

# YER BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİNDE GÜNCEL PERSPEKTİFLER VE UYGULAMALAR

EDİTÖR:  
ÖZER ÖREN

## **BİDGE Yayınları**

Yer Bilimleri ve Mühendisliğinde Güncel Perspektifler Ve Uygulamalar

**Editör:** Özer Ören

**ISBN:** 978-625-8989-43-4

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 18.06.2026

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](http://www.bidgeyayinlari.com.tr) - [bidgeyayinlari@gmail.com](mailto:bidgeyayinlari@gmail.com)

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

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



## İÇİNDEKİLER

MADEN GÜVENLİĞİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM: İŞ KAZALARININ ÖNLENMESİNDE ENDÜSTRİ	4.0
TEKNOLOJİLERİNİN BİBLİYOMETRİK ANALİZİ .....	6
ÖZER ÖREN .....	6
ULTRAMAFİK KAYAÇLARDA HİDROTERMAL AKIŞKAN ETKİLEŞİMİ VE METAL MOBİLİZASYONU .....	29
TİJEN ÜNER .....	29
MADEN SAHASI DEĞERLEME: TEMEL İLKELER .....	57
ALİ CAN ÖZDEMİR .....	57
YERALTI KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ.....	84
İLKNUR EROL .....	84
OFİYOLİTİK KROMİT YATAKLARI: OLUŞUM, JEOKİMYA VE TÜRKİYE ÖRNEKLERİ .....	122
İREM AKSOY .....	122
KAYA KÜTLESİ KARAKTERİZASYONUNDA YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ UYGULAMALARI .....	166
MEHMET ÖZDEMİR .....	166
ŞİŞEN ZEMİNLER: GİRİŞ, LABORATUVAR DENEYLERİ VE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	192
ALİ SAMET ÖNGEN .....	192

## ÖNSÖZ

Yer bilimleri ve mühendisliği, insanlığın varoluşundan bu yana yeryüzünün ve yeraltının gizemlerini çözme, doğanın sunduğu kaynakları anlama ve bu kaynakları insanlığın refahı için güvenli bir şekilde işleme misyonunu üstlenmiştir. Günümüzde bu misyon, sadece geleneksel saha ve laboratuvar çalışmalarıyla sınırlı kalmamakta; dijitalleşme, yapay zekâ, iş sağlığı ve mühendislik yönetiminin entegrasyonu ile kabuk değiştirmektedir. Elinizdeki bu kitap, maden ve jeoloji anabilim dallarının köklü geçmişini, geleceğin teknolojileri ve metodolojileriyle buluşturan çok yönlü akademik bir çabanın ürünüdür.

Toplam yedi bölümden oluşan bu eser, yer bilimlerinin makro ölçekteki jeokimyasal süreçlerinden, mikro ölçekteki yapay zekâ algoritmalarına ve sahadaki operasyonel yönetim stratejilerine kadar uzanan geniş bir spektrumu kapsamaktadır. Kitabın kurgusu, okuyucuyu yer kabuğunun derinliklerindeki oluşumlardan alıp, modern mühendislik uygulamalarına ve geleceğin dijital madencilik vizyonuna taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Bu bütünsel akış doğrultusunda eserimiz, ultramafik kayaçlardaki hidrotermal akışkan etkileşimlerini ve metal mobilizasyonunun jeokimyasal kodlarını inceleyerek başlamakta ve ardından Türkiye’den güncel örneklerle ofiyolitik kromit yataklarının oluşum mekanizmalarına ışık tutmaktadır. Teorik ve jeokimyasal altyapıyı takip eden bölümlerde ise yer bilimlerinin modern ve dijital yüzü öne çıkmaktadır; bu kapsamda Endüstri 4.0 teknolojilerinin ve dijital dönüşümün maden güvenliğindeki yeri bibliyometrik bir yaklaşımla masaya yatırılırken, kaya kütlesi karakterizasyonunda yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamaları ile yeni nesil sayısal yöntemlerin sınırları çizilmektedir. Kitabın uygulama ve yönetim odaklı son bölümlerinde ise yeraltı kömür madenciliğinin en kritik unsuru olan iş sağlığı ve güvenliği süreçleri operasyonel bir perspektifle ele alınmakta, mühendislik yapılarının karşılaştığı en büyük jeoteknik

zorluklardan biri olan şişen zeminlerin laboratuvar deneyleri ile iyileştirme yöntemleri uygulamalı olarak sunulmakta ve nihayetinde tüm bu süreçlerin finansal karşılığı olan maden sahası değerlemenin temel ilkeleri ortaya konulmaktadır.

Farklı uzmanlık alanlarından gelen akademisyen ve araştırmacı dostlarımın titiz çalışmalarıyla hayat bulan bu çok yazarlı eser, maden ve jeoloji bilimlerinin birbirini nasıl beslediğini ve tamamladığını gösteren multidisipliner bir başvuru kaynağı niteliğindedir. Kitabın, hem bu alanda akademik çalışma yürüten araştırmacılara hem de sahada pratik çözümler üreten mühendis meslektaşlarımıza yeni ufuklar açmasını ümit ediyorum.

Bu eserin fikir aşamasından basım aşamasına kadar geçen süreçte, kıymetli bilgi ve birikimleriyle bölümlerini oluşturan, sabır ve titizlikle çalışan tüm yazar arkadaşlarıma ve kitabın siz okuyuculara ulaşmasında emeği geçen herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

DOÇ. DR. ÖZER ÖREN

KÜTAHYA DÜMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ

# **MADEN GÜVENLİĞİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM: İŞ KAZALARININ ÖNLENMESİNDE ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİNİN BİBLİYOMETRİK ANALİZİ**

**ÖZER ÖREN<sup>1</sup>**

## **Giriş**

Doğal kaynakların ekonomiye kazandırılması süreci, tarihsel süreçte ülkelerin kalkınma stratejilerinin merkezinde yer almış ve sanayileşmenin temel itici gücü olarak kabul edilmiştir. Özellikle enerji arz güvenliği ve hammadde tedariki noktasında stratejik bir role sahip olan madencilik sektörü, gelişmekte olan ve gelişmiş ekonomilerin Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) oranlarına sağladığı doğrudan katkının yanı sıra, yarattığı istihdam hacmi ve tetiklediği yan sanayi kolları ile makroekonomik dengelerin vazgeçilmez bir unsuru konumundadır (Ericsson & Löff, 2019). Küresel enerji talebindeki artış ve teknolojik üretim süreçlerinde kritik minerallere duyulan ihtiyaç, madencilik faaliyetlerinin operasyonel hacmini her geçen gün artırırken, bu büyüme sektörü ulusal ekonomiler için vazgeçilmez kılmaktadır (Duzgun & Einstein,

---

<sup>1</sup> Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-4629-1718

2004). Ancak, ekonomik refah üretimi ile doğrudan ilişkili olan bu faaliyetler, doğası gereği barındırdığı jeolojik belirsizlikler ve karmaşık riskler nedeniyle "yüksek tehlikeli" iş kolları sınıfında en üst sıralarda yer almaktadır. Tarihsel ve güncel maden felaketleri hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ekonomilerde kalıcı risklerin varlığını sürdürdüğünü göstermektedir. Bu bağlamda Çin, 684 kişinin hayatını kaybettiği 1960 Laobaidong ocağı felaketi ve 214 kişinin öldüğü 2005 Sunjiawan maden patlaması gibi en ölümcül kazalardan bazılarında sahne olmuştur (Laryea vd., 2025). Benzer şekilde Türkiye’de yaşanan en büyük maden felaketi olan ve 301 işçinin hayatını kaybettiği 2014 Soma kömür madeni patlaması, yetersiz havalandırma ve acil durum müdahale eksiklikleri dahil olmak üzere sistemsel güvenlik zafiyetlerini gözler önüne sermiştir (Spada & Burgherr, 2016). Önemli bir altın ve platin üreticisi olan Güney Afrika’da ise asansör kafesinin düşmesi sonucu 104 kişinin öldüğü 1995 Vaal Reefs altın madeni felaketi gibi çok sayıda kaza yaşanmıştır (Breckenridge, 1996). Diğer taraftan Şili’de 33 madencinin 69 gün boyunca mahsur kaldığı 2010 San José maden çökmesi, acil durum müdahalesi ve zorlu koşullarda hayatta kalma konularında küresel bir vaka çalışmasına dönüşmüştür (Ngwenyama & Webber-Youngman, 2025). Sıkı yönetmeliklere sahip olmasına rağmen ABD de, metan gazı tutuşması ve güvenlik uyumsuzluğuna dayandırılan, 29 kişinin öldüğü 2010 Upper Big Branch Madeni patlaması gibi felaketlerle karşılaşmıştır (Davis vd., 2015). Ayrıca Brezilya’da 270 can kaybıyla sonuçlanan 2019 Brumadinho atık barajı çökmesi, madencilikte kötü atık yönetiminin tehlikelerini ortaya koymuştur (Cheng vd., 2021). Son olarak Hindistan madencilik sektörü, özellikle kömür alanında, 372 kişinin öldüğü 1975 Chasnala maden felaketi ve sıkça yaşanan küçük ölçekli çökmeler gibi tekrarlayan kazalarla mücadele etmektedir (Dash vd., 2016).

Sektörün ekonomik cazibesi ile operasyonel tehlikeleri arasındaki bu paradoksal ilişki, İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) disiplinini madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliği açısından en kritik parametre haline getirmiştir. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) verileri ve güncel sektörel raporlar incelendiğinde, madencilik sektörünün küresel işgücünün yaklaşık %1'ini oluşturmasına rağmen, dünya genelindeki ölümcül iş kazalarının yaklaşık %8'inden sorumlu olduğu görülmektedir (Hermanus, 2007). Bu çarpıcı orantısızlık, madenlerdeki güvenlik açıklarının sadece teknik bir mühendislik problemi değil, aynı zamanda küresel bir halk sağlığı sorunu olduğunu kanıtlar niteliktedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, madencilik sektöründeki güvenlik performansının ülkelerin gelişmişlik düzeyleri ve yasal altyapıları ile doğrudan korelasyon gösterdiği görülmektedir. Örneğin, küresel kömür üretiminde lider konumda olan Çin, son yirmi yılda uyguladığı radikal güvenlik reformları ve teknolojik yatırımlar sayesinde ölümlü kaza oranlarında (fatality rate per million tons) belirgin bir düşüş kaydetmiş olsa da, istatistikler hala gelişmiş batı ülkelerinin gerisindedir (Chen vd., 2012). Buna karşılık, madencilik teknolojilerinin ve İSG standartlarının en üst düzeyde uygulandığı Avustralya ve ABD gibi ülkelerde, kaza sıklık oranları oldukça düşük ve yatay bir seyir izlemektedir. Ancak ABD Çalışma İstatistikleri Bürosu (BLS) verilerine göre, 2020-2021 döneminde yaşanan ani kaza artışları, güvenliğin sürdürülebilirliği konusundaki endişeleri yeniden alevlendirmiştir (BLS, 2023). Gelişmekte olan ekonomiler açısından tablo daha kritiktir. Özellikle Türkiye, Hindistan ve Rusya gibi ülkeler üzerine yapılan karşılaştırmalı analizler, bu coğrafyalardaki kaza sıklık ve şiddet oranlarının küresel ortalamaların üzerinde seyrettiğini ve "göçük", "grizu patlaması" gibi önlenemez kazaların istatistikleri domine ettiğini belgelemektedir (Sari vd., 2004).

Akademik yazım, kazaların kök nedenlerini açıklama biçiminde de son çeyrek asırda köklü bir paradigma değişimi yaşamıştır. 2000'li yılların başındaki çalışmalar, kazaların büyük oranda "işçilerin güvensiz davranışlarından" (unsafe acts) kaynaklandığını savunan geleneksel yaklaşıma odaklanırken (Patterson & Shappell, 2010); güncel araştırmalar bu bakış açısını reddetmektedir. Literatürün yeni odak noktası; yetersiz liderlik, güvenlik kültürü eksikliği ve örgütsel körlük gibi "sistemik faktörler" üzerinedir. HFACS (Human Factors Analysis and Classification System) yöntemiyle yapılan son analizler, maden kazalarında örgütsel faktörlerin (organizational factors) payının %50'lerin üzerine çıktığını, bireysel hataların ise sadece bir sonuç olduğunu göstermektedir (Lenné vd., 2012). Artan organizasyonel karmaşıklık ve veri yükü ile başa çıkabilmek adına, modern güvenlik yönetimi artık insan sezgilerinden ziyade, veri odaklı (data-driven) teknolojilere ve algoritmik karar destek sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. İşte bu noktada Endüstri 4.0 araçları devreye girmektedir.

Madencilikte iş kazaları ve güvenlik yönetimi üzerine akademik ilgi son çeyrek asırda katlanarak artmış, bu durum literatürde araştırmacıların takip etmekte zorlandığı büyük bir bilgi yığını (information overload) oluşmasına neden olmuştur. Farklı disiplinlerden (mühendislik, psikoloji, yönetim) araştırmacıların ürettiği bu dağınık verinin bütüncül bir perspektifle haritalanması, alanın entelektüel yapısının ve gelişim yönünün anlaşılması açısından elzemdir. Bu gereklilikten hareketle, mevcut çalışma; 2000-2025 yılları arasında madencilikte iş kazaları üzerine inşa edilen küresel literatürü, R-Studio tabanlı bibliyometrik analiz araçları kullanarak sistematik bir şekilde incelemeyi, araştırma eğilimlerini belirlemeyi ve gelecekteki araştırmacılara veri odaklı bir yol haritası sunmayı amaçlamaktadır. Mevcut literatürdeki benzer çalışmaların aksine bu araştırma; 2025 yılına kadar uzanan

genişletilmiş veri seti ve tematik evrim analizi yaklaşımıyla, madencilik güvenliğindeki teknolojik paradigma değişimini ampirik olarak haritalayan çalışmalardan biri olma özelliğini taşımaktadır. Çalışma, Endüstri 4.0 araçlarının—Yapay Zeka'dan giyilebilir sensörlere kadar—tehlike azaltma sınırlarını reaktif önlemlerden öngörücü zekaya nasıl yeniden tanımladığına dair ilk bütüncül bibliyometrik perspektifi sunmaktadır.

## **Materyal ve Yöntem**

### **Araştırma Tasarımı**

Bu araştırmada, madencilik endüstrisinde iş sağlığı ve güvenliği alanındaki bilimsel bilgi birikimini sistematik olarak haritalamak ve literatürün entelektüel yapısındaki dönüşümü analiz etmek amacıyla bibliyometrik analiz yöntemi benimsenmiştir. Klasik literatür taramalarının aksine, bibliyometrik analizler; belirli bir disiplindeki yayın performansını, yazar/ülke iş birliklerini ve araştırma cephelerini (research fronts) istatistiksel ve matematiksel yöntemlerle inceleyerek, büyük veri setleri içerisindeki gizli örüntüleri ortaya çıkarma kapasitesine sahiptir (Donthu vd., 2021).

### **Veri Seti ve Arama Stratejisi**

Araştırmanın veri kaynağını oluşturmak için, akademik literatürde "altın standart" olarak kabul edilen ve etki faktörü yüksek dergileri kapsamasıyla bilinen Web of Science (WoS) Core Collection veritabanı (SCI-Expanded, SSCI ve ESCI indeksleri dahil olmak üzere) tercih edilmiştir. Veri ekme işlemi 30.12.2025 tarihinde gerçekleştirilmiş olup, arama protokolü çalışmanın kavramsal çerçevesini oluşturan üç temel eksen üzerine kurgulanmıştır.

Veri setinin ilgililiğini ve odaklanmasını maksimize etmek adına, WoS arama motorunun "Konu" (Topic - TS) algoritması üzerinde spesifik bir Boolean mantığı işletilmiştir. Bu kapsamda;

yayınların başlık, özet ve anahtar kelimelerinde yer alan " Mining OR Mine industry OR Underground mine OR Open pit OR Coal mine", " Occupational accident\* OR occupational health OR OHS OR Work injur\* OR Safety OR Hazard\* OR Risk management" ve "Industry 4.0 OR Artificial Intelligence OR AI OR Machine Learning OR IoT OR Internet of Things OR Big Data OR Digital Twin\* OR Virtual Reality OR Augmented Reality OR Wearable sensor\* OR Automation OR Robotics OR Drone\* OR Unmanned" anahtar kelime grupları, arama sonuçlarının bu üç kavramın kesişim kümesinden oluşmasını sağlamak amacıyla "AND" operatörü ile birbirine bağlanarak taranmıştır. Böylece, sadece tek bir kavrama odaklanan genel çalışmalar elenmiş ve doğrudan madencilik faaliyetlerindeki kaza ve risk yönetimi süreçlerini irdeleyen eserlere odaklanılmıştır. Tarama işlemi sonucunda toplamda 2440 adet makale incelemeye alınmıştır.

Elde edilen ham veri seti, metodolojik titizliği sağlamak amacıyla bir dizi rafinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Literatürün güncel durumunu ve tarihsel gelişimini bütüncül bir şekilde yansıtmak amacıyla zaman aralığı 2000 ile 2025 yılları arasında seçilmiştir. Bilimsel katkının özgünlüğü ve güvenilirliği esas alınarak, belge türü sadece hakemli (Article & Review) kategorisiyle kısıtlanmış; bildiri özetleri, editör mektupları ve derlemeler analiz dışı bırakılmıştır. Ayrıca, küresel literatürdeki bilgi akışını doğru takip edebilmek adına yayın dili İngilizce olan çalışmalar analize dahil edilmiştir. Özellikle madencilik ve yer bilimleri alanına yönlenebilmek adına WoS kategorileri “Mining Mineral Processing - Engineering Geological - Geosciences Multidisciplinary - Environmental Sciences - Public Environmental Occupational Health” disiplinleri ile sınırlandırılmıştır.

## Analitik Süreç

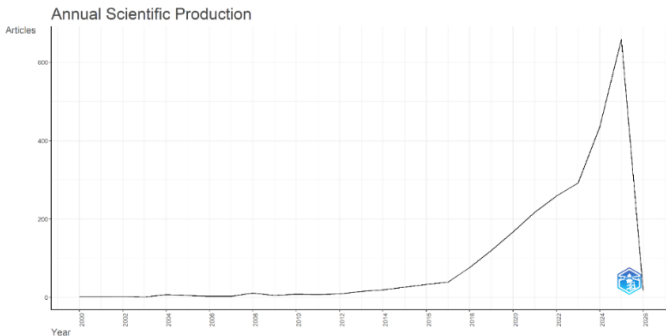
Tanımlanan arama protokolü ve filtreleme kriterleri sonucunda elde edilen nihai bibliyometrik veri seti, "Plain Text" formatında dışa aktarılarak veri temizleme işlemlerinden geçirilmiştir. Analiz ve bilimsel haritalama süreçleri, R programlama dili ekosisteminde çalışan ve kapsamlı bibliyometrik görselleştirmelere olanak tanıyan bibliometrix paketi ve onun web tabanlı arayüzü Biblioshiny kullanılarak yürütülmüştür (Aria & Cuccurullo, 2017). Bu yazılım altyapısı aracılığıyla; alanın yıllık bilimsel üretim performansı, uluslararası iş birliği ağlarının topolojisi (collaboration networks), anahtar kelime birliktelikleri (co-occurrence) ve tematik evrim haritaları oluşturularak literatürün kavramsal yapısı çok boyutlu olarak irdelenmiştir.

## Sonuçlar

### Yayın Performansı ve Büyüme Eğilimi

Madencilik güvenliği alanındaki akademik ilginin zamansal gelişimini anlamak, sektörün karşılaştığı zorluklara ve teknolojik dönüşümlere akademinin nasıl refleks verdiğini görmek açısından temel bir göstergedir. Bu bağlamda, incelenen dönemdeki yıllık yayın hacmi ve kümülatif büyüme eğilimi, alanın olgunluk seviyesini ve artan stratejik önemini somutlaştırmaktadır.

*Şekil 1. Yıllık Yayın Üretimi*



Şekil 1'de sunulan yıllık bilimsel üretim grafiği incelendiğinde, araştırma alanının gelişim seyri doğrusal bir artıştan ziyade, belirgin kırılma noktalarına sahip eksponansiyel bir büyüme (exponential growth) karakteri sergilediği görülmektedir. Literatürün gelişim süreci, yayın yoğunluğuna bağlı olarak üç temel fazda ele alınabilir:

- Kuluçka Dönemi (2000–2012): Bu dönemde yıllık yayın sayısının oldukça düşük olduğu ve yatay bir seyir izlediği görülmektedir. Bu yıllarda maden güvenliği araştırmaları, dijitalleşmeden ziyade ağırlıklı olarak geleneksel mühendislik çözümlerine, mekanik iyileştirmelere ve standart prosedürlere odaklanmıştır. Endüstri 4.0 kavramının henüz literatüre girmemiş veya yeni giriyor olması, bu dönemdeki "veri odaklı" çalışmaların sınırlı kalmasına neden olmuştur.
- Gelişim ve Farkındalık Dönemi (2013–2018): 2013 yılından itibaren grafikte hafif bir ivmelenme gözlemlenmektedir. Bu kırılma, Endüstri 4.0 paradigmasının küresel ölçekte yaygınlaşması ve 2014 Soma (Türkiye) gibi büyük ölçekli maden felaketlerinin, araştırmacıları "geleneksel yöntemlerin ötesinde" yeni arayışlara itmesiyle paralellik göstermektedir.
- Patlama ve Dijital Entegrasyon Dönemi (2019–2025): Grafikteki asıl dramatik artış 2019 sonrasında yaşanmış ve yayın sayıları her yıl katlanarak artarak 2025 yılında zirve noktasına (peak point) ulaşmıştır. Bu dönem; Yapay Zekâ, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Büyük Veri analitiğinin madencilik sektöründe uygulanabilirliğinin kanıtlandığı ve akademik ilginin "teknoloji tabanlı güvenlik yönetimine" tam anlamıyla kanalize olduğu dönemdir.

Grafiğin son sütununda (2026) görülen keskin düşüş ise, veri çekim tarihinin 2026 yılının henüz başında olması ve yalnızca erken görünüm (early access) veya kabul edilmiş makaleleri kapsamı

nedeniyedir. Dolayısıyla bu durum, akademik ilgide bir azalma olarak değil, henüz tamamlanmamış bir veri periyodu olarak yorumlanmalıdır. Mevcut trend çizgisi, 2026 yılı tamamlandığında bu sayının 2025 seviyelerini yakalayacağını veya aşacağını öngörmektedir.

## Küresel İş Birliği Ağı ve Coğrafi Dağılım

Bilimsel bilgi üretiminin sınırları aşan doğası, madencilik gibi küresel risklere sahip bir sektörde ülkeler arası bilgi transferini ve ortak çözüm arayışlarını zorunlu kılmaktadır. Hangi ülkelerin literatürü domine ettiği ve küresel bilgi ağında kimlerin merkezi rol (centrality) üstlendiğini ortaya koymak, akademik liderliğin ve iş birliği kültürünün haritalanması adına kritiktir.

*Şekil 2. Ülkeler Arası İş birliği Haritası*

Country Collaboration Map



Şekil 2’de sunulan ülkeler arası iş birliği haritası (Country Collaboration Map), küresel maden güvenliği araştırmalarının coğrafi topolojisini görselleştirmektedir. Haritadaki mavi renk tonlarının koyuluğu yayın hacmini, kırmızı bağlantı hatları ise ülkeler arasındaki ortak yazar (co-authorship) ilişkilerinin yoğunluğunu temsil etmektedir. Harita incelendiğinde üç temel yapısal bulgu öne çıkmaktadır:

1. Çin'in Hacimsel Dominasyonu: Haritada en koyu renk tonuna sahip olan Çin, niceliksel üretim açısından literatürün tartışmasız lideri konumundadır. Bu durum, Çin hükümetinin son yıllarda maden güvenliği standartlarını yükseltmek adına uyguladığı "bilim ve teknolojiye dayalı güvenlik" (science and technology-based safety) politikalarının akademik çıktılara doğrudan yansımaları olarak okunabilir.
2. Akademik "Altın Üçgen" (The Golden Triangle): İş birliği ağlarına bakıldığında, küresel bilgi akışının büyük oranda Çin, ABD ve Avustralya ekseninde şekillendiği görülmektedir. Haritadaki en kalın bağlantı hatlarının bu üç ülke arasında kurulmuş olması, madencilik teknolojilerinde lider olan bu devletlerin, güvenlik çözümlerinde de birbirleri için en önemli stratejik ortak olduklarını kanıtlamaktadır. Özellikle ABD ve Avustralya, yayın sayıları Çin'den daha az olsa da, kurdukları çok yönlü bağlantılarla küresel bilgi ağının "köprü kurucuları" (bridge builders) olarak işlev görmektedir.
3. Küresel Güney Paradoksu: Haritanın en dikkat çekici ve eleştirel yönü ise Afrika ve Güney Amerika kıtalarındaki temsiliyet zayıflığıdır. Giriş bölümünde değinilen ölümcül kazaların sıklıkla yaşandığı gelişmekte olan madenci ülkelerin (Güney Afrika, Brezilya vb.), akademik bilgi üretim ağında nispeten periferide (kıyıda) kaldığı gözlemlenmektedir. Bu asimetri, iş kazalarının yoğun olduğu coğrafyalar ile çözüm üreten akademik merkezler arasında bir "teknoloji ve bilgi transferi açığı" olduğuna işaret etmektedir.

Sonuç olarak küresel iş birliği ağı; araştırmaların ağırlıklı olarak Kuzey Yarımküre ve Avustralya merkezli gelişmiş ekonomiler tarafından domine edildiğini, kazaların yoğun olduğu ancak Ar-Ge bütçelerinin kısıtlı olduğu bölgelerin ise uluslararası iş



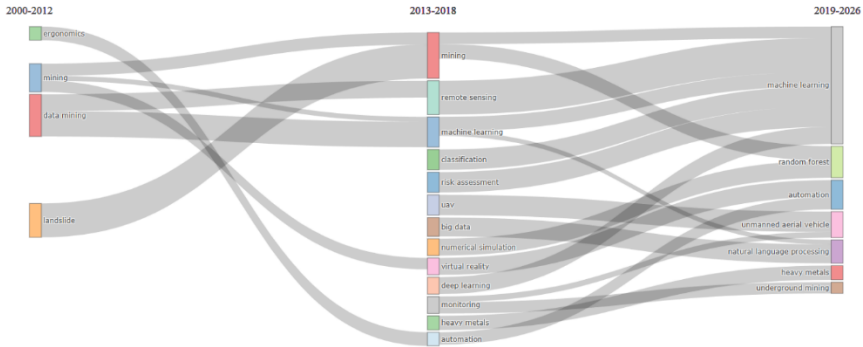
1. Algoritmik Çekirdek ve Tahminsel Modelleme (Kırmızı Küme): Ağın en yoğun kısmını oluşturan bu küme; *Random Forest (Rastgele Orman)*, *Support Vector Machine (Destek Vektör Makineleri)*, *Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağları)* ve *Ensemble Learning* gibi spesifik algoritmaların, *risk assessment (risk değerlendirme)* ve *landslide susceptibility (heyelan duyarlılığı)* gibi madencilik tehlikelerini tahmin etmede ne kadar yoğun kullanıldığını göstermektedir. Bu durum, araştırmacıların artık sadece kazaları raporlamadığını, kazaları gerçekleşmeden önce tahmin edecek matematiksel modeller inşa ettiğini doğrulamaktadır.
2. İleri Veri Analitiği ve Uzaktan Algılama (Turuncu ve Mavi Kümeler): *Deep learning (Derin Öğrenme)*, *Big Data (Büyük Veri)*, *Artificial Intelligence (Yapay Zeka)* ve *Remote Sensing (Uzaktan Algılama)* kavramlarının *Safety (Güvenlik)* düğümüyle doğrudan bağlantılı olması, Endüstri 4.0 entegrasyonunun kanıtıdır. Özellikle alt kısımdaki mavi kümede yer alan *Drone, Unmanned Aerial Vehicle (İHA)* ve *Convolutional Neural Network (Evrışimli Sinir Ağları - CNN)* birlikteliği; maden sahalarındaki güvenlik denetimlerinin artık insan gözüyle değil, bilgisayarlı görü (computer vision) ve otonom araçlar yardımıyla yapıldığı yeni bir araştırma cephesini temsil etmektedir.
3. Yükselen Teknolojiler ve Yapılandırılmamış Veri (Pembe ve Mor Kümeler): Haritanın sağ ve alt kenarlarına doğru genişleyen alanda *Digital Twin (Dijital İkiz)*, *Virtual Reality (Sanal Gerçeklik)*, *Natural Language Processing (Doğal Dil İşleme)* ve *Text Mining (Metin Madenciliği)* gibi öncü teknolojiler dikkat çekmektedir. Bu durum, maden güvenliği yönetiminin fiziksel sensör verilerinin ötesine geçerek; sanal simülasyonlar (dijital ikizler) ve geçmiş kaza raporlarının algoritmalarca okunduğu (metin madenciliği) çok boyutlu bir yapıya evrildiğini göstermektedir.

Bu kavramsal haritanın en önemli çıktısı, içerdiği kelimelerden ziyade içermediği kelimelerdir. Geleneksel iş sağlığı ve güvenliği literatürünü domine eden "insan hatası", "yönetimsel zafiyetler" veya "reaktif kaza incelemeleri" gibi kavramların ağın merkezinden tamamen silinmesi, çalışma kapsamında öne sürülen "veri odaklı (data-driven) teknolojik paradigma değişimi" tezini ampirik olarak doğrulamaktadır.

## Tematik Evrim ve Araştırma Cepheleri

Bilimsel alanlar statik değildir; teknolojik gelişmeler ve değişen endüstriyel ihtiyaçlarla birlikte çalışma konuları da zaman içinde evrimleşir. Madencilik güvenliği araştırmalarında geçmişten günümüze yaşanan paradigma değişimini ve konuların "reaktif önlemlerden" "proaktif teknolojilere" doğru nasıl bir akış izlediğini haritalamak amacıyla, veri seti kırılma yılları (2012 ve 2018) baz alınarak üç döneme ayrılmış ve tematik evrim analizi (Alluvial Plot) gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4. Tematik Evrim Grafiği



Şekil 4'te sunulan tematik evrim grafiği incelendiğinde, literatürün soldan sağa doğru izlediği akış, madencilikte iş güvenliği anlayışının mekanik-insan ekseninden algoritmik eksene geçişinin kronolojik bir özetini sunmaktadır:

1. Birinci Dönem (2000–2012) - Fiziksel Riskler ve Veri Madenciliğinin Doğuşu: Grafiğin sol sütununda yer alan bu kuluçka döneminde, araştırmaların odak noktasını *ergonomics (ergonomi)*, *landslide (heyelan)* ve genel hatlarıyla *mining (madencilik)* gibi kavramlar oluşturmaktadır. Bu dönem, güvenliğin henüz fiziksel koşulların iyileştirilmesi ve temel mühendislik önlemleriyle sınırlandırıldığı yılları temsil etmektedir. Bununla birlikte, bu dönemde ortaya çıkan dar bantlı *data mining (veri madenciliği)* akıntısı, gelecekteki teknolojik devrimin ilk sinyali niteliğindedir.
2. İkinci Dönem (2013–2018) - Dijital Çeşitlenme ve Proaktif Geçiş: Grafiğin orta sütununa gelindiğinde, tematik çeşitliliğin (node sayısının) bir anda patlama yaptığı görülmektedir. Özellikle yeraltı ve kömür madenciliği gibi yüksek riskli alanlardaki güvenlik arayışlarının artmasıyla birlikte literatüre; *remote sensing (uzaktan algılama)*, *UAV (insansız hava araçları)*, *big data (büyük veri)* ve *virtual reality (sanal gerçeklik)* gibi Endüstri 4.0 bileşenleri hızla giriş yapmıştır. İlk dönemden gelen *data mining* akıntısı, bu dönemde *machine learning (makine öğrenmesi)* ve *deep learning (derin öğrenme)* gibi daha kompleks algoritmik kollara ayrılarak, güvenliğin veri tahminiyle (risk assessment) yönetilebileceği fikrini literatüre yerleştirmiştir.
3. Üçüncü Dönem (2019–2026) - Yapay Zeka Hegemonyası ve Özelleşmiş Algoritmalar: Grafiğin sağ sütununda (günümüz) izlenen tablo, "veri odaklı teknolojik paradigma" tezini kesin olarak doğrulamaktadır. İkinci dönemdeki pek çok farklı teknolojik dalgalanma (büyük veri, uzaktan algılama vb.), tek ve devasa bir machine learning (makine öğrenmesi) bloğu içinde konsolide olmuştur. Bu durum, yapay zekanın artık alternatif bir araç değil, endüstriyel güvenliğin "ana motoru" haline geldiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca bu son periyotta, *random forest (rastgele*

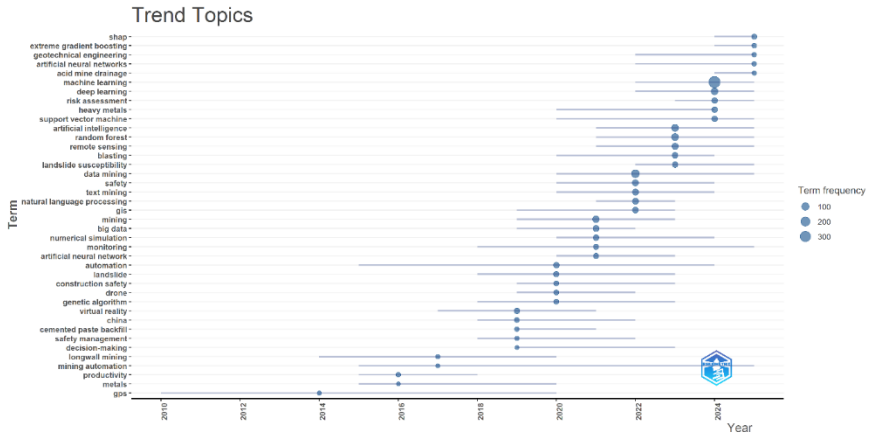
orman) gibi spesifik tahmin algoritmalarının ve yazılı güvenlik raporlarını analiz eden *natural language processing* (doğal dil işleme) gibi öncü teknolojilerin belirginleştiği görülmektedir.

Tematik akış haritası; maden kazalarını önleme stratejilerinin, son çeyrek asırda işçinin fiziksel davranışlarını veya madenin genel mekanik yapısını (ergonomi) düzeltmekten ziyade, "gerçek zamanlı veri akışını yapay zeka ile işleyerek kazayı olmadan önce tahmin etme" (predictive safety) noktasına evrildiğini somut olarak ortaya koymaktadır.

## Trend Konular ve Gelecek Projeksiyonu

Endüstri 4.0 ve dijitalleşme sürecinin hız kazanmasıyla birlikte, akademi dünyasının odaklandığı konular da hızla çeşitlenmektedir. Araştırmacıların son yıllarda yoğunlaştığı 'trend konuları' tespit etmek, alanın mevcut sınırlarını çizmek ve gelecekteki potansiyel çalışma alanlarına dair araştırmacılara veri odaklı bir projeksiyon sunmak açısından elzemdir.

Şekil 5. Yıllara göre Trend Konular



Şekil 5'te sunulan trend konular grafiği, yazarlar tarafından en sık kullanılan anahtar kelimelerin yıllara göre popülerite ömürlerini ve zirve (peak) yaptıkları dönemleri (mavi baloncuklar)

göstermektedir. Aşağıdan yukarıya (geçmişten günümüze) doğru incelendiğinde, literatürün teknolojik olgunlaşma süreci üç net aşamada okunabilmektedir:

1. Temel Donanım ve Otomasyon Evresi (2014–2018): Grafiğin alt sıralarında yer alan *gps*, *mining automation (maden otomasyonu)* ve *productivity (üretkenlik)* gibi kavramlar, dijitalleşmenin ilk adımlarını temsil etmektedir. Bu dönemde odak noktası güvenliği artırmaktan ziyade, üretimi hızlandırmak ve donanımsal takip yapmaktır.
2. Veri Toplama ve Simülasyon Evresi (2019–2022): Grafiğin orta bölümüne gelindiğinde balonların büyüdüğü ve konuların değiştiği görülmektedir. *Virtual reality (sanal gerçeklik)*, *drone*, *big data (büyük veri)* ve *natural language processing (doğal dil işleme)* gibi konuların zirve yaptığı bu yıllar; maden sahalarından veri toplanması, tehlikelerin modellenmesi ve risklerin haritalanması (risk mapping) için dijital altyapıların kurulduğu dönemdir.
3. İleri Analitik ve Açıklanabilir Yapay Zeka Evresi (2023–2026): Grafiğin en üst kısmı, mevcut durumun ve geleceğin projeksiyonunu sunmaktadır. *Machine learning (makine öğrenmesi)* en büyük baloncuk hacmiyle literatürü domine etmeye devam ederken; en güncel sıçramalar *extreme gradient boosting (XGBoost)* ve SHAP (Shapley Additive exPlanations) gibi çok spesifik alt dallarda yaşanmıştır.

Özellikle en tepede yer alan SHAP ve XGBoost kavramları son derece kritik bir eşige işaret etmektedir. Bu bulgu, maden güvenliği araştırmalarının artık standart "kara kutu" (black-box) yapay zeka modellerini geride bıraktığını; bunun yerine, *Açıklanabilir Yapay Zeka (Explainable AI - XAI)* konseptine geçiş yaptığını kanıtlamaktadır. Yani araştırmacılar ve sektör profesyonelleri sadece "kaza olacak" diyen bir algoritmaya değil,

"hangi parametrenin kazaya yüzde kaç oranında etki ettiğini" (örneğin havalandırma düşüşü, gaz birikimi vb.) şeffaf bir şekilde açıklayan algoritmalara yönelmektedir. Dolayısıyla, madencilik güvenliğinin gelecekteki ana araştırma cephesi; yapay zeka modellerinin insan (mühendis/işçi) ile olan güven ilişkisini tesis edecek "şeffaf karar destek sistemleri" üzerinde şekillenecektir.

## **Tartışma**

Bu çalışma, madencilik sektöründe iş kazalarının önlenmesi amacına yönelik küresel araştırma eğilimlerinin, son çeyrek asırda nasıl bir kavramsal ve teknolojik dönüşüm geçirdiğini bibliyometrik kanıtlarla ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, maden güvenliği literatürünün yalnızca niceliksel bir büyüme yaşamadığını; aynı zamanda "insan hatası ve fiziksel koşullar" ekseninden, "veri odaklı öngörücü algoritmalar" eksenine doğru radikal bir paradigma değişimi (paradigm shift) geçirdiğini göstermektedir.

Büyüme Dinamikleri ve Küresel Eşitsizlik: Yıllık bilimsel üretim verileri (Şekil 1), Endüstri 4.0 teknolojilerinin madencilğe entegrasyonunun özellikle 2019 sonrasında eksponansiyel bir akademik ilgi yarattığını kanıtlamaktadır. Ancak küresel iş birliği ağı (Şekil 2) incelendiğinde, bu bilgi üretiminin homojen dağılmadığı açıkça görülmektedir. Çin'in hacimsel dominasyonu ve ABD-Avustralya-Çin arasında kurulan "Altın Üçgen", yüksek teknoloji güvenliği çözümlerinin gelişmiş veya sermaye yoğun ekonomilerde tekelleştiğini göstermektedir. Buna karşılık, iş kazalarının ve ölümlerin küresel ölçekte en yoğun yaşandığı Güney Amerika ve Afrika gibi "Küresel Güney" ülkelerinin bu araştırma ağının çeperinde kalması, literatürde bir "teknoloji ve bilgi transferi açığı" olduğuna işaret etmektedir. Bu durum, teknolojik güvenlik çözümlerinin donanımsal maliyetlerinin, gelişmekte olan ülkelerdeki maden işletmeleri için hala önemli bir bariyer olduğunu düşündürmektedir.

Reaktiften Proaktife Teknolojik Evrim: Kavramsal yapı ve tematik evrim analizleri (Şekil 3 ve Şekil 4), madencilikte iş sağlığı ve güvenliği yaklaşımının temelden sarsıldığını doğrulamaktadır. 2000'li yılların başlarında literatürü domine eden ergonomi, yeraltı koşullarının fiziksel iyileştirmesi ve geleneksel risk yönetimi gibi "reaktif" veya "düzeltici" temalar, yerini tamamen "Makine Öğrenmesi" (Machine Learning) merkezli proaktif sistemlere bırakmıştır. Sensör teknolojilerinin, insansız hava araçlarının (UAV) ve büyük verinin (Big Data) merkeze yerleşmesi; güvenlik yönetiminin artık bir maden mühendisliği probleminden ziyade, çok disiplinli bir "veri bilimi" (data science) problemine dönüştüğünü kanıtlamaktadır.

Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI) İhtiyacı: Çalışmanın en çarpıcı bulgularından biri, trend konular analizinde (Şekil 5) güncel dönemin zirvesine yerleşen SHAP ve XGBoost kavramlarıdır. Makine öğrenmesinin maden sahalarında kullanımının artması, algoritmaların riskleri nasıl tahmin ettiğine dair bir "kara kutu" (black-box) sorunsalını doğurmuştur. SHAP (SHapley Additive exPlanations) gibi kavramların literatürde aniden yükselmesi, araştırmacıların artık sadece kazaları yüksek doğrulukla tahmin eden algoritmalar geliştirmekle yetinmediğini; aynı zamanda bu algoritmaların "hangi parametreye (gaz seviyesi, tahkimat basıncı vb.) dayanarak bu kararı verdiğini" mühendislere şeffafça sunan Açıklanabilir Yapay Zeka (Explainable AI - XAI) modellerine yöneldiğini göstermektedir. Bu, teknolojinin sahada insan (işçi/mühendis) güvenini kazanması açısından kritik bir eşiktir.

## **Sonuç**

Bu araştırma, 2000-2025 yılları arasında maden güvenliği ve iş kazaları bağlamında üretilen akademik literatürü Endüstri 4.0 çerçevesinde haritalayan en güncel ve kapsamlı bibliyometrik çalışmalardan birini sunmaktadır. Çalışma sonucunda, maden

kazalarını önleme stratejilerinin geleneksel insan-makine etkileşiminden çıkararak; nesnelere interneti, dijital ikizler ve makine öğrenmesi destekli karar destek sistemlerine kalıcı olarak evrildiği ampirik verilerle ispatlanmıştır.

**Çalışmanın Önemi ve Literatüre Katkısı:** Mevcut çalışma, dağınık haldeki küresel literatürü yapılandırarak madencilik güvenliğindeki teknolojik rotayı somutlaştırmış ve araştırmacıların "bilgi yığını" (information overload) içinde kaybolmasını önleyen stratejik bir yol haritası sunmuştur. Çalışma ayrıca, kazaların kök nedenlerini organizasyonel faktörlere (HFACS vb.) bağlayan teorik yaklaşımların, artan veri karmaşıklığı karşısında ancak Endüstri 4.0 araçlarıyla desteklendiğinde sürdürülebilir bir güvenlik kültürü yaratabileceğini ortaya koymuştur.

**Kısıtlılıklar ve Gelecek Çalışmalar İçin Zemin:** Araştırmanın veri seti Web of Science (WoS) veri tabanındaki İngilizce yayınlarla sınırlıdır. Gelecekteki bibliyometrik veya sistematik derleme çalışmalarının, Scopus gibi farklı veri tabanlarını veya bölgesel (örneğin Çince veya Rusça) yayınları sürece dahil etmesi küresel perspektifi genişletebilir. Gelecekteki araştırmacılar ve endüstri profesyonelleri için bu çalışma şu kritik alt zeminleri hazırlamıştır:

- **Açıklanabilir Algoritmalar:** Yapay zeka tabanlı risk tahmin modellerinin yeraltı madenlerinde operasyonel hale gelebilmesi için, kararların "nedenselliğini" kanıtlayan Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI) entegrasyonlu saha uygulamalarına ağırlık verilmelidir.
- **Gelişmekte Olan Ükelere Uygun Çözümler:** Küresel iş birliği haritasındaki asimetriyi kırmak adına, "düşük maliyetli sensör ağları" (low-cost IoT) ve açık kaynaklı makine öğrenmesi modelleri geliştirilerek, yüksek kaza oranlarına sahip gelişmekte olan ülkeler için erişilebilir teknolojik güvenlik konseptleri üretilmelidir.

- Dinamik Dijital İkizler: Geleneksel risk yönetimi statik raporlara dayanırken, gelecekteki çalışmalar maden sahasının anlık fiziksel, kimyasal ve jeolojik verisini eş zamanlı işleyen "dijital ikiz" (digital twin) tabanlı erken uyarı sistemleri üzerine yoğunlaşmalıdır.

## Kaynakça

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, *11*(4), 959–975.

<https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

Breckenridge, K. (1996). The banality of crisis: New histories of the gold mining industry. *Journal of Natal and Zulu History*, *16*(1), 69–98.

<https://doi.org/10.1080/02590123.1996.11964092>

Bureau of Labor Statistics (BLS). (2023). *Injuries, illnesses, and fatalities in the mining industry*. U.S. Department of Labor.

<https://www.bls.gov/iif/>

Chen, H., Qi, H., Long, R., & Zhang, M. (2012). Research on 10-year tendency of China coal mine accidents and characteristics of human factors. *Safety Science*, *50*(4), 745–750.

<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.08.040>

Cheng, D., Cui, Y., Li, Z., & Iqbal, J. (2021). Watch out for the tailings pond, a sharp edge hanging over our heads: Lessons learned and perceptions from the Brumadinho tailings dam failure disaster. *Remote Sensing*, *13*(9), 1775.

<https://doi.org/10.3390/rs13091775>

Dash, A. K., Bhattacharjee, R. M., & Paul, P. S. (2016). Lessons learnt from Indian inundation disasters: An analysis of case studies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *20*, 93–102.

<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.10.013>

Davis, S. G., Engel, D., & van Wingerden, K. (2015). Complex explosion development in mines: Case study—2010 Upper Big Branch Mine explosion. *Process Safety Progress*, *34*(3), 286–303.

<https://doi.org/10.1002/prs.11710>

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *133*, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>

Duzgun, H. S., & Einstein, H. H. (2004). Assessment and management of roof fall risks in underground coal mines. *Safety Science*, *42*(1), 23–41. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(02\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(02)00067-X)

Ericsson, M., & Löf, O. (2019). Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016. *Mineral Economics*, *32*(3), 223–250. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00191-6>

Hermanus, M. A. (2007). Occupational health and safety in mining—status, new developments, and concerns. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *107*(8), 531–538. [https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X\\_3264](https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_3264)

Laryea, A. E. N., Ren, W., Guo, Q., & Kang, Z. (2025). Spontaneous coal combustion, direct and indirect impact on mining in China: A prospective review and proposal of a five-level comprehensive mine safety management structure (5L-CMSMS) coupled with hazard zoning and barrier systems. *Combustion Science and Technology*, *197*(10), 2247–2279. <https://doi.org/10.1080/00102202.2024.2306902>

Lenné, M. G., Salmon, P. M., Liu, C. C., & Trotter, M. (2012). A systems approach to accident causation in mining: An application of the HFACS method. *Accident Analysis & Prevention*, *48*(1), 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.026>

Ngwenyama, P. L., & Webber-Youngman, R. C. W. (2025). An empirical study on the survivability of trapped miners in underground mines post-accident—a global analysis. *Safety in*

*Extreme Environments*, 7(14), 1–34. <https://doi.org/10.1007/s42797-025-00126-1>

Patterson, J. M., & Shappell, S. A. (2010). Operator error and system deficiencies: Analysis of 508 mining incidents and accidents using HFACS. *Accident Analysis & Prevention*, 42(4), 1379–1385. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.02.018>

Sari, M., Duzgun, H.S.B., Karpuz, C., Selcuk, A.S. (2004). Accident analysis of two Turkish underground coal mines. *Safety Science*, 42(8), 675–690. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2003.11.002>

Spada, M., & Burgherr, P. (2016). An aftermath analysis of the 2014 coal mine accident in Soma, Turkey: Use of risk performance indicators based on historical experience. *Accident Analysis and Prevention*, 87, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.11.020>

# ULTRAMAFİK KAYAÇLARDA HİDROTERMAL AKIŞKAN ETKİLEŞİMİ VE METAL MOBİLİZASYONU

TİJEN ÜNER<sup>1</sup>

## Giriş

Ultramafik kayaçlar, kendilerine özgü mineralojik ve jeokimyasal bileşimleri nedeniyle litosfer içerisindeki en reaktif kayaç topluluklarından birini oluşturmaktadır. Başlıca olivin, piroksen ve serpantin grubu minerallerden oluşan bu kayaçlar, farklı tektonik ve hidrotermal koşullar altında akışkan-kaya etkileşimlerine karşı oldukça duyarlıdır (Evans, 2004; Frost & Beard, 2007). Hidrotermal akışkanlar ile ultramafik kayaçlar arasındaki etkileşimler; mineral dönüşümleri, kütle transferi, element yeniden dağılımı ve metal mobilizasyonu üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Barnes et al., 1978; Klein & Bach, 2009).

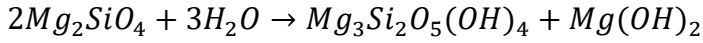
Ultramafik sistemlerde gerçekleşen hidrotermal akışkan-kaya etkileşimleri, kayaçların fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Serpantinleşme, karbonatlaşma

---

<sup>1</sup> Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,  
Orcid: 0000-0001-6059-9148

ve listvenitleşme gibi metasomatik süreçler; mineral parajenezini, geçirgenliği, redoks koşullarını ve akışkan dolaşım yollarını değiştirerek metal taşınımı ve çökelişi için uygun ortamların gelişmesine neden olmaktadır (Halls & Zhao, 1995; Klein & Garrido, 2011). Bu süreçler yalnızca ultramafik kayaların jeodinamik evrimini değil, aynı zamanda Ni, Co, Cr, Fe ve Au gibi ekonomik açıdan önemli metalik cevherleşmelerin oluşumunu da kontrol etmektedir (Groves et al., 1998; Tsikouras et al., 2016).

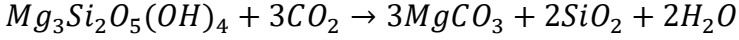
Bu dönüşüm süreçleri içerisinde serpantinleşme, ultramafik kayaları etkileyen en önemli metasomatik reaksiyonlardan biridir. Serpantinleşme sırasında birincil olivin ve piroksen mineralleri sulu akışkanlarla reaksiyona girerek serpantin mineralleri, brusit, manyetit ve hidrojen bakımından zengin fazların oluşmasına neden olur (O'Hanley, 1996; McCollom & Bach, 2009). Sürecin basitleştirilmiş reaksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:



Bu reaksiyon yalnızca kayaç mineralojisinde değişime neden olmakla kalmaz, aynı zamanda redoks koşullarını ve akışkan kimyasını değiştirerek Fe, Ni ve Co gibi geçiş metalleri üzerinde önemli bir mobilizasyon etkisi oluşturur (Alt & Shanks, 2006; Evans, 2008). Ayrıca serpantinleşme süreçleri, oldukça indirgen ortamların gelişmesine neden olarak sonraki hidrotermal ve metasomatik reaksiyonları da kontrol edebilmektedir (McCollom & Bach, 2009).

Serpantinleşmiş ultramafik kayaların CO<sub>2</sub> bakımından zengin hidrotermal akışkanlarla etkileşimi sonucunda ise yaygın karbonatlaşma ve listvenitleşme gelişebilmektedir. Bu süreçlerde serpantin mineralleri karbonat ve silis bakımından zengin topluluklar ile yer değiştirir; magnezit, dolomit, kuvars ve yer yer fuksit içeren parajenezler gelişir (Hansen et al., 2005; Falk &

Kelemen, 2015). Genel bir karbonatlaşma reaksiyonu şu şekilde gösterilebilir:



Bu reaksiyonlar, çözünme-çökeltme mekanizmaları aracılığıyla önemli element taşınımı ve yeniden dağılımına neden olmakta; aynı zamanda yapısal olarak denetlenen akışkan yolları boyunca geçirgenlik gelişimini de kontrol etmektedir (Kelemen & Matter, 2008; Beinlich et al., 2012). Özellikle fay zonları ve kırık sistemleri, hidrotermal akışkan dolaşımı için uygun geçirgenlik kanalları oluşturarak alterasyonun ve cevherleşmenin konumunu belirleyen temel yapısal unsurlar hâline gelmektedir (Sibson, 1996; Cox, 2005).

Ultramafik sistemlerde metal mobilizasyonu; akışkan bileşimi, sıcaklık, basınç, redoks koşulları, akışkan/kayaç oranı ve yapısal geçirgenlik gibi birçok parametrenin birlikte kontrol ettiği karmaşık süreçlerin sonucudur. Hidrotermal akışkanlar metalleri çoğunlukla klorür, bisülfür, hidroksit ve karbonat kompleksleri şeklinde taşımaktadır (Seward & Barnes, 1997; Williams-Jones & Migdisov, 2014). Akışkan göçü sırasında fizikokimyasal koşullarda meydana gelen değişimler bu komplekslerin kararsız hâle gelmesine ve metal çökeline neden olmaktadır (Robb, 2005). Bu nedenle hidrotermal alterasyon süreçleri ile akışkan evriminin anlaşılması, ultramafik kayaç ilişkili metalik cevherleşmelerin kökeninin yorumlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, ultramafik kayaçlarda gelişen hidrotermal sistemlerin yalnızca basit alterasyon süreçleri olarak değerlendirilmemesi gerektiğini; aksine çok evreli akışkan dolaşımı, tektonik yeniden etkinleşme ve tekrarlayan metasomatik olaylar içeren dinamik açık sistemler olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir (Halls & Zhao, 1995; Falk & Kelemen, 2015).

Özellikle karbonatlaşma zonları ve listvenit sistemleri, orojenik altın cevherleşmeleri ve kritik metal zenginleşmeleri ile olan ilişkileri nedeniyle giderek daha fazla dikkat çekmektedir (Groves et al., 1998; Ash & Arnaud, 1997).

Bu bölümde, hidrotermal akışkanların ultramafik kayalarda gelişen alterasyon süreçleri ve metal mobilizasyonu üzerindeki rolü değerlendirilmektedir. Özellikle serpantinleşme, karbonatlaşma, listvenitleşme ve yapısal olarak kontrol edilen akışkan dolaşımı süreçlerinin fizikokimyasal denetimleri ile bunların hidrotermal cevherleşme sistemleri üzerindeki etkileri ele alınmaktadır.

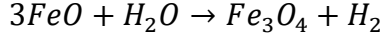
### **Ultramafik Kayaların Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri**

Ultramafik kayalar, yüksek MgO ve FeO içerikleri ile düşük SiO<sub>2</sub> oranlarıyla karakterize edilen ve büyük ölçüde manto kökenli minerallerden oluşan kayalardır. Başlıca dunit, harzburjit, lertzolit ve piroksenit gibi kaya türlerini kapsayan bu kayalar; olivin, ortopiroksen, klinopiroksen ve kromit gibi mineraller bakımından zengindir (Bodinier & Godard, 2014). Bu mineralojik bileşim, ultramafik kayaları hidrotermal alterasyon süreçlerine karşı son derece duyarlı hâle getirmektedir.

Ultramafik kayaların en önemli özelliği, mineral fazlarının termodinamik olarak yüzey ve kabuksal koşullarda kararsız olmasıdır. Özellikle olivin ve piroksen mineralleri, düşük sıcaklık ve yüksek akışkan aktivitesi koşullarında kolaylıkla hidratasyon ve karbonatlaşma reaksiyonlarına uğramaktadır (Evans, 2004; Frost & Beard, 2007). Bu nedenle ultramafik kayalar, hidrotermal sistemlerde yoğun metasomatik dönüşümlere maruz kalabilmektedir.

Olivin, ultramafik kayaların en yaygın minerallerinden biri olup genellikle forsterit-fayalit serisi içerisinde yer almaktadır. Mg bakımından zengin forsteritik bileşimler, hidrotermal akışkanlarla

reaksiyona girerek serpantin mineralleri, brusit ve manyetit oluşumuna neden olmaktadır (O'Hanley, 1996). Bu süreç sırasında  $Fe^{2+}$  iyonlarının oksidasyonu gerçekleşmekte ve sistemin redoks koşulları önemli ölçüde değişmektedir. Serpantinleşme sırasında gelişen temel reaksiyonlardan biri şu şekilde ifade edilmektedir:



Bu reaksiyon, serpantinleşme sırasında hidrojen üretimini açıklayan temel mekanizmalardan biridir ve indirgen koşulların gelişmesinde önemli rol oynamaktadır (McCollom & Bach, 2009). Hidrojen üretimi yalnızca akışkan kimyasını değiştirmekle kalmamakta, aynı zamanda metal komplekslerinin kararlılığı üzerinde de etkili olmaktadır.

Ultramafik kayaların önemli bir diğer bileşeni krom spinel mineralleridir. Kromit, özellikle Cr, Al ve Fe bakımından zengin bir spinel fazı olup hidrotermal alterasyon süreçlerine karşı göreceli olarak dirençli kabul edilmektedir. Bununla birlikte yoğun serpantinleşme ve karbonatlaşma süreçlerinde kromit çevresinde çatlak gelişimi, Fe zenginleşmesi ve yer yer Cr mobilizasyonu gözlemlenmektedir (Mellini et al., 2005). Bu durum ultramafik sistemlerde metal davranışının yalnızca birincil mineralojik bileşimle değil, aynı zamanda alterasyon derecesi ile de yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

Serpantin mineralleri, ultramafik kayaların hidrotermal dönüşümünde en yaygın ikincil fazları oluşturmaktadır. Antigorit, krizotil ve lizartit gibi serpantin polimorfları; sıcaklık, basınç ve deformasyon koşullarına bağlı olarak gelişmektedir (Evans, 2004). Özellikle antigorit yüksek sıcaklık koşullarında daha kararlı olup bölgesel metamorfizma ve derin dolaşımli hidrotermal sistemlerle ilişkilendirilmektedir. Buna karşılık krizotil ve lizartit daha düşük sıcaklıklı hidrotermal ortamlarda yaygın olarak gelişmektedir.

Ultramafik kayaçların yüksek Mg içeriği, bu kayaçları CO<sub>2</sub> bakımından zengin akışkanlarla reaksiyona son derece uygun hâle getirmektedir. Bu süreçler sırasında serpantin mineralleri ve brusit karbonat minerallerine dönüşmekte; magnezit, dolomit ve siderit gibi karbonat fazları gelişmektedir (Kelemen & Matter, 2008; Beinlich et al., 2012). Karbonatlaşma süreçleri yalnızca mineralojik dönüşüm oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda kayaçların porozite ve geçirgenlik özelliklerini de değiştirerek yeni akışkan dolaşım yolları oluşturabilir.

Jeokimyasal açıdan ultramafik kayaçlar; Ni, Cr, Co ve yer yer platin grubu elementler (PGE) bakımından zengin sistemlerdir. Bu elementlerin önemli bir bölümü olivin, serpantin, kromit ve sülfid mineralleri içerisinde tutulmaktadır (Naldrett, 2004). Hidrotermal alterasyon süreçleri sırasında bu elementlerin mobilizasyonu; akışkan bileşimi, pH-Eh koşulları, sıcaklık ve yapısal geçirgenlik gibi parametreler tarafından kontrol edilmektedir. Özellikle Ni ve Co'nun serpantinleşme ve karbonatlaşma süreçlerinde yeniden dağılıma uğrayabildiği birçok çalışmada gösterilmiştir (Klein & Bach, 2009).

Ultramafik kayaçların fiziksel özellikleri de hidrotermal sistemlerin gelişiminde önemli rol oynamaktadır. Serpantinleşme sırasında hacim artışı, kırık gelişimi ve geçirgenlik değişimleri meydana gelmekte; bu durum yeni akışkan girişlerini kolaylaştırarak alterasyonun ilerlemesine neden olmaktadır (Kelemen & Hirth, 2012). Böylece ultramafik sistemler, kendini besleyen dinamik hidrotermal dolaşım mekanizmalarının gelişebildiği açık sistemler hâline dönüşebilmektedir.

Sonuç olarak ultramafik kayaçların mineralojik ve jeokimyasal özellikleri, bu kayaçları hidrotermal alterasyon ve metal mobilizasyonu açısından son derece uygun sistemler hâline getirmektedir. Özellikle olivin ve piroksen gibi reaktif minerallerin

varlığı, yüksek Mg içeriği, redoks duyarlılığı ve yapısal deformasyona yatkınlık; serpantinleşme, karbonatlaşma ve listvenitleşme gibi süreçlerin gelişimini kolaylaştırarak metal taşınımı ve cevherleşme süreçlerinde kritik rol oynamaktadır.

## **Hidrotermal Akışkanların Özellikleri**

### **Akışkan Bileşimi ve Kaynakları**

Hidrotermal akışkanlar, yerkabuğu ve üst mantoda gelişen metasomatik ve cevherleşme süreçlerinin temel taşıyıcı fazını oluşturmaktadır. Bu akışkanlar sıcaklık, basınç, iyonik bileşim, redoks koşulları ve çözülmüş gaz içerikleri bakımından önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Ultramafik kayalarla etkileşime giren hidrotermal sistemlerde akışkan bileşimi; alterasyon mineralojisi, metal taşınımı ve çökelim süreçleri üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır (Yardley & Bodnar, 2014).

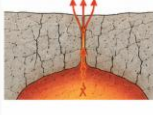
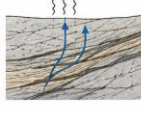

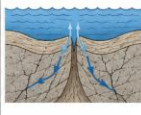
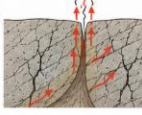
Ultramafik sistemlerde gelişen hidrotermal dolaşım genellikle fay ve kırık sistemleri boyunca gerçekleşmekte olup, akışkanların derin dolaşıma katılması serpantinleşme, karbonatlaşma ve listvenitleşme gibi metasomatik süreçleri tetiklemektedir. Özellikle yapısal kontrollü geçirgenlik zonları boyunca gelişen akışkan dolaşımı, metal mobilizasyonunun mekânsal dağılımını belirleyen temel unsurlardan biridir (Cox, 2005). Ultramafik kayalarda hidrotermal akışkan dolaşımı ve buna bağlı gelişen serpantinleşme-karbonatlaşma zonları Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

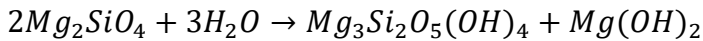
Meteorik suların derin kırık sistemleri boyunca dolaşıma katılması, hidrotermal sistemlerin gelişiminde önemli rol oynamaktadır. Bu akışkanlar ultramafik kayalarla etkileşim sırasında Mg, Fe, Ni ve Co gibi elementleri çözebilmekte; akışkanın fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak bu elementlerin yeniden taşınmasına neden olabilmektedir. Derin seviyelerde ise CO<sub>2</sub>

bakımından zengin hidrotermal akışkanların sisteme katılması karbonatlaşma ve listvenitleşme süreçlerini başlatmaktadır (Falk & Kelemen, 2015).

Serpantinleşme, ultramafik kayalarda gelişen en önemli hidrotermal alterasyon süreçlerinden biridir. Bu süreç sırasında olivin ve piroksen gibi birincil mineraller sulu akışkanlarla reaksiyona girerek serpantin mineralleri, brusit ve manyetit oluşturmaktadır (O’Hanley, 1996). Reaksiyon sırasında Fe<sup>2+</sup> oksidasyonu gerçekleşmekte ve indirgen koşullar altında hidrojen üretimi meydana gelmektedir:

Şekil 1. Ultramafik kayalarda hidrotermal akışkan dolaşımı

	Magmatik Akışkanlar	Metamorfik Akışkanlar	Meteorik Akışkanlar	Denizel Akışkanlar	CO <sub>2</sub> Zengin Akışkanlar
Kaynak ve Oluşum Mekanizması	 Magma degaşifasyonu ile gelir. Yüksek sıcaklık, volatiller (H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , S, Cl) ve metale zengin akışkanlar üretir.	 Bölgesel metamorfizma ve telonik sıkıma sırasında devolatilizasyon reaksiyonları ile oluşur. H <sub>2</sub> O ve CO <sub>2</sub> bakımından zengindir.	 Yüzeysel suların karık sistemleri boyunca derin dolaşma katmanları ile gelişir. Düşük tuzluluklu, soğuk akışkanlardır.	 Deniz suyunun olyanusal kabuk boyunca dolaşma katmanları ile oluşur. Mg, Na, Cl, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> gibi iyonlarca zengindir.	 Magmatik veya metamorfik kaynaklı CO <sub>2</sub> 'nin akışkan fazda taşınması ile oluşur. Karbonatlaşma ve listvenitleşmeyi tetikler.
Tipik Sıcaklık Aralığı (°C)	400 – 800	200 – 600	< 200	50 – 400	200 – 600
Tipik Basınç Aralığı (kbar)	1 – 5	1 – 8	0,1 – 2	0,1 – 2	1 – 6
Başlıca Bileşenler	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , S, Cl, F, metal klorür kompleksleri (Cu, Fe, Au, Zn vb.)	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , düşük tuzluluk, metamorfik elementler (B, Si, Sr vb.)	H <sub>2</sub> O, düşük iyon içeriği (Ca, Mg, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) kayalarla etkileşimle değişir	H <sub>2</sub> O, Na, Cl, Mg, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , B, Sr, Li vb.	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , düşük tuzluluk, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca, Mg, demir ve alkali elementler
CO <sub>2</sub> İçeriği	●●●○● Orta – Yüksek	●●●○● Orta – Yüksek	●○●○● Düşük	●●○●○ Düşük – Orta	●●●●● Çok Yüksek
Metal Taşıma Kapasitesi	●●●●● Yüksek	●●●○● Orta – Yüksek	●●○●○ Düşük – Orta	●●●○● Orta – Yüksek	●●●○● Yüksek
Etkili Olduğu Sistemler	Porfir Cu, skarn, epithermal, IOCG, magmatik-hidrotermal sistemler	Orojenik altın, metamorfik-hidrotermal damarlar, listvenit sistemleri	Düşük sıcaklıklı hidrotermal sistemler, epithermal, karst-hidrotermal sistemler	Okyanus tabanı hidrotermal sistemler, ofiyolit ilişkili alterasyon zonları	Listvenit, karbonatlaşma zonları, orojenik altın, Ni-Co zenginleşme sistemleri
Açıklamalar:	↑ Yükselen akışkan ↓ Süzülün akışkan } Gaz fazı		CO <sub>2</sub> İçeriği Skoru: ○ Çok Düşük ● Düşük ●● Orta ●●● Yüksek ●●●●● Çok Yüksek		
			Metal Taşıma Kapasitesi Skoru: ○ Çok Düşük ● Düşük ●● Orta ●●● Yüksek ●●●●● Çok Yüksek		

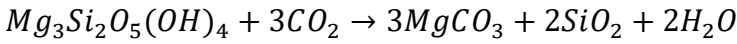
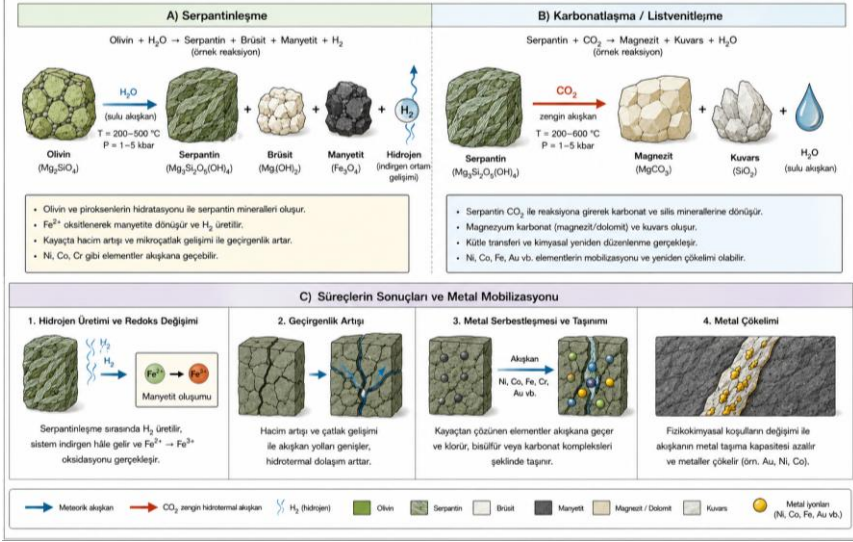


Serpantinleşme ve karbonatlaşma süreçlerinin temel reaksiyon mekanizmaları ile bunların metal mobilizasyonu üzerindeki etkileri Şekil 2’de verilmiştir. Özellikle serpantinleşme sırasında gelişen hacim artışı ve mikroçatlak oluşumu, sistem

geçirgenliğini artırarak yeni akışkan girişlerini kolaylaştırmaktadır (Kelemen & Hirth, 2012).

Serpantinleşmiş ultramafik kayaçların CO<sub>2</sub> bakımından zengin hidrotermal akışkanlarla etkileşimi sonucunda karbonatlaşma ve listvenitleşme gelişmektedir. Bu süreçlerde serpantin mineralleri karbonat ve silis mineralleri ile yer değiştirmekte; magnezit, dolomit ve kuvars bakımından zengin parajenezler oluşmaktadır (Halls & Zhao, 1995). Karbonatlaşmanın basitleştirilmiş reaksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

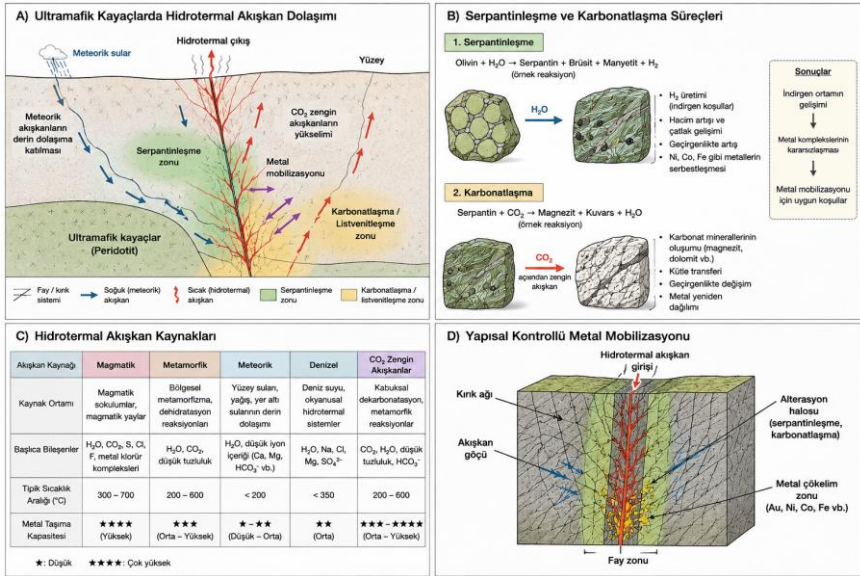
Şekil 2. Serpantinleşme ve karbonatlaşma süreçleri



Bu reaksiyonlar yalnızca mineralojik dönüşüm oluşturmakla kalmayıp aynı zamanda çözünme-çökeltme mekanizmaları aracılığıyla önemli element yeniden dağılımına neden olmaktadır. Özellikle Ni, Co, Fe ve yer yer Au gibi elementlerin akışkana geçmesi ve yeniden çökmesi hidrotermal sistemlerin evriminde önemli rol oynamaktadır (Klein & Bach, 2009).

Hidrotermal akışkanların kökenleri; magmatik, metamorfik, meteorik ve denizel sistemler olarak sınıflandırılabilir. Bununla birlikte ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemlerde sıklıkla çok kaynaklı akışkan karışımları gözlenmektedir (Robb, 2005). Farklı akışkan tiplerinin sıcaklık aralıkları, kimyasal bileşimleri ve metal taşıma kapasiteleri Şekil 3'te özetlenmiştir.

Şekil 3. Hidrotermal akışkan kaynakları

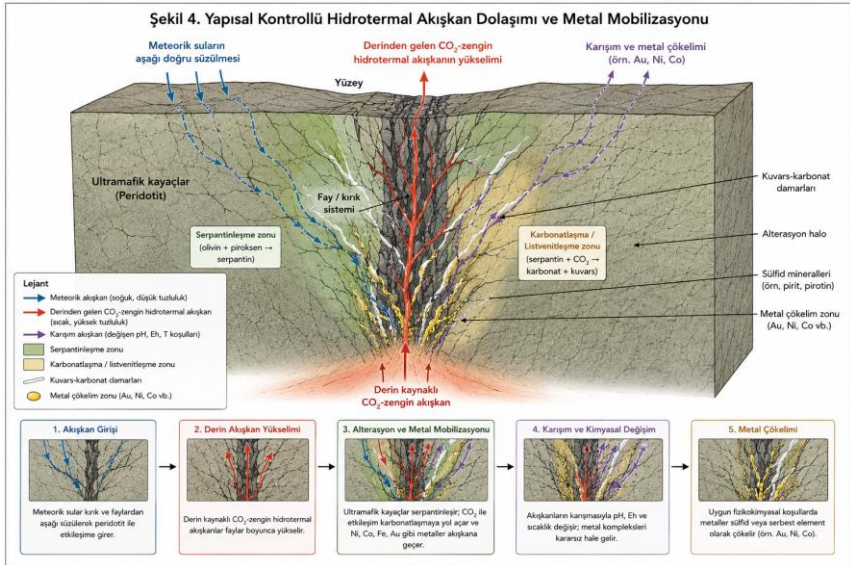


Magmatik kökenli akışkanlar genellikle yüksek sıcaklıklı, CO<sub>2</sub> ve klor bakımından zengin sistemler olup Cu, Fe, Zn ve Au gibi metalleri klorür kompleksleri şeklinde taşıyabilmektedir (Candela, 1997). Metamorfik akışkanlar ise özellikle orojenik kuşaklarda devolatilizasyon süreçleriyle oluşmakta ve çoğunlukla H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> bakımından zengin düşük tuzluluklu akışkanlar olarak tanımlanmaktadır (Yardley, 1983). Buna karşılık meteorik akışkanlar düşük sıcaklıklı sistemlerde etkili olurken, denizel akışkanlar özellikle okyanusal kabuk ve ofiyolit ilişkili hidrotermal sistemlerde önemli rol oynamaktadır (Alt & Shanks, 2006).

Ultramafik kayalarda gelişen hidrotermal sistemlerde metal mobilizasyonu çoğunlukla yapısal kontrollü akışkan dolaşımı ile ilişkilidir. Fay zonları ve kırık ağları boyunca ilerleyen akışkanlar, kayaç-akışkan etkileşimini artırarak metal çözünmesi ve yeniden çökelimine neden olmaktadır. Özellikle karbonatlaşma zonları boyunca gelişen geçirgenlik artışı, metal taşıyan akışkanların dolaşımını kolaylaştırmaktadır (Sibson, 1996). Yapısal kontrollü metal mobilizasyonunun şematik modeli Şekil 4'te sunulmuştur.

Sonuç olarak hidrotermal akışkanların bileşimi, kaynağı ve dolaşım mekanizmaları; ultramafik kayalarda gelişen alterasyon süreçleri ile metal mobilizasyonunun temel kontrolünü oluşturmaktadır. Akışkan-kaya etkileşiminin fizikokimyasal koşulları yalnızca mineral dönüşümlerini değil, aynı zamanda cevherleşme süreçlerinin mekânsal ve zamansal gelişimini de belirlemektedir.

Şekil 4. Yapısal kontrollü metal mobilizasyonu

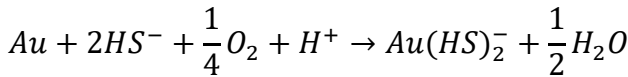


## pH–Eh Kontrolü ve Metal Taşınım Mekanizmaları

Hidrotermal sistemlerde metal mobilizasyonu ve çökeli mi büyük ölçüde akışkanların fizikokimyasal özellikleri tarafından kontrol edilmektedir. Özellikle pH, Eh (redoks potansiyeli), sıcaklık, basınç ve ligand aktivitesi; metal komplekslerinin kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olup cevherleşme süreçlerinin gelişiminde temel rol oynamaktadır (Seward & Barnes, 1997; Robb, 2005). Ultrama fik kayaçlarla ilişkili hidrotermal sistemlerde serpantinleşme, karbonatlaşma ve akışkan-karışım süreçleri bu parametrelerde önemli değişimlere neden olarak metal taşınımı ve çökeli mini kontrol etmektedir.

Metaller hidrotermal akışkanlarda çoğunlukla çözünmüş kompleksler hâlinde taşınmaktadır. Bu komplekslerin kararlılığı; sıcaklık, pH, redoks koşulları ve akışkandaki ligand türüne bağlıdır. Hidrotermal sistemlerde en yaygın metal taşıyıcı ligandlar klorür ( $Cl^-$ ), bisülfür ( $HS^-$ ), hidroksit ( $OH^-$ ) ve karbonat ( $CO_3^{2-}$ ) iyonlarıdır (Williams-Jones & Migdisov, 2014). Özellikle yüksek sıcaklıklı sistemlerde Cu, Fe, Zn ve Ni gibi metaller çoğunlukla klorür kompleksleri şeklinde taşınırken, Au taşınımında bisülfür kompleksleri önemli rol oynamaktadır (Pokrovski et al., 2014).

Altının hidrotermal sistemlerde taşınımı çoğunlukla indirgen ve sülfür bakımından zengin akışkanlar içerisinde gerçekleşmektedir. Bu süreçte Au, çözültide genellikle bisülfür kompleksleri şeklinde taşınmaktadır:



Bu komplekslerin kararlılığı özellikle Eh ve pH koşullarına duyarlıdır. Akışkanın oksidasyonu, pH değişimi veya sülfür aktivitesindeki azalma; Au komplekslerinin kararsız hâle gelmesine ve metal çökeli mine neden olabilmektedir (Groves et al., 1998).

Ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemlerde serpantinleşme sırasında gelişen indirgen koşullar, Au taşınımı için uygun kimyasal ortamların oluşmasına katkı sağlayabilmektedir.

Serpantinleşme süreçleri sırasında  $Fe^{2+}$  oksidasyonu ve  $H_2$  üretimi meydana gelmekte; bu durum sistemin redoks koşullarını önemli ölçüde değiştirmektedir (McCollom & Bach, 2009). Özellikle düşük Eh koşulları, bazı metal komplekslerinin çözünürlüğünü artırarak metal taşınım kapasitesini yükseltebilmektedir. Bununla birlikte daha sonraki karbonatlaşma veya akışkan karışımı süreçlerinde Eh koşullarının değişmesi metal çökelimini tetikleyebilmektedir.

Ni, Co ve Fe gibi geçiş metalleri ultramafik kayaçlarda çoğunlukla olivin, serpantin ve sülfid mineralleri içerisinde bulunmaktadır. Hidrotermal alterasyon sırasında bu minerallerin bozunması sonucunda metaller akışkana geçebilmekte ve çoğunlukla klorür kompleksleri şeklinde taşınabilmektedir (Klein & Bach, 2009). Özellikle sıcaklık artışı ve düşük pH koşulları, Ni ve Co çözünürlüğünü artırmaktadır. Ancak sıcaklığın düşmesi, akışkanın nötrleşmesi veya karbonatlaşma süreçleri metal komplekslerinin bozunmasına neden olarak yeniden çökelim oluşturabilmektedir.

Karbonatlaşma süreçleri hidrotermal sistemlerde pH değişimi üzerinde önemli rol oynamaktadır.  $CO_2$  bakımından zengin akışkanların ultramafik kayaçlarla etkileşimi sırasında karbonat minerallerinin çökmesi ve silisleşme gelişmektedir. Bu süreçler akışkan bileşimini değiştirerek metal taşıma kapasitesini azaltabilmektedir (Falk & Kelemen, 2015). Özellikle karbonatlaşma zonlarında gelişen çözünme-çökme mekanizmaları; Au, Ni ve Co gibi metallerin yeniden dağılımına neden olabilmektedir.

Akışkan karışımı, hidrotermal sistemlerde metal çökelimini tetikleyen en önemli mekanizmalardan biridir. Derin kökenli sıcak

ve metale zengin hidrotermal akışkanların meteorik veya denizel kökenli daha düşük sıcaklıklı akışkanlarla karışması; sıcaklık, pH ve redoks koşullarında ani değişimlere neden olmaktadır (Giggenbach, 1992). Bu değişimler metal komplekslerinin kararlılığını bozarak sülfid mineralleri, karbonatlar veya yer yer doğal metal çökelimine yol açabilmektedir.

Yapısal kontrollü geçirgenlik sistemleri de metal taşınım mekanizmalarında kritik rol oynamaktadır. Fay zonları ve kırık ağları boyunca dolaşan hidrotermal akışkanlar, kayaç-akışkan etkileşimini artırarak çözünme ve metasomatik reaksiyonları hızlandırmaktadır (Sibson, 1996). Özellikle reaction-driven cracking mekanizması ile gelişen yeni mikroçatlak sistemleri, hidrotermal dolaşımın sürekliliğini sağlayarak metal mobilizasyonunu desteklemektedir (Kelemen & Hirth, 2012).

Ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemlerde metal mobilizasyonu çoğunlukla çok evreli süreçler sonucunda gelişmektedir. İlk evrede serpantinleşme ile indirgen koşullar ve geçirgenlik gelişirken, sonraki evrelerde CO<sub>2</sub> bakımından zengin akışkanların sisteme girişi karbonatlaşma ve listvenitleşmeyi tetiklemektedir. Bu süreçler boyunca fizikokimyasal koşullarda meydana gelen değişimler, metal taşınımı ve çökeliminin zamansal olarak farklı evrelerde gerçekleşmesine neden olmaktadır.

Sonuç olarak pH-Eh koşulları, ligand aktivitesi, sıcaklık değişimleri ve akışkan karışımı; ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemlerde metal taşınımı ve çökelimini kontrol eden temel mekanizmalardır. Serpantinleşme ve karbonatlaşma süreçleri yalnızca alterasyon gelişimine neden olmakla kalmayıp aynı zamanda metal komplekslerinin kararlılığını değiştirerek cevherleşme süreçlerinin gelişiminde belirleyici rol oynamaktadır.

## **Ultramafik Kayaç İlişkili Hidrotermal Sistemler ve Cevherleşme**

Ultramafik kayaçlarla ilişkili hidrotermal sistemler; akışkan-kaya etkileşimi, metasomatik dönüşümler ve yapısal kontrollü akışkan dolaşımı sonucunda gelişen karmaşık jeolojik sistemlerdir. Bu sistemlerde serpantinleşme, karbonatlaşma, listvenitleşme ve silisleşme gibi alterasyon süreçleri yalnızca mineralojik dönüşümler oluşturmakla kalmamakta, aynı zamanda metal mobilizasyonu ve cevherleşme gelişiminde de belirleyici rol oynamaktadır (Halls & Zhao, 1995; Falk & Kelemen, 2015).

Ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemler çoğunlukla ofiyolit kuşakları, bindirme zonları ve derin fay sistemleri boyunca gelişmektedir. Bu alanlarda deformasyon kontrollü geçirgenlik artışı, hidrotermal akışkanların kayaç içerisine nüfuz etmesini kolaylaştırmakta ve çok evreli metasomatik süreçlerin gelişmesine neden olmaktadır (Cox, 2005). Özellikle serpantinleşmiş ultramafik kayaçlar, daha sonraki CO<sub>2</sub> bakımından zengin akışkan girişleri için oldukça uygun reaktif ortamlar oluşturmaktadır.

### **Serpantinleşme Kontrollü Hidrotermal Sistemler**

Serpantinleşme kontrollü hidrotermal sistemler, ultramafik kayaçların su bakımından zengin akışkanlarla etkileşimi sonucu gelişmektedir. Bu süreç sırasında olivin ve piroksen gibi birincil mineraller serpantin minerallerine dönüşmekte; manyetit, brusit ve hidrojen oluşumu gerçekleşmektedir (O'Hanley, 1996). Serpantinleşme yalnızca mineralojik dönüşüm değil, aynı zamanda önemli jeokimyasal değişimlere de neden olmaktadır.

Serpantinleşme sırasında Fe<sup>2+</sup> oksidasyonu sonucu gelişen indirgen koşullar, hidrojen üretimini desteklemekte ve akışkan kimyasını önemli ölçüde değiştirmektedir (McCullom & Bach, 2009). Bu süreçler Ni, Co ve Fe gibi elementlerin birincil

minerallerden serbestleşmesine neden olabilmektedir. Özellikle olivin bozunması sırasında Ni'nin serpantin mineralleri veya ikincil sülfid fazları içerisinde yeniden dağılıma uğradığı bilinmektedir (Klein & Bach, 2009).

Bununla birlikte her serpantinleşme sistemi ekonomik metal zenginleşmesi oluşturmaz. Metal mobilizasyonunun ekonomik cevherleşmeye dönüşebilmesi için yapısal geçirgenlik, akışkan dolaşımının sürekliliği ve uygun çökelim koşullarının birlikte gelişmesi gerekmektedir. Bu nedenle serpantinleşme çoğu zaman cevherleşme için hazırlayıcı bir süreç olarak değerlendirilmektedir.

### **Karbonatlaşma ve Listvenit Sistemleri**

CO<sub>2</sub> bakımından zengin hidrotermal akışkanların serpantinleşmiş ultramafik kayalarla etkileşimi sonucunda karbonatlaşma ve listvenitleşme gelişmektedir. Bu süreçlerde serpantin mineralleri karbonat ve silis bakımından zengin mineral toplulukları ile yer değiştirmekte; magnezit, dolomit, ankerit ve kuvars içeren parajenezler oluşmaktadır (Halls & Zhao, 1995).

Listvenitleşme çoğunlukla fay zonları ve makaslama sistemleri boyunca gelişmekte olup yapısal kontrollü hidrotermal dolaşım ile yakından ilişkilidir. Özellikle kırık kontrollü CO<sub>2</sub> zengin akışkan akışı, ultramafik kayaların yoğun karbonatlaşmasına ve silisleşmesine neden olmaktadır (Falk & Kelemen, 2015). Bu süreç sırasında önemli çözünme-çökelme mekanizmaları gelişmekte; kayaların jeokimyasal bileşimi önemli ölçüde değişmektedir.

Listvenit sistemleri özellikle orojenik altın cevherleşmeleri ile olan ilişkileri nedeniyle dikkat çekmektedir. Birçok çalışmada listvenitleşmiş fay zonlarının Au mineralizasyonu için uygun geçirgenlik yolları oluşturduğu belirtilmiştir (Groves et al., 1998). Bununla birlikte her listvenit sistemi altın cevherleşmesi içermez. Au zenginleşmesi için yalnızca CO<sub>2</sub> metasomatizması değil, aynı

zamanda uygun sülür aktivitesi, akışkan evrimi ve çökelim mekanizmalarının birlikte gelişmesi gerekmektedir.

Karbonatlaşma süreçleri sırasında Ni, Co ve Fe gibi elementlerin yeniden dağılıma uğrayabildiği; bazı durumlarda karbonat mineralleri ve sülfid fazları içerisinde zenginleşmeler oluşturabildiği bilinmektedir (Beinlich et al., 2012). Ayrıca silisleşme süreçleri fay zonlarında kırılğan davranışı artırarak yeni geçirgenlik yollarının gelişmesine katkı sağlayabilmektedir.

### **Yapısal Kontrollü Au Mineralizasyonu**

Ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemlerde Au mineralizasyonu çoğunlukla yapısal kontrollü akışkan dolaşımı ile ilişkilidir. Derin kökenli hidrotermal akışkanlar fay ve kırık sistemleri boyunca hareket ederek uygun fizikokimyasal koşullar altında Au çökeline neden olmaktadır (Groves et al., 1998).

Au taşınımı genellikle bisülür kompleksleri şeklinde gerçekleşmekte olup akışkanın redoks koşulları, sıcaklığı ve sülür aktivitesi çökelim üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Fay zonlarında meydana gelen basınç düşüşü, akışkan karışımı veya sülfidizasyon gibi süreçler Au komplekslerinin bozunmasına ve kuvars-karbonat damarları içerisinde Au çökeline neden olabilmektedir (Robb, 2005).

Listvenitleşmiş ultramafik kayaçların kırılğan deformasyona yatkın olması, hidrotermal akışkanların dolaşımı için uygun geçirgenlik ağlarının gelişmesini kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle birçok orojenik sistemde listvenit zonları Au cevherleşmeleriyle birlikte gözlenmektedir. Özellikle kuvars-karbonat damarları, pirit-arsenopirit birliktelikleri ve yoğun karbonatlaşma zonları Au mineralizasyonunun yaygın göstergeleri arasında yer almaktadır.

## **Kritik Metal Potansiyeli**

Son yıllarda ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemler; Ni, Co, Cr ve platin grubu elementler (PGE) açısından önemli kritik metal kaynakları olarak değerlendirilmektedir (Naldrett, 2004). Özellikle serpantinleşme ve karbonatlaşma süreçleri sırasında gelişen metal yeniden dağılımı, bazı elementlerin ekonomik düzeyde zenginleşmesine neden olabilmektedir.

Ni ve Co çoğunlukla olivin ve serpantin mineralleri ile ilişkili bulunurken, Cr büyük ölçüde kromit mineralleri içerisinde korunmaktadır. Ancak yoğun hidrotermal alterasyon sırasında kromit çevresinde Fe zenginleşmesi ve yer yer Cr mobilizasyonu gelişebilmektedir (Mellini et al., 2005). Ayrıca hidrotermal sistemlerde sülfidizasyon süreçleri Ni-Co sülfidlerinin oluşumunu destekleyebilmektedir.

Kritik metal potansiyeli açısından ultramafik sistemlerin önemi yalnızca mevcut metal içerikleri ile sınırlı değildir. Akışkan-kaya etkileşimi süreçlerinin anlaşılması, yeni cevherleşme modellerinin geliştirilmesi ve potansiyel arama alanlarının belirlenmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemler; çok evreli akışkan dolaşımı, metasomatik dönüşümler ve yapısal kontrol altında gelişen dinamik cevherleşme ortamlarıdır. Serpantinleşme, karbonatlaşma ve listvenitleşme süreçleri yalnızca alterasyon gelişimini değil, aynı zamanda metal taşınımı, yeniden dağılımı ve çökelimini de kontrol ederek ekonomik açıdan önemli mineralizasyon sistemlerinin oluşumunda belirleyici rol oynamaktadır.

## **Tartışma**

Ultramafik kayaçlarla ilişkili hidrotermal sistemler, yalnızca basit alterasyon süreçleri olarak değil; çok evreli akışkan dolaşımı,

metasomatik dönüşümler ve yapısal kontrollü geçirgenlik gelişimi ile karakterize dinamik açık sistemler olarak değerlendirilmelidir. Bu sistemlerde serpantinleşme, karbonatlaşma ve listvenitleşme gibi süreçler birbirinden bağımsız olaylar olmayıp çoğu zaman ardışık ve birbiriyle ilişkili hidrotermal evrim basamaklarını temsil etmektedir.

Serpantinleşme, ultramafik kayaların hidrotermal dönüşümünde başlangıç aşamasını oluşturan en önemli süreçlerden biridir. Bu süreç sırasında gelişen hidrasyon reaksiyonları yalnızca mineralojik değişimlere değil, aynı zamanda önemli fiziksel ve jeokimyasal dönüşümlere de neden olmaktadır. Özellikle  $Fe^{2+}$  oksidasyonu ile ilişkili hidrojen üretimi, sistemin redoks koşullarını değiştirerek metal komplekslerinin kararlılığı üzerinde belirleyici rol oynayabilmektedir (McCollom & Bach, 2009). Bununla birlikte serpantinleşmenin tek başına ekonomik cevherleşme oluşturduğu düşüncesi aşırı indirgemeci bir yaklaşım olacaktır. Çünkü metal mobilizasyonu ile ekonomik metal birikimi aynı süreç değildir.

Metal mobilizasyonunun ekonomik cevherleşmeye dönüşebilmesi için uygun yapısal geçirgenlik, sürekli akışkan dolaşımı ve metal çökelimini tetikleyen fizikokimyasal değişimlerin birlikte gelişmesi gerekmektedir. Özellikle fay zonları ve kırık kontrollü geçirgenlik sistemleri, hidrotermal akışkanların odaklanmasını sağlayarak metasomatik reaksiyonların yoğunlaşmasına neden olmaktadır (Cox, 2005). Bu nedenle ultramafik sistemlerde yapısal kontrol, yalnızca akışkan dolaşımını yöneten bir unsur değil, aynı zamanda cevherleşmenin mekânsal dağılımını belirleyen temel faktörlerden biridir.

$CO_2$  bakımından zengin hidrotermal akışkanların sisteme katılması ile gelişen karbonatlaşma ve listvenitleşme süreçleri, ultramafik kayaların jeokimyasal evriminde ikinci önemli aşamayı oluşturmaktadır. Bu süreçler sırasında serpantin minerallerinin karbonat ve silis mineralleri ile yer değiştirmesi; çözünme-çökelme

mekanizmaları aracılığıyla önemli element yeniden dağılımına neden olmaktadır (Falk & Kelemen, 2015). Özellikle Ni, Co ve Fe gibi elementlerin karbonatlaşma zonlarında yeniden mobilize olabildiği birçok çalışmada ortaya konmuştur.

Listvenit sistemleri özellikle orojenik altın cevherleşmeleri ile olan ilişkileri nedeniyle son yıllarda önemli araştırma konularından biri hâline gelmiştir. Bununla birlikte her listvenit sisteminin Au mineralizasyonu içermediği unutulmamalıdır. Au zenginleşmesi için yalnızca CO<sub>2</sub> metasomatizması yeterli olmayıp uygun sülfür aktivitesi, akışkan evrimi, basınç değişimi ve yapısal odaklanmanın birlikte gelişmesi gerekmektedir (Groves et al., 1998). Bu nedenle listvenitleşme çoğu zaman doğrudan cevherleşme mekanizması değil, cevherleşme için uygun hidrotermal ve yapısal ortamların göstergesi olarak değerlendirilmelidir.

Ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemlerde metal taşınımı büyük ölçüde akışkanların pH-Eh koşulları ve ligand bileşimi tarafından kontrol edilmektedir. Özellikle klorür ve bisülfür kompleksleri, metallerin çözeltide taşınmasını sağlayan temel kimyasal mekanizmalardır (Williams-Jones & Migdisov, 2014). Akışkan karışımı, sıcaklık düşüşü, basınç azalması ve redoks değişimleri ise metal komplekslerinin kararsızlaşmasına ve çökelime neden olmaktadır. Bu durum cevherleşme süreçlerinin statik değil, sürekli değişen fizikokimyasal koşullar altında geliştiğini göstermektedir.

Son yıllarda ultramafik sistemler yalnızca klasik Ni-Cr mineralizasyonları açısından değil, aynı zamanda kritik metal potansiyeli bakımından da önem kazanmaktadır. Özellikle Ni, Co ve platin grubu elementlerin hidrotermal süreçler boyunca yeniden dağılımı; yeni nesil cevherleşme modellerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca karbonatlaşma süreçlerinin doğal CO<sub>2</sub> tüketim mekanizmalarıyla ilişkili olması, ultramafik sistemlerin karbon

depolama çalışmaları açısından da dikkat çekmesine neden olmuştur (Kelemen & Matter, 2008).

Bununla birlikte ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemlerin oluşum mekanizmaları hâlen tam olarak çözülebilmemiş değildir. Özellikle:

- akışkan kaynaklarının kesin ayrımı,
- çok evreli metasomatik süreçlerin zamanlaması,
- metal taşınımının nicel mekanizmaları,
- yapısal kontrolün ölçek bağımlılığı

gibi konular güncel araştırmaların temel problemleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle gelecekte yapılacak çok disiplinli çalışmaların; petrografik, jeokimyasal, izotopik ve yapısal verileri birlikte değerlendirmesi büyük önem taşımaktadır.

### **Kavramsal Genetik Model**

Ultramafik kayaçlarla ilişkili hidrotermal sistemlerin gelişimi, çok evreli akışkan dolaşımı ve metasomatik dönüşümler ile karakterize edilmektedir. Bu çalışmada değerlendirilen süreçlere dayanarak önerilen kavramsal genetik model Şekil 5'te sunulmuştur.

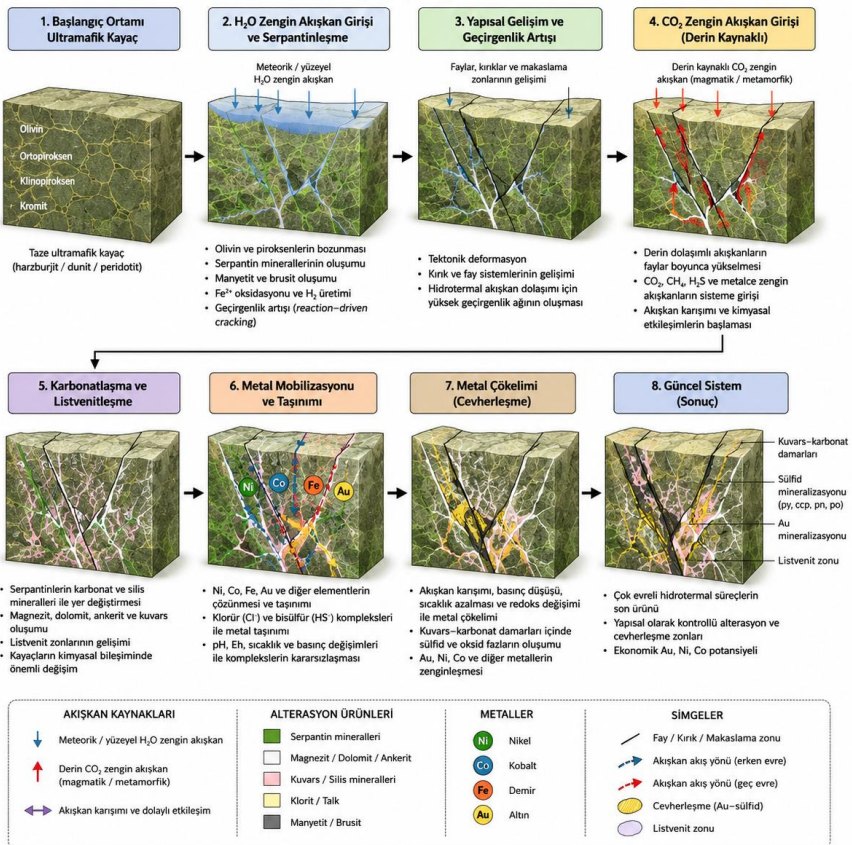
Modelde ilk aşama, ultramafik kayaçların H<sub>2</sub>O bakımından zengin akışkanlarla etkileşimi sonucu gelişen serpantinleşme süreçlerini kapsamaktadır. Bu süreç sırasında hidrasyon reaksiyonları, H<sub>2</sub> üretimi ve geçirgenlik artışı gelişmekte; böylece yeni akışkan dolaşım yolları oluşmaktadır. Daha sonraki evrelerde yapısal kontrollü kırık ve fay sistemleri boyunca sisteme giren CO<sub>2</sub> bakımından zengin hidrotermal akışkanlar karbonatlaşma ve listvenitleşmeyi tetiklemektedir.

Karbonatlaşma süreçleri sırasında çözünme-çökme mekanizmaları ile önemli element yeniden dağılımı meydana gelmekte; Ni, Co, Fe

ve yer yer Au gibi metaller hidrotermal akışkanlar içerisinde taşınabilmektedir. Akışkanların fizikokimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimler sonucunda ise kuvars-karbonat damarları ve sülfid mineralizasyonları boyunca metal çökelişi gelişmektedir.

Önerilen model, ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemlerin yalnızca basit alterasyon süreçlerinden oluşmadığını; aksine yapısal kontrol, çok evreli akışkan dolaşımı ve metasomatik reaksiyonların birlikte çalıştığı dinamik açık sistemler olduğunu göstermektedir.

Şekil 5. Kavramsal genetik model



## Sonuçlar

Ultramafik kayalarla ilişkili hidrotermal sistemler, akışkan-kaya etkileşimi, metasomatik dönüşümler ve yapısal kontrollü akışkan dolaşımının birlikte geliştiği karmaşık jeolojik sistemlerdir. Bu sistemlerde serpantinleşme, karbonatlaşma ve listvenitleşme süreçleri; kayaların mineralojik, jeokimyasal ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirerek metal mobilizasyonu üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Serpantinleşme süreçleri sırasında gelişen hidrasyon reaksiyonları, redoks koşullarını değiştirerek Fe, Ni ve Co gibi metallerin yeniden dağılımına katkı sağlamaktadır. Daha sonraki evrelerde sisteme giren CO<sub>2</sub> bakımından zengin hidrotermal akışkanlar ise karbonatlaşma ve listvenitleşme süreçlerini tetikleyerek çözünme-çökme mekanizmaları aracılığıyla yeni metasomatik zonların gelişmesine neden olmaktadır.

Metal taşınımı büyük ölçüde hidrotermal akışkanların pH-Eh koşulları, sıcaklık, basınç ve ligand bileşimi tarafından kontrol edilmektedir. Özellikle klorür ve bisülfür kompleksleri metal taşınımında önemli rol oynarken; akışkan karışımı, sıcaklık değişimi, basınç düşüşü ve redoks değişimleri metal çökmesini tetikleyen temel mekanizmaları oluşturmaktadır.

Yapısal unsurlar ultramafik sistemlerde hidrotermal dolaşımın gelişiminde kritik öneme sahiptir. Fay zonları, kırık ağları ve makaslama sistemleri yalnızca akışkan geçiş yollarını oluşturmakla kalmayıp aynı zamanda alterasyonun yoğunluğunu ve metal çökmesinin konumunu da kontrol etmektedir. Özellikle listvenitleşmiş fay zonları, Au mineralizasyonu açısından önemli hidrotermal ortamlar oluşturabilmektedir.

Sonuç olarak ultramafik kayaç ilişkili hidrotermal sistemler; çok evreli akışkan dolaşımı, metasomatik reaksiyonlar ve yapısal kontrol altında gelişen dinamik açık sistemlerdir. Bu sistemlerin

anlaşılması yalnızca hidrotermal cevherleşme modellerinin geliştirilmesi açısından değil, aynı zamanda kritik metal aramacılığı ve doğal karbon depolama mekanizmalarının değerlendirilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

## **Kaynakça**

Alt, J. C., & Shanks, W. C. (2006). Stable isotope compositions of serpentinite seamounts in the Mariana forearc: Serpentinization processes, fluid sources, and sulfur metasomatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 242(3–4), 272–285.

Ash, C. H., & Arnaud, R. J. (1997). Natural carbonation of serpentinite, listwanite and related alteration rocks in ultramafic-hosted gold deposits. *British Columbia Geological Survey Bulletin*, 108, 223–231.

Barnes, I., O’Neil, J. R., & Trescases, J. J. (1978). Present day serpentinization in New Caledonia, Oman, and Yugoslavia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(1), 144–145.

Beinlich, A., Austrheim, H., Glodny, J., & Erambert, M. (2012). CO<sub>2</sub> sequestration and extreme Mg mobility in serpentine carbonation: From reaction mechanisms to tectonic significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 91, 159–185.

Bodinier, J. L., & Godard, M. (2014). Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites. In H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., pp. 103–167). Elsevier.

Candela, P. A. (1997). A review of shallow, ore-related granites: Textures, volatiles, and ore metals. *Journal of Petrology*, 38(12), 1619–1633.

Cox, S. F. (2005). Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, 39–75.

Evans, B. W. (2004). The serpentinite multisystem revisited: Chrysotile is metastable. *International Geology Review*, 46(6), 479–506.

Evans, B. W. (2008). Control of the products of serpentinization by the  $\text{Fe}^{2+}\text{Mg}$ -1 exchange potential of olivine and orthopyroxene. *Journal of Petrology*, 49(10), 1873–1887.

Falk, E. S., & Kelemen, P. B. (2015). Geochemistry and petrology of listvenite in the Samail ophiolite, Sultanate of Oman: Complete carbonation of peridotite during ophiolite emplacement. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 160, 70–90.

Frost, B. R., & Beard, J. S. (2007). On silica activity and serpentinization. *Journal of Petrology*, 48(7), 1351–1368.

Giggenbach, W. F. (1992). Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries. *Economic Geology*, 87(8), 1927–1944.

Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G., & Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5), 7–27.

Halls, C., & Zhao, R. (1995). Listvenite and related rocks: Perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbaun, Ireland. *Mineralium Deposita*, 30(4), 303–313.

Hansen, L. D., Dipple, G. M., Gordon, T. M., & Kellett, D. A. (2005). Carbonated serpentinite (listwanite) at Atlin, British Columbia: A geological analogue to carbon dioxide sequestration. *Canadian Mineralogist*, 43(1), 225–239.

Kelemen, P. B., & Hirth, G. (2012). Reaction-driven cracking during retrograde metamorphism: Olivine hydration and carbonation. *Earth and Planetary Science Letters*, 345–348, 81–89.

Kelemen, P. B., & Matter, J. (2008). In situ carbonation of peridotite for CO<sub>2</sub> storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(45), 17295–17300.

Klein, F., & Bach, W. (2009). Fe-Ni-Co-O-S phase relations in peridotite-seawater interactions. *Journal of Petrology*, 50(1), 37–59.

Klein, F., & Garrido, C. J. (2011). Thermodynamic constraints on mineral carbonation of serpentinized peridotite. *Lithos*, 126(3–4), 147–160.

McCollom, T. M., & Bach, W. (2009). Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(3), 856–875.

Mellini, M., Rumori, C., & Viti, C. (2005). Hydrothermally reset magmatic spinels in retrograde serpentinites: Formation of "ferritchromit" rims and chlorite aureoles. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(3), 266–275.

Naldrett, A. J. (2004). *Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration*. Springer.

O'Hanley, D. S. (1996). *Serpentinites: Records of tectonic and petrological history*. Oxford University Press.

Pokrovski, G. S., Akinfiev, N. N., Borisova, A. Y., Zotov, A. V., & Kouzmanov, K. (2014). Gold speciation and transport in geological fluids: Insights from experiments and physical-chemical modeling. *Geology*, 42(6), 551–554.

Robb, L. (2005). *Introduction to ore-forming processes*. Blackwell Publishing.

Seward, T. M., & Barnes, H. L. (1997). *Metal transport by hydrothermal ore fluids*. Wiley.

Sibson, R. H. (1996). Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology*, 18(8), 1031–1042.

Tsikouras, B., Karipi, S., Hatzipanagiotou, K., & Perraki, M. (2016). Listwaenite evolution in tectonically metamorphosed ultramafic rocks. *Lithos*, 254–255, 26–37.

Williams-Jones, A. E., & Migdisov, A. A. (2014). Experimental constraints on the transport and deposition of metals in ore-forming hydrothermal systems. *Reviews in Economic Geology*, 18, 77–95.

Yardley, B. W. D. (1983). *Introduction to metamorphic petrology*. Longman.

Yardley, B. W. D., & Bodnar, R. J. (2014). Fluids in the continental crust. *Geochemical Perspectives*, 3(1), 1–127.

# MADEN SAHASI DEĞERLEME: TEMEL İLKELER

ALİ CAN ÖZDEMİR<sup>1</sup>

## Giriş

Günümüzde doğal kaynaklara olan küresel talebin artması, kritik minerallerin stratejik önem kazanması ve madencilik sektöründeki yatırım hacminin büyümesi, maden sahalarının ekonomik değerinin doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenmesini her zamankinden daha önemli hale getirmiştir. Maden sahaları, diğer birçok yatırım varlığından farklı olarak yüksek sermaye gereksinimi, uzun geliştirme süreleri, jeolojik belirsizlikler ve emtia fiyatlarındaki dalgalanmalara duyarlılık gibi özellikler taşımaktadır. Bu nedenle, bir maden sahasının değerinin belirlenmesi yalnızca mevcut Maden Kaynak ve Rezerv miktarlarının değerlendirilmesiyle sınırlı olmayıp, teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal faktörlerin birlikte ele alınmasını gerektiren kapsamlı bir süreçtir.

Maden Sahası Değerlemesi, yatırım kararlarının alınmasından proje finansmanına, şirket birleşme ve satın almalarından ruhsat devir işlemlerine kadar geniş bir uygulama

---

<sup>1</sup> Doç. Dr., Çukurova Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-3064-4264

alanına sahip olup madencilik sektörünün temel karar destek araçlarından biri olarak kabul edilmektedir. Değerleme, temel olarak ekonomik bir analiz süreci olmasının yanı sıra jeoloji, finans, hukuk ve çevre disiplinlerini bir araya getiren çok boyutlu bir süreç olarak ele alınması gereken bir konudur (Torries, 1998; Wellmer vd., 2008).

Maden Sahalarının Değerlemesi ülkemizde yakın zamanda yaygınlaşmaya başlayan bir kavramdır. Özellikle Değerleme kelimesinin anlamı net olarak bilinmemektedir ve sıklıkla Değerlendirme kavramı ile karıştırılmaktadır. Bu iki kelime arasındaki anlam farkını benimsemek oldukça önemlidir. Değerleme; bir Maden Sahasının değerinin para veya parasal eşdeğeri olarak tahmin edilmesi anlamına gelmektedir. Yani, “Maden Sahasının değeri nedir?” sorusuna cevap aranmaktadır. Değerlendirme ise; bir Maden Sahasının fiziksel, teknik, yasal, ekonomik veya diğer yönlerinin değerlendirilmesi anlamına gelmekte olup yatırım kararı vermek için kullanılabilir. Kısaca, “Bu proje neleri içeriyor? Bu projeyi yürütmek ekonomik olabilir mi?” sorularına cevap verilmektedir. Uluslararası literatürde Değerleme kavramı “valuation”, Değerlendirme kavramı ise “evaluation” olarak kullanılmaktadır (UMVAL, 2022; Parlak Baz, 2025).

Maden sahalarının değerini belirleyen temel unsurlar; Maden Kaynak ve Rezerv miktarı, cevher tenörü, üretim yöntemi, emtia fiyatları, işletme maliyetleri, yatırım giderleri, altyapı olanakları, çevresel yükümlülükler ve ülke riskleri gibi çok sayıda teknik ve ekonomik parametreyi kapsamaktadır. Bir Maden Sahası Değerleme çalışmasında tüm bu parametrelerin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Maden Sahası Değerleme raporları, esas olarak borsaların listeleme gereksinimleri doğrultusunda, kamuya duyurulması amaçlanan Maden Sahalarının Değerinin belirlenmesi için

hazırlanmaktadır. Değerleme raporlarına ihtiyaç duyulabilecek diğer konular aşağıda özetlenmiştir, ancak bunlarla sınırlı olmayıp UMVAL kodu içerisinde daha detaylı verilmiştir.

- Adil yargılama görüşleri için destek,
- Birleşme, satın almalar ve elden çıkarmalar,
- Borç veya öz sermaye finansmanı artırma gerekçesi,
- Halka arzlarda menkul kıymetlerin (sermaye piyasası araçlarının) fiyatlandırılması,
- Mali tablolar için destek,
- Devlet harçlarının ve vergilerinin değerlendirilmesi,
- Sigorta talepleri ve kurumsal Değerlemeler.

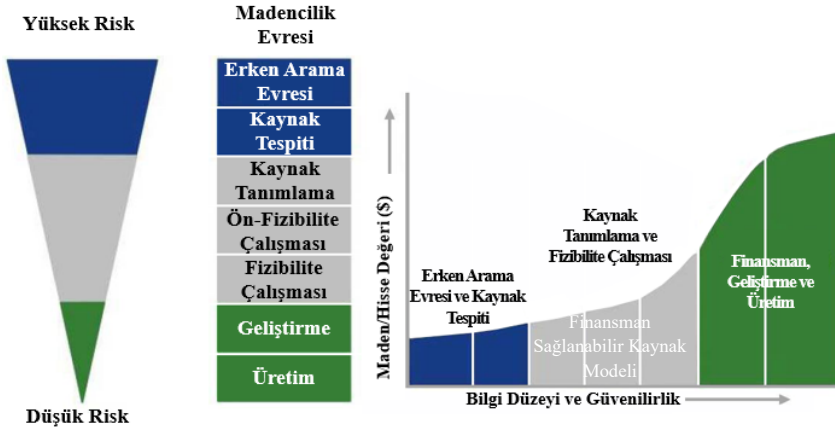
Bir madencilik projesinin başlangıç aşamalarında yer alan erken arama evresi ve kaynak tespiti çalışmalarında jeolojik belirsizlikler oldukça yüksek olduğundan proje riski fazladır ve buna bağlı olarak piyasa değeri nispeten düşüktür. Arama faaliyetleri sonucunda elde edilen verilerin artmasıyla kaynak tanımlama çalışmaları gerçekleştirilmekte, ardından ön fizibilite ve fizibilite çalışmaları ile projenin teknik ve ekonomik uygulanabilirliği daha güvenilir şekilde ortaya konulmaktadır. Bu süreçte belirsizlikler azalırken kaynak ve rezervlere ilişkin güven seviyesi artmakta, dolayısıyla yatırımcıların projeye duyduğu güven de yükselmektedir. Projenin geliştirme ve üretim aşamalarına geçilmesiyle birlikte proje finansman bulabilen, ekonomik olarak doğrulanmış bir yatırım niteliği kazanmakta ve proje değeri önemli ölçüde artmaktadır. Genel olarak, madencilik projelerinde bilgi düzeyi ve kesinlik arttıkça riskin azaldığı, buna karşılık proje değerinin ve yatırımcı ilgisinin yükseldiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle kaynak ve rezerv güvenilirliğini artıran jeolojik çalışmalar

ile fizibilite analizleri, Maden Sahası Değerlemesinin temel unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir (Baures, 2010).

Özetle, madencilik projelerinin yaşam döngüsü boyunca belirsizliklerin yüksek olması, değerlendirme çalışmalarında risk analizlerinin ve ekonomik modelleme yaklaşımlarının önemini artırmaktadır.

Şekil 1’de bir madencilik projesinin erken arama evresinden üretim aşamasına kadar ilerleyen yaşam döngüsü boyunca bilgi güvenilirliği, proje riski ve ekonomik değer arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Şekil 1. Maden projelerinde farklı evrelerde risklerin bilgi düzeyinin ve proje değerinin değişimi



Kaynak: Baures, 2010

Maden kaynakları ve rezervleri, maden sahalarının değerlendirilmesinin temelini oluşturan en önemli teknik girdiler arasında yer almaktadır. Bir maden sahasının ekonomik değeri, büyük ölçüde sahada bulunan mineral varlığının miktarına, kalitesine ve ekonomik olarak üretilebilirliğine bağlıdır. Kaynak tahminleri, cevherleşmenin jeolojik güvenilirliğini ve potansiyel büyüklüğünü ortaya koyarken, rezervler teknik, ekonomik, çevresel, yasal ve sosyal faktörler

dikkate alınarak ekonomik olarak işletilebilir kısmı temsil etmektedir. Ayrıca, Maden Sahası Değerleme çalışmalarında kaynak ve rezerv miktarları, gelecekte elde edilmesi beklenen üretim miktarlarının ve nakit akışlarının belirlenmesinde temel veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Genel olarak kaynak ve rezerv güvenilirliği arttıkça proje riskleri azalmakta, buna bağlı olarak yatırımcı güveni ve maden sahasının ekonomik değeri yükselmektedir. Bu durumda, maden kaynakları ve rezervleri ile maden sahasının değeri arasında doğrudan ve güçlü bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır.

Maden Sahası Değerleme süreci, sistematik ve aşamalı bir yaklaşım gerektirmektedir. İlk aşamada Değerleme çalışmasının amacı belirlenerek Değerlemenin yatırım kararı, satın alma-birleşme işlemi, finansman temini, teminatlandırma veya hukuki amaçlarla mı gerçekleştirileceği tanımlanır. Daha sonra projenin arama, maden kaynağı, geliştirme veya üretim sahaları aşamalarından hangisinde bulunduğu değerlendirilerek proje olgunluk seviyesi tespit edilir. Bu değerlendirme doğrultusunda projeye en uygun değerlendirme yöntemleri seçilir ve gelir yaklaşımı, piyasa yaklaşımı veya maliyet yaklaşımına dayalı modellerden biri ya da birkaçı uygulanır. Sonraki aşamada değerlendirme çalışmalarında kullanılacak teknik ve ekonomik girdi parametreleri belirlenir. Kaynak ve rezerv miktarları, tenör dağılımları, üretim planları, emtia fiyatları, sermaye ve işletme giderleri, iskonto oranları ve diğer ekonomik göstergeler bu kapsamda değerlendirilebilir. Elde edilen veriler kullanılarak uygun değerlendirme modelleri oluşturulur ve maden sahasının ekonomik değeri hesaplanır. Son aşamada ise elde edilen sonuçlar teknik, ekonomik ve piyasa koşulları açısından yorumlanarak Maden Sahası Değerleme raporu hazırlanır ve karar vericilere sunulur. Böylece değerlendirme süreci, proje verilerinin ekonomik değere dönüştürüldüğü bütünsel bir karar destek mekanizması olarak işlev görmektedir.

Bir Maden Sahası Değerleme projesinde değerlendirme sürecinde izlenmesi önerilen aşamalar Şekil 2’de özetlenmiştir.

## Şekil 2. Maden değerlendirme projesinde izlenmesi önerilen aşamalar



## **Uluslararası Maden Sahası Değerleme Standartları ve UMLVAL Kodu**

Küresel madencilik sektöründe yatırımcı güveninin artırılması amacıyla Maden Sahası Değerleme çalışmalarına kılavuz olması için uluslararası raporlama standartları geliştirilmiştir. Maden Sahası Değerleme standartları, maden sahalarının daha şeffaf, karşılaştırılabilir ve güvenilir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu standartlar, özellikle uluslararası yatırımcıların teknik ve ekonomik açıdan güvenini artırarak madencilik finansman süreçlerinde önemli rol oynamaktadır.

Maden Sahası Değerlemesine yönelik olarak farklı ülkeler tarafından geliştirilen kod ve standartlar arasında uyum sağlamak amacıyla 2012 yılında Uluslararası Maden Değerleme Komitesi (IMVAL) kurulmuştur. IMVAL, Uluslararası Değerleme Standartları Konseyi (IVSC) tarafından yayımlanan Uluslararası Değerleme Standartlarını temel referans olarak kabul etmiş ve Uluslararası Maden Sahaları Değerleme Standartları Şablonu'nu geliştirmiştir. Bu şablon, mevcut iyi uygulamaların bir uzlaşmasını temsil etmektedir ve zaman içerisinde değişen koşullar altında güncellenmesi beklenmektedir. Bağımsız bir raporlama kodu olarak tasarlanmış olan IMVAL Şablonu mevcut ulusal raporlama standartlarının yerine kullanılmamalıdır (IMVAL, 2021). Farklı ülkeler tarafından yayımlanmış olan Maden Sahası Değerleme kodları Tablo 1'de verilmiştir.

*Tablo 1 Uluslararası Maden Sahası Değerleme Kodları*

Standart / Kod	Güncel Sürüm	Ülke
VALMIN Kodu	2015	Avustralya-Asya
SAMVAL Kodu	2016	Güney Afrika
CIMVAL Kodu	2019	Kanada
UMVAL Kodu	2022	Türkiye
SME Değerleme Standartları	2025	ABD

Ülkemizde ise, UMREK Maden Sahaları Değerleme Kodu (UMVAL Kodu), IMVAL Şablonu temel alınarak hazırlanmış olup birinci versiyon olarak 2022 yılında yayımlanmıştır ve bu versiyon halen geçerliliğini korumaktadır. UMVAL Kodu, Türkiye Cumhuriyeti'ndeki Maden Sahalarının Değerlemelerinin raporlanmasına ilişkin asgari standartlar, temel ilkeler ve yönergeler sağlamaktadır. Böylece, madencilik sektörüne yönelik olarak yatırımcıların ve hissedarların yeterli derecede bilgilendirilmesi amaçlanmıştır. UMVAL Kodu hazırlanırken UMREK Kodu ile olabildiğince uyumlu olmasına dikkat edilmiş ve UMREK Kodu'ndaki tanımlar, terimler ve kısaltmalar mümkün olduğunca değiştirilmeden kullanılmaya çalışılmıştır. Bu Kod, ülkemiz finans ve madencilik sektörüne hizmet edebilmesi için SPK, BDDK, TOBB ve BİST gibi kurumlarca kabul görmüştür (Tercan, 2025).

UMVAL Kodu'nun uluslararası standartlarla uyumlu olması ve özellikle IMVAL ve IVSC gibi küresel kabul görmüş çerçevelerle paralellik göstermesi, Türkiye'de hazırlanan değerlendirme raporlarının uluslararası yatırımcılar tarafından da anlaşılabilir ve güvenilir olmasını sağlamaktadır. Bu durum, yabancı yatırımın teşvik edilmesi ve maden projelerinin finansmana erişiminin kolaylaştırılması açısından kritik bir avantaj sunmaktadır.

Maden Sahası Değerleme standartları, bu standartları kullanan değerlendirme uzmanlarının yetkin ve değerlendirme yapabilmek

için gerekli bilgi, beceri, deneyim, eğitim ve donanıma sahip oldukları varsayımıyla hazırlanmaktadır. Uluslararası Değerleme Standartları (IVS) amaçları doğrultusunda, değerlendirme uzmanı, ister kurum içi (dahili) isterse dışarıdan (sözleşmeli/harici) olsun, objektif, tarafsız, etik ve yetkin bir şekilde değerlendirme yapabilmek için gerekli niteliklere, yeteneğe ve deneyime sahip bir birey, bireyler grubu veya bir kuruluş içindeki birey olarak tanımlanmaktadır (IVS, 2025). Değerleme uzmanı, tarafsız bir değerlendirme sağlamak ve kamu güvenini teşvik etmek ve korumak için dürüstlük, nesnellik, tarafsızlık, gizlilik, yetkinlik ve profesyonellik etik ilkelerine uymalıdır (Tercan, 2025).

## **Temel İlkeler**

Bir Maden Sahasının Değerlemesine yönelik çalışmalar yürütülürken ve Değerleme Raporu hazırlanırken aşağıdaki temel ilkelere uyulması zorunludur (UMVAL, 2022; Tercan, 2025):

- Yetkinlik,
- Kapsamlılık,
- Şeffaflık

## **Yetkinlik İlkesi**

Yetkinlik ilkesi, Maden Sahası Değerleme çalışmalarının gerekli teknik bilgi, deneyim ve uzmanlığa sahip kişiler tarafından yürütülmesini ifade etmektedir. Maden Sahası Değerlemesi; maden mühendisliği, jeoloji mühendisliği, ekonomi ve finans disiplinlerinin birlikte çalışmalar yürütmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle değerlendirme uzmanlarının, değerlendirme yapılan maden türü, madencilik evresi, maden kaynak ve rezerv raporlama standartları ile değerlendirme yaklaşımları ve yöntemleri konusunda yeterli bilgi ve deneyime sahip olmaları beklenmektedir. Uluslararası standartlarda bu ilke, değerlendirme sonuçlarının güvenilirliğini ve yatırımcılar

tarafından kabul edilebilirliğini sağlayan temel unsurlardan biri olarak kabul edilmektedir (UMVAL, 2022).

### **Kapsamlılık İlkesi**

Kapsamlılık ilkesi, maden sahasının değerini etkileyebilecek tüm teknik, ekonomik, çevresel, hukuki ve sosyal faktörlerin değerleme sürecinde dikkate alınmasını gerektirmektedir. Değerleme çalışmaları yalnızca maden kaynak ve rezerv miktarlarının değerlendirilmesiyle sınırlı olmayıp; çok sayıda unsurun bütüncül olarak incelenmesini içermelidir. Kapsamlı bir değerleme yaklaşımı, proje değerini etkileyebilecek kritik değişkenlerin göz ardı edilmesini önleyerek daha gerçekçi ve savunulabilir sonuçların elde edilmesine katkı sağlayacaktır (UMVAL, 2022).

Değerleme çalışmasında yararlanılan tüm veri, bilgi ve dokümanların Maden Sahası Değerleme Raporunda eksiksiz olarak sunulması veya uygun kaynak gösterme yöntemleri kullanılarak referans verilmesi gerekmektedir. Maden Sahası Değerleme Uzmanı, değerleme sürecinde kullanılan veri setlerini, benimsenen varsayımları, karşılaşılan kısıtları ve projeye ilişkin risk unsurlarını raporda açık ve anlaşılabilir şekilde ortaya koymalıdır. Ayrıca, söz konusu risklerin ve sınırlamaların değerleme sonuçları üzerindeki olası etkilerinin analiz edilmesi ve raporlanması, çalışmanın güvenilirliği ve şeffaflığı açısından büyük önem taşımaktadır (UMVAL, 2022).

### **Şeffaflık İlkesi**

Şeffaflık ilkesi, değerleme çalışmasında kullanılan veri kaynaklarının, varsayımların, yöntemlerin ve hesaplama süreçlerinin açık, anlaşılır ve izlenebilir şekilde raporlanmasını ifade etmektedir. Değerleme sonucuna ulaşılırken kullanılan teknik ve ekonomik parametrelerin açıkça belirtilmesi, sonuçların bağımsız uzmanlar

tarafından doğrulanabilmesine ve yatırımcılar tarafından sağlıklı şekilde değerlendirilebilmesine olanak sağlamaktadır. Şeffaf bir değerlendirme raporu, yalnızca ulaşılan değeri değil, bu değer için hangi varsayımlar ve yöntemler kullanılarak elde edildiğini de ortaya koymalıdır. Böylece raporun güvenilirliği artmakta, farklı paydaşlar arasında bilgi asimetrisi azalmakta ve karar alma süreçleri daha sağlıklı hale gelecektir (UMVAL, 2022).

Değerleme sürecinde talep edilen bilgi veya açıklamanın sunulmasının mümkün olmadığı durumlarda, “Yoksa neden yok” temelinde ilgili hususun neden rapora dâhil edilemediği açıkça belirtilmeli ve bu durumun değerlendirme çalışması üzerindeki olası etkileri araştırılmalıdır (UMVAL, 2022).

### **Değerleme Yaklaşımları**

Maden Sahası Değerlemesinde kullanılan yaklaşımlar, IVS kapsamında belirli temel ekonomik prensiplere dayanmaktadır. IVS’na (IVS, 2025) göre değerlendirme yaklaşımları gelir, piyasa ve maliyet olmak üzere üç temel yaklaşım altında incelenmektedir. Bu yaklaşımlar; fiyat dengesi, gelecekteki fayda beklentisi ve ikame prensibi esaslarına dayanmaktadır (Rudendo, 2012). Madencilik sektöründe kullanılacak değerlendirme yaklaşımının seçimi; öncelikli olarak madencilik evresi olmak üzere veri kalitesine, maden kaynak ve rezerv güvenilirliğine, piyasa koşullarına ve değerlendirme amacına bağlı olarak değişmektedir (Torries, 1998; Aktan & Tercan, 2022; Parlak Baz, 2025).

Gelir yaklaşımı, bir maden sahasının gelecekte oluşacak nakit akışlarının tek bir bugünkü değere indirgenmesine dayanmaktadır. Gelir yaklaşımı gelir üretme kapasitesinin değer üzerinde temel belirleyici olduğu ve güvenilir nakit akışı projeksiyonlarının yapılabildiği durumlarda tercih edilmektedir. Özellikle, üretim aşamasındaki projelerde gelir yaklaşımı ön plana çıkmaktadır. Gelir yaklaşımının en önemli avantajı, maden

projesinin gelecekte yaratacağı ekonomik potansiyeli doğrudan dikkate almasıdır. Ancak, yöntemin doğruluğu kullanılan varsayımların güvenilirliğine bağlıdır.

Piyasa yaklaşımı, benzer maden projelerine ilişkin piyasa verileri ve gerçekleşmiş işlemler kullanılarak değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, benzer veya karşılaştırılabilir varlıkların işlem fiyatlarından yararlanılarak değer göstergesi elde edilmesini amaçlamaktadır. Bu yaklaşımda aşağıdaki göstergeler yaygın olarak kullanılmaktadır:

- Kaynak başına değer (\$/ton veya \$/ons)
- Rezerv başına değer
- Üretim kapasitesi başına değer
- Şirket birleşme ve satın alma verileri
- Borsa piyasa çarpanları

Özellikle altın projelerinde “\$/ons kaynak” göstergesi sektör tarafından yaygın biçimde kullanılmaktadır. Benzer jeolojik özelliklere, üretim yöntemine ve bölgesel koşullara sahip projelerin piyasa değerleri karşılaştırılarak ilgili maden sahasının değeri tahmin edilmektedir (Roscoe, 1986).

Piyasa yaklaşımının en önemli avantajı, gerçek piyasa verilerine dayanmasıdır. Bu durum yatırımcı davranışlarını ve piyasa beklentilerini doğrudan yansıtabilmektedir. Ancak, madencilik sektöründe her proje kendine özgü özellikler taşıdığı için tam anlamıyla karşılaştırılabilir proje bulmak çoğu zaman zor olmaktadır. Ayrıca, emtia fiyatlarındaki dalgalanmalar ve piyasa koşullarındaki değişimler, piyasa yaklaşımının güvenilirliğini etkileyebilmektedir.

Maliyet yaklaşımı, bir maden varlığının yeniden oluşturulması veya benzer faydaya sahip bir varlığın elde edilmesi

için gerekli maliyeti esas alan değerlendirme yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, bir yatırımcının aynı faydayı sağlayacak alternatif bir varlık için daha fazla ödeme yapmayacağı varsayımına dayanmaktadır (Wellmer vd., 2008). Madencilik sektöründe maliyet yaklaşımı özellikle aşağıdaki durumlarda kullanılmaktadır:

- Erken aşama arama projeleri
- Yeterli ekonomik veri bulunmayan sahalar
- Henüz üretime geçmemiş projeler
- Kaynak güvenilirliğinin düşük olduğu durumlar

Bu yöntemde dikkate alınan temel maliyet kalemleri şunlardır:

- Arama giderleri
- Sondaj maliyetleri
- Jeolojik modelleme çalışmaları
- Numune analizleri
- Ruhsat ve izin maliyetleri
- Altyapı yatırımları

Maliyet yaklaşımı, maden sahasının gelecekteki ekonomik potansiyelini tam olarak yansıtmayabilir. Bu nedenle tek başına kullanılması yerine diğer yöntemlerle desteklenmesi önerilmektedir.

UMVAL Kodunda madencilik evreleri; Arama sahaları, Maden kaynağı sahaları, Geliştirme sahaları ve Üretim sahaları olmak üzere dört gruba ayrılmıştır (UMVAL, 2022).

Arama Sahaları, mineralizasyonun varlığını belirlemek ve ekonomik potansiyelini ortaya koymak amacıyla jeolojik, jeokimyasal ve jeofizik çalışmaların yürütüldüğü en erken proje aşamasını ifade etmektedir. Bu aşamada belirsizlikler yüksek, veri

miktarı sınırlı ve proje riski fazladır. Henüz güvenilir bir kaynak veya rezerv tanımı bulunmamaktadır.

Maden kaynağı sahaları, yeterli arama çalışmaları sonucunda mineralizasyonun varlığının ve sürekliliğinin ortaya konulduğu, kaynak tahminlerinin yapıldığı projeleri kapsamaktadır. Bu aşamada görünür, belirlenmiş veya ölçülmüş kaynak kategorileri tanımlanabilmekte, ancak ekonomik işletilebilirlik henüz tam olarak doğrulanmamış olabilmektedir.

Geliştirme Sahaları, ön fizibilite ve fizibilite çalışmalarının tamamlandığı, rezervlerin belirlendiği ve maden işletmesinin kurulmasına yönelik hazırlıkların yürütüldüğü aşamayı ifade etmektedir. Bu dönemde yatırım kararları alınmakta, finansman sağlanmakta ve tesis ile altyapı yatırımları gerçekleştirilmektedir. Proje riskleri önemli ölçüde azalmış durumdadır.

Üretim Sahaları, madencilik faaliyetlerinin fiilen başladığı ve ekonomik faydanın elde edildiği aşamadır. Bu dönemde cevher üretimi, zenginleştirme ve satış faaliyetleri yürütülmekte, proje gelir üretmeye başlamaktadır. Teknik ve ekonomik belirsizlikler diğer aşamalara göre daha düşük olup, değerlendirme çalışmalarında gelir yaklaşımı genellikle ön plana çıkmaktadır.

Maden Sahalarının farklı evreleri için önerilen Değerleme Yaklaşımları Tablo 2’de görülmektedir.

*Tablo 2 Maden Sahalarının farklı evreleri ve Değerleme Yaklaşımları arasındaki ilişki*

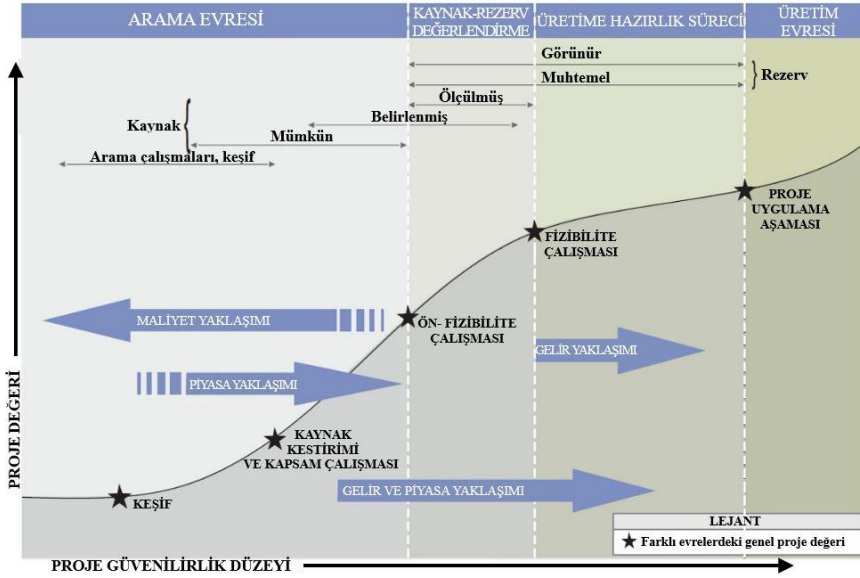
Değerleme Yaklaşımı	Arama Sahaları	Maden Kaynağı Sahaları	Geliştirme Sahaları	Üretim Sahaları
Gelir	Genellikle kullanılmaz	Bazı durumlarda	Evet	Evet
Piyasa	Evet	Evet	Evet	Evet
Maliyet	Evet	Bazı durumlarda	Evet	Hayır

Kaynak: UMLVAL, 2022

Tablo 2 incelendiğinde, arama sahalarında gelir yaklaşımı genellikle uygulanamazken, veri eksikliğinin fazla olması nedeniyle maliyet ve piyasa yaklaşımları daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Maden kaynağı sahalarında kaynak güvenilirliğinin artmasıyla birlikte piyasa yaklaşımı ön plana çıkmakta, bazı durumlarda gelir ve maliyet yaklaşımları da uygulanabilmektedir. Geliştirme sahalarında teknik ve ekonomik verilerin yeterli düzeye ulaşması nedeniyle gelir, piyasa ve maliyet yaklaşımlarının tamamı kullanılabilir. Üretim sahalarında ise gelecekteki nakit akışlarının güvenilir şekilde tahmin edilebilmesi nedeniyle gelir yaklaşımı en uygun yöntem haline gelirken, piyasa yaklaşımı da destekleyici olarak kullanılabilir. Buna karşılık maliyet yaklaşımı, işletmeye geçmiş ve ekonomik performansı ortaya çıkmış projelerde önemini büyük ölçüde kaybetmektedir.

Bir maden projesinin keşiften üretime kadar olan yaşam döngüsü boyunca proje değerindeki değişimi, güvenilirlik düzeyindeki artışı ve farklı evrelerde uygulanabilecek değerlendirme yaklaşımları Şekil 3'te gösterilmektedir.

Şekil 3. Değerleme Yaklaşımlarının Proje Evreleri ile İlişkisi



Kaynak: VenmynDeloitte, 2013; Çeviri: Aktan, 2020

Burada, yatay eksenle proje güvenilirlik düzeyi, dikey eksenle ise proje değeri yer almaktadır. Eğrinin genel görünümü, proje geliştikçe ve belirsizlikler azaldıkça proje değerinin arttığını ortaya koymaktadır.

Arama evresi, projenin en yüksek belirsizliğe sahip olduğu aşamayı temsil etmektedir. Bu aşamada keşif faaliyetleri, jeolojik incelemeler ve ilk kaynak belirleme çalışmaları yürütülmektedir. Henüz ekonomik işletilebilirlik tam olarak ortaya konulmadığından proje değeri nispeten düşüktür. Bu nedenle, erken aşama projelerde değerlendirme çalışmalarında çoğunlukla maliyet yaklaşımı ve sınırlı ölçüde piyasa yaklaşımı kullanılmaktadır. Özellikle yapılan arama harcamaları, benzer projelerin işlem değerleri ve jeolojik potansiyel temel alınarak değer tahmini yapılmaktadır.

Kaynak kestirimi ve kapsam çalışmasının tamamlanmasının ardından proje ön fizibilite aşamasına geçmektedir. Bu aşamada

kaynakların güvenilirliği artmakta ve belirlenmiş ile ölçölmüş kaynak kategorileri ortaya çıkmaktadır. Teknik ve ekonomik verilerin artmasıyla birlikte projenin ekonomik potansiyeli daha net anlaşılmaya başlamakta, buna bağlı olarak proje değeri önemli ölçüde yükselmektedir. Bu evrede gelir ve piyasa yaklaşımının birlikte kullanılabileceği görölmektedir.

Bir sonraki aşamada gerçekleştirilen fizibilite çalışmaları, projenin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğinin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Fizibilite çalışmaları sonucunda kaynakların bir kısmı görünür ve muhtemel rezervlere dönüştürölebilmektedir. Belirsizliklerin azalması ve yatırım riskinin düşmesi nedeniyle proje değeri belirgin bir artış meydana gelmektedir. Bu aşamadan itibaren gelir yaklaşımı, değerlendirme çalışmalarında baskın yaklaşım haline gelmektedir.

Proje uygulama ve üretim evresi, projenin en yüksek güvenilirliğe sahip olduğu aşamadır. Finansman sağlanmış, tesis yatırımları tamamlanmış ve üretim başlamıştır. Maden Rezerv miktarları büyük ölçüde doğrulanmış olduğundan proje riski en düşük seviyeye ulaşmaktadır. Bu nedenle, proje değeri de en yüksek düzeye çıkmaktadır. Üretim aşamasındaki maden projelerinde değerlendirme çalışmalarının temelini gelir yaklaşımı oluşturmakta, gelecekte elde edilmesi beklenen nakit akışları üzerinden ekonomik değer hesaplanmaktadır.

Genel olarak, madencilik projelerinde bilgi kalitesi ve güvenilirlik arttıkça proje riskinin azaldığı, buna karşılık proje değerinin yükseldiği ve değerlendirme yöntemlerinin madencilik evresine bağlı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Bu durumda, maden sahalarının değerlemesinde tek bir yaklaşımın her koşulda yeterli olması mümkün değildir. Bu nedenle uluslararası standartlar, mümkün olduğunda birden fazla yaklaşımın birlikte değerlendirilmesini önermektedir. Modern maden sahası değerlendirme

çalışmalarında farklı yaklaşımlar birlikte kullanılarak sonuçların karşılaştırılması, değerlendirme güvenilirliğini artırmaktadır.

## **Değerleme Yöntemleri**

Değerleme süreci içerisindeki bir başka aşama ise Değerleme Yaklaşımına karar verildikten sonra hangi Değerleme Yönteminin tercih edileceğidir. Nitekim her Değerleme Yaklaşımının alt grubunda birden fazla Değerleme yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler her bir Değerleme yaklaşımının temel mantığına uygun olarak geliştirilmiştir.

UMVAL koduna göre Değerleme yöntemleri esas ve ikincil olarak sınıflandırılmıştır. Esas yöntem, seçilen Değerleme yaklaşımına uygun olarak tercih edilmesi önerilen ilk yöntemi ifade etmektedir. İkincil yöntem ise, esas yöntemin uygulanamaması durumunda veya esas yöntemi desteklemek amacıyla tercih edilmesi önerilen yöntemdir.

Tablo 3'te her bir Değerleme yaklaşımının alt grubunda bulunan Değerleme yöntemleri verilmiştir. Bu tablodan hangi değerlendirme yönteminin seçilmesi gerektiği Değerleme Uzmanı tarafından belirlenmelidir. Seçilen Değerleme yöntemin hangi gerekçeler veya bilgi/bulgular doğrultusunda tercih edilmiş olduğu açıklanmalıdır.

*Tablo 3 Değerleme Yöntemleri*

Değerleme Yaklaşımı	Değerleme Yöntemi	Sıralama
Gelir	İndirgenmiş Nakit Akışı	Esas Yöntem
	Gerçek Opsiyonlar	Esas Yöntem
Piyasa	Karşılaştırılabilir İşlemler	Esas Yöntem
	Opsiyon Sözleşmesi Koşulları	Esas Yöntem
	Piyasa Kapitalizasyonu	İkincil Yöntem
Maliyet	Muhammen Değer	Esas Yöntem
	Geçmiş Arama Harcamalarının Katları	Esas Yöntem
Diğer	Yerbilim Faktörü (Kilburn)	İkincil Yöntem

*Kaynak: UMVAL, 2022*

### **İndirgenmiş Nakit Akışı (Discounted Cash Flow)**

İndirgenmiş Nakit Akışı yöntemi, bir maden projesinin gelecekte oluşturacağı tahmini nakit akışlarının belirli bir iskonto oranı kullanılarak bugünkü değere dönüştürülmesine dayanmaktadır. Madencilik sektöründe gelir yaklaşımının uygulanabilir olduğu maden sahalarının değerlemesinde kullanılan en yaygın yöntemidir. Yöntemde üretim miktarı, emtia fiyatı, işletme maliyetleri, yatırım giderleri ve proje ömrü gibi parametreler dikkate alınmaktadır.

### **Gerçek Opsiyonlar (Real Options)**

Gerçek opsiyonlar yöntemi, madencilik projelerindeki belirsizlikleri ve yönetsel esnekliği dikkate alan modern bir değerlendirme yöntemidir. Bu yöntem; üretimi erteleme, kapasite artırma, geçici durdurma veya projeyi terk etme gibi stratejik

seçeneklerin ekonomik değerini hesaplamaktadır. Özellikle emtia fiyatlarının yüksek oynaklık gösterdiği projelerde indirgenmiş nakit akış yöntemine göre daha gerçekçi sonuçlar verebilmektedir.

### **Karşılaştırılabilir İşlemler (Comparable Transactions)**

Bu yöntemde benzer maden projelerinin geçmiş satın alma, birleşme veya yatırım işlemleri incelenerek değerleme yapılmaktadır. Genellikle “\$/ons kaynak”, “\$/ton rezerv” veya “işletme kapasitesi başına değer” gibi çarpanlar kullanılmaktadır. Yöntem piyasa davranışlarını yansıtması açısından önemlidir; ancak tam anlamıyla benzer proje bulmak çoğu zaman zordur.

### **Opsiyon Sözleşmesi Koşulları (Option Agreement Terms)**

Madencilik sektöründe özellikle arama projelerinde kullanılan bu yöntem, bir maden sahası için yapılan opsiyon anlaşmalarındaki ödeme koşullarını temel almaktadır. Opsiyon sözleşmelerinde genellikle peşin ödeme, sondaj taahhüdü, aşamalı ödeme ve hisse devri gibi hükümler yer almaktadır. Bu sözleşmeler piyasanın ilgili saha için ödemeye razı olduğu değeri yansıtığından erken aşama projelerin değerlemede önemli veri sağlamaktadır.

### **Piyasa Kapitalizasyonu (Market Capitalization)**

Piyasa kapitalizasyonu yöntemi, halka açık madencilik şirketlerinin toplam piyasa değerine dayanmaktadır. şirketin borsadaki hisse fiyatı ile toplam hisse sayısının çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Özellikle gelişmiş projelere sahip şirketlerin piyasa algısını göstermesi açısından önemlidir. Ancak, şirketin yalnızca tek bir madene değil farklı varlıklara sahip olması, yöntemin doğrudan uygulanmasını zorlaştırabilmektedir.

### **Muhammen Değer (Appraised Value)**

Muhammen değer yöntemi, uzman görüşü ve teknik değerlendirmeler doğrultusunda belirlenen tahmini değeri ifade

etmektedir. Bu yöntemde jeolojik potansiyel, saha konumu, altyapı olanakları, benzer projeler ve piyasa koşulları birlikte değerlendirilmektedir. Özellikle yeterli ekonomik veri bulunmayan erken aşama projelerde kullanılmaktadır. Ancak, uzman yorumuna dayalı olması nedeniyle öznel değerlendirmeler içerebilmektedir.

### **Geçmiş Arama Harcamalarının Katları (Multiples of Exploration Expenditure)**

Bu yöntemde bir maden sahası için geçmişte yapılan arama harcamaları belirli katsayılarla çarpılarak saha değeri tahmin edilmektedir. Özellikle erken aşama arama projelerinde sık kullanılan yöntemlerden biridir. Kullanılan katsayı; projenin jeolojik potansiyeline, bölgesel özelliklerine ve keşif başarısına bağlı olarak değişmektedir. Yöntem basit ve hızlı uygulanabilir olsa da gelecekteki ekonomik potansiyeli doğrudan yansıtmayabilir.

### **Yerbilim Faktörü (Kilburn Yöntemi)**

Kilburn tarafından geliştirilen Yerbilim Faktörü yöntemi, maden sahasının jeolojik özelliklerini temel alan bir değerlendirme yöntemidir. Bu yöntemde mineralizasyonun sürekliliği, tenör dağılımı, jeolojik güvenilirlik, cevher tipi ve keşif potansiyeli gibi parametreler dikkate alınmaktadır. Özellikle erken aşama arama projelerinde ve ekonomik verilerin sınırlı olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Jeolojik riskleri değerlendirmesi açısından önemli olmakla birlikte, uzman yorumuna yüksek derecede bağımlıdır.

### **Risk ve Belirsizlik Analizi**

Madencilik projeleri, doğaları gereği yüksek düzeyde risk ve belirsizlik içeren yatırımlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle maden sahası değerlendirme çalışmalarında risk ve belirsizliklerin doğru şekilde tanımlanması, analiz edilmesi ve raporlanması büyük önem taşımaktadır. Risk analizi, proje değerini etkileyebilecek faktörlerin belirlenmesi ve bunların olası etkilerinin değerlendirilmesini

kapsarken, belirsizlik analizi mevcut verilerin doğruluğu ve geleceğe ilişkin tahminlerin güvenilirliği ile ilgilidir (Rudendo, 2012; Parlak Baz, 2025).

Madencilik projelerinde karşılaşılan en önemli risklerden biri jeolojik risktir. Cevherleşmenin sürekliliği, tenör dağılımı, jeolojik yapıların karmaşıklığı ve kaynak tahminlerinin doğruluğu gibi faktörler proje başarısını doğrudan etkileyebilmektedir. Özellikle erken aşama arama projelerinde veri miktarının sınırlı olması nedeniyle jeolojik belirsizlikler daha yüksek düzeydedir. Kaynak ve rezerv çalışmalarının ilerlemesiyle birlikte bu belirsizlikler azalmakta ve proje güvenilirliği artmaktadır.

Bir diğer önemli risk grubu teknik ve operasyonel risklerdir. Madencilik yöntemi seçimi, ekipman performansı, üretim verimliliği, cevher hazırlama ve zenginleştirme süreçleri gibi unsurlar proje ekonomisini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Beklenmeyen teknik sorunlar veya üretim performansındaki sapmalar, maliyet artışlarına ve gelir kayıplarına neden olabilmektedir.

Ekonomik ve finansal riskler, maden projelerinin değerlemesinde en fazla dikkate alınan unsurlar arasında yer almaktadır. Emtia fiyatlarındaki dalgalanmalar, döviz kuru değişimleri, enflasyon, faiz oranları ve sermaye maliyetleri proje kârlılığını doğrudan etkileyebilmektedir. Uluslararası piyasalarda işlem gören metallere yönelik fiyat değişimleri, maden projelerinin ekonomik değerinde önemli farklılıklara yol açabilmektedir.

Madencilik faaliyetleri aynı zamanda politik ve yasal risklere de maruz kalabilmektedir. Madencilik mevzuatındaki değişiklikler, ruhsat süreçleri, vergi düzenlemeleri, devlet hakları ve izin prosedürleri proje geliştirme sürecini etkileyebilmektedir. Bazı ülkelerde siyasi istikrarsızlık veya düzenleyici belirsizlikler, yatırım riskinin artmasına neden olabilmektedir.

Son yıllarda önemi giderek artan bir diğer risk grubu ise çevresel ve sosyal risklerdir. Çevresel etkiler, rehabilitasyon yükümlülükleri, su yönetimi, karbon emisyonları ve yerel halkın projeye yönelik tutumu, maden projelerinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Sosyal lisansın kaybedilmesi veya çevresel yükümlülüklerin yerine getirilememesi, projenin ekonomik değerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Maden sahası değerlendirme çalışmalarında risk ve belirsizliklerin sistematik olarak değerlendirilmesi, kullanılan varsayımların açıkça belirtilmesi ve proje değerine etkilerinin analiz edilmesi gerekmektedir. Risklerin doğru yönetilmesi, daha güvenilir değerlendirme sonuçlarının elde edilmesine ve yatırım kararlarının daha sağlıklı bir şekilde alınmasına katkı sağlayacaktır.

### **Duyarlılık ve Senaryo Analizleri**

Maden sahalarının değerlemesinde kullanılan ekonomik modeller, geleceğe yönelik çok sayıda varsayım içermektedir. Emtia fiyatları, üretim miktarları, cevher tenörü, işletme maliyetleri, yatırım giderleri ve iskonto oranı gibi parametrelerde meydana gelebilecek değişiklikler, proje değerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle değerlendirme çalışmalarında yalnızca tek bir ekonomik sonuç sunulması yeterli görülmemekte, aynı zamanda proje değerinin farklı koşullar altında nasıl değişebileceğinin de ortaya konulması gerekmektedir. Bu amaçla duyarlılık ve senaryo analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Rudendo, 2012).

Duyarlılık analizi, proje değerini etkileyen temel değişkenlerde meydana gelen değişimlerin ekonomik sonuçlar üzerindeki etkisini inceleyen bir yöntemdir. Bu analiz kapsamında belirli bir parametre değiştirilirken diğer değişkenler sabit tutulur ve ilgili değişikliğin net bugünkü değer (NPV), iç kârlılık oranı (IRR) veya nakit akışları üzerindeki etkisi değerlendirilir. Örneğin emtia

fiyatında %10'luk bir artış veya azalışın proje değerine etkisi hesaplanabilir. Benzer şekilde işletme maliyetleri, yatırım giderleri, üretim miktarı veya tenör değerlerindeki değişimlerin proje ekonomisini nasıl etkilediği analiz edilebilir. Duyarlılık analizleri sayesinde proje değerini en fazla etkileyen kritik değişkenler belirlenebilmekte ve yatırımcıların risk unsurlarını daha iyi anlamaları sağlanmaktadır (Parlak Baz, 2025).

Senaryo analizi ise birden fazla değişkenin aynı anda değiştirilerek farklı gelecek koşullarının değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşımda genellikle iyimser, baz ve kötümser olmak üzere üç temel senaryo oluşturulmaktadır. İyimser senaryoda yüksek emtia fiyatları, düşük maliyetler ve güçlü operasyonel performans gibi olumlu varsayımlar kullanılırken; kötümser senaryoda düşük emtia fiyatları, yüksek maliyetler ve operasyonel zorluklar dikkate alınmaktadır. Baz senaryo ise en olası veya beklenen koşulları temsil etmektedir. Bu sayede proje değerinin farklı ekonomik ve teknik koşullar altında nasıl değişebileceği ortaya konulabilmektedir.

Duyarlılık ve senaryo analizleri, maden sahası değerlendirme çalışmalarının güvenilirliğini artıran önemli araçlardır. Bu analizler sayesinde yatırımcılar ve karar vericiler, projenin yalnızca beklenen değerini değil, aynı zamanda karşılaşılabileceği riskleri ve farklı koşullara karşı dayanıklılığını da değerlendirebilmektedir.

## **Gelecekte Maden Sahası Değerleme**

Teknolojik gelişmeler ve dijital dönüşüm, maden sahası değerlendirme uygulamalarını önemli ölçüde etkilemektedir. Gelecekte yapay zekâ, makine öğrenmesi, büyük veri analitiği ve dijital ikiz teknolojilerinin değerlendirme süreçlerinde daha yaygın kullanılması beklenmektedir. Özellikle gerçek zamanlı üretim verilerinin ekonomik modellerle entegre edilmesi, maden projelerinin değerlerinin dinamik olarak güncellenmesine olanak sağlayacaktır.

Bunun yanında enerji dönüşümü ve kritik minerallere yönelik artan talep, geleneksel değerlendirme yaklaşımlarının yanı sıra stratejik değer kavramının da ön plana çıkmasına neden olmaktadır. ESG (Çevresel, Sosyal ve Yönetişim) kriterlerinin yatırım kararlarındaki öneminin artmasıyla birlikte, çevresel yükümlülükler, karbon emisyonları ve sürdürülebilirlik göstergeleri de değerlendirme modellerinin ayrılmaz bir parçası haline gelecektir. Bu gelişmeler doğrultusunda geleceğin maden değerlendirme yaklaşımlarının daha veri odaklı, dinamik ve bütüncül bir yapıya dönüşeceği öngörülmektedir.

## **Kaynakça**

Aktan, M. (2020). Kömür Gazlaştırma Ürünlerinin Gerçek Opsiyonlar Yöntemi İle Değerlemesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Aktan, M., & Tercan, A.E. (2022). Maliyet Yaklaşımı İle Erken Evre Kömür Sahalarının Değerlemesi, Türkiye 27. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi (IMCET 2022), Antalya / Türkiye, 584-595.

Baures, S. (2010). Valuation of Metals and Mining Companies. Basinvest.

CIMVAL (2019). The CIMVAL Code for the Valuation of Mineral Properties. the Special Committee of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum on the Valuation of Mineral Properties.

IMVAL (2021). International Mineral Property Valuation Standards Template. International Mineral Valuation Committee.

IVS (2025). International Valuation Standards. International Valuation Standards Council.

Parlak Baz, Z. (2025). Belirsizlik Altında Maden Projelerinin Değerlemesi: Altın Sahası Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Rudendo, V. (2012). The Mining Valuation Handbook : Mining and Energy Valuation for Investors and Management. John Wiley & Sons Australia, Ltd.

SAMVAL (2016). The South African Code for the Reporting of Mineral Asset Valuation. the SAMCODES Standards Committee (SSC).

SME Değerleme Standartları (2025). SME Standards and Guidelines for Valuation of Mineral Properties (Including Petroleum). Valuation Standards Committee of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, INC.

Tercan, A.E. (2025). UMVAL (2022) Kodu'nun UMREK (2023) Kodu ile etkileşimi ve diğer ulusal değerleme kodları ile karşılaştırılması, *Yerbilimleri*, 46(1), 1-13, 1587922.

Torries, T. F. (1998). *Evaluating Mineral Projects: Applications and Misconceptions*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, INC.

UMREK (2023). *Ulusal Maden Kaynak ve Maden Rezerv Raporlama Kodu*. Ulusal Maden Kaynak ve Maden Rezerv Raporlama Komisyonu.

UMVAL (2022). *Maden Sahalarının Değerleme Standartları*. Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu.

VALMIN (2015). *Australasian Code for Public Reporting of Technical Assessments and Valuations of Mineral Assets*. The VALMIN Committee.

VenmynDeloitte, (2013). *Independent specialist valuation report on the coal assets of the Sekoko coal (Pty) Limited (Sekoko Coal) - Firestone Energy Limited (Firestone) Joint Venture (Sekoko Coal - Firestone JV) at Theis Waterberg Coal Project, South Africa*.

Wellmer, F. W., Dalheimer, M., & Wagner, M. (2008). *Economic Evaluations in Exploration*. Springer.

# YERALTI KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ

İLKNUR EROL<sup>1</sup>

## Giriş

Madencilik, doğası gereği karmaşık ve sürekli değişim gösteren koşullar altında yürütülen bir faaliyet türüdür. Bu durum, sektörün yüksek düzeyde risk barındıran çalışma koşullarına sahip olmasına neden olmaktadır (Moyer, 1992). İş sağlığı ve güvenliği kapsamında madencilik; ağır yaralanma ve ölümlü iş kazalarının sık görüldüğü sektörlerden biridir. Dünya genelinde toplam çalışan nüfusunun yaklaşık %1'i madencilik sektöründe istihdam edilmesine rağmen, iş kazalarının yaklaşık %8'i bu alanda meydana gelmektedir (Ergun, 2007; Önder et al., 2015; Tanır, 2009). Türkiye'de ve dünya madenciliğinde meydana gelen iş kazalarının ve ölümlerin büyük bir bölümü kömür ocaklarında gerçekleşmektedir (Derin et al., 2017). Özellikle yeraltı kömür madenciliğinde karşılaşılan grizu patlamaları, kömür tozu patlamaları, göçükler, yangınlar, ani gaz püskürmesi ve su baskını bu alanı en riskli çalışma sahalarından biri hâline getirmektedir. Bu

---

<sup>1</sup> Doç. Dr., Çukurova Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8968-1134

nedenle yeraltı kömür madenciliğinde güvenli üretim anlayışının geliştirilmesi ve iş sağlığı ile güvenliği uygulamalarının etkin şekilde yürütülmesi büyük önem taşımaktadır.

Yeraltı kömür madenciliğinde iş sağlığı ve güvenliği, işletmenin planlama ve projelendirme aşamasından itibaren başlamaktadır. Ocak tasarımında; cevher ve yan kayaçların jeolojik ve jeomekanik özellikleri, üretim kapasitesi, yeraltı suyu durumu, gaz oluşum potansiyeli, havalandırma gereksinimleri ve çevresel koşullar gibi birçok teknik parametre dikkate alınarak güvenli çalışma ortamının oluşturulmasına yönelik planlamalar yapılmaktadır (Kahraman, 2024).

Yeraltı üretim faaliyetlerinin ilk aşamasını, kazı işlemlerinin kontrollü ve güvenli biçimde yürütülmesi oluşturmaktadır. Kazı sonrasında meydana gelen boşlukların stabilitesinin korunabilmesi amacıyla uygun tahkimat sistemleri uygulanmakta ve çalışma alanlarının güvenliği sağlanmaktadır. Üretim faaliyetleri sırasında kömür kazısı, tahkimat uygulamaları, nakliyat ve ekipman kullanımı gibi birçok işlemin aynı anda yürütülmesi, çalışma ortamındaki risk düzeyini artırmaktadır (Akkaya, 2001). Üretim derinliklerinin artmasıyla birlikte havalandırma, drenaj, nakliyat, enerji iletimi ve haberleşme sistemleri gibi yardımcı unsurların önemi de artmakta, bu sistemlerde meydana gelebilecek aksaklıklar ciddi iş güvenliği riskleri oluşturabilmektedir (Dursun, 2014). Bu nedenle güvenli üretimin sürdürülebilmesi için tüm altyapı sistemlerinin iş güvenliği kriterlerine uygun şekilde projelendirilmesi ve işletme süresince düzenli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde, yeraltı kömür madenciliği faaliyetleri sırasında çalışan sağlığını ve iş güvenliğini etkileyen temel risk faktörleri değerlendirilmiş; söz konusu risklerin azaltılmasına yönelik teknik ve organizasyonel önlemler ele alınmıştır.

# Yeraltı Kömür Madenciliğinde Çalışan Sağlığını ve İş Güvenliğini Etkileyen Riskler

## Zararlı Gazlar

Normal atmosfer havası yaklaşık %79,04 azot, %20,93 oksijen ve %0,03 karbondioksitten oluşmaktadır. Ancak yeraltı kömür madenlerinde hava; gaz, toz ve buhar karışımları içermekte ve atmosferik havadan farklı bir yapı göstermektedir. Ocak havasındaki kirleticilerin düzeyi; üretim yöntemi, havalandırma, mekanizasyon, mineral türü ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Yetersiz havalandırma durumunda oksijen azalırken zararlı gazların yoğunluğu artabilmekte ve bu durum ciddi iş sağlığı ve güvenliği riskleri oluşturmaktadır. Yeraltı kömür madenciliğinde bulunan zararlı gazlar genel olarak boğucu, zehirleyici (toksik) ve patlayıcı gazlar olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır (McPherson, 1993; Ayvazoğlu et al., 1994; Hartman et al., 1997).

## Boğucu özellikteki gazlar

Atmosferik havanın yaklaşık %21'i oksijenden oluşmaktadır. Boğucu gazlar ise oksijeni seyrelterek ortamda oksijen yetersizliğine neden olan biyolojik olarak tesirsiz (inert) gazlardır. Oksijen oranındaki azalma, dokulara taşınan oksijen miktarını düşürmekte ve özellikle merkezi sinir sistemi üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır (Tablo 1). Boğucu gazlara karbondioksit (CO<sub>2</sub>), azot (N<sub>2</sub>) ve metan (CH<sub>4</sub>) örnek verilebilir.

*Tablo 1 Azalan oksijen düzeyine bağlı fizyolojik etkiler*

Oksijenin havadaki hacimsel oranı (%)	Fizyolojik etkiler
17-21	Normal Solunum
15-17	Hızlı ve derin soluk alma
9-15	Yüksek nabız, yorgunluk, baş ağrısı
6-9	Bulantı, kusma, bilinç kaybı
<6	Bayılma, ölüm

Boğucu gazların etkileri yalnızca oksijen azalmasına bağlı değildir; yetersiz havalandırma, ekipman arızaları, uzun süreli maruziyet ve kişisel koruyucu donanım eksikliği gibi faktörler riski artırmaktadır. Yeraltı kömür madenlerinde oksijen oranının %19'un altına düşmesi halinde çalışma yapılmasına izin verilmemektedir.

### *Karbon dioksit (CO<sub>2</sub>)*

*Karbondioksit (CO<sub>2</sub>), havadan ağır, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Solunum, yanma, yangın ve patlamalar sonucu oluşarak özellikle işyerlerinin tabanında birikme eğilimindedir. İşyerlerinde izin verilen en yüksek CO<sub>2</sub> oranı %0,5(5000 ppm) olarak belirlenmiştir.*

*Düşük konsantrasyonlarda etkisi sınırlı olmakla birlikte, artan yoğunluklarda nefes darlığı, baş ağrısı, baş dönmesi ve bilinç kaybı gibi ciddi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Yüksek konsantrasyonlarda ise ölüm riski ortaya çıkmaktadır.*

### *Azot (N<sub>2</sub>)*

*Yeraltı madenciliğinde azot (N<sub>2</sub>), atmosferin yaklaşık %78'ini oluşturan renksiz, kokusuz ve kimyasal olarak kararlı bir gazdır.*

*Yanıcı veya patlayıcı özellik göstermemesi nedeniyle maden işletmelerinde inert gaz olarak kullanılmaktadır. Özellikle yeraltı kömür madenlerinde meydana gelen yangınların kontrol altına alınması, yangın bölgelerinin izole edilmesi ve metan gazı kaynaklı patlama risklerinin azaltılması amacıyla ocak ortamına azot enjeksiyonu yapılabilmektedir. Bununla birlikte, azot gazının yüksek konsantrasyonlarda bulunması ortamdaki oksijen miktarını azaltarak çalışanlar için boğucu bir atmosfer oluşturabilmektedir.*

*Bu nedenle yeraltı madenlerinde gaz izleme sistemleri ve yeterli havalandırma uygulamaları ile azot ve oksijen seviyelerinin sürekli kontrol altında tutulması büyük önem taşımaktadır.*

## ***Zehirleyici (toksik) gazlar***

Bu gazlar, hücresel düzeyde oksijen kullanımını etkileyerek dokulara taşınan oksijen miktarının azalmasına neden olmaktadır. Gaz yoğunluğu, maruziyet süresi, yetersiz havalandırma ve kişisel koruyucu donanım eksikliği, risk seviyesini artıran başlıca faktörlerdir. Ayrıca birden fazla gazın aynı ortamda bulunması, zararlı etkilerin daha kısa sürede ve daha şiddetli şekilde ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Zehirli gazlar ise karbonmonoksit (CO), azotun (N) tüm oksitleri, hidrojensülfür (H<sub>2</sub>S) ve kükürt dioksitten (SO<sub>2</sub>) oluşmaktadır.

### **Karbon monoksit (CO)**

Karbon monoksit (CO), renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Genellikle açık alev içermeyen yangınlar başta olmak üzere çeşitli yangın türleri, patlamalar ve içten yanmalı motorlar karbon monoksit oluşumunun önemli kaynaklarıdır. Yeraltı ortamlarda oluşan açıklıkların dip kısımlarında birikme eğilimi göstermektedir. Karbon monoksit (CO) için 8 saatlik çalışma süresinde izin verilen en yüksek maruziyet sınırı 50 ppm (%0,005) olarak belirlenmiştir. Çalışan sağlığı üzerindeki etkileri Tablo 2'de verilmiştir.

*Tablo 2 Karbon monoksitin çalışan sağlığı üzerindeki etkileri*

Havadaki CO düzeyi (ppm)	Maruziyet süresi	Kandaki COHb yüzdesi (%)	Klinik bulgular ve semptomlar
100 >	Devamlı	0-10	Psikomotor bozukluklar
100-200	Uzun süre	10-20	Alında sıkışma, hafif baş ağrısı, cilt damarlarında genişleme
200-300	5-6 saat	20-30	Baş ağrısı, şakaklarda sıkışmalar
400-600	4-5 saat	30-40	Şiddetli baş ağrısı, halsizlik, görme bulanıklığı, bulantı, kusma, dudak ve ciltte kırmızılık
700-1000	3-4 saat	40-50	Bayılma, nabız ve solunum hızının artması
1000-1500	1,5-3 saat	50-60	Nabız ve solunum hızının artması, bayılma, koma, periyodik solunum ve havale
1600-3000	1,5-3 saat	60-70	Koma, havale, kalp ve solunumun yavaşlaması
5000-10000	1-2 dk.	70-80	Zayıf nabız, solunum yetersizliği ve ölüm

### **Hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S)**

Hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), renksiz, çürük yumurta kokusuna sahip, havadan ağır ve toksik bir gazdır. Organik maddelerin çürümesi ve bazı madencilik faaliyetleri sonucunda oluşmaktadır. Bu gaz, hacimce %4 ile %44,5 arasındaki konsantrasyonlarda patlayıcı özellik göstermektedir. Düşük konsantrasyonlarda göz ve solunum yollarında tahrişe neden olurken, yüksek konsantrasyonlarda ciddi göz ve akciğer hasarına yol açabilmektedir (Tablo 3).

*Tablo 3 Hidrojen sülfürün çalışan sağlığı üzerindeki etkileri*

Ortamdaki H <sub>2</sub> S miktarı (ppm)	Klinik bulgular ve semptomlar
0,1-0,2	Koku eşiği
10-100	Göz ve üst solunum yollarında irritasyon
> 200	Geç dönemde halüsinasyonlar
> 500	Bilinç kaybı
>1000	Solunum felci, ölüm

## Sülfür dioksit (Kükürt dioksit, SO<sub>2</sub>)

Sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>), renksiz, keskin kokulu ve havadan ağır bir gazdır. Genellikle sülfürlü madenlerin işlenmesi ve pirit oksidasyonu sonucunda oluşmaktadır. Düşük konsantrasyonlarda dahi solunum yollarında tahrişe neden olurken, artan seviyelerde öksürük, nefes darlığı ve göz irritasyonu gibi etkiler ortaya çıkmaktadır. Yüksek maruziyet durumunda ise ciddi solunum problemleri ve akciğer hasarı gelişebilmektedir. Diğer etkileri Tablo 4'te verilmiştir.

*Tablo 4 SO<sub>2</sub>'nin ek fizyolojik etkileri*

Ortamdaki SO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	Fizyolojik etkiler
20	Öksürük, gözlerde tahriş, korku
150	Birkaç dakika dayanılabilir
400	Suluk almak imkansızlaşır
1000	10 dakikada ölüm gerçekleşir

## Azot oksitler

Nitro esaslı patlayıcıların kullanımı ve dizel motorlu ekipmanların egzoz emisyonları sonucunda açığa çıkan azot oksitler, yeraltı maden atmosferinde karşılaşılan önemli tehlikeli gazlar arasında yer almaktadır. Düşük konsantrasyonlarda dahi solunmaları ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmekte olup izin verilen maruziyet sınırı 25 ppm olarak belirlenmiştir. İnsan sağlığı üzerindeki etkileri Tablo 5'te verilmiştir.

*Tablo 5 Azot oksitlerin çalışan sağlığı üzerindeki etkileri*

Ortamdaki Azot oksit miktarı (ppm)	Fizyolojik etkiler
25	Uzun süreli maruziyet için sınır değer
25-60	Anında gırtlak tahrişi
60-100	Öksürük
100-200	Kısa süreli maruziyet bile tehlikeli
200 <	Kısa süreli maruziyet ani ölüm

## ***Patlama riski taşıyan gazlar***

### **Metan (CH<sub>4</sub>)**

Yeraltı kömür madenciliği, ülkemizde iş kazalarının en yoğun yaşandığı madencilik faaliyetlerinden biridir (Erol, 2025a). Özellikle metan gazının neden olduğu grizu patlamaları, yüksek ölüm ve yaralanma oranlarıyla sonuçlanan büyük ölçekli kazalara neden olmakta ve sektördeki en önemli risk kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir (Tablo 6). Kömür ocaklarında yaygın olarak bulunan metan, kömürleşme süreci sırasında damarlar ve kayaç boşluklarında hapsolmuş bir gazdır. Renksiz ve kokusuz olmasına rağmen oldukça patlayıcı özellik göstermektedir. Yeraltı atmosferinde metan oranının %4–15 aralığına ulaşması, grizu patlaması riskini oluşturmaktadır (Karakurt et al., 2011). Patlayıcı gazlarla ilgili bir diğer önemli tehlike, yeraltı kömür madenlerinde meydana gelebilen ani gaz püskürmesi (degaj) olaylarıdır. Üretim faaliyetleriyle bozulan basınç dengesi nedeniyle kömür damarlarının gözenek ve çatlaklarında biriken metan gazı, kısa sürede kömür parçacıklarıyla birlikte kazı açıklığına doğru püskürerek çalışma ortamını doldurabilmektedir. Bu durum ani metan ve kömür püskürmesi olarak adlandırılmaktadır (Esen et al., 2017).

*Tablo 6. Yeraltı kömür madenlerinde meydana gelen büyük kazalar*

<b>Yer</b>	<b>Yıl</b>	<b>Neden</b>	<b>Ölü Sayısı</b>
TTK/Armutçuk/Zonguldak	7.03.1983	Grizu Patlaması	103
TTK/Kozlu/Zonguldak	10.04.1983	Grizu Patlaması	10
Yeni Çeltek/Amasya	14.07.1983	Grizu Patlaması	5
TTK/Kozlu/Zonguldak	31.01.1987	Göçük	8
TTK/Amasra/Bartın	31.01.1990	Grizu Patlaması	5
Yeni Çeltek/Amasya	7.02.1990	Grizu Patlaması	68
TTK/Kozlu/Zonguldak	3.03.1992	Grizu Patlaması	263
Sorgun/Yozgat	26.03.1995	Grizu Patlaması	37
Aşkale/Erzurum	8.08.2003	Grizu Patlaması	8
Ermemek/Karaman	22.11.2003	Grizu Patlaması	10
Bayat/Çorum	9.08.2004	Grizu Patlaması	3
Gediz/Kütahya	21.04.2005	Grizu Patlaması	18
Dursunbey/Balıkesir	2.06.2006	Grizu Patlaması	17
Mustafakemalpaşa/Bursa	10.11.2009	Grizu Patlaması	19
Dursunbey/Balıkesir	23.02.2010	Grizu Patlaması	13
TTK/Karadon/Zonguldak	17.05.2010	Grizu Patlaması	30
TTK/Kozlu/Zonguldak	8.01.2013	Ani Gaz Püskürmesi	8
Soma/Manisa	13.5.2014	Ocak Yangını	301
Ermemek/Karaman	28.10.2014	Su Baskını	18
<b>Toplam</b>			<b>944</b>

## **Tozlar**

Maddelerin parçalanmaları, kırılmaları ve ezilmeleri sırasında o cismin özelliklerini taşıyan küçük parçacıklar oluşmaktadır. Bu parçacıklar toz diye adlandırılmakta; işyerlerinde oluşup, işyeri havasında yer alarak işçi sağlığı konusunda önemli olan pnömokonyoz hastalığını meydana getirmektedir (Karaçelebi, 1980).

Kömür ocaklarında havada askıda bulunan tozların insan sağlığını en iyi biçimde ortaya koyan parametrenin tozun “solunabilir” kısmının (5µ’dan küçük taneciklerin) ağırlığı olduğu 1950’lerden bu yana bilinen bir gerçektir (Didari, 1983). Tozlar insan sağlığını tehdit etmekte ve buna bağlı olarak da çalışma koşullarının zorlaşmasına ve verimin düşmesine neden olmaktadır.

Yeraltı kömür madenlerinde tozların bir kısmı, cevher ve yan kayaçların mekanik işlemler sonucunda küçük parçacıklar haline

dönüşmesiyle, bir kısmı ise ocakların havalandırılması sırasında tozun ocak içerisine taşınmasıyla oluşmaktadır. Kömür ocaklarında oluşan bu tozlar çalışanlar tarafından solunmakta ve meslek hastalıklarına neden olmaktadır.

Tozların büyüklüğü, akciğer alveollerine kadar ulaşması açısından önem taşımaktadır. Çapı  $0,5\mu$ 'dan daha küçük tozlar alveol içinde havada asılı kalırlar ve solunumla geri atılırlar. Genellikle çapı  $5-10\mu$  olan tozlar solunum yollarına girdikleri halde alveollere kadar ulaşamazlar. Üst solunum sistemi tarafından tutulur ve geri atılırlar. Çapı  $0,1-5\mu$  arasındaki solunabilir tozlar alveollere kadar ulaşabilmekte, ayrıca alveoller ve bronşçuklar çevresindeki akciğer dokusunda birikerek zamanla bağ dokuları (fibrozlar) meydana getirmektedir. Böylece akciğerlerin fonksiyonu değişik biçimde etkilenmekte ve Pnömokonyoz adı verilen meslek hastalıklarının oluşumuna neden olmaktadır (Didari & Çakır, 1991).

Pnömokonyoz, hastalığa neden olan tozun cinsine göre adlandırılmaktadır. Örneğin kömür tozunun solunması ile antrakoz, kuvars içeren tozların solunmasıyla silikoz, demir tozlarının solunmasıyla sideroz, asbest tozlarının solunması ile asbestoz olarak adlandırılan hastalıklar oluşmaktadır. Kömür ocaklarında solunabilir toz içinde genelde kömür tozunun yanında kaolen, mika, kuvars gibi mineral tozları vardır. Bu nedenle kömür madeninde çalışan işçilerin pnömokonyozu, “kömür işçisi pnömokonyozu” veya “antrakosilikoz” adını alır (Vidinli, 2006).

Tozların akciğerlerde hastalık oluşturmada hem toza hem de kişiye ait bazı özellikler önem taşımaktadır. Toza ilişkin özellikler arasında toz büyüklüğü, bağ doku oluşturma potansiyeli, ortamdaki toz yoğunluğu ve depolama niteliği vb. faktörler sayılabileceği gibi kişiye ait özellikler arasında da; kişinin genetik yapısı, sigara alışkanlığı, başka solunum sistemi rahatsızlığının varlığı vb. özellikler söz konusudur (Erol et al., 2013).

## **Gürültü**

Gürültü, çalışanların işitme sağlığını fizyolojik ve psikolojik ve performans açısından etkileyen, istenmeyen seslerdir. Gürültünün işitme sistemi üzerindeki zararları; çalışan kulağı tarafından alınan sesin frekansına, gürültünün ses basınç seviyesine ve maruz kalınan süre gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Hasgür, 1998; Şensögüt & Çınar, 2006)

Kömür işletmelerinde madencilik işlemleri oldukça zor şartlar altında yürütülmekte ve koşullara göre çeşitli makinalarla kazı, nakliyat ve tahkimat yapılmaktadır. Bu makinalar farklı gürültü seviyelerine sahip olmakla birlikte, uzun süre bu gürültüye maruz kalındığında geçici veya kalıcı işitme kayıplarına sebep olabilmektedir. Ayrıca bu durum dikkat dağınıklığı, stres ve iletişim problemlerine hatta iş kazalarına dahi yol açabilmektedir (Erol & Su, 2015; Erol, 2022).

## **Titreşim**

Titreşim, bir cismin iç veya dış kuvvetlerin etkisiyle yaptığı salınım hareketidir. İnsan titreşimi ise, titreşen bir yüzey veya cisim ile temas neticesinde bireyin hissettiği titreşimdir. Titreşim, insan vücuduna, temas edilen titreşen yüzey aracılığı ile iletilmektedir. Titreşim yüzeyi, bir makinanın tutamak kısmı, bir aletin yüzeyi veya motorlu bir makinanın koltuğu olabilmektedir. Titreşim maruziyeti iki çeşit olup, birincisi tutamak kısmı olan ve elle kullanılan aletlerden iletilen el-kol titreşimi, ikincisi motorlu bir makinanın üzerindeki koltuk veya yüzeyden iletilen tüm vücut titreşimidir (Zeyrek, 2009).

Kömür ocaklarında, madencilik işlemleri sırasında makina operatörleri doğrudan titreşim kaynağı ile temas halinde olup titreşime maruz kalmaktadırlar. Titreşime yoğun maruz kalan çalışanlarda çalışma konforu bozulmakta, işgücü verimliliği azalmakta ve fizyolojik fonksiyonları olumsuz etkilenmektedir.

Bunun sonucunda çalışanlarda titreşime bağlı meslek hastalıkları meydana gelebilmektedir (Özgen, 2015; Fritz, 2000; Youakim, 2009).

Maden makinaları operatörleri el-kol ve tüm vücut titreşimine maruz kalmaktadırlar. El- kol titreşim çalışılan aletlerden yayılan enerjinin, parmak veya elin avuçlarından vücuda girip mekanik enerjiye neden olmasıyla meydana gelmektedir. Tüm vücut titreşimi, operatörler, makinanın üzerindeki koltukta otururken, makinadan yayılan enerji koltuk arkılığı veya sırt arkılığından, ayrıca kalça ve ayaklar yoluyla; operatör ayakta iken, enerji ayaklar yoluyla vücuda girmektedir (Health and Safety Executive, 2005; Erol, 2025b).

Titreşimler, iç organların sarsılmasına, dolaşım sistemi bozukluklarına ve çeşitli sağlık sorunlarına yol açabilmekte; ileri durumlarda ise ciddi yaralanmalara neden olabilmektedir. Titreşimin etkisi, maruziyetin tüm vücuda ya da belirli bölgelere sınırlı olmasına göre değişmektedir. Tüm vücuda iletilen titreşim “bütün vücut titreşimi”, el aletleri ve benzeri ekipmanlardan kaynaklanan ve el-kol bölgesini etkileyen titreşim ise “el-kol titreşimi” olarak tanımlanmaktadır. El-kol titreşimi özellikle kan dolaşımını olumsuz etkileyerek duyu kaybı, doku bozulmaları ve hareket kısıtlılığına yol açabilmektedir. Titreşime bağlı sağlık sorunları genellikle yavaş gelişmekte ve başlangıçta fark edilmeyebilmektedir. İlerleyen dönemlerde kas gücünde azalma, ağrı, soğuğa duyarlılık, kas spazmları, duyu kaybı ve “beyaz parmak” gibi rahatsızlıklar ortaya çıkabilmektedir (İş Sağlığı ve Güvenliği Koşullarının İyileştirilmesi Projesi, 2013; Erol, 2020).

## **Tahkimat**

Tahkimat, madencilik faaliyeti sonucu açılan boşluğun sürekli emniyetli şekilde tutulması için alınan önlemlerdir. Kazı işleminden sonra uygulanan en önemli faaliyettir. Yeraltı maden

işletmesinde genellikle arındaki, tahkimat yetersiz olduğunda veya tavanın taşıma gücünü kaybederek çökmesi sonucunda göçükler meydana gelmektedir (Erol & Ürünveren, 2021).

Tahkimat sisteminin seçimi; kayaçların dayanımı, jeolojik yapı ve yeraltı basınç koşullarına bağlıdır. Ayrıca kullanılan malzemenin özellikleri ve zemin yapısı da yöntem seçiminde belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır.

### **Aydınlatma**

Aydınlatma, yüzey ve nesnelerin görsel olarak algılanmasını sağlayan ışıklandırma işlemidir. İş ortamlarında verimlilik ve iş güvenliği açısından önemli bir faktör olup, işin niteliği, renkler ve ışık şiddeti gibi unsurlardan etkilenmektedir. Uygun aydınlatma düzeyi için çeşitli standartlar belirlenmiş olup, doğru tasarlanmış aydınlatmanın iş verimliliğini artırdığı ve çalışma kalitesini yükselttiği bilinmektedir. Ayrıca çalışanların psikolojik durumuna da olumlu katkı sağlamaktadır. Buna karşılık yetersiz veya hatalı aydınlatma, iş kazaları açısından önemli bir risk faktörü oluşturmaktadır (International Labour Organization, 2015; Salvendy, 2012; European Agency for Safety and Health at Work, 2022).

### **Ocak yangınları**

Yeraltı kömür madenciliğinde en önemli iş güvenliği problemlerinden biri ocak yangınlarıdır. Bu yangınlar hem çalışanların güvenliğini tehdit etmekte hem de üretim kayıplarına ve ekonomik zararlara yol açmaktadır.

Grizulu ocaklarda, kontrol altına alınamayan yangınlar patlamalara neden olabilmektedir. Ocak yangınlarındaki en kritik durum, metan gibi ocak gazlarının patlamasının yanı sıra, yangının, zehirleyici ve zararlı gazlar ile ocak içindeki alanlara doğru yayılarak büyümesi ve bunun sonucunda, yangın sebebiyle meydana

gelen zehirleyici ve boğucu gazlardan dolayı çok sayıda çalışanın hayatını kaybetmesidir. Yangınların başlıca nedenleri; mekanik sürtünme, elektrik kaynaklı, sigara ve benzeri nedenler ve açık alev, lağım (dinamit) atma, kaynak işlemleri, yanabilen malzemelerin tutuşması gaz veya toz patlamaları ile kömürün kendiliğinden yanması yer almaktadır (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2011). Özellikle kömürün oksijenle reaksiyona girerek herhangi bir dış etken olmaksızın ısınması “kendiliğinden yanma” olarak tanımlanmakta ve madencilikte önemli bir risk oluşturmaktadır. Kendiliğinden yanmayı etkileyen temel faktörler; kömürün yüzey alanı, uçucu madde oranı, kalorifik değeri, petrografik yapısı, nem içeriği, oksijen miktarı, pirit ve kül içeriği, ortam sıcaklığı ile metan varlığıdır. Ayrıca damar kalınlığı, eğim, jeolojik yapılar ve üretim koşulları da bu süreci etkileyen önemli unsurlar arasında yer almaktadır (Didari, 1986).

### **Kömür tozu patlamaları**

Kömür ocaklarında oluşan patlamaların nedenleri kömür tozunun tek başına patlaması ya da başlamış bir patlamanın toz patlamasını tetiklemesidir. Büyük maden kazalarına yol açan patlamalarda ilk akla gelen toz patlamasıdır.

Havada askıda bulunan bir ateşleyici kaynakla temas etmesiyle toz patlamaları meydana gelmektedir. Patlamada mühim olan tavan, taban ve yan duvarlarda biriken tozun bir darbe etkisiyle girdaplanarak havaya karışmasıdır. Çöken tozu havalandıracak bir etken ile toz bulutunu ateşleyecek bir kaynağın bir araya gelmesi neticesinde toz patlaması oluşmaktadır. Bu durum, genellikle grizu patlamaları ve patlayıcı maddelerle yapılan ateşlemelerde meydana gelmektedir (Didari, 1985).

### **Patlayıcı madde kullanımı**

Yeraltı maden işletmelerinde cevhere ulaşmak ve üretim sağlamak amacıyla patlayıcı maddeler yaygın olarak

kullanılmaktadır. Ancak bu işlemler, iş güvenliği açısından dikkatle kontrol edilmesi gereken kritik süreçlerdir. Patlatma sırasında oluşan titreşimler kaya kütlesi ve cevher üzerinde etkiler yaratırken, açığa çıkan gazların özellikleri ve yayılımı da önemli bir risk faktörü oluşturmaktadır. Patlatma işlemi, yüzeyin hazırlanması ve uygun noktalarda deliklerin açılmasıyla başlamaktadır. Güvenli patlatma için delik yerleşimi, patlayıcı miktarı, patlayıcı türü ve sıkılama malzemesi doğru şekilde belirlenmelidir. Bu parametrelerde yapılabilecek hatalar, ciddi iş kazalarına ve istenmeyen sonuçlara yol açabilmektedir.

## **Elektrik**

Yeraltı maden işletmelerinde elektrik kullanımı, patlayıcı gazların bulunma ihtimali nedeniyle yüksek risk taşıyan bir konu olup özel güvenlik önlemleri gerektirmektedir. Elektrik tesisatındaki kaçaklar veya ark oluşumu sonucu meydana gelen kıvılcımlar, patlayıcı gazların tutuşmasına ve patlamalara neden olabilmektedir (TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2022). Ayrıca ocak içerisindeki yanıcı maddeler de elektrik kaynaklı kıvılcımlar nedeniyle yangın riskini artırmaktadır.

## **Ergonomi**

Yeraltı kömür madenciliğinde ergonomi, çalışanların fiziksel ve zihinsel kapasitelerine uygun çalışma koşullarının sağlanması ve insan-ış uyumunun oluşturulmasıdır. Temel amaç; iş yükünü azaltmak, verimliliği artırmak ve iş kazaları ile meslek hastalıklarını önlemektir.

Yeraltı ortamının dar, karanlık ve zorlayıcı yapısı; ağır kaldırma, eğilme, uzun süre aynı pozisyonda çalışma ve titreşimli ekipman kullanımı gibi ergonomik riskleri artırarak kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına ve yorgunluğa neden olabilmektedir. Bu nedenle ergonomik düzenlemelerde uygun ekipman kullanımı, çalışma alanlarının iyileştirilmesi, iş rotasyonu, yeterli aydınlatma

ve dinlenme sürelerinin planlanması önemli rol oynamaktadır. Ergonomi, yeraltı madenciliğinde hem iş güvenliği hem de üretim verimliliği açısından temel bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

### **Termal konfor**

Madenlerde sıcaklık, çalışan sağlığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olup bağıl nem, hava akımı ve barometrik basınç gibi faktörlerle birlikte değerlendirilmelidir. Termal konfor, hem verimliliği hem de iş güvenliğini doğrudan etkilemekte; bu dengenin bozulması dikkat dağınıklığı, performans düşüşü ve kaza riskinde artışa yol açmaktadır (Aritan et al., 2017).

Sıcaklık arttıkça yeraltı çalışmalarının yavaşladığı, dinlenme ihtiyacının arttığı ve ideal kabul edilen 19–20,5 °C aralığından uzaklaşıldıkça kaza oranlarının yükseldiği gözlemlenmektedir. Yüksek sıcaklık ve nem, terleme yoluyla ısı kaybını zorlaştırarak çalışma koşullarını ağırlaştırmaktadır. İnsan vücudu ise metabolik ısı üretimi ile çevreye verilen ısıнын dengede olduğu durumlarda termal dengeyi koruyabilmektedir.

### **Su baskınları**

Yeryüzü ve yer kabuğunda bulunan suların yeraltındaki çatlak, fay ve boşluklarda birikmesi, madencilik faaliyetleri sırasında ani su baskınlarının meydana gelmesine neden olabilmektedir. Maden işletmelerinde kontrolsüz şekilde ocağa giren fazla su, tavan ve arın stabilitesini olumsuz etkileyerek göçük oluşumuna yol açabilmekte; ayrıca üretim faaliyetlerinin aksamasına ve hatta tamamen durmasına neden olabilmektedir (Yaşar et al., 2015).

### **Psikososyal tehlikeler**

Çalışanların iş ortamındaki sosyal ve psikolojik koşullardan kaynaklanan ve sağlık, güvenlik ile iş performansını olumsuz etkileyebilen risk faktörleridir. Bu tehlikeler; iş yükü, çalışma

temposu, vardiya sistemi, rol belirsizliği, kontrol eksikliği, iş güvencesizliği, iletişim sorunları ve örgütsel çatışmalar gibi unsurlardan kaynaklanabilmektedir. Yeraltı kömür madenciliğinde psikososyal tehlikeler, özellikle yüksek riskli ve zorlayıcı çalışma koşulları nedeniyle daha belirgin hale gelmektedir. Kapalı ve tehlikeli çalışma ortamı, sürekli dikkat gerektiren işler, zaman baskısı, uzun çalışma saatleri ve vardiyalı çalışma düzeni çalışanlarda stres, kaygı, tükenmişlik ve motivasyon düşüklüğüne yol açabilmektedir. Ayrıca iş kazası riski ve ölümcül tehlikelere maruz kalma olasılığı, çalışanlar üzerinde psikolojik baskıyı artırmaktadır.

Bu tür psikososyal riskler yalnızca bireysel sağlık sorunlarına değil, aynı zamanda dikkat azalması, hata yapma eğiliminin artması ve iş kazası riskinin yükselmesine de neden olmaktadır. Bu nedenle psikososyal tehlikelerin yönetimi, yeraltı madenciliğinde iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır (Durşen, 2016).

## **Yeraltı Kömür Madenciliğinde Sağlık ve Güvenlik nlemleri**

### **Zararlı gazlar**

Yeraltı maden işletmelerinde zararlı gaz konsantrasyonlarının güvenli sınırlar içerisinde tutulabilmesi için etkin ve sürekli çalışan bir havalandırma sisteminin uygulanması gerekmektedir. Havalandırma sayesinde metan, karbonmonoksit, karbondioksit ve diğer tehlikeli gazlar seyreltilerek ortamdan uzaklaştırılmakta, aynı zamanda çalışma alanlarında yeterli oksijen düzeyi korunmaktadır. Bunun yanında, madencilik ekipmanlarının düzenli bakımının yapılması ve uygun egzoz sistemlerinin kullanılması, gaz emisyonlarının kontrol altına alınmasına katkı sağlamaktadır.

Maden sahalarına giriş öncesinde ve çalışma süresince belirli aralıklarla taşınabilir gaz ölçüm cihazları kullanılarak oksijen ve

zararlı gaz konsantrasyonlarının ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca bilgisayar destekli gaz izleme sistemleri sayesinde ortam koşulları sürekli takip edilmekte ve tehlikeli gaz seviyelerine ulaşılması durumunda erken uyarılar verilerek gerekli güvenlik önlemleri alınabilmektedir. Acil durumlarda kişisel koruyucu donanımların kullanılması da çalışanların gazlardan kaynaklanabilecek sağlık risklerine karşı korunmasını sağlamaktadır.

Yeraltı kömür madenciliğinde gaz izleme ve erken uyarı sistemleri, iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Özellikle metan, karbonmonoksit ve hidrojen sülfür gibi gazların sürekli izlenmesi, patlama, yangın ve zehirlenme risklerinin önceden belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bu sistemler sayesinde tehlikeli koşullar erken aşamada tespit edilerek çalışma alanlarının hızlı bir şekilde boşaltılması mümkün olmakta ve ciddi iş kazalarının önüne geçilebilmektedir (Önal, 2017).

## **Tozlar**

Toz kontrolü, yeraltı madenciliğinde çalışanların sağlığının korunması ve meslek hastalıklarının önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Delme, patlatma, yükleme ve kazı faaliyetleri sırasında ortaya çıkan tozun kontrol altına alınabilmesi için su püskürtme sistemleri, etkin havalandırma uygulamaları ve çeşitli toz bastırma yöntemleri kullanılmaktadır (Kissell, 2003). Özellikle silis ve kömür tozuna uzun süre maruz kalınması sonucu gelişebilen pnömokonyoz gibi meslek hastalıklarının önlenmesi için çalışma ortamında düzenli toz ölçümlerinin yapılması ve uygun kişisel koruyucu donanımların kullanılması gerekmektedir.

## **Gürültü**

Yeraltı kömür madenciliğinde kullanılan delme, kazı, kesme, kırma ve nakliye ekipmanları çalışma ortamında yüksek düzeyde

gürültü oluşmasına neden olmaktadır. Gürültüye uzun süre maruz kalınması çalışanlarda işitme kaybı başta olmak üzere dikkat azalması, stres, yorgunluk ve iletişim güçlükleri gibi olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu durum, çalışanların güvenliğini tehlikeye atarak iş kazası riskinin artmasına da neden olmaktadır.

Gürültü kaynaklı risklerin azaltılması amacıyla düşük gürültü seviyesine sahip ekipmanların tercih edilmesi, makinelerin periyodik bakımlarının yapılması ve gerekli noktalarda ses yalıtım uygulamalarının gerçekleştirilmesi önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra çalışanlara kulak tıkacı veya kulaklık gibi uygun kişisel koruyucu donanımlar sağlanmalı ve bu ekipmanların kullanımı teşvik edilmelidir. Çalışma alanlarında gürültü düzeyleri düzenli olarak ölçülmeli ve maruziyet değerlerinin yasal sınırların altında tutulması sağlanmalıdır.

Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik'e göre günlük gürültü maruziyet düzeyi ( $L_{EX,8h}$ ), sekiz saatlik çalışma süresi boyunca maruz kalınan gürültünün zaman ağırlıklı ortalaması olarak tanımlanmaktadır. Yönetmelikte en düşük maruziyet eylem değerleri 80 dBA ve 135 dBC, en yüksek maruziyet eylem değerleri 85 dBA ve 137 dBC olarak belirlenmiştir. Maruziyet sınır değerleri ise 87 dBA ve 140 dBC olup, bu değerlerin aşılması için gerekli teknik ve organizasyonel önlemlerin alınması zorunludur (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2013a).

## **Titreşim**

Yeraltı kömür madenciliğinde kullanılan delme, kazı, kırma ve yükleme ekipmanları çalışanların önemli düzeyde titreşime maruz kalmasına neden olmaktadır. Özellikle el-kol titreşimi ve tüm vücut titreşimi, uzun süreli maruziyet durumunda çalışanların sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu etkiler arasında el ve parmaklarda uyuşma, duyu kaybı, kas kuvvetinde azalma, dolaşım

bozuklukları, eklem rahatsızlıkları ve beyaz parmak sendromu gibi meslek hastalıkları yer almaktadır.

Titreşimden kaynaklanan sağlık risklerinin azaltılması amacıyla düşük titreşim üreten ekipmanların tercih edilmesi, makinelerin düzenli bakım ve kontrollerinin yapılması, maruziyet sürelerinin sınırlandırılması ve çalışanların farklı görevlerde dönüşümlü olarak çalıştırılması gibi önlemler uygulanmalıdır. Bu uygulamalar hem çalışanların sağlıklarının korunmasına hem de çalışma performansının artırılmasına katkı sağlamaktadır.

Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği'nde, çalışanların titreşimden kaynaklanan risklerden korunmasına yönelik uygulamalarda “Çalışanların Titreşim ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik” hükümlerinin esas alınması gerektiği belirtilmektedir. Söz konusu yönetmeliğe göre tüm vücut titreşiminde günlük maruziyet eylem değeri  $0,5 \text{ m/s}^2$ , maruziyet sınır değeri ise  $1,15 \text{ m/s}^2$  olarak belirlenmiştir. El-kol titreşiminde ise günlük maruziyet eylem değeri  $2,5 \text{ m/s}^2$ , maruziyet sınır değeri ise  $5 \text{ m/s}^2$ 'dir. Belirlenen sınır değerlerin aşılması durumunda işverenin, maruziyeti kabul edilebilir seviyelere düşürmek için gerekli önlemleri alması ve sınır değerlerin aşılmasına neden olan faktörleri tespit ederek düzeltici faaliyetler gerçekleştirmesi zorunludur (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2013b).

## **Tahkimat**

Yeraltı madenciliğinde kullanılan tahkimat sistemleri, kazı sonucu oluşan boşlukların güvenliğini sağlayarak göçük risklerini en aza indiren en önemli yapısal önlemler arasında yer almaktadır. Kaya kütlelerinin jeomekanik özelliklerine bağlı olarak ahşap, çelik veya hidrolik tahkimat sistemleri tercih edilmekte ve çalışma alanlarının stabilitesi sürekli olarak izlenmektedir. Bu nedenle tahkimat, maden işletmelerinin planlama ve projelendirme

aşamalarından itibaren dikkate alınması gereken temel mühendislik uygulamalarından biridir.

Yeraltı maden projelerinde, üretim yöntemi ve çevre kayaçların özelliklerine uygun tahkimat sistemlerinin tasarlanması, doğru şekilde uygulanması ve düzenli aralıklarla denetlenmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle zayıf ve riskli bölgelerin ilave destekleme yöntemleriyle güçlendirilmesi, iş kazalarının ve can kayıplarının önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Bazı durumlarda kayaçların yeterli dayanım göstermesi nedeniyle kapsamlı tahkimata ihtiyaç duyulmayabilmektedir. Ancak tavan ve yan duvarlarda oluşabilecek gevşek kaya parçaları ve kavlaklar, çalışanlar için ciddi bir tehlike oluşturduğundan gerekli koruyucu önlemlerin alınması gerekmektedir. Uygun olmayan tasarım veya yetersiz tahkimat uygulamaları; göçükler, kaya düşmeleri ve tavan deformasyonları gibi önemli güvenlik sorunlarına neden olabilmektedir.

Yeraltı madenlerinde meydana gelen ölümcül kazaların önemli bir bölümü göçükler ile taş ve kömür düşmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle tahkimat uygulamaları, iş sağlığı ve güvenliğinin temel unsurlarından biri olup, üretim faaliyetlerinin emniyetli ve sürdürülebilir şekilde yürütülmesi açısından kritik öneme sahiptir (Aksoy, 2019).

## **Aydınlatma**

Yeraltı kömür işletmelerinde gün ışığından yararlanılmadığı için çalışma ortamlarının aydınlatılması tamamen yapay ışık kaynakları ile sağlanmaktadır. Yetersiz aydınlatma koşulları, çalışanların çevrelerini algılamasını zorlaştırmakta, ekipman kullanımında hata yapma riskini artırmakta ve iş kazalarına neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra, aşırı parlak veya yanlış konumlandırılmış ışık kaynakları göz yorgunluğu, görsel

rahatsızlıklar ve dikkat kaybı gibi olumsuz etkilere yol açabilmektedir.

Bu nedenle yeraltı madenlerinde aydınlatma sistemlerinin çalışma alanlarının özelliklerine uygun olarak tasarlanması, yeterli ışık düzeyinin sağlanması ve ışığın ortamda dengeli bir şekilde dağıtılması gerekmektedir. Uygun şekilde planlanmış aydınlatma sistemleri, çalışanların güvenli hareket etmelerine, tehlikeleri zamanında fark etmelerine ve işlerini daha etkin bir şekilde yürütmelerine katkı sağlamaktadır. Böylece hem iş sağlığı ve güvenliği düzeyi yükselmekte hem de üretim faaliyetlerinin verimliliği artırılmaktadır.

### **Ocak yangınları**

Kömürün havayla teması sonucunda oksidasyon süreci doğal olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle üretim faaliyetlerine başlanmadan önce kömürün kendiliğinden yanmaya yatkınlığı belirlenmeli ve buna uygun üretim yöntemi seçilmelidir. Yeraltı kömür işletmelerinde meydana gelebilecek yangınların en önemli göstergelerinden biri karbonmonoksit (CO) gazıdır. Ancak CO gazı yalnızca oksidasyon sonucu oluşmamakta; patlatma faaliyetleri sonrasında ve içten yanmalı makinelerin egzoz gazlarında da bulunmaktadır. Bu durum, CO ölçüm değerlerinde geçici yükselmelere neden olabilmektedir.

Bu nedenle patlatma çalışmalarının yapıldığı veya dizel ekipmanların çalıştığı dönemlerde CO ölçümleri dikkatle değerlendirilmelidir. CO konsantrasyonunda sürekli ve düzenli bir artış gözlenmesi, oksidasyonun ilerlediğine işaret edebilmektedir. Böyle durumlarda artışın tespit edildiği bölgede taşınabilir gaz ölçüm cihazları kullanılarak ayrıntılı ölçümler yapılmalı ve CO kaynağı belirlenmelidir (Yılmaz, 2016; Kahraman, 2024).

## **Kömür tozu patlamaları**

Grizulu kömür ocaklarında, çalışma koşulları uygun olsa dahi kömür tozunun patlama riski her zaman bulunmaktadır. Bu nedenle toz patlamalarının oluşmasını önlemeye ve meydana gelen patlamaların yayılmasını sınırlandırmaya yönelik tedbirlerin alınması büyük önem taşımaktadır.

Kömür tozu patlamalarıyla mücadelede temel amaç; toz oluşumunu ve birikimini azaltmak, tozun havaya karışarak patlayıcı bir bulut oluşturmasını engellemek, ateşleme kaynaklarını ortadan kaldırmak ve olası bir patlamanın diğer bölgelere yayılmasını önlemektir. Bu kapsamda arınların sulanması, fisketelerle su püskürtülmesi ve kömür damarına su emdirilmesi gibi yöntemler kullanılarak tozun havalanması engellenmektedir.

Tozun patlayıcılık özelliğini azaltmak amacıyla sulama uygulamalarına ek olarak koruyucu taş tozu kullanılmaktadır. Taş tozu uygulamasının temel amacı, ortamda bulunan yanıcı kömür tozunun yanmaz madde oranını artırarak patlama riskini azaltmaktır. Bu amaçla en yaygın kullanılan yöntemlerden biri şistleme olarak adlandırılan taş tozu serpmeye işlemidir. Şistlemeye kullanılan taş tozunun silis içermemesi tercih edilmekte, böylece çalışanların silis kaynaklı sağlık risklerine maruz kalması önlenmektedir.

Taş tozu uygulamalarının etkinliğinin izlenebilmesi amacıyla işletmelerde toz kayıtları tutulmaktadır. Bu kayıtlarda numune alma noktaları, numune tarihleri, yanmaz madde analiz sonuçları ile taş tozu uygulanan bölgeler ve uygulama tarihleri yer almaktadır. Ayrıca tavan, taban ve tahkimat elemanları üzerinde biriken tozların düzenli olarak kontrol edilmesi ve gerekli analizlerin yapılması gerekmektedir. Alınan tüm önlemlere rağmen meydana gelebilecek bir toz patlamasının ocak içerisinde yayılmasını önlemek amacıyla ise taş tozu ve su barajları gibi koruyucu sistemlerden yararlanılmaktadır.

## **Patlayıcı madde kullanımı**

Patlayıcı maddelerin emniyetli kullanımı, madencilik faaliyetlerinde iş sağlığı ve güvenliğinin temel unsurlarından biridir. Patlatma çalışmalarında uygun delik düzeninin oluşturulması, kullanılacak patlayıcının jeolojik koşullara göre seçilmesi ve sıkılama işlemlerinin doğru şekilde gerçekleştirilmesi, olası kazaların önlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Bunun yanında, patlatma sonrasında oluşan zararlı gazların çalışma ortamından uzaklaştırılabilmesi için yeterli havalandırma sağlanmalıdır.

Patlatma işlemleri önceden planlanmalı ve belirlenen zamanlarda gerçekleştirilmelidir. Patlatma öncesinde çalışanlar gerekli uyarılarla bilgilendirilmeli, tüm personelin tehlike bölgesinden uzaklaştırılması sağlanmalıdır. Patlatma tamamlandıktan sonra ise, alanın güvenli olduğu yetkili kişiler tarafından kontrol edilmeden çalışma bölgesine girişe izin verilmemelidir.

Patlatma faaliyetlerinde karşılaşılan önemli risklerden biri de patlamamış lağımlardır. Hesaplama hataları, uygulama eksiklikleri veya teknik arızalar nedeniyle bazı deliklerde patlayıcılar infilak etmeyebilir. Bu tür durumlarda, kullanılan patlayıcı madde ve ateşleme sistemine bağlı olarak belirlenen güvenli bekleme sürelerine uyulmalı, patlamamış deliklere yalnızca gerekli eğitim ve yetkinliğe sahip kişiler müdahale etmelidir. Böylece ikinci bir patlama veya yaralanma riski en aza indirilebilir.

## **Elektrik**

Elektrik güvenliği, yeraltı madenlerinde patlayıcı gazların bulunması nedeniyle özel önem taşımaktadır. Tüm elektrik sistemlerinin ex-proof (patlamaya dayanıklı) ekipmanlarla donatılması, kaçak akım korumalarının kullanılması ve düzenli bakım yapılması zorunludur. Elektrik kaynaklı kıvılcımlar, metan gazı bulunan ortamlarda ciddi patlama riskleri oluşturabilmektedir.

## **Ergonomi**

Ergonomik düzenlemeler ve çalışan sağlığının korunmasına yönelik uygulamalar, iş sağlığı ve güvenliği yönetiminin temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Yeraltı kömür madenciliğinde dar, sınırlı ve fiziksel olarak zorlayıcı çalışma koşulları nedeniyle çalışanlar kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları açısından önemli risklerle karşı karşıya kalabilmektedir. Bu risklerin azaltılabilmesi için ergonomik tasarıma sahip ekipmanların kullanılması, çalışma sürelerinin uygun şekilde planlanması, iş rotasyonu uygulanması ve yeterli dinlenme olanaklarının sağlanması gerekmektedir. Ayrıca çalışanların doğru duruş ve çalışma teknikleri konusunda bilgilendirilmesi, kas-iskelet sistemi hastalıklarının nlenmesine ve çalışma performansının artırılmasına katkı sağlamaktadır.

## **Termal konfor**

Yeraltı kömür madenciliğinde termal konfor koşulları, ortamın kapalı yapısı, yüksek nem düzeyi ve havalandırma kısıtları nedeniyle çalışanların performansı ve sağlığı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Uygun olmayan termal koşullar çalışanlarda yorgunluk, dikkat dağınlıklığı, performans düşüşü ve iş kazası riskinde artışa neden olabilir. Termal konforun sağlanması için etkili havalandırma sistemleri, uygun hava akımı, nem kontrolü ve çalışma sürelerinin düzenlenmesi gereklidir. Bu koşulların iyileştirilmesi hem çalışan sağlığını korur hem de üretim verimliliğini artırır.

## **Su baskını**

Yeraltı maden işletmelerinde su girişlerinin kontrol altına alınması ve çalışma alanlarında biriken suların uzaklaştırılması, iş sağlığı ve güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Su baskınlarının önlenmesi amacıyla çeşitli mühendislik yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biri, su taşıyan jeolojik birimlerle çalışma alanları arasında koruyucu topuklar bırakılmasıdır. Böylece suyun üretim bölgelerine ulaşması

engellenebilmektedir. Su içeriği yüksek tavan kayaçlarının bulunduğu sahalarda ise dolgulu üretim yöntemleri tercih edilerek su kaynaklı riskler azaltılmaktadır. Ayrıca su gelme olasılığının yüksek olduğu bölgelerde gerçekleştirilen yeraltı sondajları sayesinde su önceden tespit edilmekte ve kontrollü şekilde drene edilmektedir.

Yeraltında fay ve kırık zonları boyunca gelen suların engellenmesinde sementasyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde çimento şerbeti, pompalar yardımıyla fay ve çatlak sistemlerine enjekte edilerek su geçiş yolları kapatılmaktadır. Bunun yanında çevre çalışma alanlarından gelebilecek suların önlenmesi amacıyla setler inşa edilmekte, yüksek miktarda su içeren eski çalışma bölgeleri ise yeni üretim alanlarından kil, ahşap veya beton barajlarla ayrılmaktadır.

Çalışma ortamında biriken suların uzaklaştırılmasında en yaygın yöntemlerden biri pompa sistemlerinin kullanılmasıdır. Bu amaçla su toplama havuzları oluşturularak suyun belirli noktalarda birikmesi sağlanmakta, ardından pompalar yardımıyla ocak dışına tahliye edilmektedir. Su girişinin az ve düzenli olduğu durumlarda kuyu dipleri toplama havuzu olarak kullanılabilirken, yüksek ve düzensiz su girişlerinde ek havuzların yapılması gerekmektedir. Havuzların kapasitesi ve sayısı, ocaktaki su miktarına bağlı olarak belirlenmektedir. Ayrıca drenaj galerileri aracılığıyla farklı bölgelerden gelen sular ortak bir sistemde toplanabilmekte ve pompalama sistemlerinde meydana gelebilecek arızalar durumunda su baskını riskinin azaltılması sağlanmaktadır (Tatar ve Özacar, 2017).

### **Psikososyal tehlikeler**

Yeraltı kömür madenciliğinde çalışanlar; iş stresi, vardiyalı çalışma, yoğun iş yükü ve zor çalışma koşulları nedeniyle psikososyal risklere maruz kalmaktadır. Bu riskler çalışanların ruhsal ve sosyal iyilik hâlini olumsuz etkileyerek iş performansında

düşüş, devamsızlık artışı ve işyerine bağlılıkta azalma gibi sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle psikososyal risklerin belirlenmesi ve yönetilmesi iş sağlığı ve güvenliği açısından önemlidir. Mevzuat da işverenlere bu riskleri değerlendirme ve gerekli önlemleri alma yükümlülüğü getirmektedir (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2012).

Psikososyal risklerin azaltılmasında psikolojik destek, çalışan katılımını artıran uygulamalar, sosyal etkinlikler ve dilek-öneri sistemleri önemli rol oynamaktadır. Bu tür uygulamalar çalışanların motivasyonunu ve aidiyet duygusunu güçlendirerek daha sağlıklı ve verimli bir çalışma ortamı sağlamaktadır.

Ayrıca ekonomik zorunluluklar ve zorlu çalışma koşulları nedeniyle stres ve tükenmişlik riski artabilmektedir. Bu nedenle çalışanlara destek hizmetlerinin sunulması, kurum kültürünün güçlendirilmesi ve güvenli çalışma ortamlarının sağlanması gereklidir. Psikososyal risklerin uzun vadeli ve izlenebilir bir yaklaşımla yönetilmesi, sürekli iyileştirme açısından önem taşımaktadır.

## **Risk Değerlendirmesi ve Acil Durum Yönetimi**

### **Risk değerlendirme**

Risk değerlendirme, işyerinde mevcut veya dışarıdan gelebilecek tehlikelerin belirlenmesi, bu tehlikelerden kaynaklanan risklerin analiz edilmesi ve gerekli kontrol tedbirlerinin planlanması sürecidir. Yeraltı kömür madenciliğinde çalışma koşullarının sürekli değişmesi nedeniyle risk değerlendirme dinamik bir süreç olarak ele alınmalıdır.

Risk değerlendirme çalışmalarında öncelikle çalışma ortamındaki tehlikeler belirlenmekte, ardından bu tehlikelerin meydana gelme olasılıkları ve olası sonuçları değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre riskler önceliklendirilmekte ve uygun

kontrol önlemleri planlanmaktadır (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2012). Yeraltı kömür madenciliğinde gaz patlamaları, kömür tozu patlamaları, yangınlar, göçükler, elektrik kaynaklı kazalar, su baskınları ve mekanik ekipmanlardan kaynaklanan tehlikeler risk değerlendirmesi çalışmalarında öncelikli olarak ele alınmaktadır.

Risk değerlendirmesi yalnızca yasal bir zorunluluk değil, aynı zamanda iş kazalarının önlenmesinde proaktif yaklaşımın temel aracıdır. Risklerin meydana gelmeden önce belirlenmesi ve gerekli tedbirlerin alınması, güvenli çalışma ortamlarının oluşturulmasına önemli katkı sağlamaktadır (International Labour Organization, 2015; National Institute for Occupational Safety and Health, 2024; Ren et al., 2024)

### **Acil durum yönetimi**

Yeraltı kömür madenciliğinde meydana gelebilecek yangın, patlama, göçük, su baskını ve gaz sızıntısı gibi olaylar acil durum olarak değerlendirilmektedir. Bu tür olaylarda çalışanların güvenli şekilde tahliye edilmesi ve kurtarma faaliyetlerinin etkin biçimde yürütülmesi büyük önem taşımaktadır.

Acil durum planları; görev dağılımlarını, iletişim yöntemlerini, kaçış yollarını, toplanma alanlarını ve kurtarma organizasyonunu içermelidir. Ayrıca tüm çalışanlar düzenli olarak acil durum eğitimlerine tabi tutulmalı ve belirli aralıklarla tatbikatlar gerçekleştirilmelidir.

Yeraltı kömür madenlerinde yaşam odaları, kişisel kurtarıcılar, haberleşme sistemleri ve gaz izleme sistemleri acil durum yönetiminin önemli unsurlarıdır. Özellikle büyük maden kazalarının ardından geliştirilen yeni teknolojiler sayesinde acil durumlara müdahale süreleri kısalmış ve kurtarma faaliyetlerinin etkinliği artırılmıştır (Mine Safety and Health Administration, 2024;

International Labour Organization, 2015; Mutmansky & McAtteer, 1999; Zhou et al., 2017).

## **Dijitalleşme ve Yeni Teknolojilerin İş Sağlığı ve Güvenliğine Katkıları**

Madencilik sektöründe yaşanan teknolojik gelişmeler, iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Geleneksel yöntemlerin yerini giderek daha fazla otomasyon ve dijital sistemler almaktadır.

Gerçek zamanlı gaz izleme sistemleri sayesinde metan, karbonmonoksit ve diğer zararlı gazların konsantrasyonları sürekli olarak takip edilebilmektedir. Tehlikeli seviyelerin tespit edilmesi durumunda sistemler otomatik uyarılar vererek çalışanların zamanında tahliye edilmesine olanak sağlamaktadır.

Uzaktan kumandalı ve otonom ekipmanların kullanılması, çalışanların tehlikeli bölgelerde bulunma süresini azaltmaktadır. Özellikle yüksek gaz riski bulunan bölgelerde veya göçük tehlikesi taşıyan alanlarda kullanılan uzaktan kontrollü makineler, çalışan güvenliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ ve büyük veri analizleri de madencilik sektöründe giderek yaygınlaşmaktadır. Sensörlerden elde edilen verilerin analiz edilmesi sayesinde ekipman arızaları önceden tahmin edilebilmekte, riskli bölgeler belirlenebilmekte ve önleyici bakım faaliyetleri planlanabilmektedir.

Giyilebilir teknolojiler de çalışan sağlığının korunmasında önemli katkılar sağlamaktadır. Akıllı baretler, konum takip sistemleri ve biyometrik sensörler sayesinde çalışanların konumları, sağlık durumları ve maruziyet düzeyleri anlık olarak izlenebilmektedir.

Dijitalleşme uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte gelecekte daha güvenli, daha verimli ve daha sürdürülebilir

madencilik faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi mümkün olabilecektir (Zhou et al., 2022; Mishra et al., 2023; Song & Choi, 2024).

## **Sonuçlar**

Yeraltı kömür madenciliği, çok sayıda tehlike ve risk faktörünü aynı anda barındıran, iş sağlığı ve güvenliği açısından yüksek risk düzeyine sahip bir çalışma alanıdır. Gazlar, tozlar, göçükler, yangınlar, patlamalar, gürültü, titreşim, su baskınları, ergonomik sorunlar ve psikososyal riskler çalışanların sağlık ve güvenliğini tehdit eden temel unsurlar arasında yer almaktadır.

Bu alışma kapsamında değerlendirilen riskler incelendiğinde, özellikle metan gazı ve kömür tozu patlamalarının, gklerin ve ocak yangınlarının büyük maden kazalarının başlıca nedenlerini oluşturduğu görülmektedir. Bunun yanında toz, gürültü ve titreşim maruziyetleri uzun vadede çalışan sağlığını olumsuz etkileyerek meslek hastalıklarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Yeraltı kömür madenciliğinde güvenli çalışma ortamlarının oluşturulabilmesi için etkili havalandırma sistemleri, gaz izleme teknolojileri, toz kontrol uygulamaları, uygun tahkimat sistemleri ve güvenli elektrik altyapısının oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca alışan eğitimleri, kişisel koruyucu donanımların etkin kullanımı ve güçlü bir iş sağlığı ve güvenliği kültürünün geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Gelecekte madencilik sektöründe dijitalleşme, otomasyon ve yapay zekâ uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte iş sağlığı ve güvenliği performansının daha da iyileşeceği öngörülmektedir. Gerçek zamanlı izleme sistemleri, uzaktan kontrollü ekipmanlar ve veri tabanlı risk yönetimi uygulamaları sayesinde iş kazalarının ve meslek hastalıklarının azaltılması mümkün olabilir.

Sonuç olarak yeraltı kömür madenciliğinde iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları yalnızca yasal yükümlülüklerin yerine getirilmesi açısından değil, çalışanların yaşamlarının korunması, işletme verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir madencilik faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi açısından da stratejik öneme sahiptir. Bu nedenle risklerin sistematik olarak belirlenmesi, değerlendirilmesi ve kontrol edilmesine yönelik bütüncül yaklaşımların benimsenmesi gerekmektedir.

## Kaynakça

Akkaya, S. (2001). Maden sektöründe risk faktörleri. *TTB Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi*, 2(5), 38-41.

Aksoy, M. (2019). *Maden işletmelerinde iş sağlığı ve güvenliği*. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.

Aritan, E., Tümer, M., & Şensöğüt, C. (2017). Yeraltı kömür ocaklarında termal konfor şartlarının incelenmesi. *Uluslararası Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (ss. 521–533), Adana.

Ayvazoğlu, E., Ökten, G., & Tuncel, Z. (1994). Yeraltı kazılarında havalandırma uygulamaları. *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (ss. 283-307), İstanbul.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2011). *Yeraltı ve yerüstü maden işletmelerinde iş sağlığı ve güvenliği rehberi*. İş Teftiş Kurulu Başkanlığı, Ankara.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2012). *İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmesi yönetmeliği*. Resmî Gazete (Sayı: 28512).

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2013a). *Çalışanların gürültü ile ilgili risklerden korunmalarına dair yönetmelik*. Resmî Gazete (Sayı: 28721)

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2013b). *Çalışanların titreşimle ilgili risklerden korunmalarına dair yönetmelik*. Resmî Gazete (Sayı: 28743).

Derin, L., Varol, N., & Uymaz, S. (2017). Türkiye'deki kömür madeni kazalarına ilişkin değerlendirme. *Journal of Resilience*, 1(1), 47-53. <https://doi.org/10.32569/resilience.363674>

Didari, V. (1983). EKİ Kozlu Bölgesi yeraltı ocaklarında toz yoğunluğunun ölçülmesi ve ölçme tekniğinin geliştirilmesi [Doktora tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, İstanbul.

Didari, V. (1985). Kömür tozu patlaması. *Madencilik*, 24(4): 23-29.

Didari, V. (1986). Yeraltı ocaklarında kömürün kendiliğinden yanması ve risk indeksleri. *Madencilik*, 15(4), 29-34.

Didari, V., & Çakır, A. (1991). TTK yeraltı işyerlerinde solunabilir toz koşullarının ayrıntılı değerlendirilmesi. *Madencilik*, 30(4): 21-29.

Dursun, A.E. (2014). Yeraltı kömür madenciliğinde mekanizasyonun işçi sağlığı ve iş güvenliği açısından önemi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3 (2), 1-9, Konya.

Durşen, M. (2016). *Yeraltı kömür işletmelerinde çalışanların psikososyal risklerinin değerlendirilmesi* [Uzmanlık tezi]. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.

Ergun, A.R. (2007). *Yeraltı maden işletmelerinde gaz ve toz patlamaları ve önlemler*. [Uzmanlık tezi]. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.

Erol, İ., Aydın, H., Didari, V., & Ural, S. (2013). Pneumoconiosis and quartz content of respirable dusts in the coalmines in Zonguldak, Turkey. *International Journal of Coal Geology*, 116-117, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.05.008>

Erol, İ., & Su, O. (2015). Mekanize bir yeraltı işletmesinde gürültü seviyelerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi*

*Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 191-200, Adana.  
<https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.242766>

Erol, İ. (2020). Ülkemizde madencilik sektöründe görülen meslek hastalıklarının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 859-872, Adana.  
<https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.867378>

Erol, İ., & Ürünveren, A. (2021). Yeraltı kömür madenlerinde meydana gelen büyük maden kazaları. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 5(3), 193-207, Zonguldak.  
<https://doi.org/10.33720/kisgd.1020397>

Erol, İ. (2022). Yeraltı kömür maden makinaları operatörlerinin gürültü ve titreşim maruziyetlerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(1), 55-65, Adana. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.1094945>

Erol, İ. (2025a). Evaluation of the workplace accident severity in an underground coal mine by logistic regression analysis. *Medicina del Lavoro*, 116(5): 16841, <https://doi.org/10.23749/mdl.v116i5.16841>.

Erol, İ. (2025b). Damping rates of anti-vibration gloves made of different materials. *Appl. Sci.*, 15(12), 6630. <https://doi.org/10.3390/app15126630>.

Esen, O., Ökten, G., & Fişne, A. (2017). Türkiye’de meydana gelen ani gaz ve kömür püskürmesi olaylarının değerlendirilmesi ve olaylarla mücadelede alınacak önlemler. *Madencilik*, 56(3), 99-108, Ankara. <https://doi.org/10.30797/madencilik.389260>

European Agency for Safety and Health at Work. (2022). *Workplace lighting and its impact on safety and health*. <https://osha.europa.eu/en>

Fritz, M. (2000). Description of the relationship between the forces acting in the lumbar spine and whole body vibrations by means of transfer functions. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 15, 234–240. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(99\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(99)00071-6)

Hasgür, İ. (1998). Gürültü kirliliğinin Türk mevzuatındaki yeri. *Çevre Dergisi*, 31-33.

Hartman, H.L., Mutmansky, J.M., Ramani, R.V., & Wang, Y.J. (1997). *Mine ventilation and air conditioning* (3. Baskı). Wiley-Interscience, New York, 752 p.

Health and Safety Executive. (2005). Hand-arm vibration and whole body vibration. <https://www.hse.gov.uk/vibration/>

International Labour Organization. (2015). Safety and health in underground coalmines. <https://www.ilo.org/resource/other/safety-and-health-underground-coalmines>.

İş Sağlığı ve Güvenliği Koşullarının İyileştirilmesi Projesi. (2013). Meslek hastalıkları ve işle ilgili hastalıklar tanı rehberi. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.

Kahraman, E. (2024). Yeraltı kömür madenciliğinde kömür yangınları ile mücadele çalışmaları. *Uluslararası Katılımlı Yangın Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, İzmir.

Kahraman, B. (2024). Yeraltı kömür madenciliğinde mekanizasyon ve iş güvenliği uygulamaları. *Madencilik Dergisi*, 63(2), 45–58, Ankara.

Karakurt, İ., Aydın, G., & Aydın, K. (2011). Mine ventilation air methane as a sustainable energy source. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1042-1049. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.030>

Karaçelebi, A.S. (1980). Toz raporu. EKİ İnsan Gücü Eğitim Müdürlüğü Yayını No:38, Zonguldak, 97s.

Kissell, F.N. (2003). Handbook for dust control in mining. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. <https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB2003147>

McPherson, M.J. (1993). Subsurface ventilation and environmental engineering (1st ed.). Chapman & Hall, London, 905 s.

Mine Safety and Health Administration. (2024). P25-V-01: Emergency response plan (ERP) guidance for underground coal mines. U.S. Department of Labor. <https://www.msha.gov/p25-v-01>

Mishra, D., Kumar, P., & Roy, S. (2023). Internet of things and artificial intelligence applications in mine safety management: A review. *Safety Science*, 163, 106128. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106128>.

Mutmansky, J.M., & McAtteer, J.D. (1999). Mine emergency response planning. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Moyer, F.T. (1992). Madenlerde güvenlik. *alışma Ortamı Dergisi*, 2, 13-15, Ankara.

National Institute for Occupational Safety and Health. (2024). Mining safety and health research at NIOSH. Centers for Disease Control and Prevention. <https://www.cdc.gov/niosh/mining/index.html>

Ren, S., Beeche, C. A., Shi, Z., Acevedo Garcia, M., Zychowski, K., Leng, S., Roghanchi, P., & Pu, J. (2024). Causal relationship network of risk factors impacting workday loss in

underground coal mines.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.05940>.

Salvendy, G. (2012) *Handbook of human factors and ergonomics* (4th ed.). Wiley.

Song, K., & Choi, Y. (2024). Smart mining technologies and occupational safety improvements in underground mining operations. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41(2), 487–502.  
<https://doi.org/10.1007/s42461-023-00858-6>.

Şensöğüt, C., & Çınar, İ. (2006). Açık ocaklarda gürültü yayılımının geliştirilen bir model ile incelenmesi. *Madencilik*, 45 (3), 27-33, Ankara

Tanır, F. (2009). Madenlerde iş sağlığı ve güvenliğine bakış. *Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (ss. 7-8), Adana.

Tatar, Ç., & Özacar, V. (2017). Su atımı. In C. O. Aksoy, E. Kömürlü, & H. E. Yaman (Eds.), *Temel Madencilik Bilgileri Kitabı*, Mayeb Yayıncılık, 752-840.

TMMOB Maden Mühendisleri Odası, (2022). Yeraltı kömür madenciliğinde iş sağlığı ve güvenliği rehberi. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.

Önal, G. (2017). Yeraltı kömür madenciliğinde iş kazaları ve önleme yöntemleri. *Madencilik Türkiye Dergisi*, 78, 32–40.

Önder, M., Mutlu, M., Adıgüzel, E., & Önder, S. (2015). TKİ'ye bağlı açık işletme kömür madenlerindeki iş günü kayıplı iş kazalarının aşamalı loglineer analiz yöntemi ile değerlendirilmesi. *Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı* (ss. 178-189), Antalya.

Özgen, Z. (2015). Maden işyerlerinde kullanılan bazı iş araçlarından kaynaklanan el-kol titreşim maruziyetinin ölçümü ve

değerlendirilmesi [Yüksek lisans tezi]. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

Vidinli, N. (2006). Tozlardan kaynaklanan meslek hastalıkları. İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırması, Ankara, 87 s.

Yaşar, S., İnal, S., Yaşar, Ö., & Kaya, S. (2015). Geçmişten günümüze büyük maden kazaları. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 54(2), 33-43, Ankara.

Yılmaz, A.İ. (2016). Ocak yangınlarında kendiliğinden yanmanın iş sağlığı ve güvenliği yönünden değerlendirilmesi. *C.B.Ü. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 1(21), 38-47.

Youakim, S. (2009). Hand-arm vibration syndrome. *BC Medical Journal*, 51(1), 10. <https://bcmj.org/worksafebc/hand-arm-vibration-syndrome-havs>

Zeyrek, S. (2009). *Titreşim* [Uzmanlık tezi]. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.

Zhou, G., Liu, Y., & Wang, S. (2017). Emergency management and rescue technology in coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(4), 617–622. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.020>.

Zhou, J., Wang, H., Zhang, Y., & Li, X. (2022). Digital transformation and intelligent mining technologies for sustainable underground coal mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(5), 863–875. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.05.012>.

# OFİYOLİTİK KROMİT YATAKLARI: OLUŞUM, JEOKİMYA VE TÜRKİYE ÖRNEKLERİ

İREM AKSOY<sup>1</sup>

## Giriş

### Kromitin Ekonomik ve Stratejik Önemi

Kromit, genel formülü  $(Mg,Fe^{2+})(Cr,Al,Fe^{3+})_2O_4$  olan spinel grubu bir mineral olup, kromun ekonomik ölçekte üretildiği başlıca doğal kaynak niteliğindedir. Bu nedenle kromit cevherleri; küresel hammadde arz güvenliği, ağır sanayi üretimi, metalurji teknolojileri ve stratejik metal tedariki açısından önemli bir yere sahiptir (Mosier vd., 2012; Daş vd., 2012; Akmaz vd., 2025). Kromun yüksek korozyon direnci, aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık koşullarındaki kararlılığı, kromit kökenli ürünleri metalurji, refrakter, kimya, savunma ve havacılık sanayileri için önemli bir hammadde haline getirmektedir (Kapsiotis, 2013; Akmaz vd., 2025).

Kromit cevheri dünya genelinde temel olarak metalurji, kimya ve refrakter sanayilerinde kullanılmaktadır. Metalurji sektörü, kromit tüketiminin en büyük bölümünü oluşturmakta; kromit,

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9969-0627

paslanmaz çelik ve özel alaşımların üretiminde kullanılan ferrokromun ana hammaddesi olarak değerlendirilmektedir (Mosier vd., 2012; Su vd., 2026). Çeliğe eklenen krom, yüzeyde koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak paslanmaya karşı direnç sağlar ve nihai ürüne yüksek sertlik ile mekanik dayanım kazandırır. Bu yönüyle kromit, modern endüstriyel üretim zincirlerinde hem ekonomik hem de stratejik öneme sahip cevher minerallerinden biridir (Akmaz vd., 2025; Su vd., 2026).

Kromit yatakları, bazı örneklerde platin grubu elementlerle ilişkili olabilmeleri nedeniyle yan ürün potansiyeli açısından da önem taşımaktadır. Ancak PGE zenginleşmesi tüm kromit yatakları için geçerli olmadığından, bu potansiyel yatak tipi, manto kaynağı, eriyik bileşimi, sülfür doygunluğu ve tektonik ortam koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir (Uysal vd., 2007; Uysal vd., 2009; Akmaz vd., 2025; Zaccarini vd., 2024).

Ofiyolitik kuşaklarda gelişen podiform kromit yatakları, ekonomik değerlerinin yanı sıra üst manto süreçlerinin, eriyik-kayaç etkileşiminin ve okyanusal litosferin tektonomagmatik evriminin anlaşılmasında da önemli jeolojik kayıtlar sunmaktadır (Robinson vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Arai, 2021). Bu nedenle kromit yatakları, yalnızca işletilebilir bir hammadde kaynağı olarak değil, aynı zamanda ofiyolitik sistemlerin petrojenezi ve jeodinamik gelişimi açısından da değerlendirilmesi gereken çok yönlü jeolojik oluşumlardır.

## **Cevher Kalite Sınıfları ve Endüstriyel Kullanım**

Kromit cevherinin ticari değeri ve endüstriyel kullanım alanı; başta  $Cr_2O_3$  içeriği, Cr/Fe oranı, krom spinel bileşimi, gang mineralleri, safsızlık düzeyi, tane boyu, cevher dokusu ve fiziksel özellikler olmak üzere bir dizi parametre tarafından belirlenmektedir. Bu özellikler doğrultusunda kromit cevherleri genel olarak metalürjik sınıf, kimya sınıfı ve refrakter sınıfı olmak

üzere üç ana grupta değerlendirilmektedir (Mosier vd., 2012; Akmaz vd., 2025; Zaccarini vd., 2025).

Metalürjik sınıf kromit cevherleri, genellikle yüksek  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  içeriğine ve uygun Cr/Fe oranına sahip cevherlerden oluşur. Bu cevherler, ferrokrom üretimi ve dolayısıyla paslanmaz çelik sanayisi için en önemli hammadde grubunu oluşturur. Metalürjik kalite açısından toplam  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  içeriği ve Cr/Fe oranı temel ticari parametrelerdir; bununla birlikte krom spinelin Cr#, Mg# ve Fe içeriği, cevherin petrojenetik yorumu ve kalite değerlendirmesi açısından tamamlayıcı göstergeler sunmaktadır (Mosier vd., 2012; Kapsiotis, 2013; Su vd., 2026). Yüksek Cr# değerlerine sahip kromitler çoğunlukla metalürjik kullanım açısından daha avantajlı kabul edilmekle birlikte, cevherin ekonomik değerlendirilebilirliği yatak ölçeği, tenör, gang mineralleri, işletme koşulları ve zenginleştirme olanaklarıyla birlikte ele alınmalıdır (Mosier vd., 2012; Uysal vd., 2018).

Türkiye’de Guleman, Pozantı-Karsantı, Kızıldağ, Muğla ve bazı Toros kuşağı kromit yatakları, yüksek Cr içerikli ofiyolitik kromitler açısından dikkat çeken sahalar arasında yer almaktadır (Engin vd., 1986; Uysal vd., 2018; Avcı vd., 2017; Akmaz vd., 2025). Bununla birlikte, aynı ofiyolitik kuşak içinde dahi cevher kalitesi ve krom spinel bileşimi değişkenlik gösterebildiğinden, her yatağın kendi petrografik, jeokimyasal ve teknolojik özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Kimya sınıfı kromit cevherleri, metalürjik sınıfa göre daha farklı kalite parametreleriyle değerlendirilmektedir. Bu sınıfta  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  içeriği önemli olmakla birlikte, cevherin kimyasal saflığı, çözüldürme davranışı, Fe, Al, Mg ve zararlı element içerikleri de kullanım alanını belirleyen temel faktörlerdir. Kimya sınıfı kromitler; boya pigmentleri, deri tabaklama, metal kaplama, ahşap koruma ürünleri ve çeşitli krom kimyasallarının üretiminde

kullanılmaktadır (Zaccarini vd., 2025; Akmaz vd., 2025). Bu nedenle kimya sanayisinde kullanılacak cevherlerde yalnızca yüksek krom içeriği değil, işlenebilirlik ve safsızlık düzeyi de ekonomik değerlendirmede önem taşır.

Refrakter sınıf kromit cevherleri ise genellikle yüksek sıcaklık koşullarında kararlı davranış gösterebilen, magnezyum ve alüminyumca daha zengin kromitlerle ilişkilendirilmektedir. Bu cevherler, yüksek ergime sıcaklığı, düşük termal genleşme ve kimyasal dayanım gibi özellikleri nedeniyle demir-çelik, cam, çimento ve metalurji fırınlarında astar malzemesi olarak kullanılmaktadır (Akmaz vd., 2025; Zaccarini vd., 2025). Ancak modern endüstride refrakter amaçlı kromit kullanımı, metalürjik kullanıma kıyasla daha sınırlı bir paya sahiptir. Ayrıca çevresel ve teknolojik gereklilikler nedeniyle refrakter hammaddelerde safsızlık kontrolü ve alternatif malzeme kullanımı giderek daha önemli hale gelmektedir.

Ofiyolitik kromit yataklarında cevher kalitesinin belirlenmesi, yalnızca endüstriyel sınıflama açısından değil, aynı zamanda yatakların oluşum ortamının yorumlanması açısından da önemlidir. Örneğin yüksek Cr# değerleri, düşük TiO<sub>2</sub> içerikleri ve belirli Mg# aralıkları, kromitlerin oluştuğu eriyik bileşimi ve manto kaynağının tüketilmişlik derecesi hakkında bilgi sağlayabilir (Kapsiotis, 2013; Su vd., 2026). Buna karşılık, Al bakımından daha zengin kromitler, farklı eriyik bileşimleri veya daha az tüketilmiş manto kaynaklarıyla ilişkilendirilebilmektedir (Uysal vd., 2009; Arai, 2021). Bu nedenle cevher kalite sınıflaması, ekonomik kullanım ile petrogenetik yorum arasında önemli bir bağlantı kurmaktadır.

Kromit yatakları, jeolojik oluşum ortamlarına göre genel olarak stratiform ve podiform yataklar olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmektedir. Stratiform yataklar tabakalı mafik-ultramafik

intrüzyonlarla ilişkiliyken, podiform kromit yatakları ofiyolitik komplekslerin manto peridotitleri içerisinde merceksi, bantlı, damar benzeri veya düzensiz kütleler şeklinde gelişmektedir (Robinson vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Mosier vd., 2012; Arai, 2021; Su vd., 2026). Bu bölümde ağırlıklı olarak ofiyolitik sistemlerde gelişen podiform kromit yataklarının oluşum mekanizmaları, petrografik-jeokimyasal özellikleri ve Türkiye ofiyolitleriyle ilişkisi ele alınmaktadır.

## **Ofiyolitik Kuşaklar ve Ultramafik Kayaçlar**

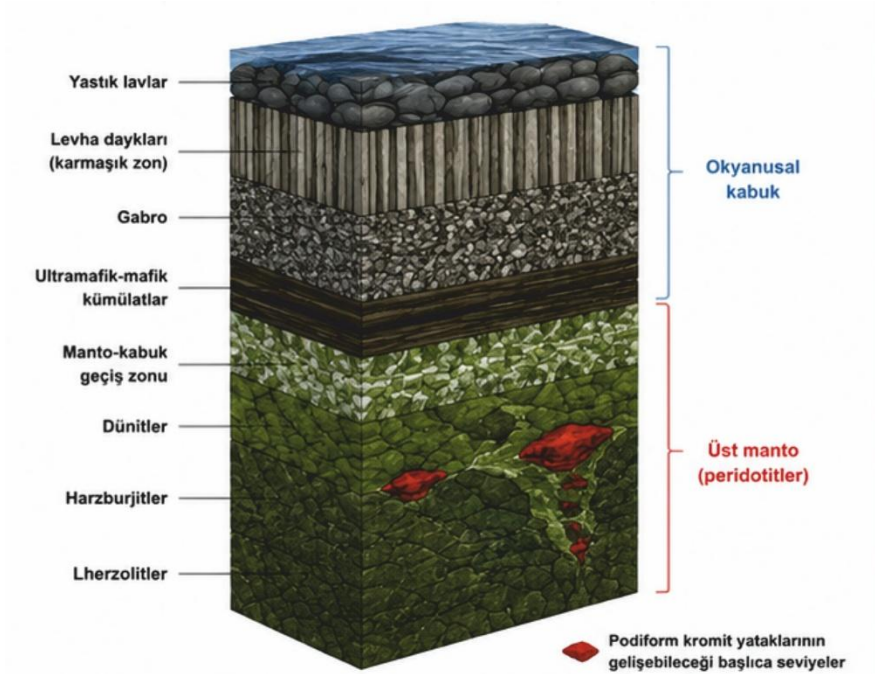
### **Ofiyolitlerin Tanımı ve Manto Dizilimi**

Ofiyolitler, okyanusal litosferin ve üst mantonun tektonik süreçlerle kıtasal kenarlara veya orojenik kuşaklara yerleşmiş parçaları olarak tanımlanmaktadır. Bu kayaç toplulukları; okyanusal kabuk oluşumu, üst manto evrimi, manto eriyiklerinin taşınımı ve tektonomagmatik süreçlerin anlaşılması açısından önemli jeolojik kayıtlar sunmaktadır (Robinson vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Arai, 2021). Ofiyolitik kompleksler aynı zamanda kromit gibi stratejik cevherleşmelerin geliştiği başlıca jeolojik ortamlardan biri olduğundan, yalnızca petrografik ve tektonik açıdan değil, ekonomik jeoloji bakımından da önem taşımaktadır (Mosier vd., 2012; Akmaz vd., 2025; Su vd., 2026).

Klasik bir ofiyolit dizilimi, tabandan üste doğru manto tektonitleri, ultramafik-mafik kümülatlar, izotrop gabrolar, levha dayk karmaşığı ve yastık yapıları bazaltlardan oluşmaktadır. Bu ideal dizilim, okyanusal litosferin mantodan kabuğa doğru gelişen yapısal ve magmatik bileşenlerini temsil eder ve literatürde Penrose tipi ofiyolit istifi olarak da değerlendirilmektedir (Dilek ve Furnes, 2011; Arai, 2021; Su vd., 2026). Manto tektonitleri genellikle harzburjit, lertzolit ve dünit gibi ultramafik kayaçlardan oluşurken; üst kesimlerde gabroik kümülatlar, dayk sistemleri ve bazaltik lavlar yer almaktadır (Robinson vd., 1997; Dilek ve Furnes, 2014; Furnes vd.,

2020). İdealize ofiyolit dizilimi ve podiform kromititlerin gelişebileceği başlıca yapısal seviyeler Şekil 1’de gösterilmiştir.

*Şekil 1. İdealize ofiyolit dizilimi ve podiform kromit yataklarının gelişebileceği başlıca seviyeler.*



Bununla birlikte, doğal ofiyolitik istifler çoğu zaman ideal dizilimin tüm üyelerini eksiksiz biçimde korumaz. Tektonik dilimlenme, bindirme, makaslama, metamorfizma, serpantinleşme ve hidrotermal alterasyon süreçleri nedeniyle birçok ofiyolitik kompleks parçalı, eksik veya yapısal olarak yeniden düzenlenmiş şekilde yüzeylenmektedir (Okay, 1986; Dilek ve Furnes, 2011; Furnes vd., 2020). Türkiye ofiyolitleri de Neotetis’in farklı kollarının kapanmasıyla ilişkili olarak farklı yaş, tektonik konum ve korunma derecelerine sahip birlikler halinde yüzeylenmektedir. Bu nedenle ofiyolitlerin değerlendirilmesinde yalnızca ideal stratigrafik dizilim değil; kayaç birliktelikleri, yapısal ilişkiler, mineralojik

bileşim ve jeokimyasal özellikler birlikte ele alınmalıdır (Okay, 1986; Dilek ve Furnes, 2011; Üner vd., 2014; Üner ve Çakır, 2025; Furnes vd., 2020).

Podiform kromit yatakları açısından ofiyolitik dizilimin, özellikle manto tektonitleri ve manto-kabuk geçiş zonu, büyük önem taşımaktadır. Çünkü podiform kromititler çoğunlukla harzburjitik peridotitler, dünitik zonlar ve serpantinleşmiş ultramafik kayalarla ilişkili olarak gelişmektedir. Bu nedenle ofiyolitik birimlerde ultramafik kayaların doğru tanımlanması hem kromit oluşum modellerinin kurulmasında hem de cevherleşme potansiyelinin değerlendirilmesinde temel bir aşama oluşturmaktadır (Mosier vd., 2012; Arai, 2021; Su vd., 2026).

### **Manto Tektonitleri: Peridotit-Harzburjitic-Dünit İlişkisi**

Manto tektonitleri, ofiyolitik komplekslerin alt yapısal seviyelerinde yer alan, yüksek sıcaklık koşullarında plastik deformasyon izleri taşıyan ve değişen derecelerde kısmi ergimeye uğramış ultramafik kayaç topluluklarıdır. Bu birimler, okyanusal litosferin üst manto kesimlerini temsil etmeleri nedeniyle hem manto evriminin hem de ofiyolitik kromit oluşumlarının anlaşılmasında temel kayaç grupları arasında yer almaktadır (Robinson vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026).

Ofiyolitik manto kesimlerinde başlıca lertzolit, harzburjitic ve dünit türü ultramafik kayaçlar ayırt edilmektedir. Lertzolitler, klinopiroksen bakımından daha zengin olup mantonun daha az tüketilmiş bileşimini temsil eder. Harzburjiticler ise olivin ve ortopiroksenin baskın olduğu, klinopiroksen içeriği düşük ve yüksek dereceli kısmi ergime süreçleri sonucunda oluşan refrakter manto kalıntılarıdır. Dünitler büyük ölçüde olivinden oluşan ultramafik kayaçlar olup, çoğunlukla harzburjiticler içerisinde mercer, damar, kanal veya düzensiz kütleler halinde gözlenmektedir (Engin vd., 1986; Robinson vd., 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026).

Podiform kromit yatakları açısından harzburjit-dünit-kromitit ilişkisi özel bir öneme sahiptir. Birçok ofiyolitik kromit yatağında kromitit kütleleri, harzburjitik manto tektonitleri içerisinde gelişmekte ve çoğu kez dünitik zonlarla çevrelenmektedir. Bu ilişki, kromit oluşumunun yalnızca manto peridotitlerinin başlangıç bileşimiyle değil; aynı zamanda manto içerisinde yükselen eriyiklerin çevre kayaçla reaksiyonu, eriyik-kayaç etkileşimi ve kanalize eriyik taşınımı süreçleriyle bağlantılı olduğunu göstermektedir (Zhou ve Robinson, 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026).

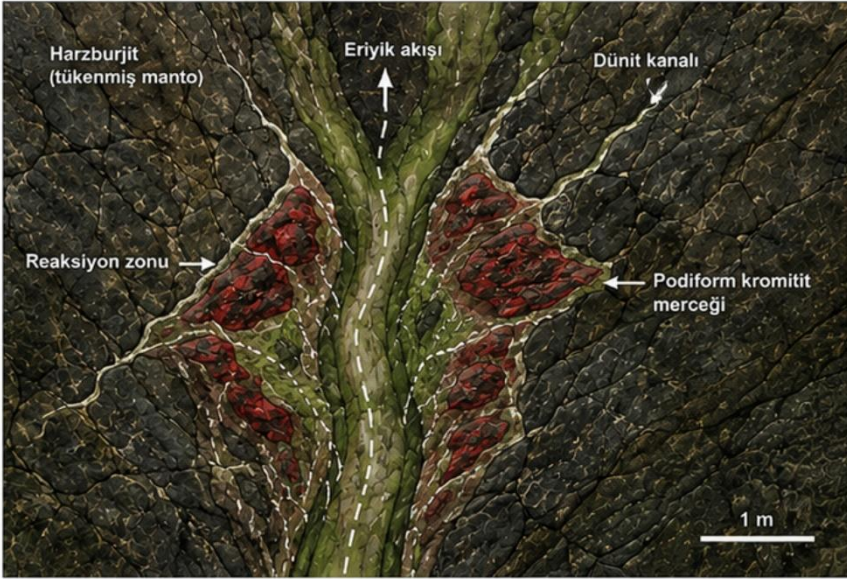
Dünitik zonlar, özellikle podiform kromit oluşum modellerinde, bazik-ultrabazik eriyiklerin harzburjitik manto içerisindeki taşınım yolları olarak yorumlanmaktadır. Bu süreçte eriyik ile ortopiroksen bakımından zengin çevre kayaç arasında gelişen reaksiyonlar, ortopiroksenin kısmen çözünmesine ve buna karşılık olivin kristallenmesine yol açabilir. Böylece harzburjitler yer yer dünitik bileşimlere dönüşürken, krom spinel doygunluğuna ulaşabilecek fizikokimyasal koşullar da gelişebilir (Arai, 2021; Su vd., 2026). Bu nedenle dünitlerin dağılımı, kromititlerin saha ilişkileri ve krom spinel kimyası birlikte değerlendirildiğinde, cevherleşmenin oluşum süreci hakkında önemli veriler sağlar. Harzburjitik manto içerisinde gelişen dünit kanalları ve bu kanallar boyunca yerleşen kromitit mercceklerinin kavramsal ilişkisi Şekil 2’de verilmiştir.

Podiform kromit yataklarının ayırt edici özelliklerinden biri, kromitit kütlelerinin çoğu kez dünitik zonlar veya dünit kılıflarıyla ilişkili olmasıdır. Bu zonlar, bazik-ultrabazik eriyiklerin harzburjitik manto içerisindeki kanalize taşınım yolları olarak yorumlanmaktadır. Eriyik ile çevre peridotit arasındaki reaksiyonlar, ortopiroksenin kısmen çözünmesine ve olivin kristallenmesine neden olarak yerel ölçekte dünitik bileşimlerin gelişmesini sağlayabilir (Zhou ve Robinson, 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026). Bu

nedenle dünit kanalları, kromitit oluşumunun anlaşılmasında önemli saha göstergeleri sunmaktadır.

Türkiye ofiyolitlerinde de harzburjitik manto tektonitleri, dünitik zonlar ve krom spinel içeren mineral toplulukları üzerine yapılan çalışmalar, peridotitik kayaçların manto evrimi, kısmi ergime derecesi, eriyik-kayaç etkileşimi ve tektonik ortam yorumları açısından önemli veriler sunduğunu göstermektedir (Engin vd., 1986; Üner ve Çakır, 2011; Uysal vd., 2018; Üner ve Aksoy, 2018; Üner ve Mutlu, 2019; Akmaz vd., 2025).

*Şekil 2. Harzburjit-dünit-kromitit ilişkisinin şematik gösterimi.*



## **Kromit Oluşumu İçin Elverişli Tektonik Ortamlar: SSZ**

Podiform kromit yatakları, yaygın olarak harzburjitik manto tektonitleri içerisinde veya manto-kabuk geçiş zonuna yakın ultramafik birimlerde gelişmektedir. Bu yatakların önemli bir bölümü, dalma-batma zonu üstü ortamlarla ilişkilendirilen ofiyolitik komplekslerde gözlenmekte ve bu nedenle podiform kromit

oluşumları çoğunlukla supra-subduction zone (SSZ) sistemleriyle birlikte değerlendirilmektedir (Robinson vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Su vd., 2026).

SSZ ortamları, dalan levhadan türeyen akışkanların manto kamasını metasomatize ettiği ve ergime sıcaklığını düşürerek yüksek dereceli kısmi ergimeyi kolaylaştırdığı jeodinamik alanlardır. Bu süreçte gelişen yüksek dereceli kısmi ergime, harzburjitik ve yer yer dünitik bileşimlere sahip tüketilmiş manto kalıntılarının oluşmasına yol açabilir. Bu tür tüketilmiş manto kaynakları, krom bakımından zengin eriyiklerin gelişimi ve krom spinel doygunluğuna ulaşılması açısından uygun koşullar sağlayabilmektedir (Üner, 2020a; Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024; Su vd., 2026).

Yay-önü veya dalma-batma başlangıcıyla ilişkili ortamlarda gelişen boninitik ya da boninit benzeri eriyikler, podiform kromit yataklarının oluşumunda önemli bir rol oynayabilmektedir. Bu eriyikler, yüksek derecede tüketilmiş harzburjitik manto ile etkileşime girerek krom bakımından zenginleşmiş eriyik sistemlerinin gelişimine katkı sağlayabilir. Bu nedenle yüksek Cr# değerlerine ve düşük TiO<sub>2</sub> içeriklerine sahip krom spineller, çoğu çalışmada SSZ ilişkili podiform kromitlerin ayırt edilmesinde kullanılan önemli petrojenetik göstergeler arasında değerlendirilmektedir (Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Su vd., 2026).

Bununla birlikte, podiform kromit yataklarının oluşumu tek bir modelle açıklanamayacak kadar karmaşıktır. Kromit oluşumunda eriyik bileşimi, manto peridotitlerinin tüketilmişlik derecesi, eriyik-kayaç etkileşimi, magma karışımı, kanalize eriyik akışı, oksijen fugasitesi, akışkan katkısı ve yapısal kontrol gibi birden fazla parametre birlikte rol oynamaktadır (Zhou ve Robinson, 1997; Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024). Bu nedenle kromitlerin oluşum ortamı yorumlanırken yalnızca tektonik konum

değil, krom spinel bileşimi, Cr#, Mg#, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, TiO<sub>2</sub> içerikleri, petrografik doku ve saha ilişkileri birlikte değerlendirilmelidir.

## **Kromit Yataklarının Oluşumu**

### **Podiform Kromitlerin Genel Karakteristikleri ve Morfolojisi**

Podiform kromitler, ofiyolitik komplekslerin manto kesimlerinde ve kabuk-manto geçiş zonuna yakın seviyelerinde gelişen, çoğunlukla düzensiz geometrili kromit cevher kütleleri olarak tanımlanmaktadır. Bu yataklar, stratiform kromit yataklarından farklı olarak tabakalı intrüzyonlarda düzenli ve süreklilik gösteren seviyeler halinde değil; manto peridotitleri içerisinde merceksi, bantlı, damar benzeri, boru biçimli veya düzensiz kütleler şeklinde gözlenmektedir (Robinson vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Mosier vd., 2012; Arai, 2021). “Podiform” terimi de bu yatakların çoğunlukla koza veya mercek benzeri morfolojiler göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Podiform kromitler, çevrelerindeki harzburjitik veya dünitik ultramafik kayalarla yakın ilişkili olup, birçok örnekte manto peridotitlerinin foliasyonuna uyumlu veya yer yer bu yapıları kesen konumlarda bulunabilmektedir (Arai, 2021; Su vd., 2026). Bu geometrik çeşitlilik, podiform kromit yataklarının yalnızca magmatik kristallenme süreçleriyle değil, aynı zamanda manto içerisinde gelişen eriyik-kayaç etkileşimi, kanalize eriyik akışı, deformasyon ve tektonik yerleşim süreçleriyle de ilişkili olduğunu göstermektedir (Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024).

Podiform kromit yataklarının boyutları oldukça değişkendir. Bazı kromitler santimetre veya metre ölçekli küçük mercekler halinde bulunurken, bazı sahalarda ekonomik olarak işletilebilir büyük cevher kütleleri gelişebilmektedir. Bu nedenle podiform kromitler, hem krom üretimi açısından ekonomik değer taşıyan cevherleşmeler hem de ofiyolitik manto süreçlerinin anlaşılmasına

katkı sağlayan jeolojik göstergeler olarak değerlendirilmektedir (Mosier vd., 2012; Arai, 2021; Akmaz vd., 2025).

Podiform kromitlerin önemli saha göstergelerinden biri, cevher kütlelerinin çoğu kez harzburjitik manto tektonitleri içerisinde yer alması ve dünitik zonlarla evrenmesidir. Bu ilişki, kromit oluşumunun manto içerisindeki kanalize eriyik akışı ve eriyik-kayaç etkileşimi süreçleriyle bağlantılı olduğunu göstermektedir (Robinson vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026).

### **Oluşum Mekanizması: Eriyik-Kayaç Etkileşimi**

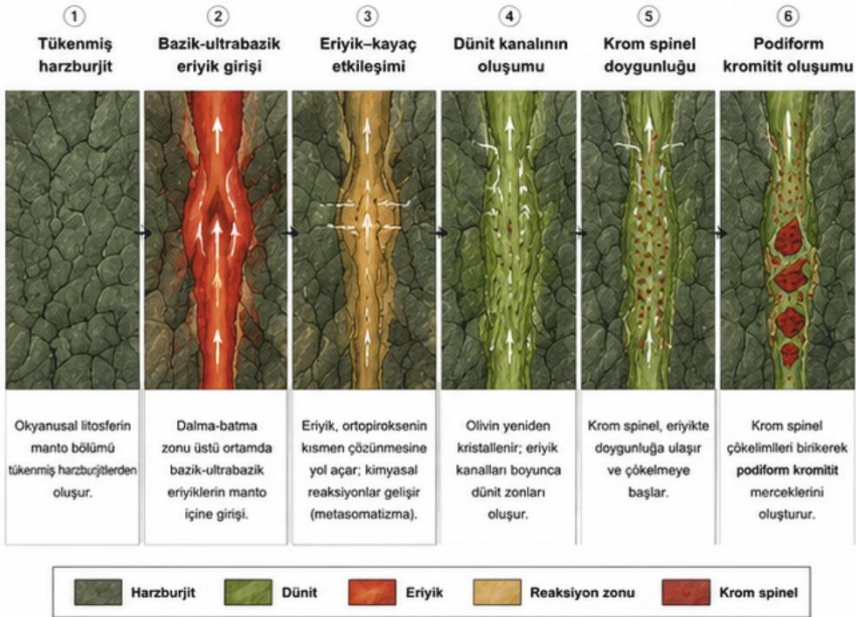
Modern petrolojik modeller, podiform kromitlerin oluşumunda eriyik-kayaç etkileşiminin temel süreçlerden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yaklaşıma göre, manto içerisinde yükselen bazik, ultrabazik veya boninitik karakterli eriyikler, harzburjitik peridotitlerle reaksiyona girerek evre kayaçların mineralojik ve kimyasal bileşimini değiştirebilir. Özellikle ortopiroksenin kısmen çözünmesi ve buna karşılık olivin kristallenmesi, harzburjitlerin yerel ölçekte dünitik bileşimlere dönüŐmesine neden olmakta; bu süreç, kromitlerin gelişebileceği reaktif eriyik kanallarının oluşumuna zemin hazırlamaktadır (Zhou ve Robinson, 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026).

Eriyik-kayaç etkileşimi sırasında ortopiroksenin çözünmesi, eriyiğin kimyasal bileşimini değiştirerek krom spinel doğunluğuna ulaşılmasını kolaylaştırabilir. Eriyikteki silis aktivitesi, oksijen fugasitesi, Mg/Fe oranı, Al içeriği ve Cr znrlğindeki değişimler, kromit kristallenmesini kontrol eden başlıca fizikokimyasal parametreler arasında yer almaktadır (Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024). Bu nedenle podiform kromitlerin oluşumu, yalnızca kromca zengin bir magmanın basit kristallenmesiyle açıklanamamakta; eriyik bileşimi, evre kayaçla reaksiyon, kanalize akış ve basınç-sıcaklık koşullarının birlikte etkili

olduğu dinamik bir süreç olarak değerlendirilmektedir. Eriyik-kayaç etkileşimi, ortopiroksen çözünmesi, olivin kristallenmesi, dünit kanalı gelişimi ve krom spinel doygunluğuna bağlı podiform kromitit oluşum süreci Şekil 3'te kavramsal olarak özetlenmiştir.

Krom spinel doygunluğunun gelişmesinde eriyik bileşimindeki ani değişimler önemli rol oynayabilir. İlksel eriyiklerin harzburjitik manto içerisinde ilerlerken ortopiroksenle reaksiyona girmesi, eriyiğin bileşimini krom spinel kristallenmesine elverişli hale getirebilir. Bunun yanında magma karışımı, eriyiklerin farklılaşma derecesi, akışkan katkısı ve manto kaynağının önceden tüketilmişlik düzeyi de kromit kristallenmesini etkileyen faktörler arasında değerlendirilmektedir (Robinson vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026).

Şekil 3. Podiform kromit oluşum modelinin kavramsal gösterimi.



Bu süreçte dünit kanalları, yalnızca eriyik taşınım yolları değil, aynı zamanda kromitit kütlelerinin oluşabileceği reaksiyon zonları olarak da önem taşımaktadır. Ancak podiform kromit oluşumu tek aşamalı ve tek mekanizmalı bir süreç değildir. Farklı ofiyolitik ortamlarda kısmi ergime derecesi, eriyik bileşimi, manto kaynağının tüketilmişlik derecesi, oksijen fugasitesi, deformasyon ve yapısal kontrol gibi parametreler; yatakların boyutunu, cevher dokusunu, krom spinel kimyasını ve ekonomik potansiyelini belirleyebilmektedir (Kapsiotis, 2013; Mosier vd., 2012; Arai, 2021; Akmaz vd., 2025).

### **Magma Karışımı ve Akışkanların Rolü**

Podiform kromititlerin oluşumunda eriyik-kayaç etkileşiminin yanı sıra magma karışımı da önemli mekanizmalardan biri olarak değerlendirilmektedir. İlksel ve krom bakımından görece zengin bir eriyik ile daha evrimleşmiş, silisçe zenginleşmiş veya farklı kimyasal karaktere sahip bir eriyiğin karışması, sistemin krom spinel doygunluğuna ulaşmasını kolaylaştırabilir. Bu tür fizikokimyasal değişimler, özellikle masif kromitit kütlelerinin oluşumunda kromit kristallenmesini tetikleyen süreçlerden biri olarak ele alınmaktadır (Robinson vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026).

Magma karışımı sırasında eriyik bileşiminde meydana gelen değişimler; silis aktivitesi, oksijen fugasitesi, Mg/Fe oranı, Al içeriği ve Cr çözünürlüğü üzerinde etkili olabilir. Bu parametrelerdeki değişim, krom spinelin kararlı hale gelmesini ve belirli reaksiyon zonlarında yoğun biçimde kristallenmesini sağlayabilir. Bu nedenle podiform kromititlerin oluşumu, yalnızca tek bir magmatik eriyikten kromit kristallenmesi şeklinde değil; farklı eriyiklerin etkileşimi, çevre peridotitle reaksiyon ve kanalize eriyik akışı gibi süreçlerin birlikte etkili olduğu çok aşamalı bir sistem olarak

değerlendirilmelidir (Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, podiform kromitlerin oluşumunda akışkanların ve uçucu bileşenlerin de rol oynayabileceğini göstermektedir. Kromit kristalleri içerisinde gözlenen bazı mineral, sıvı ve gaz kapanımları; mineralizasyon sırasında su, metan (CH<sub>4</sub>) ve diğer uçucu bileşenlerin sisteme katılmış olabileceğine işaret etmektedir (Zaccarini vd., 2024; Zaccarini vd., 2025). Bu tür kapanımlar, manto kaynaklı akışkanların veya abiyotik uçucu bileşenlerin bazı kromit sistemlerinde kromit kristallenmesiyle ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.

Akışkanların varlığı, eriyik yapısını, kristallenme koşullarını, krom spinel doygunluğunu ve mineral kapanım topluluklarını etkileyebilir. Özellikle dalma-batma zonu üstü ortamlarda dalan levhadan türeyen akışkanlar, manto kamasının metasomatizmasına ve yüksek dereceli kısmi ergime süreçlerine katkı sağlayabilir. Bu bağlamda su ve uçucu bileşenler, kromit oluşum modellerinde yalnızca ikincil bir unsur olarak değil, bazı sistemlerde magmatik süreçleri etkileyen tamamlayıcı bir faktör olarak değerlendirilmelidir (Üner, 2020b; Arai, 2021; Su vd., 2026; Zaccarini vd., 2025).

Bununla birlikte, akışkanların ve uçucu bileşenlerin rolü tüm podiform kromit yataklarında aynı düzeyde değildir. Akışkan katkısının derecesi; tektonik ortam, manto kaynağının bileşimi, eriyik karakteri, dalma-batma ilişkili süreçler ve daha sonraki metamorfik-hidrotermal etkiler tarafından kontrol edilebilir. Bu nedenle kromitlerde gözlenen kapanım, mineral kimyası ve PGE verileri tek başına genellenmemeli; petrografik doku, krom spinel bileşimi, saha ilişkileri ve tektonik ortam verileriyle birlikte yorumlanmalıdır (Kapsiotis, 2013; Zaccarini vd., 2024; Su vd., 2026).

## **Tektonik Ortam Yorumu ve Jeodinamik Bağlam**

Podiform kromit yataklarının önemli bir bölümü, dalma-batma zonu üstü ortamlarla ilişkili ofiyolitik komplekslerde gelişmektedir. Bu ortamlarda dalan levhadan türeyen akışkanlar manto kamasını metasomatize edebilir ve yüksek dereceli kısmi ergime süreçlerini kolaylaştırabilir. Bu nedenle SSZ ortamları, özellikle yüksek Cr içerikli podiform kromititlerin oluşumu açısından elverişli jeodinamik koşullar sağlayabilmektedir (Robinson vd., 1997; Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Su vd., 2026). Bununla birlikte, kromititlerin tektonik ortam yorumu yalnızca SSZ modeliyle sınırlanmamalı; krom spinel kimyası, petrografik doku, alterasyon durumu ve saha ilişkileri birlikte değerlendirilmelidir.

Bazı podiform kromit yataklarında mikro-elmas, koesit ve diğer ultra yüksek basınç mineral fazlarının rapor edilmiş olması, bu yatakların oluşum derinliği, manto içi madde dolaşımı ve derin manto-kabuk etkileşimleri konusunda yeni tartışmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, bu tür bulgular tüm podiform kromit yatakları için genellenmemelidir. Ultra yüksek basınç mineral fazlarının varlığı, belirli yataklar için derin manto süreçlerine veya manto geçiş zonundan taşınan malzemeye işaret edebilir; ancak podiform kromit oluşumlarının büyük bölümü hâlen üst manto, eriyik-kayaç etkileşimi, kanalize eriyik akışı ve SSZ ortamları çerçevesinde değerlendirilmektedir (Arai, 2021; Su vd., 2026; Xiong vd., 2022).

Bu çerçevede podiform kromit yatakları; manto peridotitleri içerisinde gelişen eriyik-kayaç etkileşimi, kanalize eriyik akışı, magma karışımı, akışkan katkısı ve tektonik ortam koşullarının birlikte etkilediği karmaşık cevherleşme sistemleri olarak değerlendirilmelidir. Bu yatakların petrografik, mineral kimyasal ve jeokimyasal özellikleri, yalnızca cevher karakterinin belirlenmesinde değil, aynı zamanda ofiyolitik sistemlerin

jeodinamik evriminin anlaşılmasında da temel veriler sunmaktadır (Mosier vd., 2012; Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024).

Podiform kromit oluşumu için kavramsal süreç zinciri şu şekilde özetlenebilir:

- Harzburjitik manto kaynağında yüksek dereceli kısmi ergime gelişir.
- Bazik-ultrabazik veya boninitik karakterli eriyikler manto içerisinde yükselir.
- Eriyik, çevre harzburjitik kayalarla reaksiyona girerek dünitik kanallar oluşturur.
- Eriyik bileşimi değişir ve krom spinel doygunluğuna ulaşılır.
- Kromit kristallenmesi, kanalize eriyik yolları boyunca podiform cevher kütleleri oluşturur.
- Sonraki deformasyon, serpantinleşme, hidrotermal alterasyon ve tektonik yerleşim süreçleri cevher dokusunu ve krom spinel kimyasını kısmen değiştirebilir.

### **Kromitlerin Petrografik ve Jeokimyasal Özellikleri**

Ofiyolitik kromitler mineralojik açıdan görece basit cevherleşmeler gibi görünse de, bünyelerinde taşıdıkları dokusal, mineralojik ve jeokimyasal veriler aracılığıyla üst mantoda gerçekleşen kısmi ergime, eriyik-kayaç etkileşimi, deformasyon ve tektonik ortam koşullarına ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır. Bu nedenle kromitlerin petrografik ve jeokimyasal özellikleri, hem cevher kalitesinin belirlenmesinde hem de ofiyolitik sistemlerin petrojenezi ve jeodinamik evriminin yorumlanmasında temel göstergeler arasında yer almaktadır (Robinson vd., 1997; Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024; Su vd., 2026).

## Mineralojik ve Petrografik Çerçeve

Ofiyolitik kromit mineralizasyonları çoğunlukla ultramafik karakterli manto tektonitleri, dünitik zonlar ve manto-kabuk geçiş zonuna yakın kayaç toplulukları içerisinde gelişmektedir. Bu yataklarda başlıca cevher minerali krom spinel olup, ona çoğunlukla olivin, ortopiroksen, klinopiroksen ve serpantin grubu mineraller eşlik etmektedir (Robinson vd., 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026).

Krom spinel, kromitlerin ana cevher mineralidir ve genel formülü  $(Mg,Fe^{2+})(Cr,Al,Fe^{3+})_2O_4$  şeklinde ifade edilmektedir. Krom spinelin kimyasal bileşimi, bulunduğu kayaç tipi, oluştuğu eriyik bileşimi, kısmi ergime derecesi ve tektonik ortam koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir (Arai, 1994; Kapsiotis, 2013; Zaccarini vd., 2024). Petrografik incelemelerde krom spinel, cevher dokusuna ve ev sahibi kayaç tipine göre farklı morfolojiler gösterebilir. Harzburjitlerde çoğunlukla taneler arası boşluklarda özşekilsiz, yarı özşekilli veya vermiküler formlarda gözlenirken; dünit ve masif kromitlerde daha iri, yarı özşekilli ya da özşekilli kristaller halinde bulunabilmektedir (Arai, 1994; Kapsiotis, 2013; Su vd., 2026).

Olivin, ofiyolitik kromit yataklarında en yaygın silikat gang minerallerinden biridir ve özellikle dünit zarflarında, dünitik zonlarda ve kromitlerin silikat matrisinde yaygın olarak gözlenmektedir. Taze olivin kristalleri genellikle yüksek Mg içerikli bileşimler sunmakla birlikte, serpantinleşme süreçleri sonucunda kısmen veya tamamen serpantin grubu minerallere dönüşebilmektedir. Olivinin poligonal, granoblastik veya yeniden kristallenmiş dokular göstermesi; yüksek sıcaklık deformasyonu, manto akışı ve yeniden kristallenme süreçlerinin izleri olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanında olivin dokuları, kromitlerin içinde geliştiği ultramafik kayaçların deformasyon geçmişinin ve eriyik-kayaç etkileşimi süreçlerinin yorumlanmasında da önemli

petrografik veriler sunmaktadır (Robinson vd., 1997; Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Rassios vd., 2020; Su vd., 2026).

Ortopiroksen, kromititleri çevreleyen harzburjitik manto tektonitlerinin ana bileşenlerinden biridir. Deformasyon etkisiyle ortopiroksen kristallerinde dalgalı sönme, bükülme bantları, deformasyon lamelleri ve yer yer parçalanma gibi mikroyapılar gelişebilmektedir. Ortopiroksen tanelerinin kenarlarında olivin ve spinel neoblastlarının gelişmesi ise eriyik-kayaç etkileşimi sırasında piroksenin kısmen tüketildiğini ve buna karşılık olivin ile spinel kristallenmesinin gerçekleştiğini düşündürebilir. Bu tür mikro-dokusal ilişkiler, harzburjit-dünit-kromitit birlikteliğinin yalnızca saha ölçeğinde değil, mineral ölçeğinde de izlenebildiğini göstermektedir (Kapsiotis, 2013; Rassios vd., 2020; Arai, 2021; Su vd., 2026).

### **Dokusal Özellikler ve Morfoloji**

Podiform kromititler, magmatik kristallenme, kanalize eriyik taşınımı, eriyik-kayaç etkileşimi ve deformasyon süreçlerinin birlikte etkisiyle gelişen farklı cevher dokuları sunmaktadır. Bu dokular, kromititlerin oluşum koşullarının, eriyik akış rejiminin ve yerleşim sonrası tektonik/metamorfik etkilerin yorumlanmasında önemli saha ve mikroskobik veriler sağlamaktadır (Robinson vd., 1997; Arai, 2021; Rassios vd., 2020; Su vd., 2026).

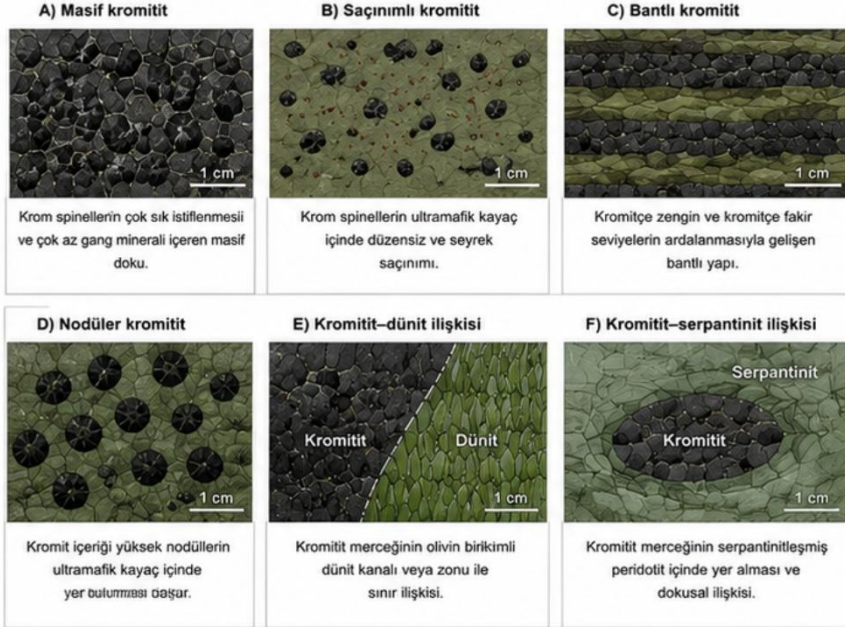
Masif kromitit dokusu, krom spinel tanelerinin yüksek oranda bir araya geldiği ve silikat matrisin oldukça sınırlı olduğu cevher tipini ifade eder. Bu tip kromititlerde spinel taneleri çoğu kez birbirleriyle temas halinde olup, cevher yüksek kromit içeriğiyle karakterizedir. Saçınımlı kromitit dokusunda ise krom spinel taneleri olivin, piroksen veya serpantinleşmiş silikat matris içerisinde daha düşük oranlarda ve dağınık biçimde yer almaktadır. Masif ve saçınımlı dokular arasındaki geçişler, eriyik akış yoğunluğu, kristal birikimi, deformasyon derecesi ve sonrasındaki serpantinleşme

süreçlerine bağlı olarak değişebilmektedir (Kapsiotis, 2013; Akmaz vd., 2025; Su vd., 2026).

Nodüler doku, podiform kromititler için karakteristik dokulardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu dokuda yuvarlak, elipsoidal veya düzensiz şekilli kromit kümeleri, çoğunlukla olivin bakımından zengin bir silikat matris içerisinde yer almaktadır. Nodüler yapıların oluşumu konusunda farklı modeller önerilmiş olmakla birlikte, güncel mikroyapısal çalışmalar bu dokuların magmatik akış, krom spinel tanelerinin kümelenmesi, eriyik damlacıkları, plastik deformasyon veya farklı yönelimli küçük spinel tanelerinin birleşmesiyle ilişkili olabileceğini göstermektedir (Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024).

Bantlı doku, krom spinel ve silikat minerallerinin belirli oranlarda araldanmasıyla gelişen bir cevher dokusudur. Bu doku özellikle manto-kabuk geçiş zonuna yakın seviyelerde, kanalize eriyik akışının etkili olduğu alanlarda veya deformasyonun belirgin olduğu zonlarda gözlenebilir. Bantlı kromititler, yer yer stratiform yataklara benzer bir görünüm sunsa da ofiyolitik podiform sistemlerde çoğunlukla yerel magmatik akış, eriyik-kayaç etkileşimi, deformasyon ve yapısal kontrol süreçleriyle birlikte değerlendirilmelidir (Arai, 2021; Rassios vd., 2020; Su vd., 2026). Podiform kromititlerde yaygın olarak tanımlanan masif, saçınımlı, bantlı ve nodüler cevher dokuları ile kromitit-dünit/serpantinit ilişkileri Şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir.

*Şekil 4. Kromitit cevher dokularının şematik gösterimi. Şekil saha fotoğrafı değildir; podiform kromititlerde yaygın olarak tanımlanan masif, saçınımlı, bantlı ve nodüler dokular ile kromitit-dünit/serpantinit ilişkilerini kavramsal olarak göstermek amacıyla hazırlanmıştır.*



Podiform kromititlerde ayrıca pull-apart dokuları, kataklastik parçalanma, kırık dolguları, tane sınırı boyunca ferritkromit gelişimi ve serpantinleşmeye bağlı ikincil dokular da gözlenebilmektedir. Bu tür dokular, cevher kütlelerinin yalnızca magmatik oluşum süreçlerini değil, aynı zamanda yerleşim sonrası deformasyon, düşük dereceli metamorfizma ve hidrotermal alterasyon etkilerini de yansıtabilir. Bu nedenle kromitit dokularının yorumlanmasında birincil magmatik dokular ile ikincil deformasyon/alterasyon dokularının ayırt edilmesi önemlidir (Kapsiotis, 2013; Rassios vd., 2020; Zaccarini vd., 2024).

## Temel Jeokimyasal Parametreler: Cr#, Mg# ve TiO<sub>2</sub> İçeriği

Krom spinelin kimyasal bileşimi, ofiyolitik kromititlerin oluştuğu eriyik bileşimi, manto kaynağının tüketilmişlik derecesi, kısmi ergime oranı ve tektonik ortam koşullarının yorumlanmasında yaygın olarak kullanılan petrojenetik göstergelerden biridir. Bu nedenle kromititlerin jeokimyasal değerlendirilmesinde özellikle Cr#, Mg#, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikleri birlikte ele alınmalıdır (Arai, 1994; Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024; Su vd., 2026).

Cr#, krom numarası olarak tanımlanmakta olup atomik olarak Cr/(Cr+Al) oranıyla ifade edilir. Bu oran, krom spinelin Cr-Al bileşimini yansıtır ve çoğunlukla manto kaynağının tüketilmişlik derecesi ile ilişkilendirilir. Genel olarak yüksek Cr# değerleri, yüksek dereceli kısmi ergimeye uğramış ve tüketilmiş manto kaynaklarını; düşük Cr# değerleri ise daha az tüketilmiş veya Al bakımından daha zengin manto bileşimlerini işaret edebilir. Bu çerçevede Cr# > 0.60 olan kromititler çoğunlukla yüksek kromlu High-Cr tip kromititlerle, Cr# < 0.60 olanlar ise daha alüminyumca zengin High-Al tip kromititlerle ilişkilendirilmektedir (Arai, 1994; Kapsiotis, 2013; Üner, 2021; Su vd., 2026). Bununla birlikte, bu eşik değerler mutlak sınıflama ölçütü olarak değil, petrojenetik yorumda kullanılan yaklaşık göstergeler olarak değerlendirilmelidir.

Mg#, magnezyum numarası olarak tanımlanmakta olup atomik olarak Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>) oranıyla ifade edilir. Bu oran, krom spinelin Mg-Fe<sup>2+</sup> bileşimini yansıtır ve kristallenme koşulları, eriyik bileşimi, oksijen fugasitesi ve sonraki alterasyon etkileri hakkında bilgi sağlayabilir. Birçok podiform kromititte Cr# ile Mg# arasında ters yönlü bir ilişki gözlemlenmektedir; bu durum, manto kaynağının tüketilmişlik derecesi, eriyik-kayaç etkileşimi ve kristallenme koşullarıyla ilişkilendirilmektedir. Ancak Mg# değeri, özellikle ferritkromit gelişimi, serpantinleşme ve düşük dereceli hidrotermal

alterasyon süreçlerinden etkilenebileceğinden, tek başına kesin petrogenetik yorum için yeterli değildir (Kapsiotis, 2013; Zaccarini vd., 2024; Su vd., 2026).

TiO<sub>2</sub> içeriği, krom spinelin oluştuğu eriyik karakteri ve tektonik ortamın yorumlanmasında kullanılan bir diğer önemli parametredir. Genel olarak düşük TiO<sub>2</sub> içerikleri, dalma-batma zonu üstü ortamlarla ilişkili, yüksek derecede tüketilmiş manto kaynaklarından türeyen krom spinellerde yaygın olarak görülmektedir. Buna karşılık daha yüksek TiO<sub>2</sub> değerleri, okyanus ortası sırtı benzeri ortamlar veya daha bazaltik eriyik karakterleriyle ilişkilendirilebilmektedir (Arai, 1994; Kapsiotis, 2013; Arai, 2021; Su vd., 2026). Bununla birlikte, TiO<sub>2</sub> içeriği de tek başına kesin bir tektonik ortam göstergesi olarak kullanılmamalı; Cr#, Mg#, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, iz element verileri, petrografik doku ve saha ilişkileriyle birlikte değerlendirilmelidir.

Türkiye'deki ofiyolitik kromitlerde de krom spinel kimyası, yatakların petrogenetik yorumunda önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Guleman, Pozantı-Karsantı, Kızıldağ, Muğla-Köyceğiz ve Elekdağ gibi sahalardan elde edilen veriler, Cr#, Mg#, TiO<sub>2</sub> ve PGE dağılımlarının; manto kaynağının tüketilmişlik derecesi, eriyik-kayaç etkileşimi ve SSZ ilişkili tektonik ortam yorumları açısından anlamlı göstergeler sunduğunu ortaya koymaktadır (Uysal vd., 2009; Dönmez vd., 2014; Avcı vd., 2017; Uysal vd., 2018; Liu vd., 2019; Chen vd., 2019; Xiong vd., 2022; Akmaz vd., 2025).

Bu nedenle krom spinel jeokimyası, podiform kromit yataklarının cevher karakterinin ve oluşum ortamının yorumlanmasında temel bir araçtır. Ancak güvenilir bir yorum için kimyasal verilerin alterasyon durumu, mineral dokusu, cevher tipi, ev sahibi kayaç ilişkileri ve bölgesel tektonik bağlamla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Krom spinel kimyasına ek olarak, bazı ofiyolitik kromititlerde platin grubu elementler de petrogenetik yorumları destekleyen tamamlayıcı veriler sunmaktadır. Özellikle Os, Ir ve Ru gibi IPGE elementlerinde gözlenen görece zenginleşmeler, manto kaynağı, kısmi ergime derecesi, eriyik-kayaç etkileşimi ve sülfür doygunluğu gibi süreçlerin yorumlanmasına katkı sağlayabilir; ancak PGE zenginleşmesi tüm kromit yataklarında ekonomik düzeyde gelişmediğinden, bu veriler çoğunlukla yan ürün potansiyelinden çok petrogenetik gösterge olarak değerlendirilmelidir (Uysal vd., 2007; Uysal vd., 2009; Dönmez vd., 2014; Zaccarini vd., 2024; Akmaz vd., 2025).

### **Alterasyon ve İkincil Etkiler: Serpantinleşme ve Ferritkromit Oluşumu**

Ofiyolitik kromititler ve onları çevreleyen ultramafik kayalar, çoğu zaman serpantinleşme, düşük dereceli metamorfizma ve hidrotermal alterasyon süreçlerinden etkilenmektedir. Bu süreçler, krom spinelin birincil magmatik bileşimini, optik özelliklerini ve tane kenarı kimyasını kısmen değiştirebilir. Özellikle kromit tanelerinin kenarlarında gelişen Fe bakımından zengin opak zonlar, literatürde çoğunlukla ferritkromit veya altere kromit kenarları olarak tanımlanmaktadır (Kapsiotis, 2013; Zaccarini vd., 2024; Su vd., 2026).

Ferritkromit oluşumu, krom spinelin birincil kimyasal bileşimini maskeleyebilen önemli bir ikincil süreçtir. Bu süreçte kromit tanelerinin kenarlarında genellikle Fe artışı, Mg ve Al azalması, yer yer Cr ve Fe<sup>3+</sup> zenginleşmesi gibi kimyasal değişimler gelişebilir. Bu nedenle krom spinel kimyasından petrogenetik yorum yapılırken mümkün olduğunca alterasyondan daha az etkilenmiş kristal çekirdeklerinin analiz edilmesi önemlidir. Özellikle tane kenarlarından veya çatlak zonlarından elde edilen veriler, birincil magmatik koşullardan çok serpantinleşme, hidrotermal alterasyon

veya düşük dereceli metamorfizma süreçlerini yansıtabilir (Kapsiotis, 2013; Zaccarini vd., 2024).

Serpantinleşme yalnızca krom spineli değil, kromitleri çevreleyen olivin ve piroksenleri de etkileyen yaygın bir alterasyon sürecidir. Olivin ve piroksenlerin serpantin grubu minerallere dönüşmesi, kayaç dokusunu, mineral birlikteliğini ve element hareketliliğini değiştirebilir. Bu süreçte manyetit, brüsit, talk, klorit veya karbonat mineralleri gibi ikincil fazlar da gelişebilir. Dolayısıyla serpantinleşmiş ultramafik kayaçlarda gözlenen mineral toplulukları, hem birincil manto mineralojisinin hem de sonraki akışkan-kayaç etkileşimi süreçlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirir (Arai, 2021; Su vd., 2026; Zaccarini vd., 2024).

Kromitlerin petrografik değerlendirmesinde birincil magmatik dokular ile ikincil alterasyon ve deformasyon dokularının ayırt edilmesi kritik öneme sahiptir. Masif, saçınımlı, bantlı veya nodüler kromit dokuları cevherleşmenin magmatik gelişimini yansıtabilirken; ferritkromit kenarları, serpantinleşmiş silikat matris, çatlak dolguları ve opak mineral yeniden dengelenmeleri daha sonraki alterasyon süreçlerinin göstergesi olabilir. Bu nedenle kromitlerin mineral kimyası yorumlanırken tane çekirdeği-kenar ilişkileri, alterasyon derecesi, silikat matrisin durumu ve saha ilişkileri birlikte dikkate alınmalıdır (Kapsiotis, 2013; Rassios vd., 2020; Zaccarini vd., 2024; Su vd., 2026).

Türkiye'deki ofiyolitik kromitlerde de serpantinleşme, ferritkromit gelişimi ve krom spinel bileşimindeki ikincil değişimler, petrografik ve jeokimyasal yorumlarda dikkate alınması gereken başlıca unsurlar arasında yer almaktadır. Guleman, Pozantı-Karsantı, Muğla-Köyceğiz ve Elekdağ gibi sahalarda yapılan çalışmalar, kromitlerin birincil magmatik özelliklerinin yanı sıra alterasyon, deformasyon ve yerel tektonik süreçlerden de etkilenebildiğini

göstermektedir (Uysal vd., 2009; Dönmez vd., 2014; Avcı vd., 2017; Uysal vd., 2018; Xiong vd., 2022; Akmaz vd., 2025).

### **Türkiye Ofiyolitleri Açısından Değerlendirme**

Türkiye, Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde yer alması ve Neotetis Okyanusu'nun kapanma süreçleriyle ilişkili geniş ofiyolitik birlikler içermesi nedeniyle podiform kromit yatakları açısından önemli bir bölgesel örnek alan sunmaktadır. Ülke genelinde farklı yaş, tektonik konum ve petrojenetik özelliklere sahip çok sayıda ofiyolitik masif bulunmaktadır; bu masifler içinde gelişen kromit cevherleşmeleri Türkiye'nin metalojenik çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Başlıca kromit sahaları genel olarak Guleman-Elazığ, Sivas-Erzincan-Kop Dağları, Fethiye-Köyceğiz-Denizli, Mersin-Adana-Kayseri, Bursa-Kütahya-Eskişehir ve İskenderun-Gaziantep çevresinde yoğunlaşmaktadır (Engin vd., 1986; Akmaz vd., 2025).

Türkiye'deki ofiyolitik kromit yatakları; buldukları tektonik kuşak, ev sahibi ultramafik kayaçların özellikleri, manto peridotitlerinin tüketilmişlik derecesi, krom spinel kimyası, cevher dokusu, PGE potansiyeli ve yapısal kontrol unsurları bakımından belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle Türkiye ofiyolitleri, yalnızca rezerv büyüklüğü veya cevher tenörü açısından değil, aynı zamanda podiform kromit yataklarının oluşum mekanizmaları, jeokimyasal karakteri ve tektonik ortam yorumları açısından da karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir (Uysal vd., 2009; Avcı vd., 2017; Uysal vd., 2018; Liu vd., 2019; Chen vd., 2019; Xiong vd., 2022; Akmaz vd., 2025).

Bu bölümde Türkiye ofiyolitleri; üretim ve rezerv açısından öne çıkan bölgeler, cevher kalitesi ve krom spinel kimyası, tektonik ortam farklılıkları, PGE potansiyeli ve başlıca kromit sahalarının karşılaştırmalı özellikleri üzerinden değerlendirilmektedir. Böylece Türkiye'deki kromit yataklarının yalnızca ekonomik önemleri değil,

aynı zamanda ofiyolitik manto süreçleri ve Neotetis'in tektonomagmatik evrimi açısından taşıdıkları bilimsel değer de ortaya konulmaktadır.

## **Rezerv Büyüklüğü ve Üretim Açısından Öne Çıkan Bölgeler**

Türkiye'de ofiyolitik kromit yatakları içerisinde Guleman Ofiyoliti (Elazığ), tarihsel üretim, cevher sürekliliği ve yüksek tenörlü kromitit kütleleri açısından en dikkat çekici alanlardan biridir. Guleman çevresindeki kromit yatakları, masif ve podiform cevher kütleleriyle Türkiye krom madenciliğinde önemli bir yere sahiptir (Engin vd., 1986; Uysal vd., 2018; Akmaz vd., 2025). Özellikle Gölalan gibi sahalar, podiform kromit yataklarının yerel ölçekte büyük ve ekonomik olarak anlamlı cevher kütleleri oluşturabileceğini göstermesi bakımından önem taşımaktadır.

Pozantı-Karsantı ve Kızıldağ ofiyolitleri, Türkiye'nin güney kuşağında kromit mineralizasyonu açısından öne çıkan diğer önemli alanlardır. Pozantı-Karsantı bölgesinde kromititler, çoğunlukla harzburjitik manto peridotitleri, dünitik zonlar ve manto-kabuk geçiş zonuna yakın ultramafik kayalarla ilişkili olarak değerlendirilmektedir. Bu bölgedeki kromititler, cevher dokusu, krom spinel bileşimi ve tektonik ortam yorumları açısından Türkiye ofiyolitik kromit literatüründe sıkça tartışılan örnekler arasında yer almaktadır (Avcı vd., 2017; Liu vd., 2019; Akmaz vd., 2025). Kızıldağ Ofiyoliti ise yüksek Cr içerikli podiform kromititleri ve dalma-batma başlangıcıyla ilişkili tektonomagmatik yorumları nedeniyle dikkat çekmektedir (Chen vd., 2019).

Sivas-Erzincan-Kop Dağları kuşağı, geniş ultramafik kayalar yüzeylenmeleri ve harzburjitik manto tektonitleri içerisinde gelişen kromitit kütleleriyle Türkiye'nin önemli kromit bölgelerinden biridir. Bu kuşakta masif, bantlı ve saçınımlı cevher dokuları gözlenebilmekte; cevherleşmeler çoğunlukla harzburjitic-dünit ilişkisi, yapısal kontrol ve manto peridotitlerinin tüketilmişlik

derecesiyle bağlantılı olarak değerlendirilmektedir (Engin vd., 1986; Akmaz vd., 2025).

Muğla-Köyceğiz ve Fethiye-Köyceğiz-Denizli çevresi, Türkiye'nin güneybatısında ofiyolitik kromit yatakları açısından önemli bir diğer alanı temsil etmektedir. Bu bölgedeki kromititler, yalnızca üretim ve cevher potansiyeli açısından değil, aynı zamanda Al- ve Cr-zengin kromititlerin petrojenezi, PGE mineralleri, krom spinel kimyası ve yüksek basınç evrimi gibi konular açısından da literatürde dikkat çekmektedir (Uysal vd., 2009; Xiong vd., 2022).

Bursa-Harmancık, Kütahya ve Eskişehir çevresi ise Kuzeybatı ve İç Anadolu ofiyolitikleri içinde tarihsel üretim ve cevher dokusu çeşitliliği açısından öne çıkan alanlardır. Özellikle Bursa-Harmancık çevresinde gözlenen bantlı veya stratiform benzeri kromitit dokuları, klasik podiform morfolojilerin yanında yerel magmatik, yapısal ve deformasyon süreçlerinin de kromitit gelişiminde etkili olabileceğini göstermektedir (Su vd., 2026). Eskişehir ve çevresindeki bazı kromititler ise yer yer PGE potansiyeli ve değişken krom spinel bileşimi açısından değerlendirilmiştir (Akmaz vd., 2025).

Genel olarak değerlendirildiğinde, Türkiye'de rezerv büyüklüğü ve tarihsel üretim açısından Guleman, Pozantı-Karsantı, Kızıldağ, Muğla-Köyceğiz, Bursa-Harmancık ve Kop Dağları gibi sahalar öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, bu sahaların her biri farklı tektonik konum, manto kaynağı, cevher dokusu ve krom spinel kimyası özellikleri sunmaktadır. Bu nedenle Türkiye ofiyolitik kromit yataklarının değerlendirilmesinde yalnızca üretim miktarı veya rezerv büyüklüğü değil, yatakların petrogenetik ve tektonomagmatik özellikleri de birlikte dikkate alınmalıdır.

## Cevher Kalitesi ve Krom Spinel Kimyası

Türkiye'deki ofiyolitik kromit yatakları, krom spinel kimyası ve cevher kalitesi açısından belirgin farklılıklar göstermektedir. Birçok yatakta yüksek Cr# değerleriyle karakterize edilen High-Cr tip kromititler gözlenmekte; bu tür cevherler yüksek Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ve uygun Cr/Fe oranları nedeniyle metalürjik kullanım açısından önem taşımaktadır. Guleman, Kızıldağ, Pozantı-Karsantı ve Muğla-Köyceğiz çevresindeki bazı kromit yatakları, Türkiye'de yüksek kromlu podiform kromititlere örnek olarak değerlendirilmektedir (Uysal vd., 2009; Avcı vd., 2017; Uysal vd., 2018; Chen vd., 2019; Xiong vd., 2022; Akmaz vd., 2025).

Krom spinel kimyası, Türkiye ofiyolitlerindeki kromit yataklarının oluşum ortamının, manto kaynağının tüketilmişlik derecesinin ve cevher karakterinin yorumlanmasında temel göstergelerden biridir. Genel olarak yüksek Cr#, düşük TiO<sub>2</sub> ve uygun Mg# değerleri, dalma-batma zonu üstü ortamlarla ilişkili, yüksek derecede tüketilmiş manto kaynaklarını işaret edebilmektedir. Bununla birlikte, krom spinel bileşimi yalnızca birincil magmatik süreçleri değil; serpantinleşme, ferritkromit gelişimi, hidrotermal alterasyon ve düşük dereceli metamorfizma gibi ikincil süreçleri de kısmen yansıtabileceğinden, her yatak kendi jeolojik bağlamı içinde değerlendirilmelidir (Kapsiotis, 2013; Zaccarini vd., 2024; Su vd., 2026).

Guleman kromititleri, yüksek kromlu podiform cevherleşmeler ve dalma-batma başlangıcıyla ilişkili manto evrimi açısından Türkiye'de öne çıkan örnekler arasında yer almaktadır (Uysal vd., 2018). Pozantı-Karsantı kromititleri ise farklı krom spinel popülasyonlarının varlığı, değişken Cr#-Mg# ilişkileri ve boninitik ya da boninit benzeri eriyiklerle ilişkili yorumları nedeniyle karmaşık bir manto evrimine işaret edebilmektedir (Avcı vd., 2017; Liu vd., 2019). Kızıldağ kromititleri de yüksek Cr#

değerleri ve dalma-batma başlangıcı/SSZ ilişkili tektonomagmatik yorumlarıyla dikkat çekmektedir (Chen vd., 2019).

Muğla ve Köyceğiz çevresindeki kromitler, yalnızca yüksek kromlu cevherleşmeler açısından değil, aynı zamanda High-Cr ve High-Al kromitlerin karşılaştırmalı petrojenezi, PGE mineralleri ve yüksek basınç evrimi tartışmaları açısından da önem taşımaktadır (Uysal vd., 2009; Xiong vd., 2022). Bu durum, Türkiye ofiyolitlerinde kromit yataklarının tek tip bir kimyasal karakter sunmadığını; aksine manto kaynağı, eriyik bileşimi, tektonik ortam ve ikincil alterasyon süreçlerine bağlı olarak bölgesel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Türkiye'deki ofiyolitik kromit yataklarında cevher kalitesi yalnızca  $Cr_2O_3$  içeriği veya Cr/Fe oranı üzerinden değerlendirilmemelidir. Cr#, Mg#,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , FeO, alterasyon derecesi, cevher dokusu ve ev sahibi ultramafik kayaç ilişkileri birlikte ele alındığında, hem cevher karakteri hem de yatakların petrogenetik gelişimi daha sağlıklı biçimde yorumlanabilir.

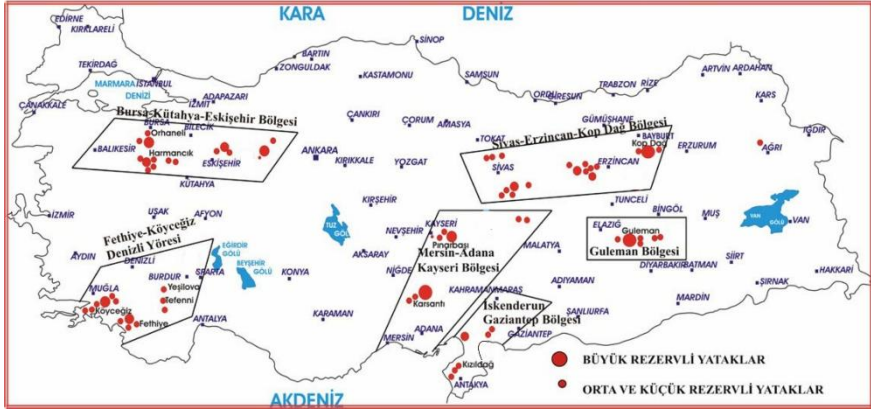
### **Tektonik Ortam ve Ofiyolitik Kuşakların Karşılaştırılması**

Türkiye ofiyolitleri, Neotetis Okyanusu'nun farklı kollarının kapanmasıyla ilişkili olarak gelişmiş çeşitli tektonik kuşaklar içerisinde yer almaktadır. Bu nedenle Türkiye'deki kromit yataklarının karakteri yalnızca yerel kayaç bileşimiyle değil; aynı zamanda ofiyolitik masiflerin tektonik konumu, manto kaynağının tüketilmişlik derecesi, eriyik-kayaç etkileşimi, krom spinel kimyası ve bölgesel tektonomagmatik evrimle birlikte değerlendirilmelidir. Türkiye'deki başlıca krom yataklarının bölgesel dağılımı Şekil 5'te gösterilmiştir.

Güney ve Güneydoğu Anadolu ofiyolitleri, özellikle Guleman, Kızıldağ ve Pozantı-Karsantı gibi alanlarda yüksek Cr içerikli podiform kromit yataklarıyla temsil edilmektedir. Bu

yataklar çoğunlukla dalma-batma zonu üstü (SSZ) ortamlarla ilişkilendirilmekte ve boninitik veya boninit benzeri eriyiklerin yüksek derecede tüketilmiş harzburjitik manto ile etkileşimi sonucunda gelişmiş olabileceği düşünülmektedir. Guleman kromititleri, dalma-batma başlangıcıyla ilişkili manto evrimi açısından; Pozanti-Karsantı ve Kızıldağ kromititleri ise SSZ ortamı,

*Şekil 5. Türkiye krom yataklarının genel dağılım haritası. Harita, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan Türkiye Krom Yatakları haritasından alınmıştır. Noktalar ve alanlar başlıca kromit yataklarının yaklaşık bölgesel konumlarını temsil etmektedir.*



**Kaynak:** MTA (2022).

boninitik eriyik karakteri ve yüksek Cr# değerleri bakımından öne çıkan örnekler arasında değerlendirilmektedir (Avcı vd., 2017; Uysal vd., 2018; Liu vd., 2019; Chen vd., 2019; Su vd., 2026).

Orta Anadolu ve Kuzeybatı Anadolu ofiyolitleri ise daha değişken karakterli kromititler içerebilmektedir. Bursa-Harmancık, Kütahya, Eskişehir ve çevresindeki kromit yatakları, yer yer manto-kabuk geçiş zonuna yakın seviyelerde gelişen bantlı veya stratiform benzeri dokularla dikkat çekmektedir. Bu tür yataklar, klasik

podiform kromit modeliyle birlikte yerel magmatik akış, yapısal kontrol, deformasyon ve eriyik-kayaç etkileşimi süreçleri dikkate alınarak değerlendirilmelidir (Akmaz vd., 2025; Su vd., 2026).

Muğla-Köyceğiz ve Fethiye-Köyceğiz-Denizli çevresi, Türkiye'nin güneybatısında podiform kromit yataklarının farklı petrogenetik özellikler sunduğu alanlardan biridir. Bu bölgelerdeki kromititler, High-Cr ve High-Al kromititlerin karşılaştırılması, PGE mineralleri, krom spinel kimyası ve yüksek basınç evrimi gibi konular açısından önem taşımaktadır. Bu özellikler, Güneybatı Anadolu ofiyolitlerinin yalnızca cevher potansiyeli açısından değil, aynı zamanda manto süreçlerinin ve Neotetis'in tektonomagmatik evriminin yorumlanması açısından da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Uysal vd., 2009; Xiong vd., 2022).

Konya ve çevresindeki bazı ofiyolitik alanlar ise kromit mineralizasyonunun daha sınırlı veya daha değişken karakterde geliştiği alanlar olarak değerlendirilebilir. Bu bölgelerde kromit mineralizasyonu çoğunlukla serpantinleşmiş ultramafik kayalar içinde saçınımlı kromitler, plaserleşmiş krom spinel birikimleri veya düşük tenörlü zenginleşmeler şeklinde gözlenebilmektedir. Bu durum, Türkiye ofiyolitlerinde kromit potansiyelinin bölgesel tektonik ortam, ultramafik kayaç bileşimi ve ikincil zenginleşme süreçlerine bağlı olarak değişebildiğini göstermektedir (Daş vd., 2012).

Türkiye ofiyolitleri üzerine yapılan bölgesel petrografik ve jeokimyasal çalışmalar, kromit yataklarının değerlendirilmesinde yalnızca doğrudan cevher kütlelerinin değil, cevherleşmenin içinde geliştiği harzburjitik manto tektonitlerinin, dünitik zonların, ultramafik kayaç birlikteliklerinin ve krom spinel içeren mineral topluluklarının da dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Eldivan, Beyşehir-Hoyran, Guleman, Pozantı-Karsantı, Kızıldağ, Muğla-Köyceğiz ve diğer ofiyolitik alanlardan elde edilen veriler,

Türkiye'deki podiform kromit yataklarının genel olarak benzer manto süreçleriyle ilişkili olmakla birlikte; yerel eriyik-kayaç etkileşimi, kısmi ergime derecesi, manto kaynağı ve tektonik ortam farklılıklarına bağlı olarak çeşitlendiğini göstermektedir (Engin vd., 1986; Üner ve Çakır, 2011; Avcı vd., 2017; Üner ve Aksoy, 2018; Uysal vd., 2018; Liu vd., 2019; Chen vd., 2019; Akmaz vd., 2025).

Sonuç olarak Türkiye ofiyolitleri, farklı Neotetis kollarına ait tektonik birlikler içerisinde gelişmiş olmaları nedeniyle, podiform kromit yataklarının tektonik ortam, manto evrimi ve krom spinel kimyası açısından karşılaştırmalı olarak incelenebileceği önemli bir doğal laboratuvar niteliğindedir. Güney ve Güneydoğu Anadolu ofiyolitleri daha çok yüksek Cr içerikli ve SSZ ilişkili kromitlerle öne çıkarken; Orta, Kuzeybatı ve Güneybatı Anadolu ofiyolitleri daha değişken cevher dokuları, krom spinel bileşimleri ve yer yer PGE potansiyelleriyle dikkat çekmektedir.

### **PGE Potansiyeli ve Yan Ürün Değeri**

Türkiye'deki bazı ofiyolitik kromitler, yalnızca Cr içeriği açısından değil, platin grubu elementler bakımından da değerlendirme potansiyeline sahiptir. Özellikle Os, Ir ve Ru gibi IPGE elementlerinde gözlenen görece zenginleşmeler, kromitlerin manto kaynağı, kısmi ergime derecesi, eriyik-kayaç etkileşimi ve sülfür doygunluğu gibi süreçlerin yorumlanmasına katkı sağlayabilmektedir (Uysal vd., 2007; Uysal vd., 2009; Dönmez vd., 2014; Akmaz vd., 2025).

Muğla, Kahramanmaraş, Elekdağ, Kop Dağları, Eskişehir ve bazı Orta Anadolu ofiyolitlerinde rapor edilen PGE verileri, Türkiye'deki ofiyolitik kromitlerin petrojenetik açıdan karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, PGE zenginleşmesi her kromit yatağında ekonomik düzeyde gelişmez. Bu nedenle PGE verileri, öncelikle kromitlerin manto evrimi, eriyik bileşimi ve tektonik ortam

koşullarını yorumlamaya yardımcı olan tamamlayıcı jeokimyasal göstergeler olarak ele alınmalı; ekonomik yan ürün potansiyeli ise tenör, rezerv, mineral fazı, işletilebilirlik ve metal kazanım verileriyle birlikte değerlendirilmelidir (Uysal vd., 2007; Uysal vd., 2009; Dönmez vd., 2014; Zaccarini vd., 2024; Akmaz vd., 2025).

### **Türkiye Ofiyolitik Kromit Yataklarının Karşılaştırmalı Özeti**

Türkiye'deki ofiyolitik kromit yatakları, tektonik konum, ev sahibi ultramafik kayaç türü, krom spinel kimyası, cevher dokusu, PGE potansiyeli ve manto kaynağının tüketilmişlik derecesi bakımından belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, Türkiye ofiyolitlerinin yalnızca ekonomik kromit potansiyeli açısından değil, aynı zamanda podiform kromit yataklarının oluşum süreçlerini ve Neotetis'in tektonomagmatik evrimini anlamak açısından da önemli veriler sunduğunu göstermektedir.

Aşağıdaki tablo, Türkiye'deki başlıca ofiyolitik kromit sahalarının genel özelliklerini karşılaştırmalı olarak özetlemektedir. Tablo, kesin rezerv veya tenör verisi sunmaktan ziyade, literatürde öne çıkan jeolojik, petrografik ve jeokimyasal özellikleri genel hatlarıyla göstermeyi amaçlamaktadır. Veriler Engin vd. (1986), Uysal vd. (2009), Dönmez vd. (2014), Avcı vd. (2017), Uysal vd. (2018), Liu vd. (2019), Chen vd. (2019), Xiong vd. (2022), Su vd. (2026) ve Akmaz vd. (2025) çalışmalarından derlenmiştir.

Ofiyolit / Bölge	Hakim cevher tipi	Genel krom spinel karakteri	Tektonik ortam yorumu	Öne çıkan özellik
Guleman (Elazığ)	Masif / podiform	Genellikle High-Cr eğilimli	SSZ / yay-önü ilişkili	Tarihsel üretim, yüksek Cr içerikli podiform cevherleşmeler
Kızıldağ (Hatay)	Podiform	Yüksek Cr# değerleri	Forearc / SSZ	Boninitik veya boninit benzeri eriyiklerle ilişkili yorumlar

Ofiyolit / Bölge	Hakim cevher tipi	Genel krom spinel karakteri	Tektonik ortam yorumu	Öne çıkan özellik
Pozantı-Karsantı	Masif / saçınımlı	Değişken; High-Cr ve daha düşük Cr# popülasyonları	SSZ / manto kaması	Karmaşık manto evrimi, farklı krom spinel popülasyonları
Muğla-Köyceğiz	Podiform / masif	High-Cr ve High-Al tipleri içerebilir	SSZ ilişkili / karma petrojenetik evrim	PGE mineralleri, krom spinel kimyası ve yüksek basınç evrimi açısından önemli
Bursa-Harmancık	Bantlı / podiform	Değişken	MTZ / ofiyolitik geçiş zonu	Bantlı ve stratiform benzeri dokular
Kop Dağları / Sivas-Erzincan	Masif / bantlı / saçınımlı	Değişken	SSZ ilişkili yorumlanabilir	Geniş ultramafik yüzeylenmeler, yapısal kontrollü cevherleşmeler
Elekdağ (Kastamonu)	Podiform / saçınımlı	Değişken	SSZ ilişkili	PGE jeokimyası ve kuzey Türkiye ofiyolitleri açısından karşılaştırmalı veri
Konya çevresi	Saçınımlı / plaserleşmiş krom spinel	Değişken	MORB/IAT veya karma ofiyolitik karakter	Düşük tenörlü veya ikincil zenginleşmeler

Genel olarak Türkiye'deki ofiyolitik kromit yatakları, tektonik konum ve manto kaynağının evrimine bağlı olarak farklı petrografik ve jeokimyasal özellikler sunmaktadır. Güney ve Güneydoğu Anadolu ofiyolitleri, yüksek Cr içerikli podiform kromitler ve SSZ ilişkili oluşum modelleri açısından öne çıkarken; Kuzeybatı, İç Anadolu ve Güneybatı Anadolu ofiyolitleri daha değişken cevher dokuları, krom spinel bileşimleri ve yer yer PGE potansiyelleriyle dikkat çekmektedir. Bu nedenle Türkiye ofiyolitleri, podiform kromit yataklarının oluşum mekanizmalarının, krom spinel jeokimyasının ve Neotetis'in tektonomagmatik

evriminin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi açısından önemli bir doğal laboratuvar niteliğindedir.

## SONUÇ

Ofiyolitik kuşaklarda gözlenen podiform kromit yatakları, hem kromun başlıca ekonomik kaynağı olmaları hem de üst manto süreçlerinin anlaşılmasında önemli jeolojik kayıtlar sunmaları nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu yataklar, manto peridotitleri içerisinde gelişen kısmi ergime, eriyik-kayaç etkileşimi, kanalize eriyik taşınımı, magma karışımı, akışkan katkısı ve tektonik ortam koşullarının birlikte etkilediği karmaşık cevherleşme sistemleri olarak değerlendirilmektedir (Arai, 2021; Zaccarini vd., 2024; Akmaz vd., 2025; Su vd., 2026).

Podiform kromit yataklarının oluşumunda harzburjit-dünit-kromitit ilişkisi temel bir saha ve petrogenetik gösterge niteliğindedir. Kromitit kütlelerinin çoğu kez harzburjitik manto tektonitleri içerisinde yer alması ve dünitik zarflarla çevrenmesi, cevherleşmenin manto içerisindeki eriyik-kayaç etkileşimi ve kanalize eriyik taşınımı süreçleriyle yakından ilişkili olduğunu göstermektedir (Robinson vd., 1997; Arai, 2021; Su vd., 2026). Bu nedenle ev sahibi ultramafik kayaların petrografik, dokusal ve mineralojik özellikleri, kromit oluşum modellerinin kurulmasında temel veriler sağlamaktadır.

Krom spinel kimyası, podiform kromit yataklarının oluşum ortamının yorumlanmasında en yaygın kullanılan araçlardan biridir. Özellikle Cr#, Mg# ve TiO<sub>2</sub> içerikleri; manto kaynağının tüketilmişlik derecesi, eriyik bileşimi ve tektonik ortam koşulları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Arai, 1994; Kapsiotis, 2013; Zaccarini vd., 2024; Su vd., 2026). Bununla birlikte, bu parametrelerin tek başına kesin sonuç vermediği; petrografik gözlemler, alterasyon durumu, iz element verileri, PGE dağılımı ve

saha ilişkileriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmalıdır.

Türkiye, Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde yer alması ve Neotetis Okyanusu'nun kapanma süreçleriyle ilişkili geniş ofiyolitik birlikler içermesi nedeniyle podiform kromit yatakları açısından önemli bir bölgesel örnek alan sunmaktadır. Guleman, Pozantı-Karsantı, Kızıldağ, Muğla-Köyceğiz, Bursa-Harmancık, Kop Dağları, Eskişehir ve Elekdağ gibi sahalar; cevher dokusu, krom spinel kimyası, tektonik ortam yorumu ve PGE potansiyeli bakımından farklı özellikler göstermektedir (Engin vd., 1986; Uysal vd., 2009; Dönmez vd., 2014; Avcı vd., 2017; Uysal vd., 2018; Liu vd., 2019; Chen vd., 2019; Xiong vd., 2022; Akmaz vd., 2025).

Türkiye ofiyolitleri üzerine yapılan bölgesel petrografik ve jeokimyasal çalışmalar, kromit yataklarının değerlendirilmesinde yalnızca cevher kütlelerinin değil, cevherleşmenin içinde geliştiği harzburjitik manto tektonitlerinin, dünitik zonların ve ultramafik kayaç birlikteliklerinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda Eldivan, Beyşehir-Hoyran, Guleman, Pozantı-Karsantı, Kızıldağ, Muğla-Köyceğiz ve diğer ofiyolitik alanlardan elde edilen veriler, Türkiye'deki podiform kromit yataklarının benzer manto süreçleriyle ilişkili olmakla birlikte, yerel eriyik-kayaç etkileşimi, kısmi ergime derecesi ve tektonik ortam farklılıklarına bağlı olarak çeşitlendiğini ortaya koymaktadır (Avcı vd., 2017; Uysal vd., 2018; Chen vd., 2019; Akmaz vd., 2025).

Sonuç olarak, ofiyolitik kromit yatakları yalnızca stratejik hammadde kaynakları olarak değil, aynı zamanda üst manto süreçleri, ofiyolitik sistemlerin petrojenezi ve Neotetis'in tektonomagmatik evrimi açısından önemli jeolojik göstergeler olarak değerlendirilmelidir. Türkiye ofiyolitleri, yüksek Cr içerikli podiform kromititler, değişken krom spinel kimyası, farklı cevher dokuları ve yer yer PGE potansiyelleriyle bu konuda karşılaştırmalı

alışmalar için önemli bir doğal laboratuvar niteliğindedir. Bu nedenle Türkiye'deki ofiyolitik kromit yataklarının ayrıntılı petrografik, mineral kimyasal ve jeokimyasal yaklaşımlarla değerlendirilmesi hem bölgesel kromit potansiyelinin hem de ofiyolitik manto süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

## Kaynakça

Akmaz, R. M., Bilen, M., & Özarslan, A. (2025). A review of chromite residues secondary raw material potential in Türkiye. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 476–490. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.1628583>

Arai, S. (1994). Compositional variation of olivine–chromian spinel in Mg-rich magmas as a guide to their residual spinel peridotites. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59(1–2), 279–293. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90083-3)

Arai, S. (2021). Chromitites as the Cr resource and as an indicator of deep mantle recycling. *Chikyukagaku*, 55(1), 5–30. <https://doi.org/10.14934/chikyukagaku.55.5>

Avcı, E., Uysal, İ., Akmaz, R. M., & Saka, S. (2017). Ophiolitic chromitites from the Kızılyüksek area of the Pozantı-Karsantı ophiolite (Adana, southern Turkey): Implication for crystallization from a fractionated boninitic melt. *Ore Geology Reviews*, 90, 166–183. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.033>

Chen, C., Su, B.-X., Xiao, Y., Pang, K.-N., Robinson, P. T., Uysal, İ., Lin, W., Qin, K.-Z., Avcı, E., & Kapsiotis, A. (2019). Intermediate chromitite in Kızıldağ ophiolite (SE Turkey) formed during subduction initiation in Neo-Tethys. *Ore Geology Reviews*, 104, 88–100. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.10.004>

Çakır, Ü., & Üner, T. (2016). The Ankara Mélange: An indicator of Tethyan evolution of Anatolia. *Geologica Carpathica*, 67(4), 403–414. <https://doi.org/10.1515/geoca-2016-0025>

Daş, B., Arık, F., Öztürk, A., & Altay, O. (2012). Krom madenciliği ve geçmişten günümüze insanlık tarihi üzerindeki etkileri. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 1(2), 77–88.

Dilek, Y., & Furnes, H. (2011). Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3–4), 387–411. <https://doi.org/10.1130/B30446.1>

Dilek, Y., & Furnes, H. (2014). Ophiolites and their origins. *Elements*, 10(2), 93–100. <https://doi.org/10.2113/gselements.10.2.93>

Dönmez, C., Uysal, İ., Yıldırım, N., & diğerleri. (2014). Chromite and PGE geochemistry of the Elekdağ Ophiolite (Kastamonu, Northern Turkey): Implications for deep magmatic processes in a supra-subduction zone setting. *Ore Geology Reviews*, 57, 216–228. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.09.019>

Engin, T., Özkoçak, O., & Artan, Ü. (1986). General geological setting and character of chromite deposits in Turkey. In W. Petrascheck, S. Karamata, G. G. Kravchenko, J. Johan, M. Economou, & T. Engin (Eds.), *Chromites* (pp. 199–228). Theophrastus Publications, Athens.

Furnes, H., Dilek, Y., Zhao, G., Safonova, I., & Santosh, M. (2020). Geochemical characterization of ophiolites in the Alpine-Himalayan Orogenic Belt: Magmatically and tectonically diverse evolution of the Mesozoic Neotethyan oceanic crust. *Earth-Science Reviews*, 208, [103258]. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103258>

Kapsiotis, A. N. (2013). Genesis of chromitites from Korydallos, Pindos Ophiolite Complex, Greece, based on spinel chemistry and PGE-mineralogy. *Journal of Geosciences*, 58(1), 49–69.

Liu, X., Su, B.-X., Xiao, Y., Chen, C., Uysal, İ., Jing, J.-J., Zhang, P.-F., Chu, Y., Lin, W., & Asamoah Sakyi, P. (2019). Initial subduction of Neo-Tethyan ocean: Geochemical records in chromite

and mineral inclusions in the Pozanti-Karsanti ophiolite, southern Turkey. *Ore Geology Reviews*, 110, Article 102926. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.012>

Mosier, D. L., Singer, D. A., Moring, B. C., & Galloway, J. P. (2012). Podiform chromite deposits—Database and grade and tonnage models (Scientific Investigations Report 2012–5157). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/sir/2012/5157/>

Okay, A. I. (1986). High-pressure/low-temperature metamorphic rocks of Turkey. In B. W. Evans & E. H. Brown (Eds.), *Blueschists and eclogites* (Geological Society of America Memoir 164, pp. 333–348). Geological Society of America.

Rassios, A., Tzamos, E., Dilek, Y., Bussolesi, M., Grieco, G., Batsi, A., & Gamaletsos, P. N. (2020). A structural approach to the genesis of chrome ores within the Vourinos ophiolite (Greece): Significance of ductile and brittle deformation processes in the formation of economic ore bodies in oceanic upper mantle peridotites. *Ore Geology Reviews*, 125, 103684. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103684>

Robinson, P.T., Zhou, M., Malpas, J., & Bai, W. (1997). Podiform chromitites: Their composition, origin and environment of formation. *Episodes*, 20, 247-252.

Su, B.-X., Liu, X., Xiao, Y., Uysal, İ., & Pan, Q.-Q. (2026). Characterization of stratiform-like chromite deposits in ophiolites and their genetic link with podiform chromitites. *Journal of the Geological Society*, 183(3), jgs2025-180. <https://doi.org/10.1144/jgs2025-180>

Uysal, İ., Tarkian, M., Sadıklar, M. B., & Şen, C. (2007). Platinum-group-element geochemistry and mineralogy of ophiolitic chromitites from the Kop Mountains, northeastern Turkey. *The*

Canadian Mineralogist, 45(2), 355–377.  
<https://doi.org/10.2113/gscanmin.45.2.355>

Uysal, İ., Tarkian, M., Sadıklar, M. B., Zaccarini, F., Meisel, T., Garuti, G., & Heidrich, S. (2009). Petrology of Al- and Cr-rich ophiolitic chromitites from the Muğla, SW Turkey: Implications from composition of chromite, solid inclusions of platinum-group mineral, silicate, and base-metal mineral, and Os-isotope geochemistry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158, 659–674.

Uysal, İ., Kapsiotis, A., Akmaz, R. M., Saka, S., & Seitz, H. M. (2018). The Guleman ophiolitic chromitites (SE Turkey) and their link to a compositionally evolving mantle source during subduction initiation. *Ore Geology Reviews*, 93, 98–113.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.017>

Üner, T. (2020a). Multi-stage evolution of forearc mantle peridotites of Kağızman Ophiolite (Ağrı-eastern Anatolia). *Journal of African Earth Sciences*, 161, Article 103667.  
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103667>

Üner, T. (2020b). Listwaenitization and enrichment of precious metals in the hydrothermal mineralization zones of serpentinites in Sugeçer-Van (Eastern Anatolia, Turkey). *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(1), 68–79

Üner, T. (2021). Supra-subduction zone mantle peridotites in the Tethyan Ocean (East Anatolian Accretionary Complex–Eastern Turkey): Petrological evidence for melting and melt-rock interaction. *Mineralogy and Petrology*, 115(6), 663–685.

Üner, T., & Aksoy, İ. (2018). Beyşehir-Hoyran Ofiyoliti İçerisindeki Tektonitlerin Dokusal ve Jeokimyasal Özellikleri: Beyşehir (Konya) Güneyinden Bir Örnek. *Afyon Kocatepe*

Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(3), 1067-1082. <https://izlik.org/JA34FK86YK>

Üner, T., & Çakır, Ü. (2011). Mineralogical, petrographical and geochemical characteristics of Eldivan Ophiolite (Çankırı) harzburgitic tectonites. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 143, 75–94.

Üner, T., & Çakır, Ü. (2025). A deformation structure and origin of metamorphic sole rocks beneath the Eldivan and Ahlat ophiolites (Çankırı), Northern Anatolia. *Journal of Scientific Reports-A*, 062, 90-110. <https://doi.org/10.59313/jsr-a.1637292>

Üner, T., & Mutlu, S. (2019). Savatlı-Özalp Ofiyolitinde (Van-Doğu Anadolu) Gözlenen Ultramafik Kayaçlar ve İlişkili Mafik Daykların Petrolojik Özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 115-128. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.601339>

Üner, T., Çakır, Ü., Özdemir, Y., & Arat, İ. (2014). Geochemistry and origin of plagiogranites from the Eldivan Ophiolite, Çankırı (Central Anatolia, Turkey). *Geologica Carpathica*, 65(3), 195–205.

Xiong, F., Zoheir, B., Xu, X., Lenaz, D., & Yang, J. (2022). Genesis and high-pressure evolution of the Köyceğiz ophiolite (SW Turkey): Mineralogical and geochemical characteristics of podiform chromitites. *Ore Geology Reviews*, 145, Article 104912. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104912>

Zaccarini, F., Economou-Eliopoulos, M., Tsikouras, B., & Garuti, G. (2024). Chromite Composition and Platinum-Group Elements Distribution in Tethyan Chromitites of the Mediterranean Basin: An Overview. *Minerals*, 14(8), 744. <https://doi.org/10.3390/min14080744>

Zaccarini, F., Kiss, G. B., Garuti, G., Mauro, D., Economou-Eliopoulos, M., Hegedűs, M., & Biagioni, C. (2025). Methane in Fluid Inclusions in Ophiolitic Chromitites Revealed by Raman Spectroscopy: Preliminary Results. *Minerals*, 15(4), 335. <https://doi.org/10.3390/min15040335>

Zhou, M.-F., & Robinson, P. T. (1997). Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits. *Economic Geology*, 92, 259–262. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.2.259>

# KAYA KÜTLESİ KARAKTERİZASYONUNDA YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ UYGULAMALARI

MEHMET ÖZDEMİR<sup>1</sup>

## Giriş

Geleneksel kaya kütlesi sınıflandırma yöntemleri, eklem ve süreksizlik verilerinin toplanmasındaki kısıtlamalar nedeniyle karmaşık jeolojik yapıları üç boyutlu olarak temsil etmekte yetersiz kalmaktadır (Ghader vd., 2024). Buna ek olarak, deneyimli uzmanların subjektif değerlendirmelerine dayanan bu geleneksel yaklaşımlar, yüksek hata payı ve veri işleme süreçlerindeki hantallık nedeniyle mühendislik tasarımlarında optimizasyon eksikliğine yol açmaktadır. Bu bağlamda, makine öğrenmesi algoritmaları, özellikle karmaşık yeraltı projelerinde toplanan devasa verilerin daha etkin biçimde analiz edilmesine olanak tanımakta ve kaya kütlelerinin ayrıntılı biçimde incelenmesine katkı sağlamaktadır (Morgenroth vd., 2019). Özellikle sinir ağları gibi yöntemler, kaya kütlesi özelliklerinin sınıflandırılmasında tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve karot kalitesi gibi doğrudan ölçümü güç parametrelerin

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8164-8874

tahmin edilmesinde geleneksel ampirik yöntemlerden daha yüksek performans göstermektedir (Lawal & Kwon, 2020; Yu vd., 2022). Bununla birlikte, makine öğrenmesi modellerinin başarısı büyük ölçüde veri setlerinin kalitesine ve önyargısız temsil kabiliyetine dayanmakta olup, standartlaştırılmamış veri toplama uygulamaları modellerde hatalı öngörülere yol açabilmektedir (Ambah & Elmo, 2024; Yang vd., 2024). Dolayısıyla, jeoteknik uygulamalarda makine öğrenmesi algoritmalarının yaygınlaşması, güvenilir ve standartlaştırılmış veri setlerinin oluşturulmasını içeren yapısal bir yol haritasına ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, güncel hesaplama gücü ve derin öğrenme kütüphanelerinin sunduğu imkânlar, geleneksel yöntemlerin aksine bu modellerin insan müdahalesi olmaksızın karmaşık desenleri tanıyarak tahminsel analizler yapmasını mümkün kılmaktadır. Ancak, tünelcilik ve madencilik gibi sektörlerde veri setlerinin genellikle tek bir jeolojik ortama özgü olması, modellerin genel geçerliliğini sınırlayan kritik bir engel teşkil etmektedir (Marcher vd., 2021). Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, madencilik sahalarındaki heterojen jeolojik koşulları kapsayan geniş ölçekli ve kamuya açık veri setlerinin geliştirilmesi, gelecekteki akademik çalışmalar için temel bir gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, jeoteknik tasarımda derin öğrenme modellerinin güvenilirliğini artırmak için geliştirilen modellerin zorlayıcı test süreçlerinden geçirilmesi ve sahadaki uzmanların bu sistemlerin çıktılarını daha şeffaf bir şekilde yorumlayabilmesi büyük önem taşımaktadır (Azhari vd., 2023). Bu doğrultuda, derin öğrenme modellerinin sağladığı yüksek tahmin doğruluğunun yanı sıra, tünelcilik operasyonlarında güvenliği doğrudan etkileyen hata paylarının azaltılması için model yorumlanabilirliğine odaklanmak, sektörde dijital dönüşümün benimsenmesi açısından kritik bir eşik oluşturmaktadır (Sheil vd., 2020). Bununla birlikte, fiziksel prensiplerin veriye dayalı modellerle entegre edilmesi ve derin öğrenme teknolojilerinden yararlanılması, çok ölçekli ve çok fiziksel

birleşme problemlerinin çözümünde modellerin sağlamlığını artıracaktır (Liu vd., 2024).

Öte yandan, makine öğrenmesi modellerinin geleneksel yaklaşımlarda sıkça karşılaşılan "kara kutu" niteliği, özellikle sinir ağlarında şeffaflık ve yorumlanabilirlik eksikliğine yol açarak mühendislik kararlarında güveni zedelemiş ve saha uygulamalarının yaygınlaşmasını engellemiştir (Apoji vd., 2023; Ghader vd., 2024; Hansen & Aarset, 2024). Bu kısıtlamaları aşmak için, model tahminlerinin fiziksel mühendislik prensipleriyle bütünleştirildiği fizik bilgisi entegreli açıklanabilir yapay zekâ yöntemlerinin geliştirilmesi, kaya kütlesi karakterizasyonunda saha ölçeğinde güvenilirlik ve kabul edilebilirliği önemli ölçüde yükseltecektir (Song vd., 2025; Xie, 2025). Ayrıca, görüntü işleme ve nokta bulutu analizlerinde derin öğrenmenin sağladığı yüksek doğruluk ve düşük işlem süresi, veri yorumlama süreçlerindeki darboğazların giderilmesine olanak tanımaktadır (Ling vd., 2022). Bu teknolojiler, özellikle veri eksikliği yaşanan bölgelerde konumsal ve zamansal modelleme kapasitesini artırarak jeolojik risklerin daha hassas biçimde öngörülmesini sağlamaktadır (Dikshit vd., 2020). Buna karşın, tünel açma makineleri operasyonlarında veri erişiminin kısıtlı olduğu durumlarda dahi temel düzeydeki derin öğrenme ağlarının yüksek tahmin doğruluğu sağlayabildiği gösterilmiştir (Chen & Seo, 2023; Tao vd., 2025). Bunun yanı sıra, SHAP ve LIME gibi açıklanabilir yapay zekâ teknikleriyle desteklenen modeller, kara kutu yapay sinir ağlarının jeoteknik kaya kütlesi tahminlerindeki belirsizlikleri azaltarak girdi özelliklerinin model çıktıları üzerindeki etkisini netleştirip mühendislik kararlarında güveni artırmayı amaçlamaktadır. Örneğin, Singapur Metro Hattı 2 projesinde TBM operasyonel verileri ve günlük raporlar kullanılarak Bayesian TPE optimizasyonlu ML ve DL modelleriyle desteklenen SHAP analizi, tünel önündeki kaya kütlesi sınıflarının tahmininde yüksek performans ve girdi değişkenlerinin etkisini aydınlatarak

mühendislik kararlarını güçlendirmiştir. Benzer şekilde, yeraltı madenciliğinde kaya patlaması gibi kritik jeolojik risklerin öngörülmesinde algoritmaları ve WOA ile optimize edilmiş SVM gibi hibrit modellerin, geleneksel ampirik yöntemlerin ötesinde daha yüksek doğruluk ve nesnellik sağladığı belirlenmiştir (Sun vd., 2022; Xiao vd., 2024). Ayrıca, derin öğrenme modellerinin şev stabilitesi ve yeraltı madenlerinde tavan çökme oranlarının tahmini gibi karmaşık dinamik süreçlere entegrasyonu, genetik algoritmalar gibi optimizasyon teknikleriyle birleşerek model başarısını daha ileri seviyelere taşımaktadır. Bu yöntemlerin otomasyon kapasitesi, manuel değerlendirmelerin getirdiği zaman ve efor kayıplarını minimize ederek jeoteknik analiz süreçlerini hızlandırmaktadır (Yaghoubi vd., 2024). Bununla birlikte, derin sinir ağlarının geleneksel makine öğrenmesi yaklaşımlarına kıyasla yapısal olmayan verileri işleme kapasitesi ve otomatik özellik çıkarımı yetenekleri, karmaşık jeo-modellerin oluşturulmasında hesaplama süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır (Shahri vd., 2023). Ancak, jeoteknik risk değerlendirmesinde veri setlerinin tutarsızlığı ve model güvenilirliği sorunları gibi temel zorluklar, SHAP ve entegre gradyanlar gibi açıklanabilir yapay zekâ araçlarının entegrasyonu sayesinde aşılmaya çalışılmakta olup, bu yaklaşımların yeraltı madenlerinde çatı çökmesi tehlike tespiti gibi kritik süreçlerde karar verme güvenilirliğini ve operasyonel etkinliği önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmektedir (Isleyen vd., 2021; Zhang vd., 2025). Ayrıca, yeraltı maden ocaklarında delme performansını optimize etmek amacıyla geliştirilen yapay zekâ modelleri, matkap penetrasyon hızı ve spesifik enerji tüketimi gibi kritik parametreleri analiz ederek kaya kütlesi özelliklerini karakterize etme sürecinde toplam enerji kullanımını daha hassas bir şekilde tahmin edebilmektedir (Goldstein vd., 2024; Heydari vd., 2024; Surya vd., 2025). Özellikle yeraltı madenlerindeki döner delme penetrasyon hızının tahmininde, Harris Hawk optimizasyonu ile parametreleri

optimize edilen XGBoost hibrit modelleri, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, eklem yönü ve eklem aralığı gibi kaya kütlesi özelliklerini entegre ederek geleneksel modellere göre üstün doğruluk ( $R^2=0.993$ ) sağlamış ve bakır madenlerindeki saha verileriyle doğrulanmıştır (Mirzahi vd., 2023). Benzer şekilde, kömür madenciliğinde fizik bilgisi entegreli sinir ağları, kömür ve gaz patlamalarının yoğunluğunu öngörmeye geleneksel modellere kıyasla daha yüksek genelleme kabiliyeti ve doğruluk sağlayarak sınırlı veri setlerinde dahi üstün performans sergilemektedir (Wang vd., 2024, 2025).

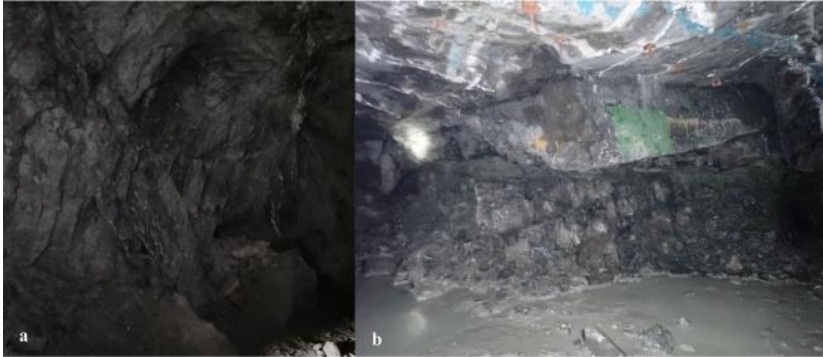
Sonuç olarak, maden ve jeoloji çalışmalarında kaya kütlesi karakterizasyonuna yönelik yapay zeka ile makine öğrenmesi entegrasyonları, hibrit modeller, optimizasyon algoritmaları ve derin öğrenme ağları sayesinde jeoteknik eksiklikleri aşarak tünel açma makinesi (TBM) penetrasyon hızı tahmini, kaya patlaması ile çökme riski öngörüsü, delme performansı ile enerji optimizasyonu, değişken jeolojik koşullarda gerçek zamanlı izleme gibi kritik süreçlerde geleneksel yöntemlere üstün doğruluk, genelleme kapasitesi ve otomasyon sunmakta; sınırlı veri setlerinde dahi yüksek güvenilirlik sağlayarak yeraltı ve yerüstü madencilik operasyonlarında jeoteknik risk yönetimini güçlendirmekte ve dijital dönüşümü hızlandırmaktadır. Gelecekteki çalışmaların, özellikle büyük ölçekli ve belirsizlik içeren projelerde veriye dayalı öngörü modellerinin analitik çözümlerle sentezlenmesi üzerine yoğunlaşması, kaya kütlesi mekaniğinde daha sağlam ve genel geçer karakteristik modellerin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır.

## **Metodoloji**

Bu çalışma, kaya kütlesi özelliklerinin tahmininde kullanılan algoritmaların performansını değerlendirmek amacıyla, literatürde kabul görmüş hibrit makine öğrenmesi modelleri ve optimizasyon teknikleri üzerine sistematik bir inceleme sunmaktadır (Mao vd.,

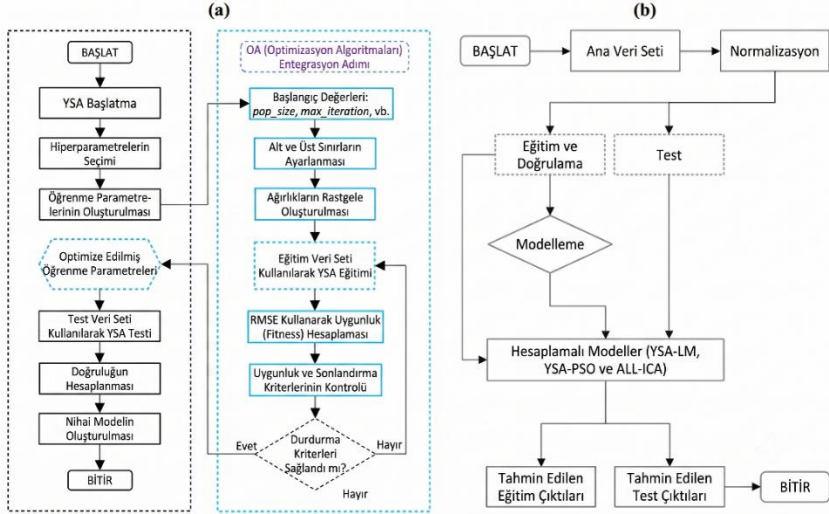
2023; Shahani vd., 2024). İncelenen yöntemler arasında özellikle parçacık sürü optimizasyonu ve ekstrem gradyan artırma gibi hibrit yaklaşımların, geleneksel modellere kıyasla penetrasyon hızı gibi kritik parametreleri tahmin etmede üstünlük sağladığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, çalışma kapsamında ele alınan verilerin ön işleme süreçlerinde kullanılan istatistiksel normalizasyon tekniklerinin, modelin eğitim aşamasındaki yakınsama hızı ve tahmin doğruluğu üzerindeki belirleyici etkisi detaylandırılmıştır. Buna ek olarak, literatür taraması süreci kapsamında, açık ocak madenciliği ve yeraltı operasyonlarında çevresel etkilerin yönetimi ile kaya kütlesi performansının optimize edilmesi amacıyla geliştirilen hibrit yapay zekâ modellerinin, geleneksel ampirik yöntemlere kıyasla tahminleme başarısı ve genelleme kapasitesi analitik bir çerçevede karşılaştırılmıştır (Shylaja & Ragam, 2025; Zhou vd., 2024). Bu bağlamda, Monte Carlo simülasyonu ve TOPSIS gibi çok kriterli karar verme mekanizmalarının entegrasyonu, kaya kütlesi sınıflandırmasında parametre belirsizliklerinin yönetilerek daha sağlam sonuçlara ulaşılmasına olanak tanımaktadır (Lawal vd., 2025) (Şekil 1).

*Şekil 1. Yeraltı saha kaya kütle karakterizasyonunda kullanılan bazı yeraltı galeri parametreleri a. galeri yan duvarları b. galeri tavanı (Lawal vd., 2025)*



Ayrıca, parçacık sürü optimizasyonu ve en yakın komşu algoritmalarının entegrasyonu gibi hibrit yaklaşımlar, patlatma kaynaklı yer sarsıntılarının tahmini gibi karmaşık mühendislik problemlerinde geleneksel yöntemlere göre daha esnek ve hassas bir karar destek mekanizması sunmaktadır (Bui vd., 2019). Bununla birlikte, parçacık sürü optimizasyonu ve emperyalist rekabet algoritması gibi güçlü küresel arama yeteneklerine sahip optimizasyon yöntemleri, yapay sinir ağlarındaki yerel minimuma sapma ve düşük öğrenme hızı gibi karakteristik sınırlamaların aşılmasında kritik bir rol oynamaktadır (Koopialipoor vd., 2018). Buna ek olarak, hiperparametre optimizasyonunda kullanılan bu algoritmalar, yapay sinir ağlarının ağırlık ve sapma değerlerini optimize ederek modelin tahmin doğruluğunu ve yakınsama hızını önemli ölçüde artırmaktadır (Skentou vd., 2022) (Şekil 2).

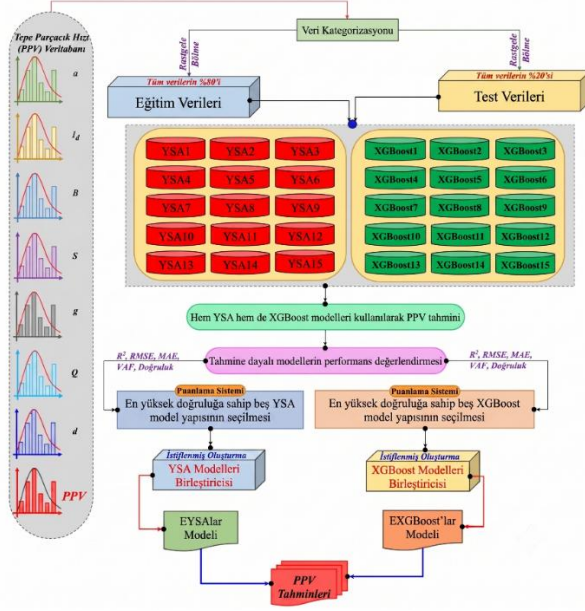
Şekil 2. a. Hibrit yapay sinir ağlarının oluşturulma prosedürü b. hesaplamalı modellemenin adımları (Skentou vd., 2022)



Özellikle hibrit modellerin, geleneksel yapay sinir ağlarının karşılaştığı yerel minimuma takılma ve yavaş öğrenme gibi

darboğazları, parçacık sürü optimizasyonu ve kolonisi tabanlı algoritmalarla minimize ettiği literatürde kanıtlanmıştır (Hosseini vd., 2023; Huang vd., 2020). CFNN-LMA ve LSSVM-WOA gibi özgün hibrit mimarilerin kaya parçalanması ve uçuşan kaya tahminindeki yüksek başarısı, bu modellerin maden sahalarındaki dinamik verileri işlemede standart tekil algoritmalarından daha etkin olduğunu göstermektedir (Ragam vd., 2024). Öte yandan, literatürde belirtilen yapay zekâ tabanlı hibrit yaklaşımların yalnızca yer sarsıntısı değil, aynı zamanda açık ocak sahalarındaki uçuşan kaya mesafelerinin öngörülmesinde de geleneksel ampirik formüllerin yetersiz kaldığı durumlarda çok daha yüksek belirleyicilik katsayıları sunduğu gözlemlenmektedir (Rezakhah vd., 2025). Buna ek olarak, biyocoğrafya tabanlı optimizasyon ile desteklenen uç aşırı öğrenme makineleri gibi hibrit yaklaşımlar, temel modellere kıyasla patlatma kaynaklı uçuşan kaya tahmininde daha yüksek doğruluk ve genelleme yeteneği sergilemektedir (Arthur vd., 2020). Ayrıca, sürü zekâ algoritmalarının ekstrem öğrenme makineleriyle entegre edilmesi, büyük ölçekli maden veri seti işleme süreçlerinde modelin hesaplama verimliliğini ve tahmin kararlılığını önemli ölçüde iyileştirmektedir (Li vd., 2022). Ayrıca, ileri seviye algoritmalarla desteklenen uzun kısa süreli bellek ağları, patlatma kaynaklı yer sarsıntılarının öngörülmesinde karşılaşılan çoklu doğrusallık problemlerini minimize ederek modelin tahmin performansını belirgin şekilde artırmaktadır (Hosseini vd., 2023) (Şekil 3).

Şekil 3. Yapay Sinir Ağları (YSA) ve XGBoost algoritmaları ile Maksimum Parçacık Hızı (PPV) tahmini akış şeması (Hosseini vd., 2023)



Yapay sinir ağlarının ağırlıklarını ve sapmalarını optimize eden meta-sezgisel algoritmalar, eğitim verisine aşırı uyum (overfitting) problemini dengeleyerek modelin daha önce hiç görülmemiş veriler üzerinde üstün bir genelleme başarısı sergilemesini sağlamaktadır. Ayrıca, Balina Optimizasyon Algoritması ile optimize edilmiş ekstrem öğrenme makineleri gibi hibrit yaklaşımlar, kaya UCS tahmini, patlatma kaynaklı uçan kaya mesafesi ve kaya kütlesi sınıflandırması gibi jeoteknik parametrelerde diğer meta-sezgisel algoritmalara göre daha yüksek doğruluk, düşük hata oranları ve geniş genelleme yeteneği sunarak model güvenilirliğini artırmaktadır (Ding vd., 2023; Li, 2024; Qiu vd., 2022; Wang vd., 2023). Özellikle hibrit modellerin



sorunlarını minimize etmekte, büyük veri setlerinde yüksek doğruluk, genelleme kapasitesi ve hesaplama verimliliği sunarak operasyonel güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirliği önemli ölçüde artırmaktadır.

## **Tartışma**

Literatürdeki güncel çalışmalar, hibrit ve topluluk öğrenme yöntemlerinin, tekil algoritmalara kıyasla vaka çalışmalarının %61'inde daha üstün performans sergilediğini ve bu eğilimin maden sahalarındaki karar verme süreçlerini dönüştürdüğünü ortaya koymaktadır (Elwahab vd., 2023). Buna paralel olarak, parçacık sürü optimizasyonu gibi meta-sezgisel yaklaşımların entegrasyonu, kaya kütlesi dayanım parametrelerinin belirlenmesinde doğrusal olmayan karmaşık ilişkilerin daha hassas modellenmesini sağlayarak, jeolojik dayanım indeksi gibi kritik göstergelerin tahmininde geleneksel modellere göre üstün genelleme kapasitesi sunmaktadır (Davoodi vd., 2025; Li vd., 2022; Qiu vd., 2022). Ayrıca, yapay zekâ modellerinin başarımı yalnızca seçilen algoritma mimarisiyle değil, aynı zamanda girdi parametrelerinin seçimindeki titizlikle de doğrudan ilişkilidir; nitekim patlatma tasarımı ve jeomekanik verilerin çok boyutlu analizi, tahmin modellerindeki hata paylarını minimize etmede kritik bir öneme sahiptir. Örneğin, delik çapı, sıkılama uzunluğu ve patlayıcı miktarı gibi parametrelerin modele dahil edilmesi, özellikle kalker ocaklarında parçalanma boyutunun tahmininde yapay sinir ağlarının kestirim doğruluğunu kayda değer ölçüde artırmaktadır. Öte yandan, destek vektör makineleri üzerine inşa edilen regresyon metodolojilerinin, özellikle küçük ölçekli dolomit ocaklarında patlatma verimliliğini optimize etmede yapay sinir ağlarına göre daha istikrarlı sonuçlar verdiği bildirilmektedir. Bunun yanı sıra, patlatma sonrası taban hacmi tahmini gibi kaya kütlesi davranışını doğrudan etkileyen parametrelerin öngörülmesinde hibrit ve topluluk öğrenme modellerinin üstün

başarısı, kaya kütlesi sınıflandırması ve RMR/GSI tahminlerindeki doğruluk oranlarını artırarak maden üretiminin sürdürülebilirliğini ve güvenlik standartlarını güçlendirmektedir (Ghader vd., 2024; Kahraman vd., 2024; Lawal vd., 2025). Bununla birlikte, patlatma işlemlerinde yalnızca %20-30 oranında etkili kullanılan enerji açığa çıktığı göz önüne alındığında, makine öğrenmesi modellerinin bu enerji verimliliğini maksimize etme ve çevresel etkileri (yer sarsıntısı, hava şoku vb.) minimize etme potansiyeli kritik bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır (Kahraman vd., 2024). Özellikle, gri kurt optimizasyonu ve genetik algoritma gibi ileri seviye tekniklerin destek vektör regresyon modelleri ile entegre edilmesi, kaya parçalanma boyutunun optimum seviyede tutulmasını sağlayarak operasyonel maliyetlerin düşürülmesinde anahtar rol oynamaktadır (Li vd., 2021). Ayrıca, uzun kısa süreli bellek ağlarının ağaç tohumu algoritması ile güçlendirilmiş mimarileri, büyük veri setlerini işlerken geo-mekanik parametreler arasındaki karmaşık etkileşimleri çözümlenmede en yüksek tahmin hassasiyetini sergilemektedir (Taiwo vd., 2024). Buna ek olarak, çok katmanlı yapay sinir ağlarında Bayes optimizasyonunun kullanımı, gizli katman yapılarının otomatik olarak analiz edilmesine imkân tanıyarak geleneksel ampirik yöntemlerin ötesinde daha güvenilir kaya parçalanma tahminleri sunmaktadır (Amoako vd., 2022). Güncel literatür, makine öğrenmesi algoritmalarının patlatma paternlerini optimize ederek patlatma maliyetlerini %23'e kadar düşürdüğünü ve patlayıcı miktarını %89 oranında azalttığını göstermektedir (Munagala vd., 2023; Cotrina-Teatino vd., 2024). Ayrıca, hiyerarşik k-ortalama kümeleme yöntemi ile yapay sinir ağlarını birleştiren hibrit yaklaşımların, parçacık hızı kestiriminde kök ortalama kare hatasını minimize ederek yüksek doğrulukta sonuçlar ürettiği kanıtlanmıştır (Chandr vd., 2023; Nguyen vd., 2018).

Ayrıca, Gradyan Artırma Makinesi tabanlı algoritmalar, kaya kütlesindeki karmaşık ve doğrusal olmayan etkileşimleri çözümlenmede diğer yöntemlere kıyasla daha üstün bir performans sergileyerek operasyonel güvenlik ve planlama süreçlerinde kritik bir avantaj sağlamaktadır (Zvarivadza vd., 2025). Özellikle Xtreme Gradient Boosting gibi ileri düzey regresyon modelleri, veri artırma teknikleri ve hiperparametre optimizasyonu ile birleştirildiğinde, patlatma sonrası ortalama parça boyutu tahmininde yüksek genelleme kapasitesi ve tahmin doğruluğu sergilemektedir (Krop vd., 2024). Bu bağlamda, histogram tabanlı gradyan artırma yöntemlerinin gri kurt optimizasyonu ile entegre edilmesi, kaya parçalanma boyutu tahminlerinde 0,94 gibi yüksek determinasyon katsayılarına ulaşılmasını sağlayarak üretim maliyetlerini ve cevher seyrelmesini minimize etmektedir (Mame vd., 2025). Benzer şekilde, parçacık sürü optimizasyonu ile desteklenen XGBoost modelleri, patlayıcı madde kullanımını minimize ederken kaya kütlesi parçalanma kalitesini optimize ederek madencilik operasyonlarında maliyet etkinliğini belirgin düzeyde artırmaktadır (Chandrasah vd., 2024).

## **Sonuç**

Bu çalışma, yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknolojilerinin madencilik ve jeoloji mühendisliğinde ne kadar kritik bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır. Geleneksel yöntemlerin sınırlı kaldığı karmaşık kaya yapılarının analizinde, sondaj verileri ve jeokimyasal analizlerin akıllı algoritmalarla işlenmesi sayesinde çok daha hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir.

Özellikle yüksek doğruluk oranlarına sahip modellerin kullanımı, maden sahalarındaki şev stabilitesi ve kaya kütlesi karakterizasyonu gibi hayati konulardaki belirsizlikleri azaltmaktadır. Bu durum, yalnızca mühendislik kararlarının veri

odaklı alınmasını sağlamakla kalmaz; aynı zamanda operasyonel maliyetleri dūşürerek iş güvenliği standartlarını en üst seviyeye taşır. Sonuç olarak, madencilik sektöründe dijital dönüşümün ve modern veri analitiği yöntemlerinin benimsenmesi hem ekonomik sürdürülebilirlik hem de güvenli çalışma ortamlarının oluşturulması açısından bir zorunluluk haline gelmiştir.

Tüm bu faktörler bir araya geldiğinde, madencilik ve jeoloji mühendisliğinde yaşanan bu dönüşümün yalnızca teknik bir araç değişiminden ibaret olmadığı, aksine temel bir zihniyet değişimini temsil ettiği görülmektedir. Veri odaklı yaklaşımlar, geleneksel mühendislik tecrübesini dışlamak yerine onu modern analitik güçle destekleyerek daha sağlam bir zemine oturtur. Disiplinlerarası bir köprü kuran bu yeni çalışma disiplini, doğal kaynakların çıkarılmasından sahanın kapatılmasına kadar geçen her aşamada daha sorumlu ve bilimsel kararların alınmasını mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, yapay zekanın sağladığı bu geniş perspektif, modern madenciliğin temel taşını oluşturacak ve sektörün hem toplumsal hem de çevresel beklentilere daha profesyonel bir şekilde yanıt vermesine katkı sağlayacaktır.

## Kaynakça

Ambah, E., & Elmo, D. (2024). Is there a Universal Rock Mass Classification System? <https://doi.org/10.56952/arma-2024-0784>

Amoako, R., Jha, A., & Zhong, S. (2022). Rock Fragmentation Prediction Using an Artificial Neural Network and Support Vector Regression Hybrid Approach. *Mining*, 2(2), 233–247. <https://doi.org/10.3390/mining2020013>

Apoji, D., Sheil, B., & Soga, K. (2023). Shaping the future of tunneling with data and emerging technologies. *Data-Centric Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1017/dce.2023.24>

Arthur, C. K., Temeng, V. A., & Ziggah, Y. Y. (2020). A Self-adaptive differential evolutionary extreme learning machine (SaDE-ELM): a novel approach to blast-induced ground vibration prediction. *SN Applied Sciences*, 2(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03611-3>

Azhari, F., Sennersten, C., Lindley, C. A., & Sellers, E. (2023). Deep learning implementations in mining applications: a compact critical review. *Artificial Intelligence Review*, 56(12), 14367–14402. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10500-9>

Bui, X.-N., Jaroonpattanapong, P., Nguyen, H., Tran, Q., & Long, N. Q. (2019). A Novel Hybrid Model for Predicting Blast-Induced Ground Vibration Based on k-Nearest Neighbors and Particle Swarm Optimization. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50262-5>

Chandrabhas, N. S., Choudhary, B. S., Venkataramayya, M. S., & Fissaha, Y. (2023). An inventive approach for simultaneous prediction of mean fragmentation size and peak particle velocity using futuristic datasets through improved techniques of genetic XG

Boost algorithm. Research Square (Research Square).  
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3018543/v1>

Chandrabhas, N. S., Choudhary, B. S., Venkataramayya, M. S., Fissaha, Y., & Cheepurupalli, N. R. (2024). AI-Driven Analysis of Rock Fragmentation: The Influence of Explosive Charge Quantity. *Acadlore Transactions on Geosciences*, 3(3), 123–134.  
<https://doi.org/10.56578/atg030301>

Chen, C., & Seo, H. (2023). Prediction of rock mass class ahead of TBM excavation face by ML and DL algorithms with Bayesian TPE optimization and SHAP feature analysis. *Acta Geotechnica*, 18(7), 3825–3848. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01779-z>

Çomaklı, R., & Atici, U. (2022). Kayalar için yapay zeka hesaplama teknikleri ile doku katsayını kullanarak basınç dayanımını tahmin etme. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.  
<https://doi.org/10.28948/ngumuh.1158645>

Cotrina-Teatino, M. A., Araujo, J. J. M., Mamani-Quispe, J. N., Gonzalez-Vasquez, J. A., Arango-Retamozo, S. M., Vidal, E. M. N., Donaires-Flores, T., & Quispe-Tello, R. L. (2024). Machine Learning Techniques for Predicting the Quantity of ANFO Used in Blasting a Bench in an Open Pit Mine. *Mathematical Modelling and Engineering Problems*, 11(10), 2625–2638.  
<https://doi.org/10.18280/mmep.111004>

Davoodi, P. K., Hajizadeh, F., & Rezaei, M. (2025). Application of the metaheuristic algorithms to quantify the GSI based on the RMR classification. *Scientific Reports*, 15(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-14332-1>

Dikshit, A., Pradhan, B., & Alamri, A. (2020). Pathways and challenges of the application of artificial intelligence to geohazards

modelling. *Gondwana Research*, 100, 290–301.  
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.08.007>

Ding, X., Jamei, M., Hasanipanah, M., Abdullah, R. A., & Le, B. N. (2023). Optimized Data-Driven Models for Prediction of Flyrock due to Blasting in Surface Mines. *Sustainability*, 15(10), 8424–8424. <https://doi.org/10.3390/su15108424>

Elmo, D., & Stead, D. (2020). Disrupting rock engineering concepts: is there such a thing as a rock mass digital twin and are machines capable of learning rock mechanics? 565–576. [https://doi.org/10.36487/acg\\_repo/2025\\_34](https://doi.org/10.36487/acg_repo/2025_34)

Elwahab, A. A., Topal, E., & Jang, H. (2023). Review of machine learning application in mine blasting. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(2). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11237-z>

Gebretsadik, A., Kumar, R., Fissha, Y., Kide, Y., Okada, N., Ikeda, H., Mishra, A. K., Armaghani, D. J., Ohtomo, Y., & Kawamura, Y. (2024). Enhancing rock fragmentation assessment in mine blasting through machine learning algorithms: a practical approach. *Deleted Journal*, 6(5). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05888-0>

Ghader, Saadati., Javankhoshdel, S., Abad, J. M. N., Mett, M., Kontrus, H., & Schneider-Muntau, B. (2024). AI-Powered Geotechnics: Enhancing Rock Mass Classification for Safer Engineering Practices. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04189-7>

Gökçeoğlu, C. (2021). Assessment of rate of penetration of a tunnel boring machine in the longest railway tunnel of Turkey. *SN Applied Sciences*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04903-y>

Goldstein, D. M., Aldrich, C., & O'Connor, L. (2024). A Review of Orebody Knowledge Enhancement Using Machine

Learning on Open-Pit Mine Measure-While-Drilling Data. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 6(2), 1343–1360. <https://doi.org/10.3390/make6020063>

Hansen, T. F., & Aarset, A. (2024). Unsupervised Machine Learning for Data-Driven Rock Mass Classification: Addressing Limitations in Existing Systems Using Drilling Data. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04280-z>

Heydari, S., Hoseinie, S. H., & Bagherpour, R. (2024). Prediction of jumbo drill penetration rate in underground mines using various machine learning approaches and traditional models. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59753-6>

Hosseini, S., Khatti, J., Taiwo, B. O., Fissha, Y., Grover, K. S., Ikeda, H., Pushkarna, M., Tuka, M. B., & Ali, M. (2023). Assessment of the ground vibration during blasting in mining projects using different computational approaches. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46064-5>

Hosseini, S., Pourmirzaee, R., Armaghani, D. J., & Sabri, M. M. S. (2023). Prediction of ground vibration due to mine blasting in a surface lead–zinc mine using machine learning ensemble techniques. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33796-7>

Huang, J., Koopialipoor, M., & Armaghani, D. J. (2020). A combination of fuzzy Delphi method and hybrid ANN-based systems to forecast ground vibration resulting from blasting. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76569-2>

Isleyen, E., Düzgün, Ş., & Carter, R. (2021). Interpretable deep learning for roof fall hazard detection in underground mines.

Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 13(6), 1246–1255. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.09.005>

Kahraman, E., Hosseini, S., Taiwo, B. O., Fissaha, Y., Jebutu, V. A., Akinlabi, A. A., & Adachi, T. (2024). Fostering sustainable mining practices in rock blasting: Assessment of blast toe volume prediction using comparative analysis of hybrid ensemble machine learning techniques. *Journal of Safety and Sustainability*, 1(2), 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2024.05.001>

Kahraman, E., Taiwo, B. O., Hosseini, S., Fissaha, Y., Jebutu, V. A., & Akinlabi, A. A. (2024). Blast Toes Volume Estimation for Post-Blast Efficiency: A Comparative Analysis of hybrid ensemble learning, voting, and base AI-algorithms. *Research Square* (Research Square). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4014302/v1>

Katuwal, T. B., & Panthi, K. K. (2025). TBM Penetration Rate Prediction in Himalayan Geology Using Machine Learning (ML) Techniques. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-05044-z>

Koopialipoor, M., Fallah, A., Armaghani, D. J., Azizi, A., & Mohamad, E. T. (2018). Three hybrid intelligent models in estimating flyrock distance resulting from blasting. *Engineering With Computers*, 35(1), 243–256. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0596-4>

Krop, I., Sasaoka, T., Shimada, H., & Hamanaka, A. (2024). Optimizing Mean Fragment Size Prediction in Rock Blasting: A Synergistic Approach Combining Clustering, Hyperparameter Tuning, and Data Augmentation. *Eng—Advances in Engineering*, 5(3), 1905–1936. <https://doi.org/10.3390/eng5030102>

Lawal, A. I., & Kwon, S. (2020). Application of artificial intelligence to rock mechanics: An overview. *Journal of Rock*

Mechanics and Geotechnical Engineering, 13(1), 248–266.  
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.05.010>

Lawal, A. I., & Mulenga, F. K. (2025). Predicting the uniaxial compressive strength of different rock types using implementable stochastically modified artificial neural network and Shapley additive explanations. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling Experiments and Design*, 8(10). <https://doi.org/10.1007/s41939-025-01050-4>

Lawal, A. I., Zvarivadza, T., Onifade, M., Mulenga, F. K., & Khandelwal, M. (2025). Optimising tunnel support design with machine learning models. *Environmental Earth Sciences*, 84(21). <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12573-x>

Li, C., Zhou, J., Dias, D., & Gui, Y. (2022). A Kernel Extreme Learning Machine-Grey Wolf Optimizer (KELM-GWO) Model to Predict Uniaxial Compressive Strength of Rock. *Applied Sciences*, 12(17), 8468–8468. <https://doi.org/10.3390/app12178468>

Li, C., Zhou, J., Khandelwal, M., Zhang, X., Monjezi, M., & Qiu, Y. (2022). Six Novel Hybrid Extreme Learning Machine–Swarm Intelligence Optimization (ELM–SIO) Models for Predicting Backbreak in Open-Pit Blasting. *Natural Resources Research*, 31(5), 3017–3039. <https://doi.org/10.1007/s11053-022-10082-3>

Li, E., Yang, F., Ren, M., Zhang, X., Zhou, J., & Khandelwal, M. (2021). Prediction of blasting mean fragment size using support vector regression combined with five optimization algorithms. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(6), 1380–1397. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.013>

Li, L. (2024). LightGBM integration with modified data balancing and whale optimization algorithm for rock mass classification. *Scientific Reports*, 14(1), 23028–23028. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73742-9>

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, 104577–104577. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104577>

Liu, H., Su, H., Sun, L., & Dias-da-Costa, D. (2024). State-of-the-art review on the use of AI-enhanced computational mechanics in geotechnical engineering. *Artificial Intelligence Review*, 57(8). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10836-w>

Mame, M., Huang, S., Li, C., Zhou, X., & Zhou, J. (2025). Prediction of Mean Fragmentation Size in Open-Pit Mine Blasting Operations Using Histogram-Based Gradient Boosting and Grey Wolf Optimization Approach. *Applied Sciences*, 16(1), 311–311. <https://doi.org/10.3390/app16010311>

Mao, Y., Zhu, L., Feng, L., Nanekaran, Y. A., & Zhang, M. (2023). Azarshahr travertine compression strength prediction based on point-load index (Is) data using multilayer perceptron. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46219-4>

Marcher, T., Erharter, G. H., & Unterlaß, P. J. (2021). Capabilities and Challenges Using Machine Learning in Tunnelling. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97695>

Mirzehi, M., Nabavi, Z., & Armaghani, D. J. (2023). A novel Hybrid XGBoost Methodology in Predicting Penetration Rate of Rotary Based on Rock-Mass and Material Properties. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), 5225–5241. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08360-0>

Morgenroth, J. (2024). Rocks, Data, Algorithms: A Roadmap for Practical Machine Learning Adoption in Rock Engineering. <https://doi.org/10.56952/arma-2024-1234>

Morgenroth, J., Khan, U. T., & Perras, M. A. (2019). An Overview of Opportunities for Machine Learning Methods in Underground Rock Engineering Design. *Geosciences*, 9(12), 504–504. <https://doi.org/10.3390/geosciences9120504>

Munagala, V. S. K. R., Thudumu, S., Logothetis, I., Bhandari, S., Vasa, R., & Mouzakis, K. (2023). A comprehensive survey on machine learning applications for drilling and blasting in surface mining. *Machine Learning with Applications*, 15, 100517–100517. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2023.100517>

Nguyen, H., Bui, X.-N., Tran, Q., Le, T.-Q., Do, N.-H., & Hoa, L. T. T. (2018). Evaluating and predicting blast-induced ground vibration in open-cast mine using ANN: a case study in Vietnam. *SN Applied Sciences*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0136-2>

Qiu, J., Yin, X., Pan, Y., Wang, X., & Zhang, M. (2022). Prediction of Uniaxial Compressive Strength in Rocks Based on Extreme Learning Machine Improved with Metaheuristic Algorithm. *Mathematics*, 10(19), 3490–3490. <https://doi.org/10.3390/math10193490>

Ragam, P., Kumar, N., Ajith, J., Karthik, G., Himanshu, V. K., Machupalli, D. S., & Murlidhar, B. R. (2024). Estimation of slope stability using ensemble-based hybrid machine learning approaches. *Frontiers in Materials*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1330609>

Rezakhah, M., Nemati, E., Batarbiat, A., & Khandelwal, M. (2025). INTEGRATING ANN PREDICTION WITH HONEYBEE OPTIMISATION FOR FLYROCK MINIMISATION IN OPEN-PIT MINING. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 40(5), 141–152. <https://doi.org/10.17794/rgn.2025.5.11>

Shahani, N. M., Xiaowei, Q., Wei, X., Li, J., Aizitiliwumaier, T., Ma, X., Shigui, Q., Weikang, C., & Longhe, L. (2024). Hybrid

PSO with tree-based models for predicting uniaxial compressive strength and elastic modulus of rock samples. *Frontiers in Earth Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1337823>

Shahri, A. A., Shan, C., & Larsson, S. (2023). A hybrid ensemble-based automated deep learning approach to generate 3D geo-models and uncertainty analysis. *Engineering With Computers*, 40(3), 1501–1516. <https://doi.org/10.1007/s00366-023-01852-5>

Sheil, B., Suryasentana, S. K., Mooney, M. A., & Zhu, H. (2020). Machine learning to inform tunnelling operations: recent advances and future trends. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 173(4), 74–95. <https://doi.org/10.1680/jsmic.20.00011>

Shylaja, G., & Ragam, P. (2025). A systematic survey of hybrid ML techniques for predicting peak particle velocity (PPV) in open-cast mine blasting operations. *Artificial Intelligence Review*, 58(7). <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11156-3>

Skentou, A. D., Bardhan, A., Mamou, A., Lemonis, M. E., Kumar, G., Samui, P., Armaghani, D. J., & Asteris, P. G. (2022). Closed-Form Equation for Estimating Unconfined Compressive Strength of Granite from Three Non-destructive Tests Using Soft Computing Models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(1), 487–514. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03046-9>

Song, C., Zhao, T., & Ling, X. (2025). Physics-Informed Explainable AI and SMOTE-GPC for the Classification of Surrounding Rock Mass in Tunneling. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part A Civil Engineering*, 11(2). <https://doi.org/10.1061/ajrua6.rueng-1519>

Sun, L., Hu, N., Ye, Y., Tan, W., Wu, M., Wang, X., & Huang, Z. (2022). Ensemble stacking rockburst prediction model based on Yeo–Johnson, K-means SMOTE, and optimal rockburst feature

dimension determination. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19669-5>

Surya, S., Srinadh, V., Tripathi, S., Saxena, K., Inumula, K. M., & Quraishi, S. J. (2025). Energy Consumption Optimization in Mining Operations via Machine Learning Techniques. *Journal of Mines Metals and Fuels*, 2675–2686. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2025/49115>

Taiwo, B. O. (2022). Improvement of small scale dolomite mine blast fragmentation efficiency using hybrid artificial intelligence and soft computing approaches-A case study. *Research Square (Research Square)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1912361/v2>

Taiwo, B. O. (2023). Improvement of small-scale dolomite mine blast fragmentation efficiency using hybrid artificial intelligence and soft computing approaches—a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(12). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11785-4>

Taiwo, B. O., Hosseini, S., Fissaha, Y., Kiliç, K., Olusola, O. A., Chandradas, N. S., Li, E., Akinlabi, A. A., & Khan, N. M. (2024). Indirect evaluation of the influence of rock boulders in blasting to the geohazard: Unearthing geologic insights fused with tree seed based LSTM algorithm. *Geohazard Mechanics*, 2(4), 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2024.06.001>

Tao, H., Cheng, Y., Xu, Z., Wang, X., Fu, H., & Zhu, C. (2025). Predicting tunnel boring machine penetration rates in rock masses using knowledge distillation with limited samples. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 29(1), 100070–100070. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100070>

Utkarsh, & Jain, P. (2024). Predicting bentonite swelling pressure: optimized XGBoost versus neural networks. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68038-x>

Wang, L., Jia, B., & Su, G. (2024). Research on coal and gas outburst prediction based on physical information neural network. *Research Square (Research Square)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5344764/v1>

Wang, L., Jia, B., & Su, G. (2025). Prediction of coal and gas outbursts based on physics informed neural networks and traditional machine learning models. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02320-4>

Wang, S., Huang, L., Cai, X., & Song, Z. (2023). *Mathematical Problems in Rock Mechanics and Rock Engineering*. In MDPI eBooks. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-6092-2>

Xiao, P., Liu, Z., Zhao, G., & Pan, P. (2024). Novel stacking models based on SMOTE for the prediction of rockburst grades at four deep gold mines. *Underground Space*, 19, 169–188. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.03.004>

Xie, X. (2025). A Systematic Review of Explainable AI Methods and their Applications in Geotechnical Engineering. *Advances in Research*, 26(5), 126–136. <https://doi.org/10.9734/air/2025/v26i51472>

Yaghoubi, E., Yaghoubi, E., Khamees, A. A., & Vakili, A. H. (2024). A systematic review and meta-analysis of artificial neural network, machine learning, deep learning, and ensemble learning approaches in field of geotechnical engineering [Review of A systematic review and meta-analysis of artificial neural network, machine learning, deep learning, and ensemble learning approaches in field of geotechnical engineering]. *Neural Computing and*

Applications, 36(21), 12655–12699. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09893-7>

Yang, B., Heagy, L. J., Morgenroth, J., & Elmo, D. (2024). Algorithmic Geology: Tackling Methodological Challenges in Applying Machine Learning to Rock Engineering. *Geosciences*, 14(3), 67–67. <https://doi.org/10.3390/geosciences14030067>

Yu, H., Taleghani, A. D., Balushi, F. A., & Wang, H. (2022). Machine learning for rock mechanics problems; an insight. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.1003170>

Zhang, Y., Zhou, J., Li, J., He, B., Armaghani, D. J., & Huang, S. (2025). Advancing overbreak prediction in drilling and blasting tunnel using MVO, SSA and HHO-based SVM models with interpretability analysis. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00963-1>

Zhou, J., Zhang, Y., & Qiu, Y. (2024). State-of-the-art review of machine learning and optimization algorithms applications in environmental effects of blasting. *Artificial Intelligence Review*, 57(1). <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10636-8>

Zvarivadza, T., Grobler, H., Rajpurohit, S. S., Moyo, S., Onifade, M., & Khandelwal, M. (2025). Advanced machine learning for pillar stress prediction and design optimisation in hardrock platinum mining: enhancing safety and sustainability on the Great Dyke of Zimbabwe. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00990-y>

# ŞİŞEN ZEMİNLER: GİRİŞ, LABORATUVAR DENEYLERİ VE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

ALİ SAMET ÖNGEN<sup>1</sup>

## Giriş

Şişen zeminler, su içeriklerinde meydana gelen değişimlere bağlı olarak hacim değiştirme eğilimi gösteren, kil mineralleri bakımından zengin, ince taneli zeminlerdir. Bu hacim değişikliği meteorolojik koşullar neticesinde yağışlı dönemlerde şişme, kurak dönemlerde ise büzülme olarak kendini göstermektedir. Değişken hacim davranışları nedeniyle, söz konusu zeminler jeoteknik uygulamalarında oldukça problemlili zemin sınıfları içerisinde yer almaktadır (Özkan, 2024). Zeminlerde meydana gelen şişme-büzülme davranışları, yol, tek katlı yapılar, bahçe duvarları, havalimanı pistleri gibi hafif mühendislik yapılarında yapısal bütünlüğü tehdit eden ciddi deformasyonlara ve hasarlara yol açmaktadır (Çimen et al., 2017; Taşçı, 2011). Chen (1975), zeminlerdeki şişme probleminin uzun yıllar fark edilmediğini ve şişen zeminlerde meydana gelen problemlerin uzun süre, oturma veya kötü inşaat kaynaklı hasar olarak yorumlandığını belirtmiştir.

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-4019-7157

Bu tür zeminlerde meydana gelen hasarların giderilmesine yönelik çalışmalar önemli ekonomik kayıplar sebep olmaktadır. Jones & Holtz (1973), Amerika Birleşik Devletleri'nde şişme kaynaklı ekonomik zararların, birçok doğal afetten daha fazla olduğunu belirtmiştir. Küresel ölçekte yıllık bazda milyarlarca dolara ulaşan maliyetler, zeminlerin şişme davranışının doğru tespitinin ve iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesinin son derece önemli olduğunu göstermektedir. Federal Acil Durum Yönetim Kurumu (FEMA)'nın verilerine göre, yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'ndeki konut yapılarına yönelik yıllık kayıplar 1970 yılında 798,1 milyon dolar seviyesindeyken, bu rakamın 2000 yılına kadar 1 milyar doları aşacağı öngörülmüştür. Ticari, endüstriyel binalar ve otoyol gibi ulaştırma altyapı tesisleri dahil edildiğinde, bu zarar tahmini günümüz küresel ekonomisinde yıllık 15 milyar doların üzerine çıkmaktadır (Al-Rawas & Goosen, 2006). Bu sebeple, şişen zeminlerin analizlerinin önceden hassasiyetle yapılması, sürdürülebilir mühendislik projeleri için bir gereklilik haline gelmiştir (Yılmaz, 2019). Arjantin, Güney Afrika, Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Kanada, Hindistan, İran, Kenya, Meksika, İspanya, Fas ve ülkemiz de dahil olmak üzere dünyanın farklı kıtalarından birçok ülke ve bölgede şişme problemleri yaşanmaktadır. Bu durum şişme problemlerinin yerel değil küresel bir mühendislik problemi olduğunu göstermektedir.

Ülkemizde çeşitli ve değişken meteorolojik koşullar nedeniyle bu zemin türleri, hafif yapı ve altyapı projelerinde önemli birer risk faktörü oluşturmaktadır. Özellikle İç Anadolu, Batı Anadolu, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerimizde, başta yol yapıları ve boru hatları olmak üzere hafif yapılarda ciddi şişme riskleri bulunmaktadır (Özkan, 2023). Türköz & Tosun (2008), büyük bir altyapı ve sulama projesi olan Güneydoğu Anadolu Projesi'nde şişme ve büzülme kaynaklı birçok yapısal hasar kaydetmiştir.

Zeminlerin şişme davranışlarının temelinde içerisinde bulundukları kil minerallerinin kristal yapıları ile su etkileşimi yer almaktadır. Tabakalı yapıya sahip olan killer, bünyelerine su aldıkça hacimsel artışa dolayısıyla şişme problemlerine neden olmaktadır. Başta montmorillonit olmak üzere smektit grubu kil mineralleri, yüksek yüzey alanları ve tabakaları arasında su alabilme kapasiteleri nedeniyle yüksek şişme potansiyeline sahiptir. Buna karşılık illit sınıfı kil mineralleri düşük şişme potansiyeline sahiptir. 1:1 tabakalı kaolinit sınıfı kil mineralleri orta düzeyde şişme davranışı göstermektedir. Zeminlerin kil mineralleri içermesi ya da içerdikleri kil mineralinin türü şişme davranışı açısından önem arz etmektedir ancak tek başına belirleyici değildir. Mineralojik açıdan aynı yapıya sahip iki zemin farklı şişme davranışı gösterebilir. Çünkü zeminlerin şişme davranışı mineralojik özelliklerin yanısıra başlangıç su içeriği, kuru birim hacim ağırlığı, örtü yükü, iklim koşulları, yeraltı suyu durumu, bitki örtüsü, şişen tabakanın kalınlığı, yüzey drenajı gibi faktörlerin etkisiyle kontrol edilmektedir (Nelson & Miller, 1993). Özellikle kurak ve yarı kurak iklim koşullarına sahip bölgelerde, yağış ve buharlaşma süreçleri neticesinde zeminlerin su içeriğinde sürekli değişim meydana gelmekte ve bu durum tekrarlı olarak şişme ve büzülme döngülerine sebep olmaktadır. Zeminlerde meydana gelen bu hacimsel değişim, sadece yağışlı dönemde şişme olarak değil buharlaşma döneminde su kaybına bağlı meydana gelen büzülme davranışını da kapsamaktadır. Bu durum yapı bütünlüğünü tehdit eden bir süreci temsil eder. Bu süreçler neticesinde zeminlerin şişme basıncının üzerinde inşa edilen yapıdan kaynaklı yükleri aşması durumunda, inşa edilen yapıda önemli hasarlar meydana gelebilir (Topçuoğlu & Gürocak, 2023).

Zeminlerin şişme davranışı, şişme basıncı ve şişme yüzdesi ile ifade edilmektedir. Zeminlerin su ile teması neticesinde meydana gelen hacimsel genişlemenin tamamen engellenmesi için gerekli olan minimum düşey gerilme şişme basıncı olarak tanımlanmaktadır.

Şişme yüzdesi ise şişen zeminde meydana gelen düşey veya hacimsel deformasyonun zeminin başlangıç boyutuna oranıdır. Bu iki parametre bir zeminin şişme potansiyelini doğrudan ifade etmekte kullanılmaktadır. Zeminlerin şişme parametrelerinin doğrudan belirlenmesi için serbest şişme deneyleri, konsolidasyon deneyleri ve emme (suction) deneyleri kullanılmaktadır. Konsolidasyon (ödometre) deneyleri bu yöntemler arasında en yaygın olanıdır. Deneylere ek olarak, şişme parametrelerinin doğrudan belirlenmesinde kullanılan deneylerin zaman alıcı olması sebebiyle, bu parametreleri zeminlerin indeks özellikleri kullanılarak ampirik eşitlikler aracılığıyla belirlemeye yarayan eşitliklerden de yararlanılmaktadır (Öngen, 2015). Ancak ampirik eşitliklere dayalı yöntemlerin yalnızca ön değerlendirme ve sınıflandırma amacıyla kullanılması, tasarım ve uygulama aşamasında ise doğrudan laboratuvar deneyleri ile desteklenmesi gerekmektedir. Çünkü bu eşitlikler belirli zemin türleri, deney koşulları ve belli veri aralıkları özelinde üretilmişlerdir. Yine şişen zeminlerin mühendislik çalışmaları kapsamında değerlendirmesi yalnızca laboratuvar ortamından ibaret olmamalı, arazi gözlemleri, jeolojik koşullar, yeraltı suyu durumu, iklimsel koşullar, temel derinliği, bitki kökleri, yapı yükleri birlikte ele alınmalıdır.

Şişen zeminlerin iyileştirmesinde kullanılan yöntemler mekanik/fiziksel yöntemler, kimyasal stabilizasyon yöntemleri ve yapı tasarım yöntemleri olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Mekanik/fiziksel yöntemler arasında ön ıslatma, aşırı sıkıştırma veya zeminin kaldırılarak uygun dolgu malzemesi ile değiştirilmesi gibi yöntemler yer alırken, kimyasal stabilizasyon yöntemlerinde kireç, çimento, polimerler veya uçucu kül gibi katkı maddeleri ile kilin mineralojik yapısının değiştirilmesi hedeflenmektedir (Kılıç, 2020; Özkan, 2024). Yapısal tasarım yöntemlerinde ise derin/rijit temeller, kazıklı temeller, özel radye sistemleri gibi yapısal önlemlerle zeminin şişme davranışına karşı direnç oluşturulması ve temel

hareketlerinin kontrollü bir şekilde sınırlanması amaçlanmaktadır (Yılmaz, 1998).

Bu kitap bölümünün amacı şişen zeminlerin temel özellikleri ve jeoteknik karakterizasyonu, şişme davranışının mineralojik ve mekanik sebepleri, şişme parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan laboratuvar deneyleri ve iyileştirme stratejileri hakkında güncel bilgileri sentezleyerek, pratik ve bilimsel bir rehber sunmaktır. Bu kapsamda, öncelikle şişen zeminlerin tanımı, sınıflandırılması ve şişme mekanizması ele alınacak, ardından laboratuvar deneylerinden bahsedilecek ve iyileştirme yöntemlerinin zeminlerin şişme davranışı üzerindeki etkisi detaylandırılacaktır.

## **Şişen Zeminlerin Temel Özellikleri ve Şişme Davranışı**

### **Şişen Zeminlerin Tanımı ve Sınıflandırılması**

Şişen zeminler, genellikle bünyelerinde montmorillonit gibi kil mineralleri bulunduran ve su muhtevalarında meydana gelen değişimler neticesinde şişme ya da büzülme yönünde hacimsel değişiklik gösteren ve mühendislik problemlerine yol açan zeminlerdir. Mühendislik açısından şişen zeminlerde esas problem sadece şişmenin büyüklüğü değil aynı zamanda hacim değişiminin düzensiz, zamana bağlı ve diferansiyel davranış göstermesidir. Bir başka ifadeyle şişen zeminlerde yapıya zarar veren sadece zeminin şişmesi değil bu şişme davranışının yapının temeli boyunca homojen olarak gerçekleşmemesidir. Bu nedenle şişen zeminler, taşıma gücü ve oturma problemlerinden ayrı tutularak hacim değişimli özel bir problem grubu olarak ele alınmaktadır.

Literatürde şişme davranışı gösteren zeminlerin tanımlanması için şişen zeminler (swelling soils), yüksek şişme potansiyeline sahip zeminler (expansive soils), şişen killer (expansive/swelling clays) gibi kavramlar kullanılmaktadır. Şişen zeminler (swelling soils) ifadesi su muhtevastaki değişimler

neticesinde hacimsel artış gösteren zeminleri ifade ederken, yüksek şişme potansiyeline sahip zeminler (expansive soils) kavramı mühendislik yapıları açısından problem oluşturabilecek zeminleri ifade etmek için kullanılmaktadır.

Zeminlerde şişme problemi ince taneli zeminler ile ilişkilendirilmektedir. Ancak bu durumun her durumda geçerli olmadığı unutulmamalıdır. Her ince taneli zeminde şişme gerçekleşmez. Aynı şekilde yüksek kil içeriğine sahip her zeminde problemlili şişme davranışı gözlenmez. Burada önemli unsur, zeminin su ile temas ettiğinde hacimsel olarak ne kadar değişim gösterdiğidir. Bu hacimsel değişim ise sadece tane boyuna değil aynı zamanda zeminin içerdiği kil türü, kuru birim hacim ağırlık, su içeriği, yeraltısuyu durumu, boşluk oranı, Atterberg limitleri, çevre koşulları gibi çok sayıda faktörün karmaşık ilişkisine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu sebeple şişen zeminlerin sadece tane boyu üzerinden tanımlanması ve sınıflandırılması doğru ve yeterli değildir.

Şişme davranışı killi zeminler ile doğrudan ilişkilidir. Bunun nedeni kil minerallerinin geniş özgül yüzey alanına sahip olması, su moleküllerini absorbe edebilmeleri, yüzeylerinde bulunan negatif elektriksel yüklerin yeraltısuyundaki katyonlarla olan etkileşimleri neticesinde belirli kil minerallerinde su moleküllerinin kristal yapı aralarına girebilmesidir. Özellikle smektit grubu kil mineralleri yüksek şişme potansiyeline sahiptir. Buna karşılık illit sınıfı kil mineralleri düşük, kaolinit sınıfı kil mineralleri ise orta düzeyde şişme davranışı göstermektedir. Dolayısıyla smektit grubu kil mineralleri içeren zeminlerin şişme davranışı göstermesi beklenir. Ancak bu noktada dikkat edilmesi gereken husus zeminlerin homojen ve tamamıyla saf bir bileşimden oluşmamalarıdır. Zeminin içerisinde bulunan kil, feldspat, silt, çakıl, kum, kuvars, organik madde gibi malzemelerin oranı tek bir mineralden ziyade tüm zemin sisteminin birleşik davranışını yansıtmaktadır (Al-Rawas & Goosen,

2006). Dolayısıyla zemin davranışı tek bir mineral üzerinden değil tüm zemin sisteminin birleşik yapısı üzerinden değerlendirilmelidir.

Şişen zeminler sadece belirli kil mineralleri ile sınırlı değildir. Ayrışmış şeyller, marnlar, kilttaşları, bazı sedimanter kayaçlar ve bazı altere olmuş volkanik kayaçlar da şişme davranışı gösterebilirler. Özellikle ayrışmış şeyller (expansive shales) su ile etkileşimi neticesinde kil zeminlerden daha problemlili davranış gösterip mühendislik problemlerine sebep olabilirler. Şeyl, litolojik olarak kaya malzemesi olsa da ayrıştıktan sonra mühendislik davranışı açısından zemin karakteri gösterebilmektedir. Bu nedenle yüksek şişme potansiyeline sahip malzemeler (expansive materials) kavramı sadece killi zeminler olarak algılanmamalı ve yukarıda bahsedilen ayrışmış kayaçları da dikkate alarak değerlendirilmelidir (Chen, 1975; Nelson & Miller, 1993).

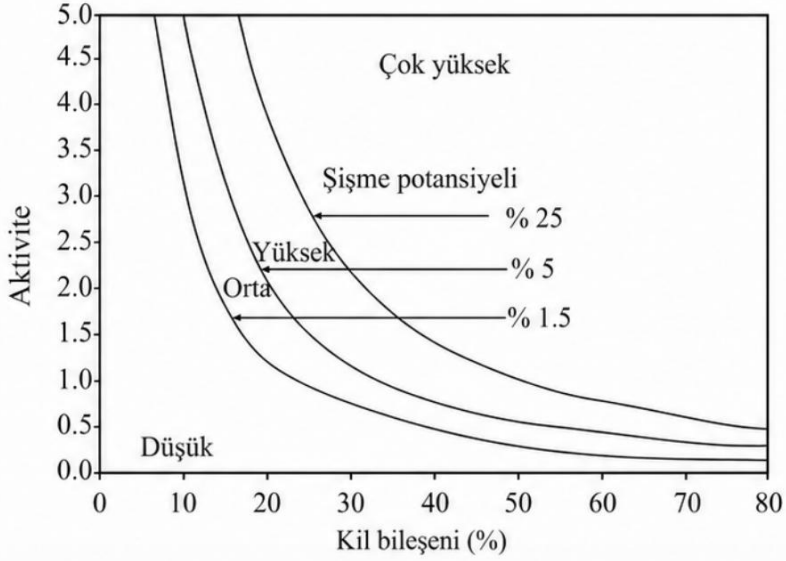
Zeminlerin şişme davranışlarının tanımlanmasından en büyük güçlüklerden biri şişme davranışının sadece zemin malzemesine bağlı olarak değil aynı zamanda çevresel koşullara bağlı olarak da değişmesidir. Örneğin yüksek plastisiteye sahip bir killi zemin doğal durumda suya doymun bir ortamda ve koşulda bulunuyorsa bünyesine sınırlı miktarda ek su alacak ve laboratuvarında düşük şişme gösterecektir. Buna karşılık aynı zemin, zemin suyu açısından kuru durumda olması durumunda su ile temas ettiğinde ciddi hacim artışı gösterebilir. Aynı şekilde yüksek kuru yoğunlukta sıkışmış zemin gevşek yapıda bir eşdeğerine göre daha yüksek şişme davranışı gösterebilir. Bu sebeple zeminlerde şişme davranışı sadece malzeme kaynaklı değil aynı zamanda çevre koşullarına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Şişen zeminlerin sınıflandırılmasına yönelik tarih boyunca birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımların bir kısmı indeks özelliklere, bir kısmı mineralojik özelliklere, bir kısmı laboratuvar deneylerine dayanmaktadır. Erken zamanda araştırmacılar

zeminlerin indeks özelliklerini kullanarak zeminlerin şişme davranışını belirlemeye çalışmışlardır (Holtz & Gibbs, 1956; Seed vd. 1962). Bu ve benzeri çalışmalar modern jeoteknik mühendisliğinde, zeminlerin mineralojik bileşim, kıvam limitleri, başlangıç su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık gibi parametreleri kullanarak şişme davranışını tahmin etmeye yarayan ampirik sınıflama sistemlerinin temelini oluşturmuştur. Ancak aynı kıvam limitlerine, başlangıç su içeriğine veya eşdeğer diğer özelliklere sahip zeminler farklı özellikler gösterebilmektedir. Bu sebeple zeminlerin şişme davranışının belirlenmesine yarayan indeks özellikler veya ampirik eşitlikler doğrudan tasarım parametresi değil ön değerlendirme veya tahmin aracı olarak görülmelidir.

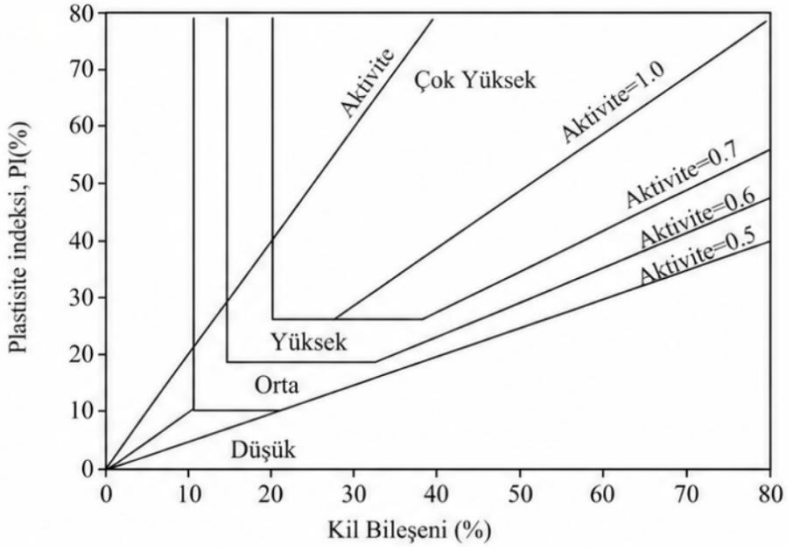
Williams (1958), zemin örnekleri üzerinde gerçekleştirdiği şişme testleri neticesinde, kil yüzdesi ve plastisite indeksi ilişkisi doğrultusunda zeminlerin sınıflanmasında kullanılacak şişme abağı önermiştir. Seed vd. (1962), aktivite ile kil yüzdesi arasındaki ilişkiyi esas olarak şişen zeminlerin sınıflandırılmasına yönelik bir abak önermiştir (Şekil 1). Yine Van der Merve (1964), kil yüzdesi ile plastisite indeksi arasındaki ilişki neticesinde şişen zeminlerin sınıflandırılmasına yarayan bir abak geliştirmiştir (Şekil 2). Bu abak günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Dakshanamurthy ve Raman (1973), zemin malzemesinin likit limit ve plastisite indeksine dayanarak şişme potansiyelini tahmin eden abak geliştirmiştir (Şekil 3).

Şekil 1 Seed vd. (1962) tarafından önerilen şişme potansiyeli abağı.



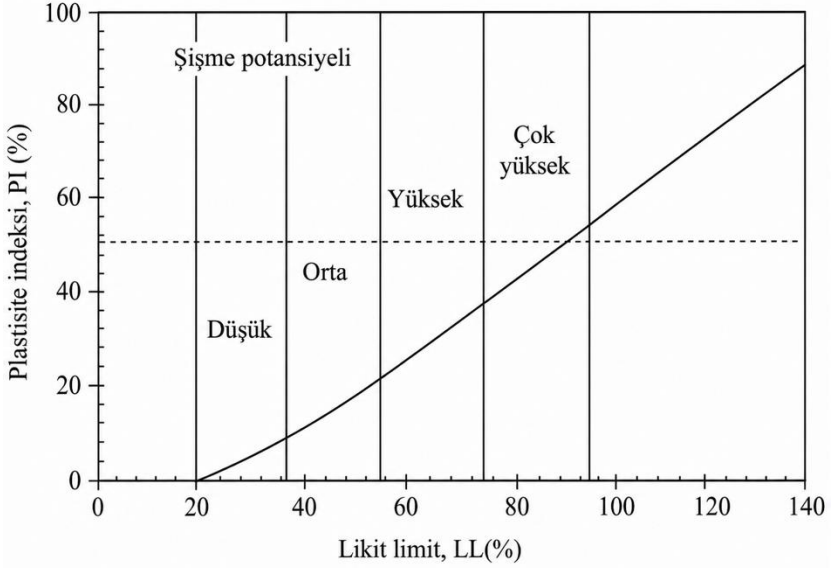
Kaynak: Seed vd. (1962); akt. Öngen (2015)

Şekil 2 van der Merve (1964) tarafından önerilen şişme potansiyeli abağı.



Kaynak: van der Merve (1964); akt. Öngen (2015)

Şekil 3 Dakshanamurthy ve Raman (1973), tarafından önerilen şişme potansiyeli abağı



Kaynak: Dakshanamurthy ve Raman (1973); akt. Öngen (2015)

Yukarıdaki araştırmaların yanı sıra Skempton (1953), killerin aktivite kavramını ortaya koyarak, kil yüzdesi ve plastisite indeksi arasındaki ilişkiyi dikkate alarak şişme potansiyelini belirleyen aktivite sınıflamasını keşfetmiştir. Bu kapsamda düşük aktivite kaolinitik davranışa yüksek aktivite ise smektitik davranışa işaret etmektedir. Aktivite değeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenmektedir:

$$\text{Aktivite (A)} = \text{Plastisite indeksi (PI)} / \text{Kil yüzdesi (\%)}$$

Bu sınıflamaya göre;

$A < 0.75 \rightarrow$  İnakaktif killer

$0.75 \leq A \leq 1.25 \rightarrow$  Normal aktif killer

$A > 1.25 \rightarrow$  Aktif killer

sınıfına girmektedir. İnaktif killer genellikle kaolinitik davranışa sahip olup düşük şişme potansiyeline sahiptir. Aktif killer ise smektit grubu minerallerinden olup yüksek şişme davranışı gösterme potansiyeline sahiptir. Bu sebeple aktivite kavramı zeminlerin şişme özelliklerini tahmin etmeye yarayan önemli bir parametredir.

Seed vd. (1962), Skempton (1953) tarafından geliştirilen aktivite formülünü:

$$\text{Aktivite (A)} = [\text{Plastisite indeksi (PI)}] / [\text{Kil yüzdesi (\%)} - 5]$$

olarak düzenlemiş ve aktivite değeri 0.75'in altında olan zeminlerin hacimsel değişimini düşük, 0.75-1.25 olan zeminleri orta, 1.25'ten fazla olanları yüksek olarak sınıflandırmıştır. Aynı çalışmada şişme potansiyelini (S), aktivite (A) ve kil yüzdesine (C) bağlı olarak hesaplanmasına yarayan aşağıdaki eşitliği önermiştir:

$$S = k (A)^{2.44} (C)^{3.44}$$

Burada k değeri tüm kil mineralleri için kullanılan bir sabit olarak yer almaktadır ( $3.6 \times 10^{-5}$ )

USCS (Unified Soil Classification System) sınıflaması da şişen zeminlerin sınıflamasında kullanılabilir. USCS'te özellikle CH sınıfına giren ince taneli zeminler, likit limit ve plastisite indeksi değerleri ile şişme potansiyeli yüksek olarak değerlendirilmelidir. Ancak CH grubunda yer alan tüm zeminlerin şişme davranışı göstereceğini düşünmek doğru değildir. Dolayısıyla bu sınıflama ön tarama açısından bir gösterge olabilir ancak tek başına yeterli değildir.

Chen (1975) ise önerdiği sınıflamada zeminlerin şişme potansiyeli zeminin plastisite indeksi, ince tane oranı, likit limit ve SPT değerleri kullanılarak tahmin edilmektedir (Tablo 1). Bu sınıflamada ilgili parametrelerin sınıflama aralığına bakılmasıyla şişme potansiyeli düşük, orta, yüksek veya çok yüksek olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte bu parametrelerin farklı

aralıklarda olması ve farklı risk seviyelerine işaret etmesi durumunda nihai değerlendirme doğrudan şişme deneyleri ile yapılmalıdır.

*Tablo 1 Chen (1975) tarafından önerilen şişme potansiyeli sınıflaması.*

No. 200 elekten geçen malzeme (%)	Likit limit, LL (%)	SPT-N (darbe/ft)	Beklenen hacim değişimi (%)	Şişme derecesi
>95	>60	>30	>10	Çok yüksek
60–95	40–60	20–30	3–10	Yüksek
30–60	30–40	10–20	1–5	Orta
<30	<30	<10	<1	Düşük

*Kaynak: Chen (1975)*

Şişen zeminler jeolojik kökene göre de sınıflandırılabilir. Bu zeminler genellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde sedimanter havzalarda, gölsel çökel ortamlarında, ayrılmış şeyllerde ve altere olmuş bazı volkanik alanlarda bulunmaktadır. Bu bölgelerde mevsimsel yağış ve buharlaşma döngüsü sonucu zeminlerin su içeriğinde meydana gelen değişimler hacim değişimlerini daha önemli hale getirmektedir. Türkiye açısından İç Anadolu ve geç Neojen çökelleri ile temsil edilen birimler, yüksek şişme potansiyeli sergileyen killi zeminlerin yaygın olduğu başlıca formasyonlar arasında yer almaktadır. Yüksek şişme potansiyeli ile karakterize edilen Ankara kili bu konuda en bilinen örneklerdendir.

### **Şişme Davranışının Mineralojik Temeli**

Kil mineralleri kayaçların atmosferik ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda anakayanın ayrışması neticesinde oluşan, tabakalı yapıda olan ve 2 mikron ve daha küçük boyuttaki alüminyum silikat yapısında olan minerallerdir. Kil minerallerinin kristal yapısı, yüzey alanı ve iyon değişim kapasiteleri zeminlerin şişme potansiyelini doğrudan etkilemektedir. Özellikle

montmorillonit tipi kil mineralleri genişleyen kafes yapısına sahip olduklarından su ile etkileşime girip hacimsel olarak genişleme eğilimindedirler. Ancak kaolinit gibi sabit kafes yapısındaki killerde ise bu tarz bir genişleme imkânı olmadığından bu tarz killeri içeren zeminlerde hacimsel genişleme sınırlı kalmaktadır. Dolayısıyla farklı yapı ve karakteristikleri ile kil mineralleri içinde buldukları kaya ve zeminlerde inşa edilen mühendislik yapılarında problemlere sebep olabilmektedirler. Özellikle kurak ve yarı kurak iklim koşullarında şişen zeminlerle ilgili gerekli önlemler alınmadığı takdirde hafif yapılar, yollar ve boru hatları gibi mühendislik yapılarında ciddi hasarlar meydana gelmektedir.

Dünya üzerindeki bütün killer anakayanın ayrışması neticesinde oluşmaktadır. Killerin farklı tiplerde gözlenmesinin nedeni ise anakayanın ayrışması esnasındaki koşulların farklılığından meydana gelmektedir. Örneğin montmorillonit ve kaolinit minerallerinin ikisi de magmatik kayanın ayrışmasından dolayı oluşmuşlardır. Ancak ayrışmaları esnasındaki farklı koşullar bu minerallerin farklı yapı sunmalarına sebep olmuştur. Bu farklılıktan dolayı su muhtevalarında meydana gelen değişim neticesinde kaolinit mineralini içeren kaya ve zeminlerde şişme problemi gözlenmezken, motmorillonit içeren kaya ve zeminlerde şişme gözlenmektedir. Montmorillonit minerallerinin tabakalarının arasına giren su hacimsel olarak artışa dolayısıyla şişmeye sebep olacaktır. Tablo 2’de kil grubu minerallerin çeşitli özellikleri özetlenmiştir.

*Tablo 2 Kil minerallerinin özellikleri (Chen, 1983; Nelson & Miller, 1992; akt. Öngen, 2015)*

Özellik	Kaolinit	İllit	Montmorillonit
Tane Kalınlığı	0.5-2 Mikron	0.003-0.1 Mikron	<9.5 A
Tane Çapı (Mikron)	0.5-4	0.5-10	0.05-10
Özgül Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /gr)	10-20	65-180	50-840
Taneler Arası Uzaklık (A)	14.4	10	9.6
Likit Limit, LL (%)	30-100	60-120	100-900
Plastik Limit, PL (%)	25-40	35-60	50-100
Büzülme Limiti, RL (%)	25-29	15-17	8.5-15
Aktivite	0.33-0.46	0.9	1.5-7.2
Tane Özellikleri	Kalın Yassı 0.1-4x0.05- 2µm	İnce Yassı 0.03-0.1x1- 10µm	İnce Filimsi Yassı >10Ax1-10µm
Tabakalar Arası Bağ	Güçlü Hidrojen Bağı	Güçlü Potasyum Bağı	Çok zayıf Van der Walls bağı
Kasyon Değişirme Kapasitesi (CEC) (meq/100 gr)	3-15	10-40	70-150

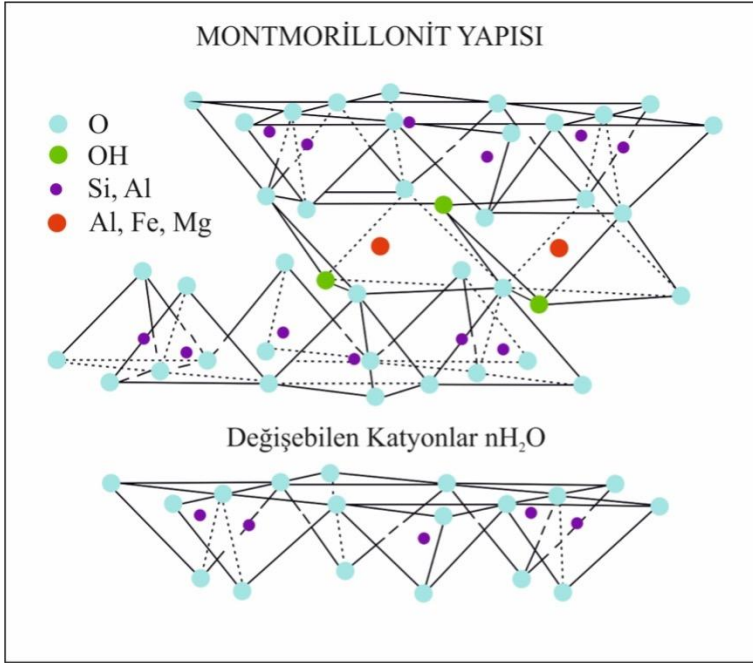
A: Angöström (1 mm = 10<sup>-6</sup>µm = 10<sup>9</sup>A)

Kil minerallerinin tipinin belirlenmesinde X ışını difraktometresi (XRD) en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu yöntem sayesinde kaolinit, illit, smektit, klorit gibi kil minerallerinin ayırt edilmesi sağlanır. Yine taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı spektroskopi (EDS), termal analizler gibi özel yöntemlerle kil mineralleri belirlenebilmektedir. Ancak en yaygın olarak XRD analizleri kullanılmaktadır. Önceki kısımlarda bahsedildiği gibi smektit grubu mineraller zeminlerde şişme probleminin temelini oluşturmaktadır. Ancak zeminlerin sahadaki gerçek davranışı sadece mineralojik yapıyla belirlenememekte zemin yapısı ve çevresel koşullarla şekillenmektedir. Bu sebeple mineralojik analizler zeminlerin şişme davranışı hususunda önemli bir gösterge olmakla beraber zeminin jeoteknik özelliği açısından sadece bir bileşen olarak ele alınmalıdır.

## Şişme Mekanizması

Kil minerallerinin farklı kristal yapıya sahip olmalarından dolayı su ile olan etkileşimleri ve tabakalar arasındaki bağ kuvvetleri değişkenlik göstermektedir. Bu durumda bazı kil mineralleri yüksek bazıları düşük şişme davranışı göstermektedir. Smektit grubu mineraller özellikle montmorillonit minerali şişme problemlerinin görüldüğü zeminlerde baskındır. Bu sebeple montmorillonit minerali şişme konusunda özel bir öneme sahiptir. Montmorillonit yapısında, iki silika tetrahedron tabakası arasında yer alan bir alümina oktahedron plakası bulunmaktadır. Bu tabakalar arasında yer alan molekül bağları ve katyonlar, suyla temas ettiğinde önemli miktarda hacimsel değişime yol açmaktadır. Montmorillonit mineralinin kristal yapısı Şekil 4’te gösterilmiştir.

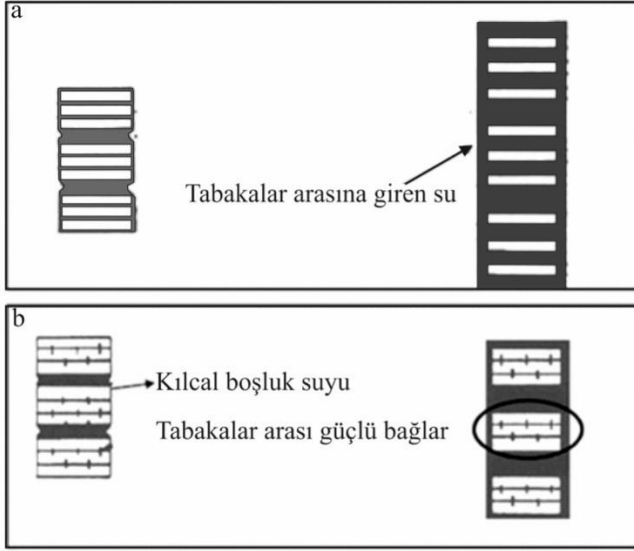
Şekil 4 Montmorillonit mineralinin yapısı



Kaynak: Grim, 1962'den düzenlenerek alınmıştır, akt. Öngen (2015)

Şişme mekanizmasının ilk aşamasında su molekülleri kil minerallerinin yüzeyleri ile etkileşime girer. Kil yüzeyleri negatif yüklü olduğundan polar karakterdeki su moleküllerini kendisine doğru çeker ve bu su kil yüzeylerinde absorbe edilerek ince katmanlı bir su filmi oluşur. Oluşan ince katmanlı su filmi, kil katmanları ile güçlü bir etkileşim içerisindedir. Mineral yüzeylerinin daha fazla su alma eğilimde olmalarından dolayı özellikle düşük su içeriğine sahip zeminlerde bu etkileşim oldukça kuvvetlidir. Şişme mekanizmasının bu ilk aşamasında su kil kristalleri arasına girerek mevcut dengeyi bozar ve parçacıkların birbirinden uzaklaşmasına neden olur (Şekil 5.a.). Şişmenin ikinci mekanizmasında ise kil kristalleri arasına girmiş olan su bu kez kil minerallerini oluşturan kristal tabakalar arasına girmektedir. Tabakalar arasına giren su arttıkça tabakalar birbirinden uzaklaşmakta, kil mineralleri hacimsel olarak genişlemekte ve şişme meydana gelmektedir (Şekil 5.b.). Şişme mekanizmasının ilk aşaması tüm kil minerallerinde gerçekleşirken ikinci aşama daha çok 2:1 yapılu smektit grubu kil minerallerine özgüdür. Smektit grubu killerin diğer kil gruplarına göre daha fazla şişme davranışı göstermesinin temel nedeni budur. Bu sebeple su ile etkileşimleri neticesinde tüm kil minerallerinde bir miktar hacimsel değişim görülse de mühendislik açıdan problemler smektit grubu kil minerallerinin yer aldığı zeminlerle ilişkilidir.

Şekil 5 a. Kristaller arasında görülen şişme mekanizması, b. Parçacıklar arasında görülen şişme mekanizması



Kaynak: Popescu (1986); akt. Öngen (2015)

Zeminlerde şişme mekanizmasını açıklayan bir diğer teori elektriksel çift tabaka teorisidir. Negatif yüklü olan kil minerallerinin etrafında pozitif yüklü katyonların birikmesiyle bir tabaka bulunmaktadır. Bu tabaka su miktarı arttıkça genişler ve itme kuvveti oluşturur. Bu durum kil kristallerinin birbirinden uzaklaşmasına ve hacimsel olarak artış meydana gelmesine neden olur (Nelson & Miller, 1993). Burada meydana gelen şişme miktarı ortamda bulunan katyon türüne göre değişmektedir. Sodyum gibi tek değerlikli iyonlar neticesinde daha geniş bir çift tabaka oluşur ve şişme artar. Ancak magnezyum ve kalsiyum gibi çift değerlikli katyonlarda ise yapı daha sıkı olup şişme sınırlandırılabilir. Bu sebeple sodyum açısından zengin smektit grubu killerde şişme potansiyeli daha yüksektir.

Şişme mekanizmasında mineralojik yapının yanı sıra zemin malzemesinin yapısal ve fiziksel özellikleri de önemli rol oynamaktadır. Zeminler doku olarak heterojen bir yapıya sahiptir. Bu heterojen tane yapısı zemine su girişini ve hacimsel değişimi etkilemektedir. Örneğin gevşek yapıdaki zeminler daha az şişme davranışı gösterirken; sıkı, yoğun ve tanelerin birbirine daha yakın olduğu zeminler daha fazla şişme davranışı gösterebilmektedir. Aynı şekilde kuru yoğunluk şişme mekanizmasını etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Yüksek kuru yoğunluğa sahip malzemelerde partiküller arasındaki mesafe az olduğundan dolayı elektriksel etkileşimler daha belirgin olup şişme açısından yüksek davranış gözlenmektedir.

### **Şişme Davranışını Etkileyen Faktörler**

Zeminlerde meydana gelen şişme davranışı tek bir parametre ile açıklanabilecek bir mühendislik problemi değildir. Aynı jeolojik birim içerisinde aynı yapıya sahip zeminler bile çevresel koşulların değişmesiyle farklı şişme davranışları gösterebilmektedir. Çünkü bir zeminin şişme davranışı sadece zeminin mineralojisine değil fiziksel, kimyasal, çevresel birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple bir zeminin şişme davranışının bu faktörlerin tamamı dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Zeminlerin şişme potansiyelini etkileyen en önemli faktörlerden biri zeminin mineralojik özelliğidir. Önceki kısımlarda bahsedildiği gibi özellikle smektit grubu kil minerallerinden oluşan zeminlerin yüksek şişme potansiyeline sahip oldukları bilinmektedir. Yüksek iyon değişim kapasitesi, yüksek yüzey alanı ve yüksek su alma kapasiteleriyle smektit grubu kil mineralleri zeminlerde şişme problemlerinin ana nedenidir. Buna karşılık illit ve vermikülit gibi mineraller orta düzeyde şişme göstermektedirler. Kaolinit grubu kil mineralleri ise şişme açısından daha stabil bir davranış göstermekte

ve sınırlı miktarda hacim değişimi meydana gelmektedir. Ancak zeminler hem fiziksel hem mineralojik açıdan heterojen yapıda olduklarından dolayı şişme davranışı tek bir mineralin özelliği ile açıklanamamaktadır.

şişme davranışını etkileyen bir diğer faktör zemin içerisindeki ince tane oranıdır. Zemin içerisinde ince tane oranının artmasıyla su ile etkileşime giren aktif yüzey alanı artmaktadır. Ancak tıpkı diğer faktörlerde olduğu gibi ince tane oranı zeminlerin şişme davranışının değerlendirilmesi açısından tek başına yeterli değildir.

Zeminlerin plasitisite özellikleri şişme davranışları ile güçlü bir ilişki göstermektedir. Likit limit ve plasitisite indeksinin artması zeminlerin aktif davranışına işaret etmektedir. Bu sebeple zeminlerin şişme davranışını tahmin etmek için kullanılan birçok ampirik yaklaşımda plasitisite indeksi ve likit limit gibi faktörler temel değerlendirme parametreleri olarak kullanılmaktadır. Yüksek plasisiteli killerde su tutma davranışı da yüksek olacağından hacim değişiminin yüksek olma ihtimali güçlenmektedir. Bu kapsamda Chen (1975), plasitisite indeksi ve şişme davranışı arasında güçlü bir ilişki tespit etmiştir.

şişme davranışını etkileyen faktörlerden bir diğeri başlangıç su içeriğidir. Düşük başlangıç su içeriğine sahip zeminler bünyelerine daha fazla su alma eğilimindedirler. Bu sebeple özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde bünyelerinde aktif killer bulduran zeminler su ile temas ettiklerinde büyük hacim değişimi gösterebilmektedirler. Ancak bu tür zeminler, başlangıç su içeriğinin yüksek olması durumunda bünyelerine daha az ilave su alma eğilimindedirler. Bu durumda böyle zeminlerde daha az hacim değişimi gözlenmektedir. Ülkemizde ngen (2015) tarafından yapılan çalışmada, başlangıç su içeriğinin artmasıyla zeminlerin şişme davranışında belirgin olarak azalma meydana geldiği

gösterilmiştir. Yine Öngen ve Ergüler (2022) tarafından yapılan aynı kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan çalışmada, başlangıç su içeriği ile şişme basıncı arasında güçlü ilişkiler bulunduğu tespit edilmiştir.

Kuru yoğunluk ve sıkışma derecesi de zeminlerin şişme davranışında önemli rol oynamaktadır. Yüksek kuru yoğunluğa sahip şişen zeminlerde, partiküller birbirine daha yakın oldukları için bünyelerine su almaları durumunda daha yüksek elektrostatik itme kuvveti oluşmakta ve yüksek reaksiyon basıncı göstermektedirler.

Örtü yükü parametresi zeminlerin şişme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Zemin üzerine uygulanan düşey gerilmenin şişme basıncından yüksek olması durumunda zeminin şişme davranışı baskılanıp engellenebilir. Bu sebeple hafif yapılarda şişme problemleri meydana gelmekte iken aynı zemin içerisine inşa edilen ağır yapılarda şişme kaynaklı deformasyonlar sınırlı kalabilmektedir. Ancak örtü yükü veya üst yük şişme problemini tamamen ortadan kaldırmamaktadır. Çünkü aktivitesi çok yüksek olan killerde yüksek miktarda şişme meydana gelebilir ve şişme hareketi heterojen ve çok yönlü olduğundan yapılarda deformasyonlar meydana gelebilir.

İklim, zeminlerin şişme davranışını etkileyen önemli bir çevresel faktördür. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde yağış ve buharlaşma arasındaki fark yıl içerisinde mevsimler boyunca sürekli değişmektedir. Bu durum, kuruyan zeminlerin bünyelerine yüksek miktarda su almalarına ve önemli hacim artışlarına neden olmaktadır.

Yeraltısuyu ve drenaj problemleri şişme davranışını etkileyen faktörler arasındadır. Yeraltısuyunda zaman içerisinde meydana gelen değişimler, drenaj problemleri, sızıntılar neticesinde zemin malzemesinin nem içeriği sürekli değişebilir. Örneğin inşa edilen yapının etrafında sürekli su birikmesi zemin malzemesinde şişme ve

kabarmalara neden olabilmektedir. Bu sebeple drenaj tasarımı, temel tasarımı kadar önem arz etmektedir.

Sonuç olarak zeminlerin şişme davranışı mineralojik yapı, zeminin plastisite özellikleri, ince tane oranı, başlangıç su içeriği, kuru yoğunluk, örtü yükü, iklim, yeraltısuyu, drenaj koşulları gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu çok değişkenli yapıdan dolayı zeminlerin şişme davranışının tek bir parametre üzerinden değerlendirilmesi sağlıklı ve gerçekçi değildir. Güvenilir tespitler için saha gözlemleri, laboratuvar analizleri, mineralojik analizler ve çevresel koşulların hep birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

### **Şişen Parametrelerinin Tayinine Dair Laboratuvar Deneyleri**

Zeminlerin şişme davranışının doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi için bu zeminlerin şişme parametrelerinin laboratuvar ortamında belirlenmesi gerekmektedir. İndeks özellikler ve gözleme dayalı değerlendirmeler zeminlerin şişme parametrelerini kesin olarak belirleyecek bir özellikler değildir. Çünkü aynı indeks özelliklere veya yapılaraya sahip zeminler farklı mineralojik yapı, başlangıç su içeriği veya farklı çevresel koşullar nedeniyle oldukça farklı şişme davranışı gösterebilmektedir. Bu nedenle laboratuvar deneyleri kritik önem arz etmektedir (Chen, 1975; Nelson&Miller, 1992).

### **Doğrudan Ölçüm Yöntemleri**

Doğrudan genellikle ölçme yöntemlerinde konsolidasyon (ödometre) cihazları kullanılmaktadır. Deneyi yapılacak zemin numunesi, konsolidasyon halkasına yerleştirilmekte ve konsolidasyon hücrelerine yerleştirilerek sabitlenmektedir. Bu sayede konsolidasyon halkasının içerisindeki numunenin yatay yönde deformasyonu engellenmekte ve şişme hareketinin düşey yönde gelişmesi sağlanmaktadır. Sonrasında numune kontrollü bir şekilde suya maruz bırakılarak şişme hareketi tetiklenmektedir. Serbest

şişme yöntemi ve sabit hacim yöntemi en çok kullanılan doğrudan ölçme yöntemleridir. Bunların yanı sıra çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen alternatif ölçme yöntemleri vardır. Ancak mühendislik uygulamalarında en çok bu iki yöntem kullanılmaktadır. Deneylerin uygulanmasında numune hazırlama aşamaları önem arz etmektedir. Çünkü kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su içeriği, boşluk oranı gibi faktörlerin zeminlerin şişme potansiyelleri üzerinde önemli etkileri vardır. Bu nedenle deneylerin uygulama aşamalarında ilgili deney standartlarına uyulması gerekmektedir.

### **Serbest Şişme Yöntemi**

Serbest şişme deneyi, şişen zeminlerin hacim değiştirme potansiyellerinin değerlendirilmesinde en yaygın ve temel yöntemlerden biridir. Bu yöntemde amaç, zeminlerin su ile temas ettiklerinde herhangi bir dış müdahale olmaksızın göstereceği hacimsel artışın belirlenmesidir. Deney kapsamında numune konsolidasyon halkasına yerleştirilerek su ile temas ettirilmekte ve düşük bir başlangıç yükü ile dengelenmektedir. Düşey yönde meydana gelen deformasyonlar dengeye ulaşmasının ardından şişme yüzdesi hesaplanmaktadır.

$$S(\%) = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100$$

Burada;

S (%): Şişme yüzdesi

$\Delta H$ : Şişme sonucu meydana gelen yükseklik artışı

$H_0$ : Başlangıç numune yüksekliği

Serbest şişme deneyleri, zeminin hacimsel değişim potansiyelini göstermesi açısından oldukça kullanışlıdır. Yüksek

şişme yüzdesi değerleri şişme açısından problemlı zeminleri işaret etmektedir. Bununla beraber bu deney sonuçları saha koşullarını doğrudan temsil etmemektedir. Çünkü laboratuvar koşullarında şişme tamamen serbest koşullarda gerçekleşmekte iken saha koşullarında zeminin üzerinde bir miktar örtü yük bulunmakta ve şişme tamamen serbest koşullarda gerçekleşmemektedir. Bu sebeple deney sonuçları zeminin şişme davranışı hususunda ön değerlendirme sağlamakla birlikte şişme deneyleri ile yorumlanmalıdır. Hızlı ve uygulanabilir olması ve kapsamlı bir ekipman gerektirmemesi nedeniyle özellikle ön araştırma aşamasında yaygın kullanılmaktadır.

### **Serbest Hacim Yöntemi**

Sabit hacim yöntemi zeminlerin su aldıklarında gösterebilecekleri maksimum şişme basıncının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Zeminler saha koşullarında serbest şişme gösteremediğinden bu deney zeminlerin gerçek davranışının gözlenmesinde önem arz etmektedir. Numune konsolidasyon halkası içerisinde konsolidasyon cihazına yerleştirilmekte, belirli başlangıç yükü altında dengelenmekte ve daha sonra kontrollü bir şekilde su ile temas ettirilmektedir. Serbest şişme deneyinin aksine bu deneyde ek yükler ile numunenin düşey yönde deformasyonuna izin verilmemektedir. Numunenin başlangıç hacmini koruyabilmek için gerekli olan bu gerilme şişme basıncı olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle bu deneyde, şişen zeminlerde hacim artışının engellenmesi için gerekli olan basıncı ölçülmektedir.

Sabit hacim deneyinin avantajlarından biri de doğrudan tasarımda kullanılabilir bir parametre üretmesidir. Deney sonucunda elde edilen şişme basıncı değeri temel tasarımda, yapı zemin etkileşiminde, zemin iyileştirme gereksiniminin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Ancak deney sonuçlarının laboratuvar koşullarına duyarlı olduğu ve numune

hazırlama aşamasındaki faktörlerin deney sonuçları üzerinde etkileri unutulmamalıdır. ASTM D4546 standardında bu deneye ait deney adımları ayrıntılı bir şekilde belirtilmiştir.

### **Şişen Zeminlerde İyileştirme Yöntemleri**

Şişen zeminler, üzerine inşa edilen yapılara zarar verebilen problemlili zemin grupları arasında yer almaktadır. Bu tür zeminlerde meydana gelen hacim değişimleri temellerde veya hafif yapılarda deformasyonlara sebep olmakta; yol kaplamalarında bozulma, kanalizasyon sistemlerinde hasar, temellerde oturma veya kabarma, hafif veya tek katlı yapılarda çeşitli hasarlar ile karşılaşmaktadır. Şişen zeminlerde meydana gelen şişme davranışının sadece belirlenmesi değil bu zeminlerin şişme davranışının önlenmesi veya kontrol altına alınması da önemlidir. Bu kapsamda iyileştirme yöntemleri genellikle mekanik ve fiziksel iyileştirme yöntemleri, kimyasal stabilizasyon yöntemleri ve yapısal tasarım çözümleri olmak üzere üç ana başlıkta toplanmaktadır. Uygulanacak iyileştirme yönteminin seçimi yapı koşullarına, aktif zonun kalınlığına, ekonomik koşullara, saha koşullarına ve şişme potansiyeline bağlı olarak değişmektedir.

### **Mekanik ve Fiziksel İyileştirme Yöntemleri**

Mekanik ve fiziksel iyileştirme yöntemlerinde zeminin mineralojik/kimyasal yapısı değiştirilmeden fiziksel özelliklerine yönelik iyileştirme yapılır. Bu kapsamda aktif zon kalınlığı ve zeminin su içeriği kontrol edilmeye çalışılır. Kimyasal yöntemlere göre daha az çevresel etkiye sahiptir. Düşük ve orta düzeyde şişme potansiyeline sahip zeminlerde etkili sonuçlar vermektedir.

### **Nem Kontrolü ve Bariyer Sistemleri**

Zeminlerde şişmenin meydana gelebilmesi için aktif kil minerallerinin su ile temas etmesi gerekmektedir. Bu sebeple şişme problemlerinin nedeni sadece zeminin mineralojik yapısı değil aynı

zamanda suyla temas etme durumudur. Bu durum, şişen zeminlerde nem kontrolü ile iyileştirme sağlanmasını prensip alan bu yöntemi oldukça önemli hale getirmektedir.

Nem kontrolü yönteminde ana prensip zemin içerisinde aktif zon bölgesinde su içeriğini kontrol ederek hacim değişimlerini azaltmaktır. Yapıya doğru düzensiz su girişleri, yağmur suyu birikimi, drenaj sistemlerinin yetersiz olması, altyapı sistemlerindeki kırıklar, vahşi sulama gibi kontrolsüz sulama yöntemleri şişme problemine sebep olmaktadır. Bu nedenle yapı çevresinde kurulan etkili bir drenaj sistemi bile herhangi bir iyileştirme yöntemine gerek kalmadan şişme problemine çözüm olabilmektedir. Bu kapsamda nem kontrolü için uygulanan adımlardan biri etkili bir yüzey drenajı sistemi kurulmasıdır. Kurulan etkili ve verimli bir drenaj sistemi ile yağmur suları temelden, yüzey suları yüzeyden uzaklaştırılarak suların yapı çevresinde birikmesi önlenmiş olmaktadır. Bu yöntem özellikle düşük eğimli ve geçirimsizliği düşük olan zeminlerde önem arz etmektedir.

### **Zemin Değişirme ve Ön Islatma Yöntemleri**

Şişen zeminlerde uygulanan en eski ve en etkili yöntemlerden biri aktif kil mineralleri ile zengin şişen zeminin kaldırılarak yerine daha uygun bir malzemenin yerleştirilmesidir. Bu yaklaşım, şişen zeminler kaldırılıp ortamdan uzaklaştırıldığı için oldukça etkili sonuçlar vermektedir. Ancak uygulamanın maliyeti şişen zeminin kalınlığına, yeraltısu koşullarına, temel derinliğine ve inşa edilecek yapının türüne göre değişmektedir (Nelson&Miller, 1993).

Yüzey drenajının yanı sıra bir diğer önemli yöntem bariyer sistemlerinin kullanılmasıdır. Yatay veya düşey olarak uygulanabilen bariyer sistemleri ile yapay geçirimsiz bir örtü uygulanarak suyun şişen zeminlerin tabakalarına girmesi engellenmektedir. Yatay bariyer sistemleri beton kaplamalar, asfalt

yüzeyley, geomembranlar ve düşük geçirgenliğe sahip kil tabakaları şeklinde uygulanmaktadır. Düşey bariyer olarak ise yapı çevresindeki hendeklere açılan geomembranlar, beton perdeler ve düşük geçirgenliğe sahip sıkıştırılmış dolgu malzemesi kullanılmaktadır. Nem kontrolü ve bariyer sistemleri aktif zon kalınlığının sınırlı olduğu sahalarda başarılı sonuçlar vermektedir. Aktif zon kalınlığının yüksek olduğu çok kalın şişen zemin tabakalarında veya yeraltısuyunun baskın olduğu bölgelerde tek başına bu yöntemler yeterli olmayabilir. Bu durumda bu yöntemler kimyasal yöntemler ile veya uygun temel tasarım yöntemleri ile uygulanmalıdır.

Zemin değiştirme yönteminde ilk olarak şişen zeminin kalınlığı belirlenmektedir. Sonrasında bu tabakanın tamamı ya da problem teşkil edebilecek kısmı kaldırılarak taşınmakta ve yerine düşük plastisiteli, iyi derecelenmiş ve düşük sıkışabilirliğe sahip zemin malzemesi serilmektedir. Bu zemin malzemesi genellikle çakıl, kum ve düşük plastisiteli siltli malzemelerden oluşmaktadır. Ardından bu malzeme katman serilerek uygun sıkışma enerjisi ile sıkıştırılmakta ve zemin değiştirme işlemi tamamlanmaktadır. Bu yöntem şişen zemin tabakalarının sınırlı olduğu yerlerde uygulanmaktadır. Aksi taktirde, şişen tabakaların kalın olduğu yerlerde yöntemin maliyeti yüksek rakamlara çıkmaktadır. Bu sebeple bu yöntem uygulanırken tüm tabakanın değiştirilmesi yerine genellikle kısmi değiştirme yapılmakta, şişen zeminin bir kısmı değiştirilmekte altta yine şişen zemin bırakılmaktadır.

Zemin değiştirme yönteminde en önemli husus aktif zon kalınlığının doğru belirlenmesidir. Aksi taktirde altta kalan şişen zemin içerisinde şişme meydana gelip üst yapıda diferansiyel kabarmalar ve hasarlar görülebilir. Bu nedenle kazı derinliği belirlenirken mevsimsel yağışlar ve zeminin su içeriğindeki değişim de dikkate alınmalıdır.

Zemin değiştirme yöntemlerinde hızlıca sonuç alınmaktadır. Bu durum bu yöntemin en önemli avantajlarındanır. Kimyasal iyileştirme yöntemlerinde kür bekleme süresine ihtiyaç duyulmakta iken zemin değiştirme yönteminde böyle bir süreye ihtiyaç yoktur. Bununla birlikte nakliye ihtiyacı, dolgu malzemesinin temini, büyük ölçekte kazılar gerektirmesi bu yöntemin uygulanabilirliğini sınırlayabilmektedir.

Şişen zeminlerde uygulanan bir diğer fiziksel iyileştirme yöntemi ön ıslatma (prewetting) yöntemidir. Bu yöntemde yapı inşa edilmeden önce zemin ıslatılarak şişmenin önceden meydana gelmesi sağlanmaktadır. Teorik temel şişme davranışının yapıdan önce su alımı sonucu meydana gelmesine bağlıdır. Böylelikle zeminde şişme hareketi önemli ölçüde tamamlanacak ve ilave hacim değişimleri azaltılarak yapıda meydana gelebilecek deformasyonlara karşı tedbir alınacaktır. Zeminin ıslatılması yüzeyden sulama veya sızdırma havuzları gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Zemin bir süre suya maruz bırakılmakta ve zeminin ulaştığı nem derecesi kontrol edilmektedir. Bu süreçte zeminde kabarmalar da gözlenebilmektedir. Ön ıslatma yönteminin etkililiği, aktif zonun kalınlığı ve zemin malzemesinin geçirgenliği ile yakından ilişkilidir. Düşük geçirgenliğe sahip killi malzemelerde, ön ıslatma amacıyla zemine verilen su oldukça yavaş ilerleyecektir. Aktif zonun kalın olması durumunda tüm zonun belli doğunluğa ulaşabilmesi için zemine büyük miktarlarda su verilmesi gerekecektir. Bu durumlar yöntemin maliyetini ve uygulama süresini artıracaktır. Zemin yeteri kadar ıslatılmış olsa da hacim değişimi tamamen ortadan kalkamayabilir ve mevsimsel süreçler neticesinde meydana gelen ıslanma kuruma çevrimleri sonucunda zeminde hacim değişimleri meydana gelebilmektedir. Bu durum ön ıslatma yöntemini sınırlamaktadır. Bu sebeple ön ıslatma yöntemi çoğu zaman tek başına kullanılmamakta, diğer yöntemlerle birlikte uygulanmaktadır. Ön ıslatma yöntemi kontrollü yükleme ile uygulanabilmektedir. Bu durumda zemin

ıslatılırken yük uygulanarak zeminin şişme miktarının belirli ölçüde sınırlandırılması amaçlanmaktadır.

### **Kimyasal Stabilizasyon Yöntemleri**

Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri kimyasal stabilizasyon yöntemidir. Bu yöntemde zeminin yapısı sadece fiziksel olarak değil kimyasal ve mineralojik olarak da değiştirilerek şişme potansiyeli kalıcı olarak azaltılmaktadır. Özellikle smektit grubu kil minerallerinin yer aldığı zeminlerde mekanik/fiziksel yöntemlerin yeterli olmadığı durumlarda kimyasal stabilizasyon sistemleri uygulanarak zeminler iyileştirilmektedir. Bu doğrultuda zemin içerisine reaksiyona girebilen çeşitli kimyasal maddeler gönderilmektedir. Bu maddeler ile aktif killerin yüzey özellikleri değiştirilmekte, zeminin plastisitesi azaltılmakta, geçirgenliği değişmekte ve şişme potansiyeli azaltılmaktadır. Son yıllarda artan sürdürülebilirlik politikaları ile zemin içerisinde geleneksel bağlayıcılar ve kimyasallar yerine jeopolimerler, endüstriyel atıklar ve polimer tabanlı çeşitli katkılar da gönderilmeye başlanmıştır. Tam bir verim alınması için uygulama öncesi laboratuvarda optimum katkı oranlarının belirlenmesi gerekmektedir. Katkının başarısı sadece katkı malzemesine değil nem koşullarına, çevresel faktörlere, karıştırma kalitesine, zeminin mineralojisine, katkı miktarına bağlı olarak değişmektedir. Bu yöntemde en çok kullanılan uygulamalar kireç ile stabilizasyon, çimento stabilizasyonu ve endüstriyel/polimer esaslı katkı maddelerinin kullanımınıdır.

### **Kireç ile Stabilizasyon**

Kireç stabilizasyonu şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Kireç kullanımının amacı kil mineralleri ile kimyasal reaksiyon oluşturulmasıdır. Bu sayede zeminin plastisitesi azaltılacak, dayanımı artacak ve şişme davranışı kontrol altına alınacaktır. Kireç stabilizasyonunda genelde sönmüş

veya sönmemiş kireç kullanılmaktadır. Kireç zemin içerisine ilave edildikten sonra kimyasal reaksiyonlar başlar ve katyon değişimleri meydana gelir. Kil yüzeyleri üzerindeki katyonlarla kalsiyum iyonları yer değiştirerek zeminin yapısı değişir, plastisitesi azalır ve zemin daha kararlı ve duraylı bir davranış göstermeye başlar.

Kireç stabilizasyonunda meydana gelen bir diğer reaksiyon puzolanik reaksiyonlardır. Kalsiyum ve kil minerallerinden silis ve alümina ortaya çıkmaktadır. Bu silis ve alümina arasında da reaksiyonlar gerçekleşmekte ve bunun sonucunda kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidrat bileşikleri meydana gelmektedir. Bu bileşikler zemin içerisinde çimentolaşmış sağlam bir yapı meydana getirmekte, şişme potansiyeli ve hacim değişimi azalmaktadır (Lime, 1975). Kireç stabilizasyonu yüksek plastisiteli smektit grubu kil minerallerinde önemli sonuçlar verirken, düşük plastisiteli veya organik içerikli zeminlerde aynı derecede etkili olamayabilir. Kullanılacak kirecin oranı laboratuvar koşullarında önceden belirlenmiş olmalıdır. Birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve etkinliği kanıtlanmış olan eski bir yöntem olmasından dolayı şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntemde zeminin şişme basıncı ve şişme yüzdesi düşmekte, plastisite azalmakta, taşıma gücü artmakta, nem değişimlerine duyarlılık azalmaktadır.

### **Çimento ile Stabilizasyon**

Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri çimento stabilizasyonudur. Çimento ile zemin arasında hidratasyon reaksiyonları meydana gelmekte ve zemin daha dayanıklı, rijit ve hacim değişimlerine karşı dirençli bir hale gelmektedir. Bu yöntemde zemine uygulanan çimento su ile reaksiyona girmekte ve hidratasyon ürünleri ortaya çıkmaktadır. Bu ürünler zemin taneleri arasında bağlayıcı rol oynamakta ve zemin sağlam ve rijit bir yapıya bürünmektedir. Çimento stabilizasyonu

sadece killi zeminlerde değil kumlu zeminlerden siltli zeminlere kadar değişik tane boyutuna sahip birçok zemin türünde sonuç vermektedir. Bu durum yöntemin uygulama alanını genişletmektedir. Çimento zemine karıştırıldıktan sonra su ile temas ettiğinde jel yapısına bürünmektedir. Bu jel yapı zeminlerin taneleri arasına dolarak taneleri bağlamakta ve zeminin daha güçlü bir hale gelmesini sağlamaktadır. Böylece zeminin rijitliği artarken suya olan duyarlılığı azalmaktadır. Diğer yöntemlerde olduğu gibi çimento katkısının etkinliği zemin türüne, mineralojik yapıya, başlangıç su içeriğine, çimento katkısının miktarına bağlı olarak değişmektedir. Bu yöntemde kür süresi önemli bir parametredir. Çimento ve su arasındaki reaksiyon zamanla gerçekleştiğinden dolayı iyileştirmenin tam etkisi uygulamanın ardından ortaya çıkmamakta, reaksiyon günler, haftalar hatta aylar boyunca devam etmektedir. Bu nedenle laboratuvar analizlerinde günlük, haftalık ve aylık kür süreleri dikkate alınmaktadır. Puppala (2016), smektit grubu kil mineralleri açısından zengin olan zeminlerde çimento stabilizasyonunun kireç stabilizasyonu ile uygulanmasının daha başarılı sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Sonuç olarak çimento stabilizasyonu, şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan en eski, etkili ve güvenilir yöntemlerden biridir.

## **Endüstriyel Katkı Maddeleri ve Polimerler**

Son yıllarda şişen zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan kireç ve çimento yöntemlerinin yanı sıra endüstriyel atıkların ve polimer kaynaklı ürünlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu durum zeminlerin şişme davranışının iyileştirilmesinin yanı sıra daha sürdürülebilir ve ekonomik yaklaşımların kullanılmasına yönelik geliştirilmiştir. Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin iyiden iyiye hissedildiği ve çimento üretiminin yüksek karbon salınımı nedeniyle çevresel etkilerinin tartışıldığı günümüzde, bu tarz alternatif yaklaşımlar önem arz etmektedir. Bu kapsamda uçucu kül, yüksek

sıcaklıklı fırınların cürufu, bacalarda elde edilen silis dumanı (silica fume) en yaygın kullanılan malzemelerdir.

Uçucu kül en yaygın kullanılan endüstriyel atık ürünlerinden biridir. Termik santrallerde kömürün yakılması neticesinde elde edilen bu malzeme, çimento ve kireçle birlikte kullanıldığında silis ve alümina içeriğinden dolayı reaksiyona girerek zeminlerin dayanımının artmasına katkı sağlamaktadır. Araştırmalarda uçucu külün puzolanik özelliği neticesinde uygun oranlarda kullanıldığında plastisite indeksini azalttığı belirtilmiştir (Puppala vd., 2004; Phani Kumar&Sharma, 2004).

Yüksek sıcaklık fırınlarının cürufu da zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilir. Demir-çelik endüstrisinin yan ürünü olan bu malzeme kireç ve çimento ile kullanıldığında ikincil reaksiyonlar gerçekleştirme ve çimento yapısı zeminlerin boşluklarını doldurarak hacim değişimlerini azaltmaktadır.

Silis dumanı, çok ince tane boyutu ve yüksek reaktivitesi nedeniyle zemin içerisindeki boşlukları doldurup puzolanik reaksiyonların hızlanmasına katkı sağlayabilmektedir. Bunun sayesinde zemin içerisinde mikro yapı oluşmakta ve şişme davranışı önemli oranda sınırlandırılabilir.

Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde endüstriyel atıkların ve yan ürünlerin kullanımı hem ekonomik açıdan hem de sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Bu sayede yan ve atık niteliğindeki ürünler yeniden geri dönüşüme kazandırılmaktadır. Ancak yan ürünlerin kimyasal bileşimleri üretim niteliğine bağlı olarak değiştiğinden öncesinde mutlaka laboratuvar çalışmalarıyla değerlendirilmesi gerekmektedir.

Son yıllarda şişen zeminlerin iyileştirmesinde kullanılan en dikkat çekici malzemelerden biri polimerlerdir. Polimerler, diğer bağlayıcı malzemelerden farklı olarak daha çok zemin-su etkileşime yönelik bir uygulamadır. Kullanılan polimerler, zemin taneleri

arasında bağlayıcı etkiler oluşturarak zemin-su etkileşimini sınırlandırmakta ve bu sayede zeminlerin hacim değişimlerini azaltabilmektedir. Polimerlerin kullanımıyla zemin boşlukları arasında film tabakası oluşmakta, zemin taneleri arasına su girişi engellenerek emme kapasitesi ve şişme davranışı azalmaktadır. Ancak polimerlerin ömrü, uzun dönem performansları ve çevre koşullarına dayanıklılığı halen tam olarak net değildir. Bu sebeple bu malzemeler kullanılırken mutlaka saha koşulları dikkate alınmalıdır. Biyopolimer esaslı malzemelerin kullanımı da son yıllarda artış göstermektedir. Zemin içerisinde bağlayıcılık görevi gören bu malzemeler de çevre dostu alternatifler olarak değerlendirilmektedir.

Endüstriyel atıklar ve polimerler, şişen zeminlerin iyileştirilmesinde uzun yıllardır kullanılan geleneksel kireç ve çimento stabilizasyonuna alternatif veya ilave iyileştirme yöntemleri olarak ön plana çıkmaktadır. Sürdürülebilir uygulamaların tüm dünyada önem kazandığı göz önüne alındığında zemin mühendisliğinde bu ve benzeri yöntemlerin yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, her katkı maddesinin performansı zeminlerin mineralojisi, katkı oranı, çevresel koşullar gibi faktöre bağlı olduğundan uygulama öncesinde laboratuvar testleriyle uygun tasarım parametresi belirlenmelidir.

### **Yapısal Tasarıma Dayalı Çözüm Yaklaşımları**

Şişen zeminlerde iyileştirme yöntemleri her koşulda mümkün olmayabilir. Aktif zon kalınlığının yüksek olduğu, şişen zeminlerin geniş alana yayıldığı ya da iyileştirme yöntemlerinin ekonomik olmadığı durumlarda çözüm zeminin iyileştirilmesinden ziyade bu tür zeminlere dayanıklı yapılar tasarlanmasıdır. Bu yöntemde zeminin iyileştirilmesine değil şişen zeminlerin yapı üzerindeki etkisinin en aza indirilmesine odaklanılmaktadır. Yapısal tasarıma dayalı çözümlere dair ilk yaklaşımda yapının yükü aktif zon altındaki birimlere aktarılır. Bu sayede yapıdan kaynaklı yükler alt

katmana aktarılarak şişen tabakaların zemin üzerindeki etkileri azaltılmaktadır. Bir diğer yaklaşımda ise yapı elemanları diferansiyel şişme hareketlerine karşı daha rijit ve dayanıklı hale getirilerek şişmeden kaynaklı riskler en aza indirilmektedir.

## **Derin Temeller**

Derin temel sistemleri ile amaç şişen zeminlerden etkilenmeyecek ya da önemsiz miktarda etkilenecek zemin katmanlarına ulaşılması ve yapı yüklerinin bu katmanlara aktarılmasıdır. Yağış, buharlaşma, bitki kökleri, yüzey drenajı gibi faktörlerden dolayı zeminlerin su içeriği dönemsel olarak değişmekte ve değişimin meydana geldiği bu bölge aktif zon olarak tanımlanmaktadır. Aktif zon altında yer alan zemin katmanlarında, su içeriği önemli ölçüde azalmakta ve hacim değişimleri de sınırlı miktarda olmaktadır. Derin temel sistemleri ile amaç aktif zonu geçerek yapı yükünü aktif zonun altında yer alan katmanlara aktarmaktır. Kazık temeller, fore kazıklar, mini kazıklar, keson temeller en yaygın kullanılan derin temellerdir. Zeminin şişme davranışı neticesinde şişen zeminler yukarı doğru kuvvet uygulayacak ve bu da kazık temeller gibi uygulamalarda ek sürtünme yüklerine sebep olacaktır. Bu sebeple temel tasarımı yapılırken sadece düşey yükler değil şişme hareketlerinden kaynaklanacak kaldırma kuvvetleri de mutlaka dikkate alınmalı ve buna yönelik uygulamalar yapılmalıdır.

## **Rijit Temeller**

Şişen zeminlerde yapısal tasarımlara dayanan bir diğer çözüm yapının deformasyonlara karşı daha dirençli hale getirilmesidir. Böylelikle yapı şişmeden kaynaklı deformasyonları daha güvenli karşılayabilecektir. Şişme hareketi yapının her noktasında aynı seviyede şişme meydana gelmemekte şişme diferansiyel&çok yönlü olarak kendini göstermektedir. Örneğin aynı zemin içerisinde bir bölgede önemli ölçüde kabarma meydana

gelmekte iken başka bir bölgede daha az deformasyon meydana gelmektedir. Dolayısıyla temelerde eğilme, çekme ve dönme gerilmeleri meydana gelmektedir. Rijit temel sistemleri ile temelerin bu etkilere karşı daha dayanıklı hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda en sık uygulanan temelerden biri radye temellerdir. Radye temelerde yapı kaynaklı yükler geniş bir alana yayılmakta ve diferansiyel hareketlerden kaynaklı deformasyonların etkisi sınırlandırılmaktadır. Radye temelerde ilave donatılar kullanılarak, temel kalınlığı artırılarak veya temellere kirişler eklenerek temeller daha rijit hale getirilebilmektedir. Özellikle kirişli radye temeller, konutlarda şişme/kabarma hareketlerine karşı yaygın olarak uygulanan temel türleri arasındadır.

Günümüzde şişen zeminler üzerine inşa edilen yapılarda en başarılı uygulamalar bütünlüklü çözümlere dayanmaktadır. Su içeriği kontrolü gibi mekanik ve fiziksel yöntemler, kimyasal yöntemlerle desteklenip uygun temel tasarımlarıyla birleştirilerek daha güvenli çözümler elde edilmektedir. Bu sebeple temel uygulamaları bu yöntemlerin tamamlayıcı uygulaması olarak değerlendirilmektedir.

### **Özel Tasarım Yaklaşımları**

Şişen zeminlerin yapı üzerindeki deformasyonlarının engellenmesi için katkı maddelerinden ve temel sistemlerinin haricinde bazı özel yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu özel yaklaşımların ilki yapı ile zemin arasında boşluk bırakılmasıdır. Yapı altında bırakılan bu boşluklara zamanla ezilebilen malzemeler doldurularak şişme hareketinin bir miktar bu malzeme tarafından sönmülmesi sağlanmaktadır. Özel yaklaşımlardan bir diğeri esnek altyapı sistemleridir. Kanalizasyon sistemleri, boru hatları gibi hafif altyapı elemanlarında harekete izin veren esnek bağlantı elemanları kurularak bu yapıların şişme hareketinden kaynaklanan hareketlere karşı daha esnek davranması sağlanmaktadır.

Sonuç olarak Şişen zeminler, karmaşık ve çok y6nl6 bir mekanizmaya sahip olduğundan dolayı bu zeminlerin çok disiplinli olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda zeminlerin mineralojik 6zellikleri, laboratuvar testleri, çevresel koşullar, yapı ve zemin etkileşimi detaylı olarak ele alınarak g6venilir 6z6mler geliŐtirilebilir. G6n6m6zde laboratuvar tekniklerinin, modelleme yaklaşımlarının, geleneksel ve modern iyileştirme y6ntemlerin geliŐmesiyle Şişen zeminlerde meydana gelen problemlerin etkin Şekilde y6r6t6lmesi m6mk6n hale gelmiştir. Bununla birlikte her zeminin kendi içerisinde değerlendirilmesi, laboratuvar çalışmalarının yapılması, yerel ve çevresel koşulların araştırılması g6venilir 6z6mler noktasında 6nem taşımaktadır.

## Kaynakça

Al-Rawas, A. A., & Goosen, M. F. A. (Eds.). (2006). *Expansive soils: Recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis.

Aslan Topçuoğlu, Y., & Gürocak, Z. (2023). Tüf katkılı yüksek plastisiteli killerde kıvam limitleri ve şişme potansiyeli ilişkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 514–524. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1251975>

Chen, F. H. (1975). *Foundations on expansive soils*. Elsevier.

Çimen, Ö., Günaydın, H. İ., & Keskin, S. N. (2017). Yüksek plastisiteli kil zeminin mühendislik özelliklerine inşaat atıklarının etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 250–253.

Dakshanamurthy, V., & Raman, V. (1973). A simple method of identifying an expansive soil. *Soils and Foundations*, 13(1), 97–104.

Grim, R. E. (1962). *Applied clay mineralogy*. McGraw-Hill.

Holtz, W. G., & Gibbs, H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 121, 641–663.

Jones, D. E., & Holtz, W. G. (1973). Expansive soils: The hidden disaster. *Civil Engineering*, 43(8), 49–51.

Kılıç, İ. E. (2020). 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği uyarınca bir inceleme alanının zemin etüdü açısından incelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 10(1), 100–112.

Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1993). *Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons.

Öngen, A. S. (2015). *Başlangıç su içeriğinin ince taneli zeminlerin şişme davranışı üzerindeki etkisi* (Yüksek lisans tezi). Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

Öngen, A. S., & Erguler, Z. A. (2022). The effect of initial water content on the swelling pressure of soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 55, qjgeh2020-170. <https://doi.org/10.1144/qjgeh2020-170>

Özkan, İ. (2024). Şişen zeminlerin ısırgan otu ile iyileştirilmesi. *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(2), 211–224. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.44>

Phani Kumar, B. R., & Sharma, R. S. (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), 764–767. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:7\(764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(764))

Puppala, A. J., Wattanasanticharoen, E., & Punthutaecha, K. (2004). Combined lime and fly ash stabilization of expansive soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 8(4), 181–191.

Seed, H. B., Woodward, R. J., & Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88(SM3), 53–87.

Skempton, A. W. (1953). The colloidal activity of clays. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 1, pp. 57–61).

Taşçı, G. (2011). *Problemlili kil zeminin geoteknik özelliklerine silis dumanı ve kireç katkısının etkisi* (Yüksek lisans tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Türköz, M., & Tosun, H. (2008). Harran kili şişme potansiyelinin belirlenmesinde yapay sinir ağları ve çoklu regresyon modellerinin kullanımı. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 125–140.

Van der Merwe, D. H. (1964). The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils. *The Civil Engineer in South Africa*, 6(6), 103–107.

Williams, A. A. B. (1958). The use of the P.I. in the assessment of the swelling properties of soils. In *Proceedings of the 2nd African Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 1, pp. 123–128).

Yılmaz, İ. (2019). Şişen killerin iyileştirilmesinde jips kolonu performansının araştırılmasına ilişkin laboratuvar model çalışması. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43(1), 23–38. <https://doi.org/10.24232/jmd.485590>

