Maldonado, A., Pötsch, M., Gaich, A., McQuillan, A., & Yacoub, T. (2020). Rapid and robust slope failure appraisal using aerial photogrammetry and 3D slope stability models. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(5), 651–658. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.013>

Battulwar, R., Zare-Naghadehi, M., Emami, E., & Sattarvand, J. (2021). A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 920–936. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.008>

Beni, T., Gigli, G., Lombardi, L., Carlà, T., & Casagli, N. (2022). Route Stability Index (RSI): an Index for the Assessment of Rockfall-Related Hazards in Rock Slopes Equipped for Sport

Climbing. *Geoheritage*, 14(3). <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00715-7>

Benrabah, A., Senent, S., & Bordehore, L. J. (2025). Discontinuity Mapping in Natural Caves: A Comparative Study of Manual Data Collection, Structure from Motion, and iPhone 13 Pro Max. *Civil And Environmental Engineering Reports*, 35(4), 81–90. <https://doi.org/10.59440/ceer/208299>

Bernardini, M., Paredes, C., Sanchidrián, J. A., Segarra, P., & Gómez, S. M. (2022). On the Influence of Sampling Scale on the In Situ Block Size Distribution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(9), 5723–5738. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02953-1>

Biber, K., Khan, S. D., Seers, T., Sarmiento, S., & Lakshmikantha, M. R. (2018). Quantitative characterization of a naturally fractured reservoir analog using a hybrid lidar-gigapixel imaging approach. *Geosphere*, 14(2), 710–730. <https://doi.org/10.1130/ges01449.1>

Boileau, S., Saunders, E., & Kamp, C. (2025). Operational open pit ground support design at Rainy River Mine. 1–15. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2535_22

Bordehore, L. J., Albán, L. G., Valenzuela, R. C., Bravo, G., Menoscal, M., Larreta, E., Garcés, D., & Mulas, M. (2023). An Analysis of Slope Stability in the Penipe–Baños Road by Applying Empirical Methods, Kinematic Analysis and Remote Photogrammetry Techniques. *Geosciences*, 13(12), 366. <https://doi.org/10.3390/geosciences13120366>

Buyer, A. A., & Schubert, W. (2017). Calculation the Spacing of Discontinuities from 3D Point Clouds. *Procedia Engineering*, 191, 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.181>

Caccia, A., Palma, B., & Parise, M. (2021). Comparing traditional geomechanical and remote sensing techniques for rock mass characterization; <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10147>

Canales, C., & Sellers, E. (2020). Structural recognition and rock mass characterization in underground mines: A UAV and LiDAR map ping bas ed appr oach. 1302–1312. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2063_97

Cerekwicki, M., Cerekwicka, M., Machete, R., Falcão, A. P., Gonçalves, A. B., Sikora, P., & Silva, M. C. e. (2026). Application of terrestrial laser scanning for the geometric characterization of discontinuities in limestone quarry faces. *Geodesy and Cartography*, 52(2), 90–98. <https://doi.org/10.3846/gac.2026.22897>

Chen, Z., Qin, S., Tao, Y., Rao, W., Qi, J., & Yan, J. (2026). The Multi-Level Classification Strategy for Rock Surface 3D Point Clouds. *Journal of Progress in Civil Engineering*, 8(1), 47–55. [https://doi.org/10.53469/jpce.2026.08\(01\).08](https://doi.org/10.53469/jpce.2026.08(01).08)

Cirillo, D., Zappa, M., Tangari, A. C., Brozzetti, F., & Ietto, F. (2024). Rockfall Analysis from UAV-Based Photogrammetry and 3D Models of a Cliff Area. *Drones*, 8(1), 31. <https://doi.org/10.3390/drones8010031>

Daghigh, H., Tannant, D. D., Daghigh, V., Lichti, D. D., & Lindenbergh, R. (2022). A critical review of discontinuity plane extraction from 3D point cloud data of rock mass surfaces.

Computers & Geosciences, 169, 105241.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105241>

Dong, X., Xu, Q., Huang, R., Liu, Q., & Kieffer, D. S. (2019). Reconstruction of Surficial Rock Blocks by Means of Rock Structure Modelling of 3D TLS Point Clouds: The 2013 Long-Chang Rockfall. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(2), 671–689.
<https://doi.org/10.1007/s00603-019-01935-0>

Duarte, J., Sousa, F. de A. S. de, & Valente, B. D. (2021). Use of geotechnologies in mining planning in Quarries carbonated rocks - Contribution to the digital transition (Industry 4.0). *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 906(1), 12015.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012015>

Ellmann, A., Kütimets, K., Varbla, S., Väli, E., & Kanter, S. (2021). Advancements in underground mine surveys by using SLAM-enabled handheld laser scanners. *Survey Review*, 54(385), 363–374. <https://doi.org/10.1080/00396265.2021.1944545>

Ersoy, H., Karahan, M., Sünnetçi, M. O., & Ersoy, A. F. (2024). Torul-Kürtün (Gümüşhane) karayolu şevlerinde kaya düşme potansiyelinin 3 boyutlu analizlerle araştırılması ve koruma yöntemlerinin değerlendirilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
<https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1485466>

Eyre, M., Wetherelt, A., & Coggan, J. (2016). Evaluation of automated underground mapping solutions for mining and civil engineering applications. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(4), 46011. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.10.046011>

Fahle, L., Holley, E., Walton, G., Petruska, A. J., & Brune, J. F. (2022). Analysis of SLAM-Based Lidar Data Quality Metrics for

Geotechnical Underground Monitoring. Mining Metallurgy & Exploration, 39(5), 1939–1960. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00664-3>

Fazio, N. L., Perrotti, M., Andriani, G. F., Mancini, F., Rossi, P., Castagnetti, C., & Lollino, P. (2019). A new methodological approach to assess the stability of discontinuous rocky cliffs using in-situ surveys supported by UAV-based techniques and 3-D finite element model: a case study. Engineering Geology, 260, 105205. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105205>

Fener, M., & Varol, N. (2024). Quantitative Risk Assessment of Rock Instabilities Threatening Manazan Caves, Karaman, Türkiye. Geoheritage, 16(2). <https://doi.org/10.1007/s12371-024-00951-z>

Francioni, M., Salvini, R., Stead, D., Giovannini, R., Riccucci, S., Vanneschi, C., & Gulli, D. (2015). An integrated remote sensing-GIS approach for the analysis of an open pit in the Carrara marble district, Italy: Slope stability assessment through kinematic and numerical methods. Computers and Geotechnics, 67, 46–63. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.02.009>

Gerstner, R., Fey, C., Kuschel, E., Valentin, G., Voit, K., & Zangerl, C. (2023). Polyphase rock slope failure controlled by pre-existing geological structures and rock bridges. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(9). <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03382-2>

Gigli, G., Morelli, S., Fornera, S., & Casagli, N. (2012). Terrestrial laser scanner and geomechanical surveys for the rapid evaluation of rock fall susceptibility scenarios. Landslides, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0374-0>

Giordan, D., Adams, M., Aicardi, I., Alicandro, M., Allasia, P., Baldo, M., Berardinis, P. D., Dominici, D., Godone, D., Hobbs, P., Lechner, V., Niedzielski, T., Piras, M., Rotilio, M., Salvini, R., Segor, V., Sotier, B., & Troilo, F. (2020). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(7), 3437–3481. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>

Gómez, S. M., Sanchidrián, J. A., Segarra, P., & Bernardini, M. (2023). A Non-parametric Discrete Fracture Network Model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(5), 3255–3278. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03194-y>

Gu, Z., Xiong, X., Yang, C., & Cao, M. (2024). A method for analyzing discontinuities characterization using the integration of underground drift point cloud with 3DEC software. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(6), 102744. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102744>

Guerriero, L., Corona, M. A., Martire, D. D., Francioni, M., Limongiello, M., Tufano, R., & Calcaterra, D. (2024). Rockfall susceptibility analysis of the “San Michele Arcangelo” historic trail (Central Italy) based on virtual outcrops and multiple propagation models. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(7). <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03764-0>

Guill, A. J. R., Tomás, R., González, M. C., & Fernández, A. A. (2016). Programas de código abierto para la extracción semiautomática de propiedades de las discontinuidades del macizo rocoso a partir de nubes de puntos 3D. *Dialnet (Universidad de la Rioja)*, 165–174. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6459560>

Gül, Y. (2019). Açık Maden İşletmelerinde İnsansız Hava Aracı (İHA) Uygulamaları. Türkiye Jeoloji Bülteni / Geological Bulletin of Turkey. <https://doi.org/10.25288/tjb.519506>

Hellmy, M. A. A. M., Aripin, F., Jaapar, R. A., Mohamad, Z., Muhammad, R. F., & Omar, R. C. (2024). Comparative Study of UAV LiDAR, Terrestrial Laser Scanner, and iPhone 15 Pro LiDAR in Rock Discontinuities Characterization for Rockfall Analysis. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-7226>

Hellmy, M. A. A. M., Muhammad, R. F., Shuib, M. K., Ng, T. F., Abdullah, W. H., Bakar, A. A., & Kugler, R. L. (2019). Rock Slope Stability Analysis based on Terrestrial LiDAR and Scanline Survey on Karst Hills in Kinta Valley Geopark, Perak, Peninsular Malaysia. *Sains Malaysiana*, 48(11), 2595–2604. <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4811-29>

Huang, M., Ninić, J., & Zhang, Q. (2020). BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108, 103677. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103677>

Hurtgen, M., & Detert, R. (2024). A Data-Driven Approach to Mapping Rock Mass Discontinuities. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1435(1), 12006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1435/1/012006>

Ivanovski, I., Nedelkovska, N., Petrov, G., Jovanovski, M., & Nikolovski, T. (2023). Comparison Between Traditional And Contemporary Methods For Data Recording In Structural Geology. *Geologica Macedonica*, 37(2), 119–133. <https://doi.org/10.46763/geol23372119i>

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2010). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 61(1), 5–28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>

Järvenpää, M., Siikanen, S., Bogdanov, K., Savolainen, M., & Paavola, M. (2026). Automated Drone Networks for Exploration Targeting and Other Mining Surveys. *Geological Society London Special Publications*, 559(1). <https://doi.org/10.1144/gslspecpub2024-124>

Ji, Y., Song, S., Chen, J., Xue, J., Yan, J., Zhang, Y., Sun, D., & Wang, Q. (2024). Automatic identification of discontinuities and refined modeling of rock blocks from 3D point cloud data of rock surfaces. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(5), 3093–3106. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.04.039>

Jones, E., Sofonia, J., Cardenas, C. C., Hrabar, S., & Kendoul, F. (2019). Advances and applications for automated drones in underground mining operations. *Deep Mining*, 323–334. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1952_24_jones

Kabadayı, A. (2022a). Maden Sahasının İnsansız Hava Aracı Yardımıyla Fotogrametrik Yöntemle Haritalanması. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(1), 19–23. <https://doi.org/10.51534/tiha.1130929>

Kabadayı, A. (2022b). Açık Maden Ocağında Hacim Hesabı için GNSS ve İHA Ölçümlerinin Karşılaştırıldığı Bir Çalışma Örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 52–57. <https://doi.org/10.51534/tiha.1179910>

Karahan, M., Sünnetçi, M. O., Ersoy, H., & İpek, A. (2024). 3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri ile Birleşik Kaya Islah

Uygulamalarının Değerlendirilmesi: Işıklar (Akçaabat, Trabzon) Örneği. DergiPark (Istanbul University), 48(2), 179–202. <https://doi.org/10.24232/jmd.1528065>

Kayen, R., & Russo, B. M. (2024). Computational-Rock Mechanics in Pedagogy and Practice. <https://doi.org/10.56952/arma-2024-0692>

Kekeç, B., Bilim, N., Karakaya, E., & Ghiloufi, D. (2021). Applications Of Terrestrial Laser Scanning (Tls) in Mining: A REVIEW. Turkey Lidar Journal. <https://doi.org/10.51946/melid.927270>

Koyuncu Teknik Cihazlar. (2025). El tipi LiDAR cihaz ile karayolu tüneli ölçümü [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PkLvWvpultE>

Kun, M., & Güler, Ö. (2019). İnsansız Görüntüleme Sistemleri ile Elde Edilen Sayısal Yüzey Modellerinin Mermer Madenciliğinde Kullanımı. Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik, 21(63), 1005–1013. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2019216328>

Kun, M., & Özcan, B. (2019). Maden ocaklarında insansız hava aracı kullanımı: örnek bir saha çalışması. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(2), 554–564. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.624484>

Lee, H.-K., Song, M. K., Jeong, Y.-O., & Lee, S. S. (2024). Development of an Automatic Rock Mass Classification System Using Digital Tunnel Face Mapping. Applied Sciences, 14(19), 9024. <https://doi.org/10.3390/app14199024>

Li, M., Xiu, Z., Han, J., Meng, F., Wang, F., & Ji, H. (2024). Characterization and Stability Analysis of Rock Mass

Discontinuities in Layered Slopes: A Case Study from Fushun West Open-Pit Mine. *Applied Sciences*, 14(23), 11330. <https://doi.org/10.3390/app142311330>

Li, Y., & Zhan, Z. (2025). Brief Analysis on Application Advantages of UAV Surveying and Mapping Technology in Open-Pit Mines. *International Journal of Applied Science*, 8(2). <https://doi.org/10.30560/ijas.v8n2p130>

Ling, J., Li, X., Li, H., Shen, Y., Rui, Y., & Zhu, H. (2022). Data acquisition-interpretation-aggregation for dynamic design of rock tunnel support. *Automation in Construction*, 143, 104577. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104577>

Liu, Y., Hua, W., Chen, Q., & Liu, X. (2024). Characterization of Complex Rock Mass Discontinuities from LiDAR Point Clouds. *Remote Sensing*, 16(17), 3291. <https://doi.org/10.3390/rs16173291>

Madear, C., Bonduà, S., Madear, G., & Klen, A. M. (2023). Discontinuity Analysis at Ruschita Marble Quarry Using Televiewer and Scanline Techniques. *Revista Minelor*, 29(2), 30–41. <https://doi.org/10.2478/minrv-2023-0012>

Madjid, M. Y. A., Vandeginste, V., Hampson, G. J., Jordan, C., & Booth, A. (2018). Drones in carbonate geology: Opportunities and challenges, and application in diagenetic dolomite geobody mapping. *Marine and Petroleum Geology*, 91, 723–734. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.02.002>

Mammoliti, E., Stefano, F. D., Fronzi, D., Mancini, A., Malinverni, E. S., & Tazioli, A. (2022). A Machine Learning Approach to Extract Rock Mass Discontinuity Orientation and

Spacing, from Laser Scanner Point Clouds. *Remote Sensing*, 14(10), 2365. <https://doi.org/10.3390/rs14102365>

Medici, G., Ling, F., & Shang, J. (2023). Review of discrete fracture network characterization for geothermal energy extraction. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1328397>

Medinac, F., & Esmaeili, K. (2020). Integrating unmanned aerial vehicle photogrammetry in design compliance audits and structural modelling of pit walls. 1439–1454. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2025_99

Mehrishal, S., Song, J., Kim, J., Shao, Y., & Lim, J. (2025). Enhanced 3D Analysis of Rock Mass Discontinuities: A Novel Approach to Joint Set Spacing Calculation. <https://doi.org/10.56952/arma-2025-0500>

Menegoni, N., Giordan, D., Corvò, S., Bonazzi, M., Petagine, A., Guerra, M., Foletti, M., Arese, E., Perotti, C., & Maino, M. (2025). Fracture Network and Rock Slope Stability Analysis of Quarry Areas by Digital Outcrop Modelling and open-sources Algorithms: an example from Montorfano (Southern Alps, Italy). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-6906>

Menegoni, N., Giordan, D., Perotti, C., & Tannant, D. D. (2019). Detection and geometric characterization of rock mass discontinuities using a 3D high-resolution digital outcrop model generated from RPAS imagery – Ormea rock slope, Italy. *Engineering Geology*, 252, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.02.028>

Minh, D. T., & Dung, N. B. (2023). Applications of UAVs in mine industry: A scoping review. *Journal of Sustainable Mining*, 22(2), 128–145. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1384>

Monsalve, J. J., Baggett, J. G., Bishop, R. C., & Ripepi, N. (2018). Application of laser scanning for rock mass characterization and discrete fracture network generation in an underground limestone mine. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(1), 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.11.009>

Mosch, S., Nikolayew, D., Ewiak, O., & Siegesmund, S. (2010). Optimized extraction of dimension stone blocks. *Environmental Earth Sciences*, 63, 1911–1924. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0825-7>

Mutluhan, A., İsmail, D., Özgün, O., Ali, Ahmet, O., Müge, A., & Tamer, T. (2018). The use of point clouds for the generation of digital surface models during 3-d rockfall analyses. *OpenMETU (Middle East Technical University)*. <https://hdl.handle.net/11511/75254>

Nguyen, T., Dempers, G., Seymour, C., & Harris, M. (2023). Using drone photogrammetry to optimise geotechnical analysis through efficient data collection. 477–490. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2335_31

Nilufer, K. B. A., Karen, B., Lukas, F., Chad, W., & Emre, Ö. (2024). Mixed-Reality Geotechnical Cell Mapping for Slope Stability Assessment at Rio Tinto Bingham Canyon Mine. <https://doi.org/10.56952/arma-2024-0851>

Nizar, N. H. A., Ariffin, M., Khong, L. X., & Zabidi, H. (2024). Evaluation of Rock Mass Rating in Underground Mine Bukit

Kachi Using UAV Photogrammetry Method. *Applied Mechanics and Materials*, 920, 189–196. <https://doi.org/10.4028/p-11vlc2>

Noroozi, M., Kakaie, R., & S, E. (2015). 3D Geometrical-Stochastical Modeling of Rock mass joint networks: Case study of the Right Bank of Rudbar Lorestan Dam plant. *Journal of Geology and Mining Research*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.5897/jgmr14.0213>

Önal, G., Fidan, D., & Ulvi, A. (2024). Açık Ocak Maden Sahalarının İHA Teknolojisi Kullanılarak Tespiti ve Değerlendirilmesi. *DergiPark (Istanbul University)*, 6(2), 31–38. <https://doi.org/10.53030/tufod.1585916>

Öppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L. H., Derron, M., & Metzger, R. (2009). Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(3), 1003–1019. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1003-2009>

Palamakumbura, R., Krabbendam, M., Whitbread, K., & Arnhardt, C. (2020). Data acquisition by digitizing 2-D fracture networks and topographic lineaments in geographic information systems: further development and applications. *Solid Earth*, 11(5), 1731–1746. <https://doi.org/10.5194/se-11-1731-2020>

Park, S., & Choi, Y. (2020). Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review. *Minerals*, 10(8), 663. <https://doi.org/10.3390/min10080663>

Patra, D., Baylis, C., Ranasinghe, P., Banerjee, B. P., & Raval, S. (2025). A UAV Laser Scanning Technique for Automated Mapping of In-Stope Structural Discontinuity Sets in Underground

<https://doi.org/10.1109/igarss55030.2025.11243341>

Peralta, T., Menoscal, M., Bravo, G., Rosado, V., Vaca, V., Capa, D., Mulas, M., & Bordehore, L. J. (2024). Rock Slope Stability Analysis Using Terrestrial Photogrammetry and Virtual Reality on Ignimbritic Deposits. *Journal of Imaging*, 10(5), 106. <https://doi.org/10.3390/jimaging10050106>

Perozzo, M., Menegoni, N., Foletti, M., Poggi, E., Benedetti, G., Carretta, N., Ferro, S., Rivola, W., Seno, S., Giordan, D., & Maino, M. (2024). Evaluation of an innovative, open-source and quantitative approach for the kinematic analysis of rock slopes based on UAV based Digital Outcrop Model: A case study from a railway tunnel portal (Finale Ligure, Italy). *Engineering Geology*, 340, 107670. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107670>

Rasti, A., Ebrahimi, N., Tabaei, M., & Adarmanabadi, H. R. (2021). Maximize mining exploitation efficiency of the quarry: a case study. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 36(5), 21–31. <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.5.3>

Ren, H., Yanling, Z., Xiao, W., & Hu, Z. (2019). A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(3), 320–333. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00264-5>

Ribas, G. P., Gontijo, A. A., Matos, A. R., Gomes, L. J., Silva, J. E. da, Barros, M. B. de A., & Cacciari, P. P. (2023). Workflow for Discontinuity Set Characterization in Rock Masses Using 3D Digital Outcrop Models Derived from UAV Survey in an Iron Ore Mine Slope. <https://doi.org/10.56952/arma-2023-0336>

Robiati, C., Eyre, M., Vanneschi, C., Francioni, M., Venn, A., & Coggan, J. (2019). Application of Remote Sensing Data for Evaluation of Rockfall Potential within a Quarry Slope. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(9), 367. <https://doi.org/10.3390/ijgi8090367>

Rodríguez-Servín, M. G., Arreygue-Rocha, J. E., Rodríguez, H., Báez, M. L., Díaz-Barriga, J. M., & Morales-Rosales, L. A. (2025). Comparative Analysis of Rock Mass Characterization Techniques to Recommend Geomechanical Prevention Mechanisms Using UAV Photogrammetry. *Applied Sciences*, 15(21), 11388. <https://doi.org/10.3390/app152111388>

Salvini, R., Mastrococco, G., Esposito, G., Bartolo, S. D., Coggan, J., & Vanneschi, C. (2018). Use of a remotely piloted aircraft system for hazard assessment in a rocky mining area (Lucca, Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 287–302. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-287-2018>

Santa, C., Fernandes, I., & Chaminé, H. I. (2024). Geomechanical Classifications, Geotechnical Indexes, and Fractured Rock Media: the Influence of Discontinuities on the Rock Masses Description. *Civil And Environmental Engineering Reports*, 34(4), 43–54. <https://doi.org/10.59440/ceer/193932>

Şener, E. (2019). İnsansız Hava Araçları Kullanılarak Olası Kaya Düşmelerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı 3D Modellenmesi: Kasımlar Köyü (Isparta-Türkiye) Örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(2), 419–426. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.501482>

Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P., & Hassanalian, M. (2020). A Comprehensive Review of Applications of Drone

Technology in the Mining Industry. Drones, 4(3), 34.
<https://doi.org/10.3390/drones4030034>

Shipton, Z. K., Roberts, J. J., Comrie, E. L., Kremer, Y., Lunn, R. J., & Caine, J. S. (2019). Fault fictions: systematic biases in the conceptualization of fault-zone architecture. *Strathprints: The University of Strathclyde Institutional Repository (University of Strathclyde)*, 496(1), 125–143. <https://doi.org/10.1144/sp496-2018-161>

Shrivastava, A. (2025). Unmanned aerial vehicles (UAV) in mining sector: Enhancing productivity and safety. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering*, 239(15), 2219–2235.
<https://doi.org/10.1177/09544100251352429>

Singh, C., Mishra, V., & Jain, K. (2023). High-Resolution Mapping Of Forested Hills Using Real-Time UAV Terrain Following. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 665–671.
<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-x-1-w1-2023-665-2023>

Singh, P., Murthy, V., Kumar, D., & Raval, S. (2024). A comprehensive review on application of drone, virtual reality and augmented reality with their application in dragline excavation monitoring in surface mines. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 15(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2327399>

Soares, G. B., Silva, H. S. e, & Mata, J. F. C. da. (2024). Review On The Use Of Remotely Piloted Aircraft (RPA) in the Mining Industry. *Revista Foco*, 17(8).
<https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n8-132>

Söğütçü, G. (2024). Low cost deformation analysis of open pit mine by using unmanned aerial vehicles (UAV) technology, Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Stead, D., Donati, D., Wolter, A., & Sturzenegger, M. (2019). Application of Remote Sensing to the Investigation of Rock Slopes: Experience Gained and Lessons Learned. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(7), 296. <https://doi.org/10.3390/ijgi8070296>

Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009). Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 267–287. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-267-2009>

Sun, J., Yuan, G., Song, L., & Zhang, H. (2024). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Landslide Investigation and Monitoring: A Review. *Drones*, 8(1), 30. <https://doi.org/10.3390/drones8010030>

Sun, W., Qu, X., Wang, J., Jin, F., & Li, Z. (2024). Multi-Platform Point Cloud Registration Method Based on the Coarse-To-Fine Strategy for an Underground Mine. *Applied Sciences*, 14(22), 10620. <https://doi.org/10.3390/app142210620>

Tariq, Dr. M. (2021). The Role of Drones in Enhancing Mining Operations and Site Monitoring. 2(4), 11–18. <https://doi.org/10.71465/ajme1967>

Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J. L., Pagán, J. I., Asensio, J. L., & Ruffo, M. (2020). Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un

vehículo aéreo no tripulado. *Revista de Teledetección*, 55, 1.
<https://doi.org/10.4995/raet.2020.13168>

Tsachouridis, S., Pavloudakis, F., Pilalidis, K., Myronidis, L., & Roumpos, C. (2022). Monitoring slope stability in surface mines: are low-cost UAVs used for excavated rock volume calculations capable of early detection of displacements? *MATEC Web of Conferences*, 373, 52.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/202237300052>

Tsachouridis, S., Pavloudakis, F., Sachpazis, C., & Tsioukas, V. (2025). Monitoring Slope Stability: A Comprehensive Review of UAV Applications in Open-Pit Mining. *Land*, 14(6), 1193.
<https://doi.org/10.3390/land14061193>

Tuan, N., Anh. (2015). Influence of geometrical uncertainties and modeling method on stability analysis of fractured rock masses: application to open-pit mines.
<http://www.theses.fr/2015LORR0296/document>

Ulusoy, İ., Şen, E., Tuncer, A., Sönmez, H., & Bayhan, H. A. (2017). 3D Multi-view Stereo Modelling of an Open Mine Pit Using a Lightweight UAV. *Türkiye Jeoloji Bülteni / Geological Bulletin of Turkey*, 60(2), 223–242. <https://doi.org/10.25288/tjb.303032>

Umili, G., Bonetto, S. M. R., & Ferrero, A. M. (2018). An integrated multiscale approach for characterization of rock masses subjected to tunnel excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(3), 513–522.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.01.007>

Umili, G., Carriero, M. T., Taboni, B., Migliazza, M., & Ferrero, A. M. (2024). A New Analytical Solution for Calculating

Rock Block Volume. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(5), 3109–3120. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03728-y>

Ünlü, M., & Akçay, Ö. (2025). A case study on deformation analysis of an open-pit mine using UAV photogrammetry. *Mersin Photogrammetry Journal*, 7(1), 9–21. <https://doi.org/10.53093/mephoj.1628236>

Utlü, M., Öztürk, M. Z., & Şimşek, M. (2021). Evaluation of Rockfall Hazard Based On UAV Technology And 3D Rockfall Simulations. In *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-681240/v1>

Wang, P., Huang, B., Gao, Y., & Cai, M. (2024). Identification and automatic recognition of discontinuities from 3D point clouds of rock mass exposure. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(8), 4982–5000. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.09.020>

Wu, J. (2025). Enhancing Quarry Management Using RTK-UAV LiDAR. 11–16. <https://doi.org/10.1109/r10-htc63995.2025.11394514>

Wu, L., Wang, Y., Yang, J., Wang, B., Wang, S., Yang, X., Liu, X., & Leng, Z. (2026). Application of UAV photogrammetry technology in identifying discontinuities in slopes in the Pulang copper mine. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-43520-w>

Yakar, M., Ulvi, A., Yiğit, A. Y., & Alptekin, A. (2022). Discontinuity set extraction from 3D point clouds obtained by UAV Photogrammetry in a rockfall site. *Survey Review*, 55(392), 416–428. <https://doi.org/10.1080/00396265.2022.2119747>

Yalcin, I., Can, R., Kocaman, S., & Gökçeoğlu, C. (2023). Rock Mass Discontinuity Determination With Transfer Learning. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 609–614. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xxviii-m-1-2023-609-2023>

Yetkin, M. E. (2012). Örselenme faktörünün süreksizliklerin seçilmiş bazı jeoteknik özelliklerine olan etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yi, X., Wu, W., Feng, W., Zhou, Y. H., & Zhao, J. (2024). Rock discontinuity extraction from 3D point clouds using pointwise clustering algorithm. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 17(7), 4429–4444. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.10.001>

Yiğit, A. Y., Kaya, Y., & Şenol, H. İ. (2023). Açık Maden Ocaklarında İnsansız Hava Aracı (İha) Kullanımı. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(1), 225–235. <https://doi.org/10.21923/jesd.1090190>

Yiğit, A. Y., & Şenol, H. İ. (2025). Surface Change and Stability Analysis in Open-Pit Mines Using UAV Photogrammetric Data and Geospatial Analysis. Drones, 9(7), 472. <https://doi.org/10.3390/drones9070472>

Yonli, H. F., Lompo, M. B., Kagambega, N., & Sawadogo, P. (2023). Slope Stability Analysis: Case of the West Wall of the EMZ Pit at the Essakane Gold Mine in Burkina Faso (West Africa). Geomaterials, 13(4), 109–123. <https://doi.org/10.4236/gm.2023.134008>

Yousefi, S., Arefi, H., & Bahroudi, A. (2019). Detecting Probable Rockfalls In Open Pit Mines Based On Uav Point Clouds.

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1091–1096.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-4-w18-1091-2019>

Yücel, D. Ş., & Yücel, M. A. (2017). Determining hydrochemical characteristics of mine lakes from abandoned coal mines and 3D modelling of them using unmanned aerial vehicle. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(6), 780–791. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.37431>

Yüksel, G. (2022). Açık Maden Sahalarında İnsansız Hava Araçlarının Kullanımı. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(1), 29–37. <https://doi.org/10.51534/tiha.1124260>

Zapico, I., Laronne, J. B., Castillo, L. S., & Duque, J. F. M. (2021). Improvement of Workflow for Topographic Surveys in Long Highwalls of Open Pit Mines with an Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion. *Remote Sensing*, 13(17), 3353. <https://doi.org/10.3390/rs13173353>

Zhang, W., Sun, X., Yuan, W., & Zheng, H. (2026). Stability Analysis and Critical Sliding Surface Determination of a Three-Dimensional Rock Slope: A Case Study of an Open-Pit Limestone Mine. *International Journal of Geomechanics*, 26(5). <https://doi.org/10.1061/ijgnai.gmeng-11744>

Zhang, Y., Wu, J., Tang, P., & Wang, Y. (2023). Three-dimensional laser scanning and numerical investigation on the influence of freeze-thaw and hang-wall mining on the instability of an open-pit slope. *Frontiers in Materials*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1242764>

Zimbardo, M., Nocilla, A., & Santolo, A. S. di. (2024). The Laser Scanner Technique: A Tool for Determining Shear Strength

Parameters of Rock Mass Discontinuities. Applied Sciences, 14(13), 5793. <https://doi.org/10.3390/app14135793>

BÖLÜM 3

GÖÇERTMELİ UZUNAYAK MADENCİLİĞİNDE TAVAN KÖMÜRÜ ÇEKİM MEKANİZMASI: FİZİKSEL MODELLEME YAKLAŞIMI

ARİF ÇELİK¹

Giriş

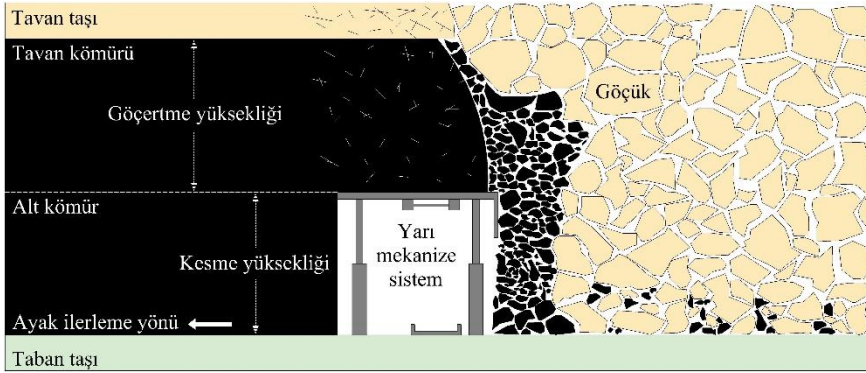
Küresel ölçekte elektrik üretimi, demir-çelik endüstrisi ve diğer sanayi kolları için stratejik önemini koruyan kömürün önemli bir bölümü kalın kömür damarlarından üretilmektedir (Wang, 2008; Quang, 2010; Le, 2018; Çelik, 2022). Bu damarların güvenli, verimli ve ekonomik olarak işletilebilmesi amacıyla farklı yeraltı üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında göçertmeli uzunayak üretim yöntemi (Şekil 1), yüksek üretim kapasitesi, düşük üretim maliyeti ve kalın damarlara uygulanabilirliği sayesinde günümüzde en yaygın kullanılan üretim yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Wang vd. 2021; Çelik, 2024).

Göçertmeli uzunayak üretim yöntemi, alt kömürün üretimini takiben tahkimat arkasında bırakılan tavan kömürünün kontrollü olarak çekilmesine dayanmaktadır. Bu sayede yalnızca kesme yüksekliği içerisindeki kömür değil, bunun üzerinde bulunan tavan

¹ Dr, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Çan Linyitleri İşletmesi Müdürlüğü, Orcid: 0000-0002-2914-3369

kömürü de üretime kazandırılarak kalın damarların önemli bir bölümü ekonomik olarak değerlendirilebilmektedir. Yöntem; damar kalınlığı, jeolojik yapı ve işletme koşullarına bağlı olarak klasik, yarı mekanize veya tam mekanize sistemlerle uygulanabilmektedir.

Şekil 1. Göçertmeli uzunayak üretim yöntemi (Çelik, 2023'den düzenlenmiştir)



Yöntemin en önemli üstünlüğü, kalın kömür damarlarının ilave üretim dilimlerine ihtiyaç duyulmadan işletilebilmesidir. Dilimli üretim yöntemlerinde her üretim katı için ayrı hazırlık çalışmaları, tahkimat uygulamaları ve üretim faaliyetleri yürütülürken, göçertmeli uzunayak yönteminde tavan kömürü aynı üretim panosu içerisinde kontrollü olarak üretime alınmaktadır. Böylece hazırlık çalışmaları ve üretim maliyetleri azalırken, işletme organizasyonu da önemli ölçüde sadeleşmektedir. Bununla birlikte yöntemin başarısı yalnızca üretim ekipmanlarının performansına bağlı değildir. Üretim süresince gelişen tavan davranışının doğru yönetilmesi ve tavan kömürü hareketinin etkin şekilde kontrol edilmesi, güvenli ve verimli bir işletme açısından belirleyici rol oynamaktadır.

Yöntemde, üretimin ilerlemesiyle birlikte ayak arkasında oluşan boşluk, tavan kayaçlarının doğal gerilme dengesini bozarak deformasyon sürecini başlatmaktadır. İlk aşamada tabakalarda

eğilme ve çatlaklar gelişmekte, ilerleyen aşamalarda ise bu çatlakların birleşmesiyle kayaçlar kırılarak göçük bölgesi oluşmaktadır. Üretim, planlı göçertme prensibine göre sürdürüldüğünden kazı ilerleyişi ilave dolgu gerektirmeden devam edebilmektedir. Kalın ve dayanımlı tavan kayaçlarının doğal olarak göçmediği ya da göçmenin geciktiği durumlarda ise kontrollü ön gevşetme veya göçertme patlatmaları uygulanarak göçük oluşumu desteklenmektedir.

Göçük bölgesi, farklı boyutlardaki kırılmış kayaç ve kömür parçalarından oluşan heterojen bir ortamdır. Parçalanma derecesi, tane boyutu dağılımı ve zamanla gelişen sıkışma davranışı, tavan kömürünün üretim açıklığına doğru hareketini ve üretime karışan yan kayaç miktarını etkileyen temel unsurlardır. Bu nedenle göçük bölgesinin özellikleri, tavan kömürü çekiminin başarısı ve elde edilen ürünün kalitesi açısından önem taşımaktadır. Tavan kömürünün üretime kontrollü biçimde alınabilmesi için yüksek kömür geri kazanımı ile düşük seyrelme arasında uygun bir dengenin sağlanması gerekmektedir (Zhu vd. 2018). Bu denge; çekimin başlatılma zamanı, çekim süresi, çekim sırası ve tahkimat sistemindeki çekim açıklıklarının tasarımı ve yerleşimi gibi işletme parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesine bağlıdır (Çelik & Özçelik, 2021).

Söz konusu parametrelerin uygun şekilde belirlenememesi, kömür kaybı veya yan kayaç karışımı gibi istenmeyen sonuçlara yol açabilmektedir. Çekimin erken sonlandırılması göçük içerisinde kömür bırakılmasına neden olurken, gereğinden uzun sürdürülmesi yan kayaçların üretime daha fazla karışmasına ve ürün kalitesinin düşmesine yol açabilmektedir (Zhu vd. 2018; Çelik & Özçelik, 2023). Bu nedenle çekim koşullarının belirlenmesi, göçük içerisindeki malzeme hareketinin ve kömür–yan kayaç etkileşiminin anlaşılmasını gerektirmektedir. Ancak göçük içerisindeki bu hareketlerin gerçek üretim koşullarında doğrudan gözlemlenmesi

oldukça güçlüdür. Bu nedenle tavan kömürü çekim mekanizmasının anlaşılmasına yönelik araştırmalarda teorik yaklaşımların (Liu & Zhang, 1995; Zhu vd. 2018) yanı sıra sayısal modelleme (Wang vd. 2020a; Zhang vd. 2020) ve fiziksel modelleme yöntemlerinden (Wang vd. 2015b; Wang vd. 2016) yararlanılmaktadır. Özellikle fiziksel modelleme, göçük içerisindeki malzeme hareketlerinin kontrollü koşullar altında gözlemlenmesine ve farklı çekim koşullarının karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

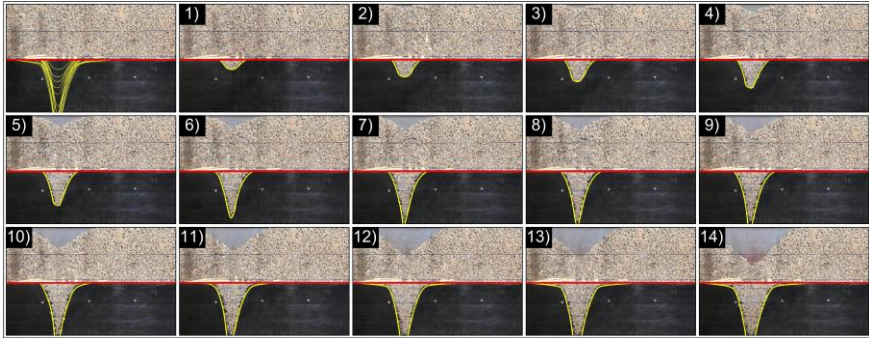
Tavan Kömürü Çekim Mekanizması

Tavan kömürü çekim mekanizması, tahkimat arkasında göçük içerisinde bulunan kırılmış kömür kütlelerinin yerçekimi ve çevre kayaçların oluşturduğu gerilme koşulları altında üretim açıklığına doğru hareket etmesine dayanmaktadır. Çekim sırasında üretim açıklığına doğru hareket eden ve üretime katılan aktif kömür kütlesi çekim gövdesi bu hareketli kütlelerin sınırını tanımlayan ve çekim süresince konumu ile geometrisi değişen sınır ise tavan kömürü akma sınırı olarak tanımlanmaktadır (Song & Konietzky, 2019; Song vd. 2020; Wang vd. 2021). Akma sınırının geometrisi ve çekim gövdesinin gelişimi, üretime katılan tavan kömürü hacmini belirlediğinden kömür geri kazanımı ve seyrelme üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Zhu vd. 2018; Song vd. 2020; Wang vd. 2021). Şekil 2’de çekim sürecinin ilerlemesine bağlı olarak akma sınırı ve çekim gövdesinde meydana gelen değişim gösterilmektedir.

Çekimin başlangıç aşamasında üretim açıklığına yakın konumda bulunan kömür parçaları harekete geçmekte, çekimin ilerlemesiyle birlikte hareket bölgesi tavan kömürü kütlesi içerisinde genişlemektedir. Buna bağlı olarak çekim gövdesinin geometrisi değişmekte ve akma sınırı zaman içerisinde yukarı ve geriye doğru gelişmektedir. Çekimin ilerleyen aşamalarında göçük içerisinde bulunan daha üst seviyelerdeki kömür parçaları da harekete katılabilmekte, belirli bir aşamadan sonra ise yan kayaçların akış

bölgesine dâhil olmasıyla seyrelme meydana gelmektedir. Dolayısıyla çekim sürecinde akma sınırının ve çekim gövdesinin zamana bağlı gelişiminin ortaya konulması, kömür geri kazanımı ile seyrelme arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi açısından temel önem taşımaktadır.

Şekil 2. Tavan kömürü akma sınırının çekim sürecine bağlı olarak gelişimi (Çelik, 2024)



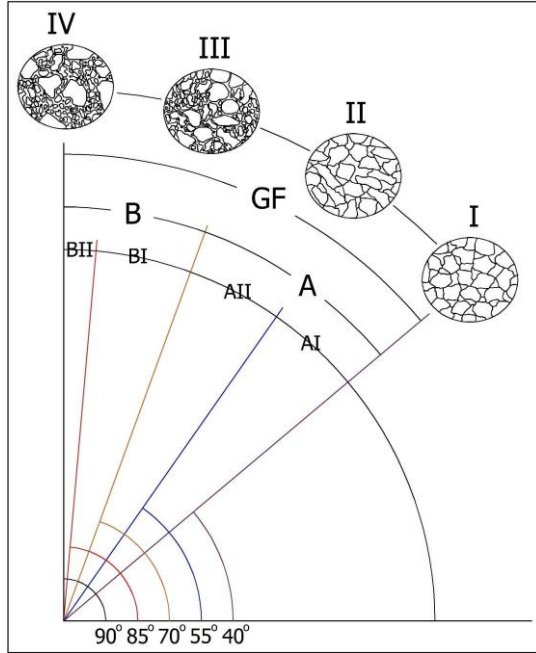
Granüler Malzeme Davranışı

Tavan kömürünün akma davranışı büyük ölçüde yerçekimi kuvveti tarafından yönlendirilmekle birlikte, sürecin yalnızca bu kuvvetle açıklanması mümkün değildir. Göçertme sonucunda oluşan kırılmış kömür kütlesi granüler bir ortam oluşturmakta ve bu ortamın davranışı parçacık özellikleri ile parçacıklar arası etkileşimler tarafından belirlenmektedir.

Granüler ortamı oluşturan kömür parçalarının tane boyutu dağılımı, parça şekli, içsel sürtünme açısı ve parçacıklar arasındaki temas kuvvetleri akma sınırının gelişimini ve akma karakterini önemli ölçüde etkilemektedir (Kvapil, 1992; Wang vd. 2016; Wang vd. 2019a). Bu nedenle tavan kömürü çekim mekanizmasının doğru biçimde açıklanabilmesi için yerçekimi etkisinin yanı sıra granüler malzemenin fiziksel özelliklerinin de birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Kvapil (1992), granüler malzemelerin akma davranışını ayrıntılı olarak inceleyerek tane boyutu dağılımı, malzeme heterojenliği ve içsel sürtünme özelliklerinin akma geometrisi üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur (Şekil 3).

Şekil 3. Parça boyut dağılımı ve malzeme akma açısı arasındaki ilişki (Kvapil, 1992)



Araştırma sonuçları, tekdüze tane boyutuna sahip granüler ortamlarda akma sınırının daha düzenli geliştiğini; farklı boyutlardaki parçaların birlikte bulunduğu heterojen ortamlarda ise akma geometrisi ve akma açısının belirgin biçimde değiştiğini göstermiştir. Tane boyutu dağılımındaki bu farklılıkların akma sınırının gelişimini değiştirmesi, buna bağlı olarak çekim gövdesinin geometrisini ve hareketini de etkilemekte; sonuç olarak tavan kömürü geri kazanımı ve üretime karışan yan kayaç miktarı üzerinde belirleyici olmaktadır.

Tavan Kömürü   ekim Mekanizmasını Etkileyen Parametreler

Tavan kömürü çekim mekanizması, jeolojik, jeomekanik ve işletme koşullarının birlikte etkisi altında gelişmektedir. Akma davranışını belirleyen başlıca özellikler; kömürün tane boyutu dağılımı, parçalanma biçimi, içsel sürtünme açısı, kömür ve yan kayaçların mekanik özellikleri ile g    k malzemesinin fiziksel yapısıdır (Kvapil, 1992; Wang vd. 2015b).

Bunlara ek olarak damar kalınlığı, üretim yükseklığı, tavan kömürü kalınlığı, çekim açıklığının boyutları, çekim sırası ve çekim süresi gibi işletme parametreleri de çekim gövdesinin gelişimini ve akma sınırının geometrisini doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerdeki değişimler, üretim sırasında hareket eden kömür kütlesinin hacmini ve hareket alanını değiştirerek kömür geri kazanımı ile seyrelme düzeyini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Song & Konietzky, 2019; Wang vd. 2021).

G    k bölgesindeki malzemenin parçalanma durumu ve tavan kömürünün dayanım özellikleri de akma davranışının gelişiminde önemli rol oynamaktadır. Kolay parçalanan kömürlerde malzeme hareketi daha düzenli gerçekleşirken, büyük bloklar hâlinde kırılan ve daha yüksek dayanımlı kömürlerde kemerlenme, düzensiz akı   ve ani malzeme hareketleri daha sık ortaya çıkabilmektedir (Zhu vd. 2018; Wang vd. 2021).

Teorik Yaklaşımlar

Granüler malzemelerin yerçekimi etkisi altındaki akışını açıklamaya yönelik ilk   alı  malar Kvapil (1965) ile Janelid ve Kvapil (1966) tarafından gerçekleştirilmiştir. Katmanlı granüler malzemeler kullanılarak oluşturulan şeffaf fiziksel modeller üzerinde yürütülen deneylerde, üretim açıklığına doğru hareket eden aktif bölge ile hareketsiz bölge arasındaki ilişki incelenmiş ve bu kapsamda çekim elipsoidi ile gevşeme elipsoidi kavramları geliştirilmiştir. Bu   alı  malar, granüler malzemelerin ak  a

davranışını açıklamaya yönelik daha sonraki teorik modellerin geliştirilmesine temel oluşturmuştur.

Tavan kömürü hareket mekanizmasının açıklanmasına yönelik önemli yaklaşımlardan biri Ünver (1995) tarafından ortaya konulmuştur. Ünver'e göre göçertmeli uzunayak üretiminde meydana gelen malzeme hareketi, klasik silo akışıyla tamamen aynı özellikleri göstermemekle birlikte benzer davranışlar sergilemektedir. Kırılmış kömürün hareketinin blok göçertmeli madencilikte gözlenen kaya akışıyla da benzerlik göstermesi nedeniyle, bu alanda geliştirilen teorik yaklaşımların gerekli uyarlamalar yapılarak göçertmeli uzunayak madenciliğine uygulanması mümkün olmuştur (Wang vd. 2015b; Jin vd. 2017; Song vd. 2018).

Teorik yaklaşımlar içerisinde öne çıkan modellerden biri Stokastik Ortam Teorisi'dir. Litwiniszyn (1956) tarafından granüler malzemelerin akışını açıklamak amacıyla geliştirilen teori, daha sonrasında birçok araştırmacı (David, 1968; Liu & Zhang, 1995; Qiao vd. 2003; Yu vd. 2017; Zhu vd. 2018) tarafından geliştirilerek blok göçertmeli ve göçertmeli uzunayak madenciliğine uygulanmıştır. Teori, tavan kömürü ve yan kayaçların granüler parçacıklardan oluşan rastgele bir ortam meydana getirdiğini ve parçacık hareketlerinin olasılıksal kurallar çerçevesinde gerçekleştiğini kabul etmektedir (Wang vd. 2021).

Zhu vd. (2018), Stokastik Ortam Teorisi'nin göçertmeli uzunayak madenciliğindeki uygulanabilirliğini iki boyutlu fiziksel model deneyleriyle değerlendirmiştir. Araştırma sonuçları, teorinin özellikle zayıf ve kolay parçalanabilen kömür damarlarında çekim gövdesinin gelişimini başarılı biçimde temsil ettiğini; buna karşılık sert ve bütünlüğünü büyük ölçüde koruyan kömür damarlarında öngörü doğruluğunun azaldığını göstermiştir. Bu sonuçlar, teorik modellerin temsil başarısının kömürün parçalanma özelliklerinden etkilendiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla tavan kömürü çekim

mekanizmasının güvenilir biçimde açıklanabilmesi için teorik yaklaşımların fiziksel model deneyleri ve sayısal modelleme sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Fiziksel Modelleme

Göçertmeli uzunayak yönteminde tavan kömürü üretimi sırasında göçük bölgesinde meydana gelen granüler malzeme akışı, kırılmış kömür ve yan kayaç parçalarının hareketi, göçük gelişimi ve kömür–yan kayaç karışımının oluşumu gibi süreçler, yeraltında doğrudan gözlemlenmesi güç olan dinamik olaylardır. Üretim bölgesinin erişilemez olması, yüksek gerilme koşulları altında çalışılması ve işletme güvenliği gibi nedenlerle bu mekanizmaların saha koşullarında ayrıntılı olarak incelenmesi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle tavan kömürü çekim mekanizmasının anlaşılmasına yönelik çalışmalarda fiziksel modelleme, kontrollü laboratuvar koşullarında deneylerin gerçekleştirilmesine olanak sağlayan en önemli deneysel araştırma yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Fiziksel modelleme, gerçek sistemde meydana gelen fiziksel olayların belirli benzeşim ilkeleri esas alınarak laboratuvar ölçeğinde yeniden oluşturulmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde gerçek üretim ortamında kontrol edilmesi güç olan parametreler bağımsız olarak değiştirilebilmekte, farklı üretim ve çekim stratejilerinin sistem davranışı üzerindeki etkileri kontrollü koşullar altında incelenebilmektedir. Ayrıca deneylerin aynı koşullar altında tekrarlanabilmesi, parametrelerin sistematik olarak değiştirilebilmesi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi, fiziksel model çalışmalarının en önemli avantajları arasında yer almaktadır.

Tavan kömürü çekimine yönelik fiziksel model çalışmalarında temel amaç, gerçek kaya kütlesinin tüm mekanik davranışını birebir temsil etmekten ziyade, göçük bölgesindeki

kırılmış kömür ve yan kayaç parçalarının yerçekimi etkisi altında gösterdiği akma davranışını güvenilir biçimde benzetmektir.

Son yıllarda yüksek hızlı görüntüleme sistemleri, dijital görüntü işleme teknikleri, parçacık takip yöntemleri ve üç boyutlu görüntüleme teknolojilerindeki gelişmeler, fiziksel model deneylerinden elde edilen verilerin yalnızca nitel değil, aynı zamanda nicel olarak da değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Böylece parçacık hareketleri, akma bölgeleri, çekim gövdesinin gelişimi ve kömür–yan kayaç karışımı gibi süreçler ayrıntılı biçimde analiz edilebilmekte, deney sonuçlarının güvenilirliği artırılmaktadır. Bu gelişmeler, fiziksel model çalışmalarının yalnızca deneysel bir yaklaşım olmanın ötesinde, sayısal modelleme ve saha gözlemlerini destekleyen önemli bir araştırma aracı hâline gelmesini sağlamıştır.

Fiziksel Modellemenin Temel İlkeleri

Fiziksel model çalışmalarının başarısı yalnızca deney düzeneğinin oluşturulmasına değil, model tasarım sürecinde alınan mühendislik kararlarının araştırma amacına uygun olmasına da bağlıdır. Bu nedenle fiziksel model geliştirme süreci, araştırılacak fiziksel mekanizmanın tanımlanmasıyla başlamakta; ardından uygun model konfigürasyonunun belirlenmesi ve gerçek sistem ile model arasındaki benzeşim koşullarının sağlanmasıyla devam etmektedir (Çelik & Özçelik, 2021). Tasarım sürecinde alınan bu kararlar, model ölçeğinden benzer model malzemelerine, deney düzeneğinin geometrisinden ölçüm tekniklerine kadar tüm aşamaları doğrudan etkilemektedir.

Araştırmanın Amacı ve Model Yaklaşımının Belirlenmesi

Fiziksel modelleme sürecinin ilk ve en önemli aşaması, araştırmanın amacının açık bir şekilde tanımlanmasıdır. Çünkü fiziksel model, gerçek üretim sisteminin tüm özelliklerini eksiksiz biçimde temsil etmek amacıyla değil, belirli bir fiziksel

mekanizmanın kontrollü laboratuvar koşullarında incelenmesini sağlamak amacıyla geliştirilmektedir. Bu nedenle modelin geometrisi, temsil edeceği üretim bölgesi, uygulanacak benzeşim koşulları, kullanılacak benzer malzemeler ve ölçüm yöntemleri araştırmının hedeflerine göre belirlenmektedir.

Göçertmeli uzunayak yöntemine yönelik fiziksel model çalışmalarında araştırma amaçları oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Çalışmalar; tavan kömürü çekim mekanizmasının açıklanması, malzeme akma davranışının incelenmesi, çekim açıklıklarının tasarımı, hidrolik tahkimat sistemlerinin etkisinin değerlendirilmesi, üretim parametrelerinin optimizasyonu, kömür geri kazanımının artırılması gibi farklı mühendislik problemlerine odaklanabilmektedir. Araştırma konusundaki bu çeşitlilik, fiziksel model tasarımlarının da farklı özelliklerde geliştirilmesine neden olmaktadır.

Araştırma amacı belirlendikten sonra, modellenmesi gereken fiziksel süreçler tanımlanmakta ve deney düzeneğinin bu süreçleri temsil edebilecek yeterlilikte olması hedeflenmektedir. Bununla birlikte laboratuvar ortamının fiziksel ve ekonomik kısıtları da göz önünde bulundurularak, yalnızca araştırma probleminin çözümü açısından kritik öneme sahip mekanizmalar modele dâhil edilmektedir. Böylece model, gerçek sistemin küçültülmüş bir kopyası olmaktan ziyade, araştırılan fiziksel olayın temel davranışlarını güvenilir şekilde temsil eden deneysel bir araç hâline gelmektedir.

Bu yaklaşım doğrultusunda geliştirilen fiziksel modeller, araştırmının kapsamına bağlı olarak farklı boyutlarda, farklı konfigürasyonlarda ve farklı ayrıntı düzeylerinde tasarlanabilmektedir. Dolayısıyla fiziksel model tasarımında tek bir standart çözüm bulunmamakta; her model, araştırma sorusuna en uygun deneysel yaklaşımı sağlayacak şekilde şekillendirilmektedir.

Model Konfigürasyonunun Belirlenmesi

Fiziksel modellemenin ikinci aşaması, fiziksel mekanizmayı en uygun şekilde temsil edecek model konfigürasyonunun seçilmesidir. Model konfigürasyonu; deney düzeneğinin boyutsal yapısını, gözlemlenebilecek fiziksel süreçleri, uygulanacak deney yöntemlerini ve elde edilecek verilerin kapsamını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle model konfigürasyonu, araştırmanın amacı ve incelenmesi hedeflenen fiziksel olaylar doğrultusunda belirlenmektedir.

Tablo 1’de literatürde tavan kömürü çekimine yönelik geliştirilen fiziksel model düzeneklerinin model konfigürasyonları ve odaklandıkları araştırma konuları, Şekil 4’de ise literatürde kullanılan örnek fiziksel modeller verilmiştir. Şekil 4 ve Tablo 1 birlikte değerlendirildiğinde, tavan kömürü çekimine yönelik fiziksel model çalışmalarında iki temel model konfigürasyonunun benimsendiği görülmektedir. Model konfigürasyonunun seçimi ise standart bir tercihten ziyade araştırmanın amacı ve incelenen fiziksel mekanizmanın özelliklerine bağlı olarak belirlenmektedir.

Şekil 4. Fiziksel model örnekleri



Tablo 1. Literatürde kullanılan fiziksel model konfigürasyonları ve araştırma kapsamları (Wang vd. 2021’den düzenlenmiştir)

Model Boyutu	Model Ölçeği	Araştırma Kapsamı			Referans
		Kömür Kazanımı	Çekim Gövdesi	Çekim Sınırları	
Yarı-3B	1/25	✓	-	✓	Huang vd. 2006
Yarı-3B	1/25	✓	-	✓	Huang vd. 2007
Yarı-3B	1/37,5	✓	-	✓	Huang vd. 2008
Yarı-3B	1/37,5	✓	-	✓	Wang, 2008
Yarı-3B	1/37,5	✓	-	✓	Liu vd. 2009
Yarı-3B	1/20	✓	-	-	Wang vd. 2014
Yarı-3B	1/30	-	-	✓	Wang & Song, 2015
Yarı-3B	1/30	-	✓	-	Wang vd. 2019a
Yarı-3B	1/25	✓	-	✓	Celik, 2024
3B	1/20	✓	✓	-	Wang vd. 2015
3B	1/30	-	✓	-	Wang vd. 2016
3B	1/30	✓	✓	✓	Zhang vd. 2015
3B	1/30	✓	✓	✓	Zhang vd. 2018a
3B	1/30	✓	✓	-	Wang vd. 2020b
3B	1/40	✓	-	-	Celik & Ozelcik, 2023

Yarı üç boyutlu modeller

Yarı üç boyutlu modeller, modelin ön ve arka yüzeylerinin saydam plakalarla sınırlandırıldığı ve model kalınlığının sınırlı tutulduğu deney düzenekleridir (Wang vd. 2021). Bu konfigürasyonun en önemli avantajı, model içerisindeki parçacık hareketlerinin doğrudan gözlemlenebilmesi ve görüntüleme sistemleri kullanılarak ayrıntılı biçimde analiz edilebilmesidir. Bu nedenle yarı üç boyutlu modeller; granüler akma davranışı, çekim gövdesinin gelişimi, parçacık hareketleri ve kömür-yan kayaç karışımının incelendiği çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca deney düzeneğinin görece basit olması, düşük maliyetle kurulabilmesi ve deneylerin kolaylıkla tekrarlanabilmesi bu model yaklaşımının önemli avantajlarıdır. Bununla birlikte model kalınlığının sınırlı olması nedeniyle parçacık hareketleri belirli

ölçüde düzlemsel bir akışa yönlendirildiğinden, gerçek üretim ortamındaki üç boyutlu davranış tam olarak temsil edilememektedir.

Üç boyutlu modeller

Üç boyutlu modeller, gerçek üretim geometrisini ve parçacık hareketlerini üç boyutlu olarak temsil etmek amacıyla geliştirilen deney düzenekleridir. Bu modellerde göçük bölgesindeki akma davranışı doğal yapısı içerisinde incelenebildiğinden, çekim gövdesinin gelişimi, kömür geri kazanımı, yan kayaç karışımı ve üretim parametrelerinin etkileri daha gerçekçi biçimde değerlendirilebilmektedir. Buna karşılık deney düzeneğinin kurulumu, ölçüm sistemlerinin uygulanması ve deneylerin yürütülmesi yarı üç boyutlu modellere göre daha karmaşıktır. Bu nedenle üç boyutlu modeller, gerçek üretim koşullarının daha ayrıntılı temsil edilmesini gerektiren çalışmalarda tercih edilmektedir.

Benzeşim İlkeleri

Fiziksel model çalışmalarında deney sonuçlarının gerçek sistemi temsil edebilmesi, model ile gerçek sistem (prototip) arasında uygun benzeşim koşullarının sağlanmasına bağlıdır. Benzeşim ilkeleri, laboratuvar ölçeğinde oluşturulan modelin gerçek üretim koşullarındaki fiziksel davranışı güvenilir biçimde temsil edebilmesi için esas alınan temel kuralları ifade etmektedir. Bu nedenle fiziksel model tasarımında yalnızca model boyutlarının küçültülmesi yeterli olmayıp, incelenen fiziksel mekanizmayı etkileyen temel parametrelerin de uygun şekilde ölçeklendirilmesi gerekmektedir.

Fiziksel model çalışmalarında dikkate alınan temel benzeşim ilkeleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Genel olarak benzeşim; geometrik, kinematik ve dinamik benzerlik olmak üzere üç temel başlık altında değerlendirilmektedir. Ancak bu ilkelerin uygulanma düzeyi,

araştırmanın amacı ve modellenmek istenen fiziksel mekanizmaya bağlı olarak değişebilmektedir.

Tablo 2. Fiziksel model çalışmalarında dikkate alınan temel benzeşim ilkeleri

Benzeşim	Açıklama	Tavan kömürü çekimi çalışmalarındaki önemi
Geometrik	Boyutların ölçeklendirilmesi	Model geometrisinin ve üretim açıklıklarının doğru temsil edilmesi
Kinematik	Hareket benzerliği	Parçacık hareketlerinin ve granüler akışın temsil edilmesi
Dinamik	Kuvvet benzerliği	Akış mekanizmasının ve parçacık etkileşimlerinin gerçekçi şekilde modellenmesi

Geometrik benzerlik, model ile prototip arasındaki tüm doğrusal boyutların belirli bir ölçek oranına göre küçültülmesini ifade etmektedir. Kinematik benzerlik, modelde meydana gelen hareketlerin yönü, hızı ve zamana bağlı değişiminin gerçek sistemle uyumlu olmasını esas almaktadır. Dinamik benzerlik ise modele etki eden kuvvetlerin ve bu kuvvetlerin oluşturduğu fiziksel davranışın prototip ile benzer olmasını ifade etmektedir.

Tavan kömürü çekimine yönelik fiziksel model çalışmalarında benzeşim ilkelerinin uygulanışı, klasik kaya mekaniği modellerinden belirli yönleriyle farklılık göstermektedir. Bu çalışmalarda temel amaç, kaya kütlesinin gerilme–şekil değiştirme davranışını eksiksiz temsil etmekten ziyade, göçük bölgesindeki kırılmış kömür ve yan kayaç parçalarının yerçekimi etkisi altında gösterdiği granüler akma davranışını doğru şekilde modellemektir. Bu nedenle model tasarımında özellikle parçacık boyutu, yoğunluk, parçacık şekli ve içsel sürtünme özellikleri gibi granüler akışı doğrudan etkileyen parametrelerin benzerliği ön plana çıkmaktadır.

Benzeşim ilkelerinin uygun şekilde uygulanması, fiziksel model deneylerinden elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve gerçek üretim koşullarını temsil etme kabiliyetini doğrudan etkilemektedir. Bu doğrultuda model leğinin belirlenmesi, benzer model malzemelerinin seçimi ve deney düzeneğinin tasarımı gibi sonraki aşamalar, benzeşim esasları dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir.

Fiziksel Modelin Geliştirilmesi

Fiziksel modelin geliştirilmesi, model leğinin belirlenmesinden modelin fiziksel olarak oluşturulmasına kadar uzanan sistematik bir süreci kapsamaktadır. Bu süreçte modelin temsil edeceği fiziksel sistemin özellikleri, laboratuvar koşulları ve deneysel gereksinimler birlikte değerlendirilerek modele ilişkin temel mühendislik kararları verilmektedir. Alınan bu kararlar, modelin araştırma amacını ne ölçüde temsil edebileceğini, deneylerin uygulanabilirliğini ve elde edilecek sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle fiziksel modelin geliştirilmesi, birbirini tamamlayan tasarım, planlama ve uygulama aşamalarının bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını gerektirmektedir.

Model leğinin Belirlenmesi

Fiziksel model çalışmalarında ölçek seçimi, gerçek üretim sisteminin laboratuvar ortamında temsil edilebilirliğini belirleyen en önemli tasarım aşamalarından biridir. Model leği; yalnızca fiziksel boyutların küçültülmesini ifade eden geometrik bir oran değil, aynı zamanda modelde temsil edilecek fiziksel mekanizmaların, kullanılacak malzemelerin ve gerçekleştirilecek ölçümlerin uygunluğunu belirleyen temel bir parametredir.

Benzeşim ilkeleri kapsamında geometrik ilişkilerin korunması esas olmakla birlikte, fiziksel model deneylerinde gerçek sistemin tüm boyutlarını doğrudan temsil etmek çoğu zaman mümkün değildir. Bu nedenle uygun ölçeğin belirlenmesinde,

araştırmanın amacı, incelenecek fiziksel olay, laboratuvar olanakları, model boyutları, kullanılan malzemelerin özellikleri ve ölçüm hassasiyeti birlikte değerlendirilmelidir.

Literatürde göçertmeli uzunayak yönteminin temel problemlerine yönelik fiziksel model çalışmalarında kullanılan model ölçekleri ve bu ölçeklerde ele alınan araştırma konuları Tablo 3'te özetlenmiştir. Tablo 3 incelendiğinde, fiziksel modellerin yaklaşık 1/10 ile 1/200 arasında değişen farklı ölçeklerde geliştirildiği görülmektedir. Bu farklılık, fiziksel model çalışmalarında tek bir ideal ölçeğin bulunmadığını, model ölçeğinin araştırmanın amacı ve incelenmek istenen fiziksel mekanizmaya göre belirlendiğini doğrulamaktadır.

Tablo 3. Literatürde kullanılan fiziksel model ölçekleri ve araştırma kapsamı (Çelik (2022), Wang vd. 2021'den düzenlenmiştir)

Ölçek	Araştırma Kapsamı				Referans
	Kömür Kazanımı	Çekim Gövdesi	Çekim Sınırları	Diğer	
1/200	-	-	-	✓	Wang vd. 2017
1/200	-	-	-	✓	Yang vd. 2018
1/100	-	-	-	✓	Li vd. 2017
1/100	-	-	-	✓	Yang vd. 2019
1/100	-	-	-	✓	Lang vd. 2021
1/40	✓	-	-		Celik & Ozcelik, 2023
1/37,5	✓	-	✓		Huang vd. 2008
1/37,5	✓	-	✓		Liu vd. 2009
1/30	-	-	✓		Wang & Song, 2015
1/30	-	✓	-		Wang vd. 2019a
1/30	✓	✓	-		Wang vd. 2019b
1/30	✓	✓	✓		Zhang vd. 2015
1/30	✓	✓	✓		Zhang vd. 2018a
1/30		✓	✓		Song & Konietzky, 2019
1/28	✓	✓	-		Zhu vd. 2018
1/25	✓	-	✓		Huang vd. 2006
1/25	✓	-	✓		Huang vd. 2007
1/25	✓	-	✓		Celik, 2024
1/20	✓	-	-		Wang vd. 2014
1/20	✓	✓	-		Wang vd. 2015
1/10,5	-	✓	-		Zhang vd. 2018b

Küçük ölçekli modeller, daha geniş üretim alanlarının laboratuvar ortamında temsil edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu modellerde genellikle ayak ilerlemesine bağlı tabaka hareketleri, göçük gelişimi, gerilme dağılımı ve tasman davranışı gibi makro ölçekte gerçekleşen olaylar incelenmektedir. Buna karşılık büyük ölçekli modeller, çekim açıklıkları çevresinde gelişen malzeme akışının daha ayrıntılı incelenmesine imkân sağlamaktadır. Bu modellerde çekim gövdesinin oluşumu, kömür–yan kayaç karışımı, çekim sınırları, kömür geri kazanımı ve farklı üretim parametrelerinin çekim performansı üzerindeki etkileri daha gerçekçi biçimde değerlendirilebilmektedir. Bununla birlikte model boyutlarının büyümesi, deney düzeneğinin kurulumu, benzer model malzemesi ihtiyacı ve deney maliyetini artıran önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tavan kömürü çekim mekanizmasına bağlı problemlerin araştırılmasında özellikle 1/20 ile 1/40 ölçek aralığındaki modellerin yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir (Tablo 3). Bu ölçekler, malzeme akma davranışının yeterli doğrulukta temsil edilmesi ile laboratuvar ortamında uygulanabilir model boyutları arasında uygun bir denge sağlamaktadır.

Literatürde model ölçeğinin belirlenmesine yönelik nicel değerlendirmeler de bulunmaktadır. Çelik & Özçelik (2021) farklı model ölçeklerinin deney düzeneği boyutları, çekim penceresi ölçüleri ve modelde kullanılacak benzer malzeme miktarı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada, 1/10 ölçekli bir model için yaklaşık 6,4 m uzunluğunda bir deney düzeneği ve 74,65 ton model malzemesine ihtiyaç duyulduğu, buna karşılık 1/40 ölçekli bir modelde bu değerlerin 1,6 m ve 1,17 ton seviyesine düştüğü gösterilmiştir. Ölçeğin 1/50'ye küçültülmesi ise laboratuvar gereksinimlerini daha da azaltmasına rağmen, çekim penceresi genişliğinin yaklaşık 20 mm'ye ve ayak ilerleme mesafesinin 16 mm'ye düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, modelde

kullanılabilecek benzer malzemelerin tane boyutunu sınırlandırarak çekim açıklıklarından gerçekleşen granüler akışın güvenilir biçimde temsil edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, deneysel uygulanabilirlik ile fiziksel temsil kabiliyetini birlikte değerlendirerek 1/40 ölçeğini en uygun model ölçeği olarak tercih etmiştir.

Model Malzemelerinin Seçimi

Fiziksel model deneylerinde kullanılan model malzemeleri, gerçek kayaç ve kömür ortamının laboratuvar koşullarında temsil edilmesini sağlayan temel unsurlardır. Benzeşim ilkeleri ve model ölçeği uygun şekilde belirlense dahi, seçilen malzemenin gerçek ortamın davranışını yeterli düzeyde yansıtamaması deney sonuçlarının güvenilirliğini sınırlayabilmektedir. Tavan kömürü çekimine yönelik fiziksel modellerde temel amaç, gerçek kayaç ve kömürün tüm özelliklerini birebir kopyalamaktan ziyade, göçük içerisindeki malzeme hareketini ve akma davranışını temsil edebilecek uygun bir model ortamı oluşturmaktır. Bu nedenle model malzemesinin seçimi, fiziksel model tasarımının önemli aşamalarından birini oluşturmaktadır.

Literatürde tavan kömürü çekim mekanizmasına yönelik gerçekleştirilen fiziksel model çalışmalarında kullanılan model malzemeleri ve parça boyut dağılımları Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Literatürde kullanılan fiziksel model malzemeleri

Tavan Taşı		Kömür		Referans
Malzeme Türü	Boyut, (mm)	Malzeme Türü	Boyut (mm)	
Kireçtaşı	20-25	Kömür	12-20	Celik, 2024
Bazalt	5-10	Kireçtaşı	3-5	Celik & Ozcelik, 2023
Mermer	8-12	Granit	5-8	Zhu vd. 2018
Mermer	10-20	Granit	5 -8	Zhang vd. 2018a
Mermer	8-12	Granit	5-8	Yang vd. 2016
Mermer	10-20	Granit	5-10	Wang vd. 2015
Çakıl	7-9	Çakıl	4-7	Song & Konietzky, 2019

Tablo 4 incelendiğinde, tavan kömürü çekim mekanizmasına yönelik fiziksel model çalışmalarında model malzemesi olarak mermer, kireçtaşı, bazalt, granit ve çakıl gibi doğal kayaçların tercih edildiği görülmektedir. Bu malzemeler; temin kolaylığı, homojen fiziksel özelliklere sahip olmaları ve istenilen tane boyutu aralıklarında hazırlanabilmeleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca literatürde yer alan çalışmalarda, kömürü temsil eden model malzemelerinin tavan taşını temsil eden malzemelere kıyasla daha küçük parça boyutuna ve daha düşük yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Bu tercih, gerçek üretim koşullarında kömür ve yan kayaç arasında bulunan fiziksel farklılıkların modele yansıtılmasını sağlayarak deneylerin saha koşullarını daha gerçekçi biçimde temsil etmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle model malzemelerinin seçiminde yalnızca kullanılacak malzeme türü değil, kömür ve tavan taşını temsil eden malzemeler arasındaki parça boyutu ve yoğunluk ilişkisinin de gerçek üretim koşullarını yansıtacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

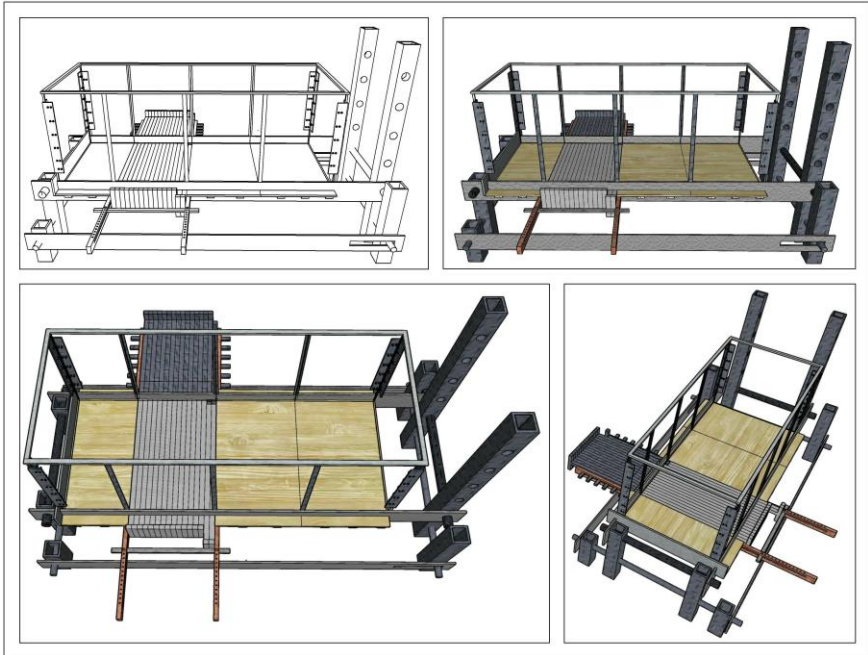
Deney Düzeneğinin Tasarımı ve Geliştirilmesi

Model ölçeğinin belirlenmesinin ardından, fiziksel modelin geometrisi bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak üç boyutlu ortamda tasarlanmaktadır. Şekil 5'te, Çelik & Özçelik (2021) tarafından geliştirilen fiziksel modele ait üç boyutlu tasarım görselleri örnek olarak sunulmuştur. Bu aşamada model haznesi, üretim panosu, tavan ve taban tabakaları, çekim açıklıkları ile deney düzeneğini oluşturan diğer yapısal bileşenler seçilen ölçeğe uygun olarak modellenmekte ve bileşenler arasındaki geometrik ilişkiler tanımlanmaktadır. Böylece modelin fiziksel yapısı imalat öncesinde ayrıntılı olarak oluşturulmakta ve tasarımın uygulanabilirliği değerlendirilmektedir.

Üç boyutlu tasarım çalışmaları sayesinde model bileşenlerinin montaj uyumu, hareket kabiliyeti ve deney sırasında oluşabilecek mekanik problemler imalat öncesinde değerlendirilebilmektedir. Böylece tasarım aşamasında gerekli düzenlemeler yapılarak üretim sürecinde karşılaşılabilecek hata ve maliyetler önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Deney düzeneğinin tasarımında temel amaç, model içerisinde gerçekleşecek malzeme hareketini etkilemeyecek, deneylerin güvenilir ve tekrarlanabilir şekilde yürütülmesini sağlayacak bir sistem geliştirmektir. Bu doğrultuda taşıyıcı sistemin yeterli rijitliğe sahip olması, gözlem yüzeylerinin deney süresince kesintisiz izlemeye olanak sağlaması, çekim mekanizmasının hassas ve kontrollü çalışması ile model bileşenlerinin bakım, ayar ve gerektiğinde değiştirilmeye uygun şekilde tasarlanması temel tasarım kriterleri arasında yer almaktadır.

Şekil 5. Fiziksel modelin üç boyutlu tasarımı (Çelik & Özçelik, 2023)



Modelin İmalatı ve Montajı

Bilgisayar ortamında tasarımı tamamlanan model bileşenleri, hazırlanan teknik resimler doğrultusunda uygun üretim yöntemleri kullanılarak imal edilmektedir. İmal edilen parçalar, tasarım planına uygun biçimde bir araya getirilerek deney düzeneği oluşturulmaktadır. Bu aşamada model geometrisinin korunması, bileşenler arasındaki ölçüsel uyumun sağlanması ve hareketli mekanizmaların doğru şekilde çalışması, deney düzeneğinin güvenilirliği açısından temel gerekliliklerdir.

Montaj işlemlerinin tamamlanmasının ardından deney düzeneğinin mekanik performansı kontrol edilmekte, hareketli bileşenlerin işleyişi doğrulanmakta ve gerekli ayarlamalar gerçekleştirilmektedir. Böylece deneyler öncesinde sistemin güvenilirliği doğrulanmakta ve deney sonuçlarını etkileyebilecek olası mekanik sorunlar giderilmektedir (Song ve Konietzky, 2019).

Deney düzeneğinin tasarımında yalnızca mevcut deney gereksinimleri değil, ilerleyen süreçte ortaya çıkabilecek farklı araştırma ihtiyaçları da dikkate alınmalıdır. Bu nedenle bakım, parça değişimi ve farklı deney senaryolarına uyarlatabilirliği kolaylaştıracak modüler tasarım yaklaşımının benimsenmesi önerilmektedir. Modüler yapı, deney düzeneğinin uzun süreli kullanımını desteklerken gerektiğinde belirli bileşenlerin yeniden tasarlanmasına veya değiştirilmesine de olanak sağlamaktadır.

Fiziksel Model Deneylerinin Uygulanması

Fiziksel modelin oluşturulmasının ardından deneysel uygulama aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada laboratuvar ortamında geliştirilen model kullanılarak incelenen fiziksel mekanizma kontrollü koşullar altında değerlendirilmekte ve deney kapsamında belirlenen parametrelerin sistem davranışı üzerindeki etkileri ortaya konulmaktadır. Güvenilir ve karşılaştırılabilir

sonuçlar elde edilebilmesi için deneylerin planlı ve sistematik bir prosedür doğrultusunda yürütülmesi gerekmektedir.

Modelin Hazırlanması

Deney öncesinde fiziksel model, tasarım aşamasında belirlenen geometrik özelliklere uygun olarak hazırlanmalıdır. Kömür ve tavan taşını temsil eden benzer malzemeler, belirlenen tabaka düzeni korunacak şekilde model haznesine yerleştirilmelidir. Bu aşamada tabakaların sürekliliğinin korunması ve farklı malzemelerin istenmeyen biçimde karışmasının önlenmesi, deneylerin güvenilirliği açısından önem taşımaktadır.

Araştırmanın amacına bağlı olarak parçacık hareketlerinin izlenmesini kolaylaştırmak amacıyla renkli izleyici parçacıklar, referans tabakaları veya farklı işaretleme yöntemlerinden yararlanılabilmektedir (Wang vd. 2021). Bu uygulamalar, granüler akışın, çekim gövdesinin gelişiminin ve kömür–yan kayaç etkileşiminin daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Model hazırlandıktan sonra çekim açıklıkları, hareketli mekanizmalar ve ölçüm sistemleri kontrol edilerek olası mekanik veya geometrik hatalar giderilmelidir. Bu kontroller, tüm deneylerin aynı başlangıç koşullarında yürütülmesini sağlayarak elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve karışılaştırılabilirliğini artırmaktadır.

Deneylerin Yürütülmesi

Model hazırlığının tamamlanmasının ardından deneyler, önceden belirlenen deney planı doğrultusunda yürütülmektedir. Deney sürecinde uygulanacak işlem sırası, deney koşulları ve çalışma parametreleri önceden tanımlanmalı; karışılaştırmalı çalışmalarda incelenen parametre dışındaki tüm koşullar sabit tutulmalıdır. Bu yaklaşım, farklı deneylerden elde edilen sonuçların güvenilir ve karışılaştırılabilir olmasını sağlamaktadır.

Deneyler sırasında modelde meydana gelen fiziksel değişimler düzenli olarak gözlemlenmeli ve uygun yöntemlerle kayıt altına alınmalıdır. Araştırmanın kapsamına bağlı olarak parçacık hareketi, malzeme akışı, deformasyon davranışı veya diğer fiziksel süreçler görsel gözlemler, görüntüleme sistemleri ya da ölçüm ekipmanları kullanılarak izlenebilmektedir. Elde edilen veriler, deney sonunda gerçekleştirilecek değerlendirmelerin temelini oluşturmaktadır.

Deneylerin güvenilirliğinin artırılması amacıyla aynı koşullar altında tekrar deneyleri gerçekleştirilmeli ve elde edilen sonuçların tutarlılığı kontrol edilmelidir (Çelik & Özçelik, 2021). Tekrarlanabilir sonuçların elde edilmesi, fiziksel model deneylerinin güvenilirliğini ve deney prosedürünün doğruluğunu gösteren temel ölçütlerden biri olarak kabul edilmektedir.

Ölçüm ve Veri Değerlendirme

Deneyler sırasında elde edilen veriler, kullanılan ölçüm ve analiz yöntemleri yardımıyla değerlendirilerek model içerisinde gerçekleşen fiziksel süreçler nitel ve nicel olarak ortaya konulmaktadır. Bu amaçla deney süresince dijital fotoğraf makineleri, video kameralar ve yüksek hızlı görüntüleme sistemleri kullanarak model davranışı kayıt altına alınmakta; özellikle saydam gözlem yüzeyine sahip deney düzeneklerinde parçacık hareketleri, malzeme akma davranışı ve malzeme etkileşimleri doğrudan izlenebilmektedir.

Elde edilen görüntüler, uygun görüntü işleme yazılımları kullanılarak analiz edilmekte ve parçacık hareketleri, akma bölgeleri ve akma sınırları ile incelenen fiziksel mekanizmaya ilişkin davranışlar nicel olarak belirlenebilmektedir. Böylece deney sonuçları yalnızca görsel gözlemlerle değil, ölçülebilir verilerle de desteklenmektedir.

Görüntü analizlerinden elde edilen bulgular, araştırmanın kapsamına uygun olarak belirlenen performans göstergeleriyle birlikte değerlendirilmektedir. İncelenen probleme bağlı olarak geri kazanım oranı, malzeme karışım oranı, akma karakteristiği, deformasyon davranışı, kömür kayıpları ve seyrelme gibi performans ölçütlerinden yararlanılarak farklı deney koşulları karşılaştırılabilmekte ve model davranışı nicel olarak yorumlanabilmektedir.

Kalite Güvence ve Kalite Kontrol

Fiziksel model deneylerinden elde edilen sonuçların güvenilirliği yalnızca deney düzeneğinin uygun şekilde tasarlanmasına değil, deneylerin kalite güvence ve kalite kontrol ilkelerine uygun olarak yürütülmesine de bağlıdır (Çelik, 2024). Kalite güvence uygulamaları, deney sürecinin planlanması, standartlaştırılması ve dokümantasyonunu kapsarken; kalite kontrol uygulamaları, deney sırasında ve sonrasında elde edilen verilerin doğruluğu, tutarlılığı ve tekrarlanabilirliğinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Deneylere başlanmadan önce model geometrisinin, deney düzeneğinin, hareketli mekanizmaların ve ölçüm sistemlerinin tasarım kriterlerine uygunluğu doğrulanmalıdır. Ayrıca deneylerde kullanılacak model malzemelerinin tane boyutu dağılımı, yoğunluğu ve diğer fiziksel özelliklerinin belirlenen kriterleri karşıladığı kontrol edilmeli; model hazırlanırken tabaka geometrisinin korunmasına ve farklı malzemelerin istenmeyen biçimde karışmamasına dikkat edilmelidir.

Deney prosedürünün tüm deneylerde aynı şekilde uygulanması, fiziksel model çalışmalarının güvenilirliği açısından temel gerekliliklerden biridir. Bu nedenle model hazırlama yöntemi, deney koşulları, ölçüm yöntemleri ve veri kayıt süreçleri standartlaştırılmalı; aynı koşullar altında gerçekleştirilen tekrar

deneyleriyle yöntemin tekrarlanabilirliği doğrulanmalıdır. Deneyler arasında önemli farklılıklar gözlenmesi durumunda ise model hazırlığı, deney koşulları ve ölçüm süreçleri yeniden değerlendirilerek sapmanın olası nedenleri belirlenmelidir.

Deneyler sırasında elde edilen görüntü, video ve diğer ölçüm verileri eksiksiz biçimde kayıt altına alınmalı ve uygun şekilde arşivlenmelidir. Veriler analiz edilmeden önce olası kayıt hataları, eksik veriler ve tutarsızlıklar kontrol edilmeli; gerekli durumlarda ilave ölçüm veya doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Bu uygulamalar, fiziksel model deneylerinden elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmanın yanı sıra farklı çalışmalar arasında sağlıklı karşılaştırmalar yapılmasına da katkı sağlamaktadır.

Fiziksel Modelin Doğrulanması

Fiziksel model deneylerinden elde edilen sonuçların güvenilirliği, model çıktılarının gerçek üretim koşullarından elde edilen saha verileri, deneysel gözlemler veya doğrulanmış sayısal model sonuçları ile karşılaştırılması yoluyla değerlendirilmektedir. Bu süreç, fiziksel modelin incelenen mekanizmayı ne ölçüde temsil ettiğinin belirlenmesine ve elde edilen sonuçların mühendislik uygulamalarındaki geçerliliğinin ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır.

Doğrulamada; çekim bölgesinin geometrisi, granüler malzemenin akma davranışı, kömür geri kazanım oranı, yan kayaç karışımı ve çekim sınırları gibi ölçülebilir veya gözlenebilir göstergeler esas alınabilmektedir. Bu göstergeler üzerinden gerçekleştirilen değerlendirmeler, fiziksel modelin gerçek üretim koşullarını ve incelenen mekanizmayı temsil etme düzeyinin ortaya konulmasını sağlamaktadır. Karşılaştırma, nicel ölçümlerin yanı sıra göçme, parçalanma ve malzeme akışı gibi mekanizmaların gözlemsel olarak değerlendirilmesi yoluyla da gerçekleştirilebilmektedir.

Fiziksel model sonuçları ile referans alınan saha veya sayısal model verileri arasında kabul edilebilir düzeyde uyum bulunması, modelin araştırılan fiziksel davranışı başarılı bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, doğrulama sürecinde ortaya çıkan farklılıkların yalnızca model eksikliklerinden kaynaklandığı kabul edilmemelidir. Ölçek etkileri, model malzemelerinin mekanik özellikleri, çekim sürecindeki düzensizlikler, sınır koşullarındaki farklılıklar ve saha verilerindeki belirsizlikler, sonuçlar arasındaki uyumu etkileyebilecek temel faktörlerdir.

Bu nedenle fiziksel model doğrulaması, sonuçların birebir örtüşmesinden ziyade modelin temel mekanizmaları ve davranış eğilimlerini ne ölçüde temsil edebildiğinin değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Başarılı bir doğrulama süreci, fiziksel model sonuçlarının üretim parametrelerinin değerlendirilmesi, tasarım alternatiflerinin geliştirilmesi ve saha uygulamalarına yönelik mühendislik kararlarının desteklenmesinde güvenilir bir temel oluşturmasını sağlamaktadır.

Sonuç ve Değerlendirme

Göçertmeli uzunayak madenciliğinde tavan kömürü çekim mekanizmasının doğru anlaşılması, kömür geri kazanımının artırılması ve üretime karışan yan kayaç miktarının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak göçük bölgesinde gerçekleşen granüler akışın ve parçacık hareketlerinin gerçek üretim koşullarında doğrudan gözlemlenememesi, fiziksel modellemeyi bu alandaki en önemli deneysel araştırma yöntemlerinden biri hâline getirmektedir.

Fiziksel model çalışmalarının güvenilirliği; benzeşim ilkelerinin doğru uygulanmasına, uygun model ölçeği ve benzer malzemelerin seçilmesine, deneylerin standart prosedürler doğrultusunda yürütülmesine ve elde edilen sonuçların saha

gözlemleri veya doğrulanmış sayısal modeller ile desteklenmesine bağlıdır. Bu nedenle fiziksel model tasarımı, tek bir standart yaklaşımdan ziyade araştırmanın amacı ve incelenen fiziksel mekanizmaya göre şekillendirilmelidir.

Gelişen görüntüleme teknolojileri ve sayısal modelleme yöntemleri, fiziksel model deneylerinden elde edilen verilerin daha ayrıntılı ve güvenilir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Fiziksel modelleme ile saha gözlemleri ve sayısal analizlerin birlikte kullanılması, tavan kömürü çekim mekanizmasının daha kapsamlı anlaşılmasına katkı sağlamakta ve üretim parametrelerinin geliştirilmesine yönelik daha güvenilir mühendislik değerlendirmelerinin yapılmasına imkân vermektedir.

Sonuç olarak fiziksel modelleme, göçertmeli uzunayak madencilğinde tavan kömürü çekim mekanizmasının araştırılmasında önemini koruyan temel deneysel yöntemlerden biridir. Benzeşim ilkelerine uygun olarak geliştirilen ve doğrulama çalışmalarıyla desteklenen fiziksel modellerin, gelecekte gerçekleştirilecek araştırmaların yanı sıra optimum çekim stratejilerinin geliştirilmesi ve üretim verimliliğinin artırılmasına yönelik mühendislik uygulamalarına önemli katkılar sağlamaya devam edeceği değerlendirilmektedir.

Kaynakça

Celik, A. (2022). *Eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğinin fiziksel modelleme ile araştırılması*. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Celik, A. (2023). Yataya yakın kalın kömür damarlarında damar eğiminin uzunayak yöntem verimliliğine etkisinin fiziksel modelleme ile araştırılması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 705–717. <https://doi.org/10.31796/ogummf.1264290>

Celik, A. (2024). Investigation of LTCC efficiency in horizontal and near-horizontal thick coal seams with a 2d physical model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57, 8381-8404. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03967-7>.

Celik, A., & Ozcelik, Y. (2021). Investigation of the efficiency of longwall top coal caving method applied by forming a face in horizontal thickness of the seam in steeply inclined thick coal seams by using a physical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 148, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104917>

Celik, A., & Ozcelik, Y. (2023). Investigation of the effect of caving height on the efficiency of the longwall top coal caving production method applied in inclined and thick coal seams by physical modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 162, 105304. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105304>

David, J. (1968). Computer simulation of the movement of ore and waste in an underground mining pillar. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 67(2), 854-859.

Huang, B., Liu, C., & Cheng, Q. (2007). Relation between top-coal drawing ratio and refuse content for fully mechanized top coal caving. *Journal of China Coal Society*, 32(8), 789-793.

Huang, B., Liu, C., Wu, F., & Wang, Z. (2006). Experimental research on drawing top-coal with loose medium model under dead-unconsolidated sandstone roof. *Journal of China University of Mining and Technology*, 35(3), (2006) 351-355.

Huang, B., Liu, C., Niu, H., & Wang, J. (2008). Research on coal-gangue flow field character resulted from great cutting height fully mechanized, *Journal of Mining and Safety Engineering*, 25(4), 415-419.

Janelid, I., & Kvapil, R. (1966). Sublevel caving, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 3, 129-153.

Jin, A., Sun, H., Wu, S., & Gao, Y. (2017). Confirmation of the upside-down drop shape theory in gravity flow and development of a new empirical equation to calculate the shape. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 92, 91-98.

Kvapil, R. (1965). Gravity flow of granular material in hoppers and bins part 1. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2, 35-41.

Kvapil, R. (1992). Sublevel Caving. In Hartman, H.L. (Ed.), *SME Mining Engineering Handbook*, Society for Mining Metallurgy and Exploration (pp. 25). Littleton, Colorado.

Lang, D., Wu, X., Wu, Y., Lin, H., & Luo, S. (2021). Boundary distribution of top-coal limitequilibrium zone in fully mechanized caving in steeply dipping coal seams. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(21), 2561-2589.

Le, T. D. (2018). *Longwall top coal caving mechanism and cavability assessment*. PhD Thesis, The University of New South Wales, Australia.

Li, X., Wang, Z., & Zhang, J. (2017). Stability of roof structure and its control in steeply inclined coal seams. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(2), 359-364.

Litwiniszyn, J. (1956). Application of the equation of stochastic processes to mechanics of loose bodies. *Archives of Mechanics*, 8(4), 393-411.

Liu, B. C., & Zhang, J. S. (1995). Stochastic method for ground subsidence due to near surface excavation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 14(4), 289-295.

Liu, C., Huang, B., & Wu, F. (2009). Technical parameters of drawing and coal-gangue field movements of a fully mechanized large mining height top coal caving working face, *Mining Science and Technology*, 15(5), 549-555.

Oiao, D., Sun, Y., & Ren, F. (2003). Study on movement probability density equation of ore drawing stochastic theory. *Journal of China Coal Society*, 28(4), 361-365.

Quang, D. H. (2010). *The effect of seam dip on the application of the longwall top coal caving method for inclined thick seams*. PhD Thesis, The University of New South Wales, Australia.

Song, Z., & Konietzky, H. (2019). A particle-based numerical investigation on longwall top coal caving mining. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 556.

Song, Z., Konietzky, H., & Herbst, M. (2020). Drawing mechanism of fractured top coal in longwall top coal caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 130, 104329.

Song, Z., Wei, W., & Zhang, J. (2018). Numerical investigation of effect of particle shape on isolated extracted zone (IEZ) in block caving. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(12), 310.

Ünver, B. (1995). Kalın damar kömür madenciliğinde tabaka kontrolü ve göçme mekanizmasına pratik bir yaklaşım. *Türkiye 14. Madencilik Kongresi (pp. 8)*, Zonguldak.

Wang, J. (2008). *Study on coal rock caving laws and technological parameters of top coal caving of fully-mechanized mining with great cutting height for thick coal seam*. PhD Thesis, China University of Mining and Technology, China.

Wang, J., & Song, Z. (2015). Characteristic and control method of initial interface between coal and rock under fully

mechanized loose top coal caving. *Journal of China Coal Science and Engineering*, 47(4), 1-4.

Wang, J., Song, Z., Zhang, J., & Chen, Y. (2016). Theoretical model of drawing body in LTCC mining. *Journal of China Coal Society*, 41(2), 352-358.

Wang, J., Wei, W., & Zhang, J. (2019a). Effect of the size distribution of granular top coal on the drawing mechanism in LTCC. *Granul Matter*, 21(3), 70.

Wang, J., Wei, W., & Zhang, J. (2019b) Theoretical description of drawing body shape in an inclined seam with longwall top coal caving mining. *International Journal of Coal Science and Technology*, 7(1), 182-195.

Wang, J., Wei, W., Zhang, J., Mishra, B., & Li, A. (2020a). Numerical investigation on the caving mechanism with different standart deviations of top coal block size in LTCC. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30, 583-891.

Wang, J., Wei, W., Zhang, J., & Mishra, B. (2020b). Laboratory and field validation of a LTCC recovery prediction model using relative size of the top coal blocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2), 1389-1401.

Wang, J., Yang, S., Li, Y., Wei, L., & Liu, H. (2014). Caving mechanisms of loose top-coal in longwall top-coal caving mining method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71, 160-170.

Wang, J., Yang, S., Wei, W., Zhang, J., & Song, Z. (2021). Drawing mechanisms for top coal in longwall top coal caving (LTCC): a review of two decades of literature. *International Journal of Coal Science & Technology*, 8(6), 1171–1196.
<https://doi.org/10.1007/s40789-021-00453-1>

Wang, J., Zhang, J., Li, Z. (2016). A new research system for caving mechanism analysis and its application to sublevel top-coal caving mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 88, 273-285.

Wang, J., Zhang, J., Song, Z., & Li, Z. (2015). Three-dimensional experimental study of loose topcoal drawing law for longwall top-coal caving mining technology. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(3), 318-326.

Wang, P., Zhao, J., Chugh, Y.P., & Wang, Z. (2017). A novel longwall mining layout approach for extraction of deep coal deposits. *Minerals*, 7(4), 60.

Yang, D., Guo, W., & Tan, Y. (2019). Study on evolution characteristics of two-zone failure mode of the overburden strata under shallow buried thick seam mining. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 9874769.

Yang, S., Zhang, J., Chen, Y., & Song, Z. (2016). Effect of upward angle on the drawing mechanism in longwall top-coal caving mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.03.004>

Yang, Y., Ma, Y., Ji, C., Kang, T., & Guo, X. (2018). Effect of mining thickness on overburden movement and underground pressure characteristics for extra thick coal seam by sublevel caving with high bottom cutting height. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 6871820.

Yu, B., Zhu, D., & Chen, Z. (2017). Top-coal drawing law of LTCC mining based on stochastic medium theory. *Journal of China Coal Society*, 42(6), 1366-1371.

Zhang, J., Pan, W., Li, Z., & Song, Z. (2015). Development and application of 3d simulation test device for loose top-coal

drawing under caving mining technique. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34, 3871-3879.

Zhang, J., Wang, J., Wei, W., Chen, Y., & Song, Z. (2018a). Experimental and numerical investigation on coal drawing from thick steep seam with longwall top coal caving method. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 96.

Zhang, N., Liu, C., Wu, X., & Ren, T. (2018b). Dynamic random arching in the flow field of top coal caving mining. *Energies*, 11(5), 1106.

Zhang, Q., Yuan, R., Wang, S., Li, D., Li, H., & Zhang, X. (2020). Optimizing simulation and analysis of automated top-coal drawing technique in extra-thick coal seams. *Energies*, 13, 232.

Zhu, D., Chen, Z., Du, W., Zhang, L., and Zhou, Z. (2018). Caving mechanisms of loose top coal in longwall top-coal caving mining based on stochastic medium theory. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(20), 621. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3987-3>

BÖLÜM 4

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN MAGMATİK PETROLOJİDE KULLANIMI: MAGMA KAYNAĞI VE EVRİM SÜREÇLERİNİN YORUMLANMASI

RECEP UĞUR ACAR¹

Giriş

Magmatik kayaçların kimyasal bileşimi, magmanın oluştuğu kaynağın özelliklerinden başlayarak kısmi ergime, kristallenme, magma karışımı ve kabuksal etkileşim gibi çok sayıda sürecin ortak sonucunu yansıtmaktadır. Ana elementler kayaçların sınıflandırılması ve magmatik farklılaşmanın genel eğilimlerinin belirlenmesinde önemli bilgiler sağlarken, iz elementler düşük konsantrasyonlarına rağmen magmatik sistemlerin kökeninin ve evriminin daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine olanak verir. Nadir toprak elementleri (Rare Earth Elements, REE), benzer kimyasal özellikleri ile seri boyunca düzenli değişen iyon yarıçaplarını birlikte taşımaları nedeniyle bu amaçla kullanılan en güçlü iz element gruplarından biridir (Henderson, 1984; Rollinson, 1993).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-0420-6263

Nadir toprak elementleri, geniş kimyasal tanımıyla lantanyumdan (La; atom numarası 57) lutesyuma (Lu; atom numarası 71) kadar uzanan 15 lantanit ile skandiyum (Sc) ve itriyumu (Y) kapsayan 17 elementten oluşur. Magmatik petrolojide kullanılan klasik REE örüntüleri ise çoğunlukla La–Lu serisini ifade eder. Y, üç değerlikli iyonunun yarıçapı ve mineral–eriyik bölümlenmesi bakımından HREE’lerle benzer davranışı nedeniyle tamamlayıcı bir element olarak değerlendirilir. Sc ise farklı bölümlenme özellikleri nedeniyle genellikle ayrı ele alınır. Bu bölümde REE terimi La–Lu serisi için kullanılmaktadır (Klein & Philpotts, 2017).

REE’lerin petrojenetik değerini belirleyen temel özellik, elementlerin çoğunun doğal magmatik koşullarda +3 değerlik durumunda bulunmasına karşın iyon yarıçaplarının La’dan Lu’ya doğru düzenli biçimde küçülmesidir. Bu düzenli değişim, her bir REE’nin mineral kafeslerindeki belirli kristalografik konumlara farklı derecelerde uyum göstermesine yol açar. Sonuçta bir kayaçtaki REE dağılımı yalnızca toplam element bolluğunu değil, magmanın kaynak mineralojisini ve evrimi sırasında ayrılan ya da sistemde kalan mineral topluluğunu da kaydeder (Henderson, 1984).

Magmatik süreçlerde REE’ler çoğunlukla uyumsuz davranır ve kısmi ergime sırasında katı kaynağa göre eriyikte, kristallenme sırasında ise gelişen kristallere göre artık eriyikte zenginleşir. Ancak bu genelleme bütün REE’ler ve bütün mineraller için aynı ölçüde geçerli değildir. Granat HREE’leri, plajiyoklaz uygun redoks koşullarında Eu’yu, amfibol ve klinopiroksen ise özellikle MREE’leri diğer REE’lere göre daha güçlü biçimde bünyelerine alabilir. Zirkon, monazit, allanit, apatit ve titanit gibi aksesuar mineraller çok düşük modal oranlarda bulunsalar bile yüksek dağılım katsayıları nedeniyle bütün-kaya REE örüntüsünü belirgin biçimde değiştirebilir (Rollinson, 1993).

REE konsantrasyonlarının doğrudan ppm değerleriyle karşılaştırılması, elementlerin doğal bolluklarında atom numarasına bağlı olarak görülen tek-çift etkisi nedeniyle örüntünün okunmasını güçleştirir. Bu nedenle veriler çoğunlukla kondritik referans değerlere göre normalize edilir. Normalizasyon, komşu elementler arasındaki doğal bolluk farkını azaltarak LREE-HREE fraksiyonlaşmasını, örüntünün eğimini ve Eu gibi elementlerin komşularına göre gösterdiği sapmaları görünür hale getirir. Bununla birlikte kullanılan normalizasyon veri seti mutlaka belirtilmelidir; farklı referans setleri aynı numunenin örüntüsünde küçük fakat yorum açısından önemli değişikliklere neden olabilir (Henderson, 1984; Rollinson, 1993).

REE örüntüleri tek başına belirli bir petrogenetik sürecin kesin kanıtı değildir. Benzer eğimler ve anomaliler farklı kaynak bileşimleri, ergime dereceleri veya kristallenme süreçleri sonucunda ortaya çıkabilir. Ayrıca mineral-eriyik dağılım katsayıları sıcaklık, basınç, mineral ve eriyik bileşimi ile oksijen fugasitesine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle REE verileri ana ve diğer iz elementler, mineral kimyası, izotop verileri, petrografik gözlemler ve arazi ilişkileriyle birlikte değerlendirilmelidir (Rollinson, 1993).

Bu bölümde nadir toprak elementlerinin temel jeokimyasal özellikleri, mineral-eriyik bölümlenmesini kontrol eden etkenler ve kondrite normalize edilmiş örüntülerin yorumlanma ilkeleri ele alınmaktadır. Amaç, REE verilerinden yalnızca betimleyici zenginleşme ve tüketilme ifadeleri üretmek değil; gözlenen örüntü ile kaynak mineralojisi, kısmi ergime ve kristallenme süreçleri arasında sınanabilir ilişkiler kurmaktır.

Nadir Toprak Elementlerinin Temel Jeokimyasal Özellikleri

Nadir toprak elementlerinin çoğu, isimlerinin düşündürdüğüne aksine, yerkabuğunda çok düşük bolluklarda bulunmaz. “Nadir toprak” adlandırması, bu elementlerin başlangıçta

görece nadir minerallerden elde edilmesi ve oksitlerinin tarihsel olarak “toprak” olarak adlandırılmasıyla ilişkilidir. Benzer kimyasal özellikleri nedeniyle birbirlerinden ayrıştırılmaları da güçtür. Bir elementin ortalama kabuk bolluğu ile ekonomik olarak işletilebilir derişimlerde bulunması farklı kavramlardır; dolayısıyla kabukta görece bol bulunması, ekonomik yataklarının da yaygın olduğu anlamına gelmez (Van Gosen vd., 2014).

Üç değerlikli lantanit iyonlarında La’dan Lu’ya doğru 4f elektron kabuğu aşamalı olarak dolar. Artan çekirdek yükünün 4f elektronları tarafından yeterince perdelenememesi, aynı koordinasyon sayısı için iyon yarıçapının seri boyunca küçülmesine neden olur. Lantanit büzülmesi olarak adlandırılan bu özellik, REE’lerin mineral kafeslerine farklı derecelerde uyum göstermesinin temel nedenlerinden biridir. Bölümlenme, iyon yarıçapının ilgili kafes konumuna uygunluğunun yanı sıra yük dengesi, mineral bileşimi ve eriyik özellikleri tarafından da kontrol edilir (Henderson, 1984).

İyon yarıçapının kafes konumuna uygunluğu, kafes gerinimi modeliyle nicel olarak açıklanabilir. Aynı yüke sahip iyonlar için kristalografik konumun tercih ettiği yarıçaptan sapma, kafesin deformasyonuna ve elementin minerale alınmasının enerji maliyetinin artmasına neden olur. Modelde uygun yarıçap, konumun elastik özellikleri ve sıcaklık birlikte değerlendirilir. Bu yaklaşım, REE dağılım katsayılarının seri boyunca neden sistematik fakat çoğu zaman kavisli değiştiğini açıklar (Blundy & Wood, 1994).

Bir elementin mineral ile eriyik arasındaki dağılımı, mineral –eriyik dağılım katsayısıyla ifade edilir:

$$D_i^{mineral / eriyik} = \frac{C_i^{mineral}}{C_i^{eriyik}}$$

Burada C, i elementinin ilgili fazdaki konsantrasyonudur. Konsantrasyonlar aynı birimlerle ifade edilir ve mineral ile eriyiğin dengede olduğu kabul edilir. Katsayının 1'den küçük olması elementin eriyikte, 1'den büyük olması ise mineralde daha yüksek konsantrasyona sahip olduğunu gösterir. Çok mineralli bir katı topluluğun toplam dağılım katsayısı şu şekilde hesaplanır:

$$\bar{D}_i = \sum_j X_j D_i^j$$

Burada X, j mineralinin katı topluluk içindeki kütle payıdır ve bu payların toplamı 1'dir. Hacimsel mineral oranları kullanılacaksa mineral yoğunlukları dikkate alınarak kütle paylarına dönüştürülmelidir. “Uyumlu” veya “uyumsuz” nitelemesi, mineral topluluğu ve fiziksel koşullar belirtilmeden elementin değişmez bir özelliği olarak kullanılmamalıdır (Rollinson, 1993).

REE'lerin büyük bölümü olivinde düşük dağılım katsayılarına sahiptir; plajiyoklazda da Eu dışındaki REE'ler genellikle düşük katsayılar gösterir. Dağılım katsayıları REE serisi boyunca aynı değildir. Olivin ve ortopiroksen HREE'leri LREE'lere göre daha güçlü tutarken, klinopiroksende MREE–HREE'lerin LREE'lere göre daha güçlü tutulduğu, bileşime ve fiziksel koşullara bağlı olarak kavisli dağılım katsayısı örüntüleri gelişebilir. Granatta HREE–LREE ayrımı çok daha belirgindir; dolayısıyla granatın ergime artığında kalması, oluşan eriyikte HREE tüketilmesine ve yüksek LREE/HREE oranlarına neden olabilir. Amfibol ise özellikle orta REE'lerin göreceli dağılımını etkileyerek örüntünün orta bölümünde kavis gelişmesine katkıda bulunabilir (Rollinson, 1993; Gaetani & Grove, 1995).

REE'lerin çoğu doğal magmatik koşullarda +3 oksidasyon basamağını korur. Ancak Eu ve Ce bu genel davranıştan ayrılabilir. Eu, uygun redoks koşullarında +2 değerlik durumuna geçerek Ca²⁺ ve Sr²⁺ ile benzer davranabilir ve plajiyoklazın kristal yapısına daha kolay girebilir. Bu nedenle plajiyoklazın magmadan ayrılması artık

eriyikte negatif Eu anomalisi, plajiyoklaz birikimi ise kümülat kayaçta pozitif Eu anomalisi oluşturabilir. Bununla birlikte Eu'nun bölünmesi yalnızca feldspat miktarına değil; oksijen fugasitesi, sıcaklık, eriyik bileşimi ve plajiyoklaz bileşimine de bağlıdır (Henderson, 1984; Rollinson, 1993; Philpotts & Schnetzler, 1968).

Ce'nin +3 ve +4 oksidasyon basamaklarında bulunabilmesi, bazı minerallerde ve jeokimyasal ortamlarda Ce anomalilerinin gelişmesine neden olabilir. Belirgin Ce anomalileri deniz suyu, kimyasal sedimanlar ve bazı alterasyon ortamlarında görülürken, magmatik zirkonlarda da pozitif Ce anomalileri yaygındır. Zirkondaki Ce anomalisi oksijen fugasitesinin yanı sıra sıcaklık ve eriyik bileşiminden etkilenir; bu nedenle magmanın oksidasyon koşullarının değerlendirilmesinde uygun kalibrasyonlarla kullanılmalıdır (Trail vd., 2012). Bütün-kaya analizlerinde görülen zayıf Ce sapmaları ise analitik belirsizlik, alterasyon ve kullanılan normalizasyon değerleri kontrol edilmeden doğrudan redoks göstergesi olarak yorumlanmamalıdır.

Nadir Toprak Elementlerinin Sınıflandırılması

REE'lerin LREE, MREE ve HREE olarak ayrılması, örüntünün farklı bölümlerindeki mineralojik kontrolleri tartışmayı kolaylaştırır; ancak bu grupların sınırları evrensel değildir. Bu bölümde LREE, La–Sm; HREE, Gd–Lu aralıklarını ifade eder. MREE terimi, bu iki grupta kısmen örtüşen Sm–Dy aralığı için kullanılır. Eu, redoksa duyarlı davranışı nedeniyle ayrıca değerlendirilir. Pm, kararlı izotopunun bulunmaması ve doğal bolluğunun çok düşük olması nedeniyle rutin jeokimyasal REE örüntülerinde genellikle yer almaz. Kullanılan aralıklar ve başlıca petrogenetik uygulamalar Tablo 1'de özetlenmiştir (Henderson, 1984; Rollinson, 1993).

Tablo 1: Nadir toprak elementlerinin genel sınıflandırması ve magmatik petrolojide başlıca kullanım alanları.

Grup	Elementler	Genel jeokimyasal özellik	Magmatik petrolojide başlıca kullanım
LREE	La, Ce, Pr, Nd, Sm	Birçok yaygın kayaç yapıcı mineralde görece uyumsuz	Kaynak zenginleşmesi, düşük dereceli kısmi ergime ve farklılaşma
MREE	Sm, Eu, Gd, Tb, Dy	LREE–HREE arasında geçiş davranışı; amfibol ve bazı aksesuar fazlara duyarlı	Amfibol, klinopiroksen, apatit ve titanit etkisinin değerlendirilmesi
HREE	Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	Granat ve zirkon gibi fazlar tarafından daha güçlü tutulabilir	Kaynak mineralojisi, artık granat ve ergime koşullarının değerlendirilmesi
Özel davranış gösteren REE	Eu, Ce	Değişken oksidasyon basamakları gösterebilir	Eu: feldspat kontrolü ve redoks; Ce: özellikle zirkonda magmatik oksidasyon koşulları

Kaynak: Henderson (1984) ve Rollinson (1993) temel alınarak yazar tarafından derlenmiştir.

Bu bölümde LREE, La–Sm; MREE, Sm–Dy; HREE, Gd–Lu aralıkları için kullanılmıştır. MREE, LREE ve HREE ile kısmen örtüşen bir ara aralıktır. Eu ve Ce’nin ayrı satırda gösterilmesi, bu elementlerin diğer gruplardan çıkarıldığı anlamına gelmez; redoksa duyarlı davranışlarını vurgular. Pm, kararlı izotopu bulunmadığından ve doğal bolluğu çok düşük olduğundan listeye alınmamıştır.

Magmatik Sistemlerde REE Dağılımını Kontrol Eden Mineral Fazlar

Bir kayacın bütün-kaya REE bileşimi, içerdği mineral ve varsa cam fazlarının REE konsantrasyonlarının kütle oranlarıyla ağırlıklandırılmış toplamını yansıtır. Bu bileşimin petrojenetik yorumu ise mevcut fazların yanı sıra, magmanın oluşumu ve evrimi sırasında kaynakta artık olarak kalan, eriyikle dengede bulunan veya eriyikten ayrılan fazların etkilerinin değerlendirilmesini gerektirir.

Aynı mineral farklı eriyik bileşimlerinde aynı dağılım katsayısını göstermeyebilir. Rollinson (1993), REE dağılım katsayılarının bazaltik, andezitik ve riyolitik eriyikler arasında önemli ölçüde değişebildiğini; özellikle piroksen, amfibol, granat ve feldspat için sıcaklık ve bileşim etkilerinin göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle literatürden seçilen tek bir dağılım katsayısı bütün magmatik sistemlere doğrudan uygulanmamalıdır.

Olivin ve ortopiroksende HREE'lerin LREE'lere göre daha güçlü tutulması yaygın bir özelliktir. Klinopiroksende ise REE dağılım katsayıları mineral ve eriyik bileşimine bağlı olarak kavisli bir örüntü gösterebilir; bu nedenle katsayıların La'dan Lu'ya kadar sürekli arttığı varsayılmamalıdır. Bazaltik ve andezitik eriyiklerde bu minerallerin REE'lere gösterdiği göreceli seçicilik, kristallenme veya kısmi ergime sırasında örüntünün eğimini ve eğriliğini değiştirebilir. Klinopiroksenin REE dağılımı üzerindeki etkisi genellikle olivinden daha güçlüdür. Bununla birlikte yalnızca örüntünün eğimine dayanarak belirli bir piroksen fazının varlığı ileri sürülmemeli; yorum mineral kimyası, ana element değişimleri ve petrografik gözlemlerle desteklenmelidir (Gaetani & Grove, 1995).

Granat, HREE'leri LREE'lere göre çok daha güçlü biçimde bünyesine alır. Bu nedenle granatın kaynaktan artık faz olarak kaldığı ergime koşullarında oluşan eriyik HREE bakımından tüketilmiş, dik eğimli bir REE örüntüsü gösterebilir. Benzer biçimde granat fraksiyonlaşması artık eriyiğin HREE içeriğini azaltabilir. Bununla birlikte HREE tüketilmesi yalnızca granata özgü değildir; felsik eriyiklerde amfibol veya zirkonun ayrılması da benzer yönde etki oluşturabilir. Granat yorumu, kayaç türü, basınç koşulları ve diğer iz element oranlarıyla desteklenmelidir.

Amfibol, özellikle orta REE'ler üzerinde güçlü bir denetim kurabilir. Orta ve felsik bileşimli eriyiklerde amfibolün yüksek MREE dağılım katsayıları, kristallenme sırasında artık eriyikte MREE bakımından göreceli bir çukur; amfibol birikimi gösteren

kayaçta ise görelî bir tümsek gelişmesine neden olabilir. Klinopiroksen ve titanit de benzer biçimde MREE'leri etkileyebildiğinden, örüntünün orta bölümündeki kavis tek başına amfibol ayrılmasının kesin kanıtı olarak görülmemelidir (Rollinson, 1993).

Feldspatların REE serisinin genel eğimi üzerindeki etkisi çoğu durumda sınırlı, Eu üzerindeki etkisi ise belirgindir. Eu²⁺ plajiyoklazda Ca²⁺ yerine geçebildiği için plajiyoklaz fraksiyonlaşması negatif, plajiyoklaz birikimi pozitif Eu anomalisi üretebilir. K-feldspat da özellikle felsik sistemlerde Eu bölümlenmesine katkıda bulunabilir. Buna karşın negatif Eu anomalisi her zaman yalnızca ileri plajiyoklaz fraksiyonlaşmasını göstermez; kaynakta feldspatın kalması veya daha önce Eu bakımından tüketilmiş bir kabuksal kaynağın yeniden ergimesi de benzer bir örüntü oluşturabilir.

Zirkon, monazit, allanit, apatit ve titanit gibi aksesuar fazlar modal olarak yüzde birin çok altında bulunsalar bile yüksek REE dağılım katsayılarına sahip olabilir. Zirkon çoğunlukla HREE'leri, monazit ve allanit LREE'leri, apatit ve titanit ise MREE'leri belirgin biçimde denetler. Bu minerallerin doygunluğa ulaştığı an, magmanın REE evriminde kırılma oluşturabilir. Özellikle felsik kayaçlarda aksesuar mineral kontrolü hesaba katılmadan yalnızca ana kayaç yapıcı mineraller üzerinden yapılan kısmi ergime veya kristallenme yorumları yanıltıcı olabilir (Rollinson, 1993).

REE Verilerinin Normalizasyonu ve Örüntülerin Okunması

Kondrite normalizasyon, tek ve çift atom numaralı elementler arasındaki doğal bolluk farkından kaynaklanan zikzaklı görünümü azaltır ve REE'ler arasındaki fraksiyonlaşmayı görünür hâle getirir. Her element için normalize değer şu şekilde hesaplanır:

$$C_{i,N} = \frac{C_{i,\text{örnek}}}{C_{i,\text{kondrit}}}$$

Burada N alt indisi kondrite normalizasyonu gösterir. Aynı birimlerle ifade edilen konsantrasyonların oranından elde edilen değer boyutsuzdur. Elementler yatay ekseninde atom numaraları artacak biçimde, normalize değerler ise genellikle logaritmik düzeyde ekseninde gösterilir. Böylece referansa göre zenginleşme düzeyi, eğim, eğrilik ve anomaliler birlikte değerlendirilir (Henderson, 1984; Rollinson, 1993).

Kullanılan kondrit referansının kaynağı açıkça belirtilmelidir. Sun ve McDonough (1989), magmatik jeokimya yaygın kullanılan referans bileşimlerinden biridir. Farklı normalizasyon setleri, örüntünün düzeyini ve küçük anomalilerin büyüklüğünü değiştirebilir. Çalışmalar karşılaştırılırken mümkünse ham konsantrasyonlar aynı referans setiyle yeniden normalize edilmelidir.

Örüntünün genel eğimi LREE ile HREE arasındaki fraksiyonlaşmayı gösterir. Yüksek $(La/Yb)_N$ oranı ve sağa doğru azalan dik bir örüntü, LREE zenginleşmesini veya HREE tüketilmesini ifade eder; ancak bu iki olasılığı birbirinden ayırmaz. LREE zenginleşmesi kaynak metasomatizması ya da düşük dereceli kısmi ergimeyle, HREE tüketilmesi ise granat gibi HREE tutan bir artık fazla ilişkili olabilir. Benzer şekilde $(La/Sm)_N$ örüntünün LREE, $(Gd/Yb)_N$ ise HREE bölümündeki fraksiyonlaşmayı özetler. Tek bir oran bütün örüntünün eğriliğini ve yerel anomalileri temsil edemeyeceğinden oranlar diyagramın yerine değil, onunla birlikte kullanılmalıdır (Henderson, 1984; Rollinson, 1993).

Eu anomalisi, normalize Eu değerinin Sm ve Gd'den beklenen değerle karşılaştırılmasıyla hesaplanır:

$$Eu / Eu^* = \frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_N \times Gd_N}}$$

Burada Eu^* normalize Sm ve Gd değerlerinin geometrik ortalamasından hesaplanan beklenen Eu değeridir. Oranın 1'den

küçük olması negatif, 1'den büyük olması pozitif sapmayı ifade eder. Sapmanın anlamlı bir anomali olarak kabul edilmesi için analitik belirsizlik dikkate alınmalıdır. Negatif anomali plajiyoklaz ayrılması, kaynakta feldspat kalması veya Eu bakımından tüketilmiş bir kabuksal bileşenin katılımıyla; pozitif anomali ise feldspat birikimi ya da Eu bakımından zengin bir bileşenin katılımıyla oluşabilir. Eu anomalisi Sr, Ba, CaO, Al₂O₃, feldspat petrografisi ve mineral kimyasıyla birlikte değerlendirilmelidir (Henderson, 1984; Rollinson, 1993).

Eu anomalisinin bulunmaması, plajiyoklazın süreçte hiç rol almadığını veya kristallenmenin mutlaka derinde gerçekleştiğini göstermez. Anomalinin büyüklüğü, başlangıç bileşimi, Eu'nun değerlik dağılımı ve feldspatın miktarı ile bölümlenme özelliklerinin ortak sonucudur. Dolayısıyla Eu anomalisi tek başına kristallenme basıncını belirlemek için kullanılmamalıdır (Henderson, 1984; Rollinson, 1993).

Örüntünün düzgünlüğü de önemli bir kalite göstergesidir. Komşu REE'ler benzer kimyasal davranış gösterdiğinden magmatik örüntüler genellikle düzenli değişir. Tek bir elementte açıklanamayan keskin sapma; analitik girişim, tayin sınırına yakın konsantrasyon, hatalı normalizasyon veya aksesuar mineral heterojenliği gibi nedenlerden kaynaklanabilir. Petrogenetik yorumdan önce ham veriler, analitik belirsizlikler ve standart ölçümleri kontrol edilmelidir.

Magma Kaynağı ve Evrim Süreçlerinin REE Verileriyle Değerlendirilmesi

REE zenginleşmesi ve fraksiyonlaşması, kaynak bileşimi ile magmatik süreçlerin ortak etkisini yansıtır. Düşük dereceli kısmi ergime, toplam dağılım katsayısı düşük olan elementlerin eriyikte güçlü biçimde zenginleşmesine neden olabilir. Ancak benzer LREE zenginleşmeleri, metasomatize olmuş bir manto kaynağının ergimesi

veya kabuksal bileşenlerin katılımıyla da oluşabilir. Kaynak bileşimi bağımsız olarak sınırlandırılmadan REE oranları doğrudan ergime derecesine dönüştürülmemelidir (Henderson, 1984; Rollinson, 1993).

Sabit toplam dağılım katsayısının kabul edildiği modal denge ergimesi modelinde aşağıdaki bağıntı kullanılır:

$$\frac{C_L}{C_0} = \frac{1}{D + F(1 - D)}$$

Burada C_1 eriyiğin, C_0 başlangıç kaynağının element konsantrasyonu; F oluşan eriyiğin başlangıç kaynak kütlelerine oranı ve üst çizgili D toplam dağılım katsayısıdır. Örneğin toplam dağılım katsayısı 0,01 için $F = 0,02$ alındığında eriyik/kaynak konsantrasyon oranı yaklaşık 33,6; $F = 0,20$ alındığında yaklaşık 4,8 olur. Bu hesap, diğer koşullar sabitken düşük ergime derecesinin uyumsuz elementlerde daha güçlü zenginleşme oluşturduğunu gösterir. Mineral fazlarının tüketildiği veya katsayıların değiştiği sistemlerde bu basitleştirilmiş model yeterli değildir (Shaw, 1970; Rollinson, 1993).

Minerallerin ergimeye katılma oranları başlangıçtaki kütle paylarından farklıysa modal olmayan denge ergimesi modeli kullanılır:

$$\frac{C_L}{C_0} = \frac{1}{D_0 + F(1 - P)}$$

Burada D_0 başlangıç katı topluluğunun toplam dağılım katsayısı, P ise minerallerin eriyiğe katkı paylarıyla ağırlıklandırılmış dağılım katsayısıdır. F , başlangıç kaynak kütlelerine göre oluşan eriyik oranını gösterir. Modal ergimede katkı payları başlangıç mineral paylarına eşittir ve $P = D_0$ olduğundan bağıntı modal denge ergimesi denkleminde indirgenir. Bu ifade, sabit mineral –eriyik dağılım katsayıları ve sabit ergime katkı payları varsayımına dayanır; bir mineral fazı tüketildiğinde sonraki evre için katsayılar

ve mineral topluluğu yeniden değerlendirilmelidir (Shaw, 1970; Rollinson, 1993).

Denge ergimesinde oluşan eriyik, ayrılınca kadar artık katıyla dengede kalır. Fraksiyonel ergimede ise eriyik küçük miktarlar hâlinde kaynaktan uzaklaştırılır. Bu iki model aynı toplam ergime derecesinde farklı element konsantrasyonları üretebilir. Doğal sistemler değerlendirilirken eriyiğin ayrılma biçimi ve kaynak mineral oranlarının değişimi dikkate alınmalıdır (Shaw, 1970; Rollinson, 1993).

Kaynakta artık granat bulunması, yüksek $(Sm/Yb)_N$ ve $(Dy/Yb)_N$ oranlarıyla birlikte düşük Yb–Lu konsantrasyonları oluşturabilir. Ancak bu göstergeler kaynak heterojenliğinden ve sonraki kristallenme süreçlerinden de etkilenir. Kaynak değerlendirmesinde mümkün olduğunca az farklılaşmış ve kristal birikimi göstermeyen örnekler seçilmelidir.

Doğal manto ergimesi tek bir basınçta gerçekleşmek zorunda değildir. Yükselen bir manto parçası, granatın kararlı olduğu koşullardan spinelin kararlı olduğu koşullara geçerken eriyik üretebilir. Farklı derinliklerde oluşan eriyiklerin birleşmesi, bütün-kaya REE örüntüsünde birden fazla mineral topluluğunun ortak etkisini oluşturur. Bu nedenle granatla uyumlu bir REE sinyali, magmanın tamamının tek bir derinlikte oluştuğunu göstermez. REE konsantrasyonlarından ergime dağılımını kestiren ters modeller de kaynak bileşimi, mineralojisi ve dağılım katsayıları gibi varsayımlara dayanır; sonuçlar doğrudan ölçülmüş derinlikler yerine bu varsayımlarla uyumlu model çözümleri olarak değerlendirilmelidir (McKenzie & O’Nions, 1991).

Sabit toplam dağılım katsayısıyla temsil edilen ideal Rayleigh fraksiyonel kristallenme modelinde aşağıdaki bağıntı kullanılır:

$$\frac{C_L}{C_0} = f^{(\overline{D} - 1)}$$

Burada C_0 başlangıç magmasının konsantrasyonu, f ise başlangıç magma kütlesine göre kalan eriyik oranıdır. Toplam dağılım katsayısı 1'den küçük olduğunda element artık eriyikte zenginleşir; 1'den büyük olduğunda konsantrasyonu azalır. Yeni fazların kristallenmeye başlaması toplam dağılım katsayısını değiştirdiğinden, özellikle aksesuar mineral doygunluğuna ulaşan felsik sistemlerde farklı kristallenme evreleri ayrı değerlendirilmelidir (Rollinson, 1993).

Magma karışımı ve kabuksal asimilasyon da REE örüntülerini değiştirebilir. Basit iki bileşenli karışımda konsantrasyonlar, bileşenlerin kütle paylarıyla ağırlıklandırılmış toplamına eşittir. Asimilasyonla eş zamanlı fraksiyonel kristallenmede (AFC), sisteme katılan malzemenin ve ayrılan kristallerin etkileri birlikte değerlendirilir. Bu süreçte gelişen iz element ve izotop ilişkileri basit iki bileşenli karışımdan farklı olabilir (DePaolo, 1981). Süreçlerin ayrıştırılmasında REE örüntülerinin yanı sıra mineral zonlanması, ankavlar, ana ve iz element ilişkileri ile uygun yaş düzeltmeleri yapılmış izotop verileri kullanılmalıdır.

Petrogenetik Yorumda Temel Sınırlamalar

REE'ler birçok magmatik ve düşük dereceli metamorfik durumda görece hareketsiz kabul edilse de bütünüyle hareketsiz değildir. Camca zengin volkanik kayalarda, yoğun alterasyonda veya halojen ve karbonat bakımından zengin akışkanların etkili olduğu sistemlerde yeniden dağılım görülebilir. Alterasyon minerallerinin varlığı, ateşte kayıp değerleri, ana element

değişimleri ve taze–alterasyonlu örnek karşılaştırmaları incelenmeden REE örüntüsünün birincil magmatik bileşimi bütünüyle koruduğu varsayılmamalıdır (Rollinson, 1993).

Bütün-kaya analizi, magmanın sıvı bileşimini her zaman doğrudan temsil etmez. Kümülatlarda kristal birikimi, porfirik kayaçlarda kristal–eriyik ayrışması ve felsik örneklerde aksesuar minerallerin heterojen dağılımı analizi etkileyebilir. Bununla birlikte fenokristal bulunması tek başına bütün-kaya bileşiminin ana magmayı temsil etmediğini göstermez; belirleyici olan kristallerin sistemden ayrılması, birikmesi veya örnekleme fazları temsil etmemesidir.

Numune hazırlama ve çözündürme yöntemleri de önemlidir. REE bakımından zengin aksesuar minerallerin örnek içinde düzensiz dağılması analizler arasında fark oluşturabilir. Dirençli fazların eksik çözündürülmesi, bazı elementlerin olduğundan düşük ölçülmesine neden olabilir. Bu nedenle örnek homojenliği, çözündürme yeterliliği, yöntem blankları, referans malzemeleri ve tekrarlı analizler değerlendirilmelidir (Rollinson, 1993).

Dağılım katsayılarının koşullara bağlılığı nicel modellerde önemli belirsizlik yaratır. Katsayılar incelenen sistemin mineral ve eriyik bileşimi ile sıcaklık ve basınç koşullarına uygun seçilmelidir. Eu ve Ce için redoks koşulları da özellikle önemlidir. Tek bir katsayı setiyle iyi matematiksel uyum elde edilmesi, modelin benzersiz olduğunu göstermez. Alternatif kaynak bileşimleri, mineral oranları ve süreçler duyarlılık analizleriyle karşılaştırılmalıdır (Rollinson, 1993; Gaetani & Grove, 1995).

REE konsantrasyonları ile izotop bileşimleri farklı bilgiler taşır. Örneğin Sm/Nd element oranı ergime ve kristallenmeyle değişebilirken, yaşa göre değerlendirilmiş Nd izotop bileşimi kaynağın zaman içindeki evrimi ve bileşenlerin karışımı hakkında ek bilgi sağlar. Kaynak yorumları bu farklı veri türlerinin birlikte

değerlendirilmesiyle güçlenir (Sun & McDonough, 1989; Rollinson, 1993).

Sonuç

REE verileri, magma kaynağının mineralojisi ile kısmi ergime ve kristallenme süreçlerinin değerlendirilmesinde güçlü bir araçtır. Ancak gözlenen örüntü kaynağı doğrudan ve tek başına temsil etmez. Kaynakta kalan mineraller, ayrılan veya biriken kristaller, aksesuar fazlar, magma karışımı ve alterasyon aynı örüntü üzerinde birlikte etkili olabilir.

Güvenilir yorum için temsili örneklem ve analitik kalite kontrolü yapılmalı; kullanılan normalizasyon değerleri, dağılım katsayıları ve model varsayımları açıkça belirtilmelidir. REE örüntülerinden üretilen hipotezler bağımsız petrografik, jeolojik ve izotopik verilerle sınanmalıdır. Böylece REE verileri yalnızca zenginleşme ve tüketilmenin tanımlanmasını değil, magma kaynağı ve evrim süreçleri için sınanabilir modeller kurulmasını da sağlar.

Kaynakça

Blundy, J., & Wood, B. (1994). Prediction of crystal–melt partition coefficients from elastic moduli. *Nature*, 372, 452–454. <https://doi.org/10.1038/372452a0>

DePaolo, D. J. (1981). Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 53(2), 189–202. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(81\)90153-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(81)90153-9)

Gaetani, G. A., & Grove, T. L. (1995). Partitioning of rare earth elements between clinopyroxene and silicate melt: Crystal-chemical controls. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(10), 1951–1962. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00119-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00119-0)

Henderson, P. (Ed.). (1984). *Rare earth element geochemistry* (Developments in Geochemistry, Vol. 2). Elsevier.

Klein, C., & Philpotts, A. R. (2017). *Earth materials: Introduction to mineralogy and petrology* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316652909>

McKenzie, D., & O’Nions, R. K. (1991). Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32(5), 1021–1091. <https://doi.org/10.1093/petrology/32.5.1021>

Philpotts, J. A., & Schnetzler, C. C. (1968). Europium anomalies and the genesis of basalt. *Chemical Geology*, 3(1), 5–13. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(68\)90009-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(68)90009-0)

Rollinson, H. R. (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific & Technical.

Shaw, D. M. (1970). Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(2), 237–243. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(70\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(70)90009-8)

Sun, S.-s., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>

Trail, D., Watson, E. B., & Tailby, N. D. (2012). Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for the oxidation state of magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 97, 70–87. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.08.032>

Van Gosen, B. S., Verplanck, P. L., Long, K. R., Gambogi, J., & Seal, R. R., II. (2014). *The rare-earth elements—Vital to modern technologies and lifestyles* (Fact Sheet 2014–3078). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/fs20143078>

