

MADEN VE GEOTEKNİK BİLİMİNDE DİSİPLİNLERARASI YAKLAŞIMLAR

Editör
ENGİN ÖZDEMİR



BİDGE Yayınları

**MADEN VE GEOTEKNİK BİLİMİNDE
DİSİPLİNLERARASI YAKLAŞIMLAR**

Editör: ENGİN ÖZDEMİR

ISBN: 978-625-372-692-8

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-06-25

BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

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

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

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



ÖNSÖZ

Mühendislik bilimleri, günümüzde yalnızca klasik yöntemlerle değil, teknolojik gelişmeler ve disiplinler arası yaklaşımlarla sürekli dönüşmektedir. Bu kitap, maden mühendisliği başta olmak üzere, jeoteknik mühendisliği, yapay zekâ uygulamaları, malzeme geri dönüşümü ve termal analiz gibi güncel konuları bir araya getirerek çok yönlü bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Kitapta; geoteknik uygulamalarda yapay zekâ destekli modellemelerin kullanımı, kurşun-çinko ve bakır cevherlerine yönelik jeolojik değerlendirmeler, geri dönüştürülmüş beton agregalarının zemin iyileştirme ve inşaat uygulamalarındaki rolü ile kömür ve linyit örneklerine ilişkin termal karakterizasyon çalışmaları yer almaktadır. Ayrıca, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nden pirofillit örneği üzerinden bölgesel maden yataklarının değerlendirilmesine de yer verilmiştir.

Bu eser, hem akademik araştırmalara katkı sağlamayı hem de mühendislik uygulamalarında güncel bilgi sunmayı hedeflemektedir. Lisansüstü öğrenciler, akademisyenler ve sektörde çalışan mühendisler için faydalı bir başvuru kaynağı olacağına inanıyorum.

Kitabın oluşumunda değerli katkılar sunan tüm yazarlarımıza ve destek veren herkese içtenlikle teşekkür eder, bu çalışmanın maden ve geoteknik mühendisliği alanında yeni araştırmalara ilham vermesini dilerim.

DOÇ. DR. ENGİN ÖZDEMİR

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

DOĞU VE GÜNEYDOĞU ANADOLU BÖLGESİ MADEN YATAKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ: PİROFİLLİT ÖRNEĞİ	1
<i>MUSTAFA BİRİNCİ</i>	
BAKIR-KURŞUN-ÇİNKO (CU-PB-ZN) YATAKLARINA GENEL BİR BAKIŞ VE BATI ANADOLU'DAN BİR ÖRNEK	21
<i>HÜSEYİN SENDİR, KADİR SARIİZ</i>	
KURŞUN ÇİNKO CEVHERİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ	35
<i>TUFAN KIYAK, HİKMET SİS</i>	
ARGUVAN (MALATYA) LİNYİTİNİN TERMAL KARAKTERİZASYONUNUN ARAŞTIRILMASI	67
<i>İSMAİL BENTLİ, AYDAN AKSOĞAN KORKMAZ</i>	
KÖMÜRÜN TERMAL ANALİZİ	82
<i>AYDAN AKSOĞAN KORKMAZ</i>	
GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARININ ZEMİN İYİLEŞTİRME, İNŞAAT UYGULAMALARI VE YOL YAPIMINDA KULLANIMI	104
<i>ÇİĞDEM CEYLAN, ÖZGÜR YILDIZ</i>	
GEOTEKNİK UYGULAMALARDA YAPAY ZEKA KULLANIMI	138
<i>ÇİĞDEM CEYLAN, ÖZGÜR YILDIZ</i>	
CONSIDERATIONS IN INSITU STRESSES AND ENGINEERED WORKS	173
<i>MEHMET KEMAL GOKAY</i>	

BÖLÜM 1

DOĞU VE GÜNEYDOĞU ANADOLU BÖLGESİ MADEN YATAKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ: PİROFİLLİT ÖRNEĞİ

MUSTAFA BİRİNCİ¹

Giriş

İnsanlık tarihi boyunca madenler, toplumların gelişiminde kilit rol oynamıştır. İlkçağlardan itibaren avlanma ve barınma gibi temel ihtiyaçlar için kullanılan madenler, ilk madencilik faaliyetlerinin temelini oluşturmuştur. Günümüzdeki uzay çağı ve sanayi ötesi bilgi toplumuna ulaşmamız bile, madenlerden elde edilen özel metal, alaşım ve malzemeler sayesinde mümkün olmuştur. Bu durum, ülkelerin refah ve gelişmişlik düzeyi ile madencilik faaliyetleri arasında doğrudan ve güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Gelişmiş sanayi ve teknolojiye sahip ülkelerin madencilikte de ileri düzeyde olması, bu bağlantının en somut kanıtıdır.

Türkiye'nin maden kaynakları, bir kıtanın kaynakları kadar çeşitli ve büyüktür. Yetersiz düzeydeki arama faaliyetlerine rağmen, Türkiye'nin bor, mermer, toryum, nadir toprak elementleri, trona,

¹ Doç. Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, 44280 Battalgazi/Malatya, ORCID ID: 0000-0002-1954-7837

zeolit, pomza ve selestit gibi stratejik madenlerde küresel ölçekte önemli rezervlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, krom, manyezit, feldispat, barit, kil, kömür, altın, gümüş ve çeşitli endüstriyel hammaddelerin üretiminde de Türkiye, dünya genelinde söz sahibi ülkeler arasında yer almaktadır. Bu durum, Türkiye'nin madencilik sektöründeki mevcut konumunu ve gelecekteki potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

Türkiye'nin Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri, barındırdığı maden yatakları açısından önemli bir konuma sahiptir. Toplam 23 ili kapsayan bu coğrafyada tespit edilen maden rezervleri, (Tablo 1) bölgelerin jeolojik yapısının bir yansımasıdır. Doğu Anadolu Bölgesi, özellikle metalik madenler bakımından zengin bir çeşitlilik sunmaktadır. Türkiye'nin önde gelen demir, bakır, kurşun ve krom yatakları bu bölgede yoğunlaşmıştır. Bu durum, bölgenin metal sanayi ve ilgili sektörler için stratejik bir hammadde kaynağı olduğunu göstermektedir.

Güneydoğu Anadolu Bölgesi ise endüstriyel hammaddeler ve enerji hammaddeleri açısından kritik bir öneme sahiptir. Son yıllarda Türkiye'nin ihracatında önemli bir paya sahip olan mermer sahaları bu bölgede yer almaktadır. Ayrıca, ülkenin en büyük petrol ve asfaltit rezervleri de yine Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bulunmaktadır. Bölge, çimento hammaddeleri açısından da yüksek bir potansiyel taşımakta olup, gübre sektörünün temel hammaddesi olan fosfat yataklarına ev sahipliği yapmaktadır. Bu özellikleriyle Güneydoğu Anadolu Bölgesi, hem enerji güvenliği hem de endüstriyel üretim açısından ülkenin önemli bölgelerinden birisi durumundadır.

Bu bağlamda, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri, Türkiye'nin madencilik sektörüne önemli katkılar sunan ve gelecekteki kalkınma hedefleri için stratejik öneme sahip bölgeler olarak öne çıkmaktadır.

Son dönemlerde maden fiyatlarında gözlemlenen önemli artışlar, daha önce ekonomik olarak değerlendirilmesi mümkün olmayan, düşük tenörlü ve teknolojik zenginleştirme problemleri taşıyan cevherlerin ekonomik olarak değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu fiyat seviyeleri, önceden bilinen ancak işlenmesi ekonomik bulunmayan düşük tenörlü veya zenginleştirme sorunları olan cevherlerin artık etkin bir şekilde işlenebilir hale gelmesini sağlamıştır. Dolayısıyla, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'nde yer alan düşük tenörlü cevher yataklarının yeniden incelenmesi ve değerlendirilmesi, hem ülke hem de bölge ekonomisi için büyük bir önem arz etmektedir. Bu yeniden değerlendirme sürecinde, cevher hazırlama işlemlerinin kilit bir rol oynaması beklenmektedir, zira bu işlemler cevherlerin ekonomik değerini artırarak kullanılabilir hale gelmesini sağlayacaktır.

Türkiye'nin sahip olduğu önemli hammaddelerden biri de bir alüminyum silikat minerali olan pirofillittir. Türkiye'de pirofillit yatakları yalnızca Malatya ili Pütürge ilçesi civarında bulunmakta olup, toplamda 6 milyon ton görünür rezerve sahip olduğu bilinmektedir (DPT Raporu, 2001). Üretilen cevherin büyük bir bölümü, şu an için orijinal haliyle parça cevher olarak beyaz çimento üretiminde kullanılmaktadır.

Ancak, küresel ölçekte pirofillit tüketen diğer ülkelerin kullanım alanları incelendiğinde, bu mineralin beyaz çimento üretimi dışında seramik, refrakter ve dolgu sanayii gibi birçok farklı alanda çeşitli amaçlarla ve farklı formlarda kullanıldığı görülmektedir. Mevcut durumda sadece beyaz çimento üretiminde kullanılan bu hammaddenin, önümüzdeki dönemde ticari değeri daha yüksek olan seramik, refrakter ve dolgu sanayilerinde de değerlendirilmesi, hem ülke ekonomisi hem de bölge ekonomisi açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bu geçiş, pirofillitin katma değerini artırarak daha geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesine açılmasını sağlayacaktır.

Tablo 1 Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi önemli maden yatakları

Maden Cinsi	Bulunduğu Yer İl/İlçe
<i>Metalik Madenler</i>	
Demir	Sivas, Malatya, Adıyaman, Erzincan, Bingöl, Bitlis, Elazığ, Batman
Bakır	Elazığ-Keban, Diyarbakır-Ergani, Siirt-Şirvan, Erzurum
Kurşun	Elazığ-Keban, Malatya, Diyarbakır
Çinko	Elazığ-Keban, Malatya
Krom	Elazığ, Erzincan, Erzurum, Malatya, Bitlis,
Manganez	Elazığ, Erzurum, Erzincan, Adıyaman, Gaziantep
Nikel	Bitlis
<i>Endüstriyel Hammaddeler</i>	
Mermer	Diyarbakır, Van, Elazığ, Malatya
Manyezit	Erzincan-Çayırılı, Erzincan- Refahiye, Kars-Kağızman, Erzurum-Tortum
Disten	Bitlis, Bingöl, Siirt
Pirofillit	Malatya-Pütürge
Asbest	Sivas, Malatya, Erzincan, Ağrı, Kars, Bitlis
Pomza	Bitlis, Van, Erzurum, Kars, Ağrı
Perlit	Bitlis, Erzurum, Erzincan, Van
Vermikülit	Malatya, Elazığ
Fosfat	Mardin, Bingöl, Bitlis
Soda	Bitlis
Kükürt	Diyadin
Fluorit	Elazığ-Keban, Malatya-Kuluncak
Kayatzuzu	Iğdır, Kars, Batman
Jips	Erzurum, Erzincan
Barit	Muş
<i>Enerji Hammaddeleri</i>	
Petrol	Batman
Linyit	Sivas-Kangal, Adıyaman-Gölbaşı, Erzurum-Oltu, İspir, Bingöl-Karlıova, Erzincan
Asfaltit	Şırnak, Silopi
Sıcak sular	Van-Erciş, Bitlis-Tatvan, Erzurum-Ilıca, Diyarbakır-Çermik, Batman, Ağrı-Diyadin, Bingöl, Şırnak

Kaynak: (MTA Raporu, 2000)

.Pirofillit ve Teknolojisi

Tanımı ve genel özellikleri:

Pirofillit, bir fillosilikat mineralidir ve alüminyum silikat hidroksitten oluşur. Saf pirofillit yaklaşık %28,3 Al_2O_3 , %66,7 SiO_2 ve %5 H_2O içerir. Yapısal olarak talk minerali ile benzerlik gösterir, ancak kimyasal olarak ondan farklıdır; talk magnezyum içerirken, pirofillit alüminyum içerir. Pirofillit, endüstriyel alanda geniş bir kullanım yelpazesine sahip, önemli bir mineraldir. Pirofillit mineralinin başlıca özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 Pirofillit mineralinin temel özellikleri

Özellik	Açıklama
Kimyasal Formül	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$
Kristal Sistemi	Monoklinik veya Triklinal
Sertlik (Mohs)	1-2 (Oldukça yumuşak, tırnakla çizilebilir)
Yoğunluk	$\sim 2.65-2.9 \text{ g/cm}^3$
Renk	Beyazdan açık yeşile, gri, sarımsı; nadiren pembe veya kahverengimsi yeşil
Parlaklık	Sedefimsi, mat
Dilinim	Tek yönde mükemmel (mika benzeri yapraklı yapı)
Doku	Yumuşak, kaygan
Termal Genleşme	Düşük ısı genleşme katsayısı
Termal Şok Direnci	Yüksek (ani sıcaklık değişimlerine dayanıklı)
Su Kaybı ve Genleşme	Isıtıldığında suyunu kaybeder ve hacmi artar
Kimyasal Direnç	Kimyasal olarak inerttir
Bulunuş Ortamı	Pirofillit, genellikle alüminyumca zengin metamorfik kayalarda (fillitler, şistler, metabasitler ve kuvarsitler gibi) veya hidrotermal alterasyon (sıcak su çözeltilerinin etkisiyle değişime uğrama) sonucu oluşur.

Kaynak: (Erdemoğlu, 2023)

Genel kullanım alanları:

Hammadde olarak pirofillit kullanan sanayilerin her biri, kendi üretim süreçlerine göre cevherin Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , TiO_2 , Fe_2O_3 içerikleri ve tane boyu özelliklerine göre tüketim yapmaktadır. Pirofillitin genel kullanım alanları dikkate alındığında aşağıdaki sektörlerin ön plana çıktığı görülmektedir:

Seramik Ürünleri: Elektrik izolatörlerinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Böylece elde edilen ürünler mekanik ve fiziksel özellikler açısından normal porselen ile benzer özellikler göstermekle beraber sifıra yakın porozite ve yüksek "puncture" değerlerinin önemli olduğu durumlarda uygun olmaktadır. Pirofillit ve talk karışımı, fayans ve yarı vitroz sofrta takımları imalinde kullanılmaktadır. Pirofillit karışımıyla yapılan sofrta eşyaları yüksek mekanik dayanıklılık ile beraber mamul madde yüzeyinde zamanla meydana gelebilecek kılcal çatlakları tamamen ortadan kaldırmaktadır. Öte yandan fayans yapımında feldispat yerine pirofillit kullanımı ile termal şok, ateşte pişirme, küçültme ile oluşabilecek kılcal çatlaklar ortadan kalkar ve kolay pişirim imkanı sağlanır.

Refrakter Ürünleri: Pirofillit ısıtıldığında 400-700 °C arasında kristal yapıda değişiklik olmadan kristal suyunu kaybeder. 800 °C civarında mineral Al_2SiO_{10} yapısına dönüşür ve 1000 °C'ye kadar kararlı kalır. Bu sıcaklıktan sonra mullit dönüşümleri başlar ve bünyedeki serbest kuvars da kristabolite dönüşür. Bu yapısı pirofillite 1200-1300 °C civarında genleşme özelliği vermektedir. Pirofillit kalsinasyona gerek duymaksızın refrakter hammadde olarak kullanılabilir. Mullitleşme reaksiyonları 1400-1450 °C civarında da sürdüğü için çelik potalardaki genleşme özelliği tuğla derzlerini kapadığı için eşdeğeri hammaddelere oranla daha iyi performans verir. Ancak, demir-çelik sanayiinde potalarda şu anda kısıtlı kullanım imkanı vardır.

Beyaz Çimento Üretimi: Pirofillit beyaz çimento üretiminde de tercih edilen hammaddelerden biridir. Bu tür kullanımda pirofillitin fiziksel ve kimyasal özellikleri itibari ile en düşük niteliklisinin bile yeterli olması fiyat avantajı getirmektedir.

İnsektisitler: İnce öğütölmüş (-230 mesh) pirofillit DDT gibi insektisitler veya rotenone gibi fungusidler için taşıyıcı olarak özellikle A.B.D.'de geniş olarak kullanılmaktadır. Akıcılığı çok iyi olduğundan ve insektisitlerin fonksiyonel maddesi ile bir etkileşmeye girmediginden bu alanda kullanılan en ideal malzemelerden biridir.

Dolgu Malzemesi Olarak Diğer Kullanım Alanları: Kaliteli kağıt imalinde yüzey düzgünleştirme amacı ile kullanılmaktadır. Krem, deterjan, sert ve yumuşak lastik, temizlik malzemelerinde, tekstil ve kord finisajında, melamin, fenol formaldehid ve üre-formaldehid reçine bağlayıcı kalıp tozlarında, boya sanayiinde önemli oranlarda kullanılmaktadır.

Endüstriyel uygulamalara yönelik çalışmalar:

Pirofillit, endüstriyel alanda geniş bir kullanım yelpazesine sahip çok yönlü bir mineraldir. Başlıca kullanım alanları arasında refrakter ve seramik malzemelerin üretimi ile beyaz çimento üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmesi yer almaktadır. Ayrıca, lastik, boya, kozmetik ve sabun gibi ürünlerde dolgu maddesi olarak işlev görmekte ve çeşitli böcek ilaçlarında dağıtıcı olarak kullanılmaktadır.

Günümüzdeki endüstriyel uygulamalara yönelik araştırmalar, ağırlıklı olarak Ar-Ge çalışmaları kapsamında yürütölmektedir. Bu çalışmalar, özellikle seramik, porselen, boya ve beyaz çimento endüstrilerine odaklanmıştır. Örneğın, pirofillitin boya endüstrisinde dolgu maddesi olarak kullanılabilirliğine dair yapılan çalışmalarda, epoksi astar boya içerisinde denendiğı ve bu tür epoksilerde başarılı bir şekilde kullanılabiliceğı Erdem ve Karaoğlu (2005) tarafından rapor edilmiştir. Bu durum, pirofillitin farklı endüstriyel sektörlerdeki potansiyelini ve Ar-Ge faaliyetlerinin bu potansiyeli ortaya çıkarmadaki kritik rolünü vurgulamaktadır.

Pirofillitin seramik malzeme üretiminde kullanımı, bir dizi önemli avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar arasında düşük sıcaklıkta pişirme olanağı sağlaması, seramik ürünlerde sıklıkla karşılaşılan çekme ve büzülme gibi özelliklerin etkin bir şekilde kontrol altına alınabilmesi yer almaktadır. Ayrıca, pirofillitin yüksek ısı iletkenliği ve düşük ısıl genleşme katsayısı, nihai ürünlerin termal şok direncini önemli ölçüde artırmasına ve mekanik mukavemetini yükseltmesine katkı sağlamaktadır.

Pirofillitin seramik ürünlerdeki kullanılabilirliğine dair Mutlu ve Erdemoğlu (2005) tarafından yapılan kapsamlı bir çalışmada, pirofillitin hem seramik bünye hem de sır reçetelerine eklenmesinin etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Bu araştırmanın bulguları, pirofillit ilavesinin, seramik üretiminde yaygın olarak kullanılan kuvars mineralinin bazı olumsuz etkilerini giderebildiğini ortaya koymuştur. Spesifik olarak, pirofillit katkısı ile bünye üzerinde çatlaksız ve daha dayanıklı bir sır elde etme imkanı sağlanmıştır. Pişirim öncesi kurutma aşamasında ise, pirofillit içeren bünyelerin yüksek mekanik dayanım ve iyi bir ısıl şok direnci sergileyerek deformasyonları azalttığı ve kuruma süresini kısalttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, pirofillitin seramik üretim süreçlerinde hem kaliteyi artırıcı hem de üretim verimliliğini optimize edici stratejik bir katkı maddesi olarak potansiyelini açıkça göstermektedir.

Pirofillit mineralinin endüstriyel sektörlerdeki kullanımı, hedeflenen ürünün niteliğine göre farklı kimyasal özellikler gerektirmektedir. Özellikle refrakter malzeme üretiminde, malzemenin yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal inertliği nedeniyle en saf pirofillit cevheri tercih edilmektedir. Bu, nihai ürünün performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür.

Bununla birlikte, beyaz çimento üretiminde durum farklılık göstermektedir; burada daha düşük saflıktaki pirofillit cevheri de

kullanılabilmektedir. Bu durum, beyaz çimento üretim sürecinin belirli tolerans aralıklarına sahip olmasından ve pirofillitin bu uygulamada daha çok dolgu veya kısmi bağlayıcı olarak işlev görmesinden kaynaklanmaktadır.

Seramik ve porselen malzeme üretiminde ise pirofillit cevherinin Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve alkali metal içeriği belirleyici bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Yüksek Al_2O_3 içeriği, seramik malzemenin mekanik dayanımını ve termal şok direncini artırırken, Fe_2O_3 içeriği ürünün rengini olumsuz etkileyebilir. Alkali metaller ise genellikle sinterleme sıcaklığını düşürerek üretim sürecini kolaylaştırır da, aşırı miktarları ürünün özelliklerini bozabilir. Bu nedenle, seramik ve porselen endüstrisinde kullanılacak pirofillit cevherinin kimyasal kompozisyonu, ürünün estetik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkilediği için büyük bir hassasiyetle kontrol edilmelidir.

Tablo 3'te, pirofillit cevherinde aranan başlıca kimyasal özellikler, her bir kullanım alanının spesifik gereksinimleri doğrultusunda detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Pirofillit cevherinin farklı endüstriyel kullanım alanları göz önüne alındığında, standart özelliklere sahip hammadde ihtiyacının çeşitli cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemleriyle konsantre pirofillit üretimi yoluyla karşılanması büyük önem taşımaktadır.

Tablo 3 Bazı sektörler tarafından tüketilen pirofillitin önemli bileşenleri (Industrial Minerals)

Ana Bileşen (%)	Dolgu Malzemesi	Refrakter ve Cam Elyaf	Fayans ve Yer Karosu	Beyaz Çimento	Seramik İşleri
Al_2O_3	21-27	15-21	15-19	9-18	22-28,20
SiO_2	65-71	73-77	76-80	70-86	<65,80
Fe_2O_3	0,15-0,25	0,15-0,30	0,15-0,30	0,15-0,30	<0,5
A.K	4-5	3,8-4,5	3,3-3,8	2,9-3,4	

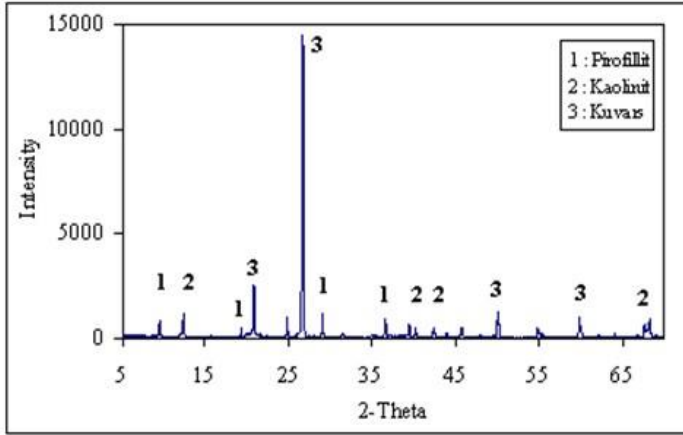
Kaynak: (Industrial Minerals, 1993)

Deneysel Çalışmalar

Malzeme:

Zenginleştirme deneylerinde kullanılan cevher numunesi Malatya-Pütürge yöresinde pirofillit üretimi yapılan maden sahasından temin edilmiştir. X-ışınları difraktometresi ile yapılan analiz sonuçları, cevherde ana mineraller olarak kuvars (SiO_2), pirofillit, ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) ve kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) olduğunu göstermektedir. (Şekil 1). Cevherin X-ışınları floresans spektrometresi ile yapılan kimyasal analiz sonuçları da Tablo 4'te verilmiştir. Cevher içinde kuvars, kristal formda ve kristalleri gözle görülebilecek büyüklüktedir. Pirofillit ise bazen kuvars yüzeyine sıvanmış şekilde, bazen de kuvars kristalleri ile dokanak halinde bulunmaktadır.

Şekil 1 Cevher örneğinin XRD ile belirlenmiş mineralojik analizi



Tablo 4 Cevher örneğinin XRF ile belirlenmiş kimyasal analizi

Bileşen	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O
%	13,90	79,00	0,35	0,07	0,14
	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	A.K
	0,18	0,26	0,35	0,10	5,64

Yöntem

Pirofillit mineralinin doğal yüzebilirliğinden ve birlikte bulunduğu kuvarsla aralarındaki sertlik farkından yararlanarak sırasıyla, köpüklü flotasyon, kuru öğütme sonrası sınıflandırma ve aşındırılmalı yıkama yöntemleri olmak üzere başlıca üç yöntem denenmiştir.

Flotasyon deneyleri Denver marka laboratuvar tipi flotasyon makinesi ve cihaza ait 1 litrelik paslanmaz çelikten yapılmış hücre içerisinde gerçekleştirilmiştir. Doğal yüzebilirliği olan pirofillit flotasyonunda reaktif olarak yalnızca köpürtücü kullanılmıştır. Bütün deneylerde saf suyun kullanıldığı flotasyon deney koşulları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5 Flotasyon çalışma koşulları

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
Tane iriliği	-100 µm
Pülpte katı oranı	%20
Köpürtücü türü ve miktarı	Dietilhegzanol (DEH), 200 g/t
Pülpün pH'ı	Doğal pH (7,5-8)
Köpük alma süresi	10 dak
Karıştırma hızı	1000 rpm

Kuru öğütme sonrası sınıflandırma ile zenginleştirme deneylerinde kırıcı-değirmen kombinasyonundan yararlanılmıştır. Önce çeneli ve çekiçli kırıcıdan geçirilen cevher numunesi son aşamada porselen bilyalı değirmende 2 mm'nin altına kuru olarak öğütülmüştür. Öğütme işleminin akabinde numunenin elek çözümlemesi yapılmıştır. Elek çözümlemesinde ASTM E-11 model standart laboratuvar test eleklerinden yararlanılmıştır.

Aşındırılmalı yıkama yöntemi kuru öğütmenin devamı niteliğinde bir işlemdir. 2 mm'nin altına öğütülen numune elek çözümlemesinden önce uygun bir hücre içerisinde karıştırma-

dağıtma işlemine tabi tutulmuştur. %70 katı içerikli pülp haline getirilen öğütülmüş numune 9 cm çapında, 22 cm derinliğinde bir cam hücre içerisinde 1500 rpm karıştırma hızında 60 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma-dağıtma işleminde laboratuvar ölçekli flotasyon makinesine bağlı 6 kanatçıklı bir karıştırıcı pervane kullanılmıştır. Hücre içerisinde karıştırılarak dağıtılmış malzeme hücre dışına alınarak yaş eleme ile birlikte yıkanmıştır. Yaş eleme sonrası elek fraksiyonları etüvde 105 °C'de kurutulup tartılmak suretiyle elek çözümlemesi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen ürünlerin kimyasal analizleri için XRF, mineralojik tanımlamaları için XRD teknikleri kullanılmıştır.

Deneyisel bulgular:

Flotasyon ile zenginleştirme: Doğal yüzebilirliği olan pirofillit mineralinin sadece köpürtücü ile flotasyonundan elde edilen sonuçlar Tablo 6'da görülmektedir. Flotasyon konsantresinin detaylı tam kimyasal analiz sonuçları Tablo 7'de, mineralojik analizi ise Şekil 2'de sunulmuştur. Elde edilen verilere göre, flotasyon konsantresinin kimyasal bileşiminde önemli değişiklikler gözlenmiştir. Özellikle alümina (Al_2O_3) tenöründe belirgin bir artış, buna karşılık silis (SiO_2) tenöründe ise önemli bir azalma kaydedilmiştir. Bu durum, flotasyon işleminin pirofillit mineralini silikat fazından başarılı bir şekilde ayırarak konsantrasyonunu artırdığını göstermektedir. Konsantrenin diğer oksit bileşenlerinde ise dikkate değer bir değişiklik görülmemiştir. Konsantrenin mineralojik yapısını ortaya koyan X-ışını kırınımı (XRD) analizi incelendiğinde, pirofillite ait piklerin şiddetinde göreceli bir artış olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, flotasyon işleminin pirofillit mineralinin zenginleşmesini sağlayarak, konsantre ürünündeki pirofillit miktarını artırdığını ve istenmeyen gang minerallerinin (genellikle silisli mineraller) başarılı bir şekilde uzaklaştırıldığını doğrulamaktadır. Bu sonuçlar, pirofillitin endüstriyel kullanım

alanları için gerekli saflıkta bir konsantre elde etme potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

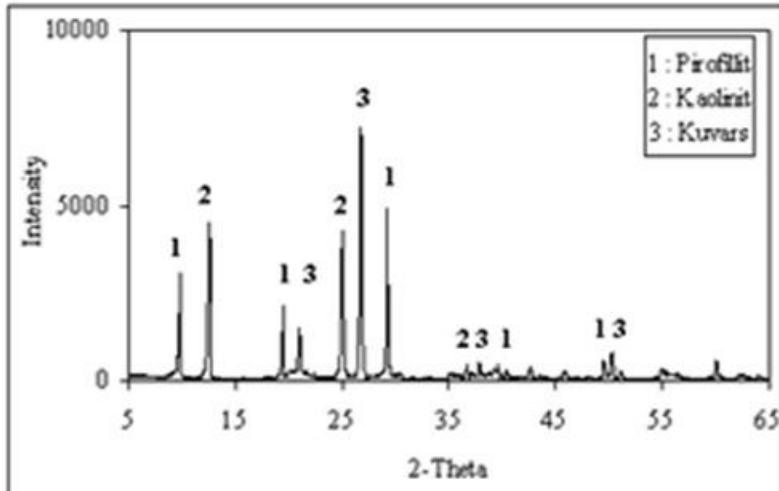
Tablo 6 Flotasyon deneyi sonuçları

Ürünler	Miktar %	Tenör %Al ₂ O ₃	Verim %
Konsantre	37,18	25,89	69,25
Artık	62,82	6,80	30,75
Besleme	100,00	13,90	100,00

Tablo 7 Flotasyon konsantresinin kimyasal analiz sonuçları

Bileşen	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
%	25,89	65,80	0,25	0,51	0,94
	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	A.K
	0,45	0,44	0,36	0,09	5,27

Şekil 2 Flotasyon konsantresinin XRD deseni



Kuru öğütme sonrası sınıflandırma ile zenginleştirme: Tablo 8’de 2 mm’nin altına öğütülmüş cevherin elek analizi ve elek fraksiyonlarının Al_2O_3 tenörü verilmiştir. İlgili tablo incelendiğinde; ince tane boylarına inildiğinde fraksiyonların Al_2O_3 tenörünün giderek arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Dolayısıyla ince tane boylarında bir pirofillit zenginleşmesinin olduğu rahatlıkla söylenebilir.

En yüksek Al_2O_3 tenörüne (%20,22) en ince elek fraksiyonunda (-0,075 mm) ulaşılmıştır. Al_2O_3 tenörünün en yüksek olduğu 0,075 mm altı malzemenin (ki en ince pirofillit konsantresi de denilebilir) kimyasal analiz sonuçları Tablo 9’da gösterilmektedir. Özellikle Al_2O_3 ve SiO_2 oranlarında çok belirgin olan değişim dikkat çekicidir. Aynı fraksiyonun XRD analizi ile saptanan başlıca mineralleri Şekil 3’te görülmektedir. Buna göre en ince konsantrede ana mineraller olarak yine kuvars, pirofillit ve kaolinit bulunmaktadır. Bununla birlikte, pirofillite ait piklerde göreceli bir artış olduğu, daha belirgin bir hal aldığı açık bir şekilde görülmektedir.

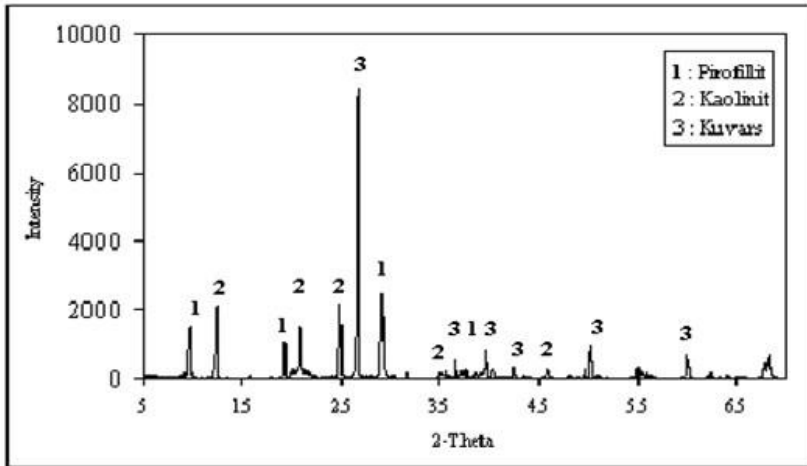
Tablo 8 Öğütülmüş cevherin kuru elek analizi sonuçları

Tane Boyu, mm	Ağırlık, %	Al_2O_3 Tenörü, %	Al_2O_3 Dağılımı, %
-2,000+1,000	31,32	6,43	14,49
-1,000+0,850	10,44	11,43	8,58
-0,850+0,600	11,54	16,88	14,01
-0,600+0,500	4,53	16,73	5,45
-0,500+0,300	4,74	17,18	5,86
-0,300+0,212	6,91	18,52	9,21
-0,212+0,150	7,40	19,31	10,28
-0,150+0,106	4,54	18,11	5,91
-0,106+0,075	6,86	18,54	9,15
-0,075	11,72	20,22	17,05
Toplam/Besleme	100,00	13,90	

Tablo 9 Kuru eleme sonrası en ince fraksiyonun (<0,075 mm) kimyasal içeriği

Bileşen	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
%	20,22	74,53	0,22	0,15	0,30
	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	A.K
	0,19	0,05	0,87	0,19	3,28

Şekil 3 Kuru eleme sonrası en ince fraksiyonun (<0,075 mm) mineral içeriği



Aşındırmalı yıkama ile zenginleştirme: Pirofillit cevherinin zenginleştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen aşındırmalı yıkama çalışmaları, kuru öğütme sonrası sınıflandırma ile elde edilen sonuçlara benzer bulgular ortaya koymuştur (Tablo 10). Bu yöntemde de, tane boyutunun inceliğiyle birlikte fraksiyonların Al₂O₃ tenöründe artış gözlemlenmiştir. Özellikle en ince fraksiyon olan -0,075 mm malzemenin Al₂O₃ tenörü %27,30 seviyesine yükselerek en yüksek değere ulaşmıştır.

Aşındırılmalı yıkama işlemiyle elde edilen en saf konsantre olan 0,075 mm altı malzemenin kimyasal bileşimi, Al_2O_3 bileşeninin yanı sıra diğer oksit bileşenleri açısından da incelenmiştir (Tablo 11). Bu analizde, Al_2O_3 oranında önemli bir artış ve SiO_2 oranında kayda değer bir azalış tespit edilmişken, diğer bileşenlerin oranında belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu durum, aşındırılmalı yıkama işleminin pirofillit ve silisli minerallerin ayrıştırılmasında etkili olduğunu göstermektedir.

Aynı konsantrenin X-ışını kırınımı (XRD) grafiği (Şekil 4) incelendiğinde, pirofillit ve kaolinit minerallerine ait karakteristik piklerin çok daha belirgin hale geldiği ve pik şiddetlerinde önemli artışlar olduğu saptanmıştır. Bu bulgular, aşındırılmalı yıkama işleminin mineralojik saflığı artırma ve hedef minerallerin konsantrasyonunu yükseltme kapasitesini açıkça ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, aşındırılmalı yıkama, pirofillit cevherlerinin etkin bir şekilde zenginleştirilmesi için umut vadeden bir yöntem olarak değerlendirilmektedir

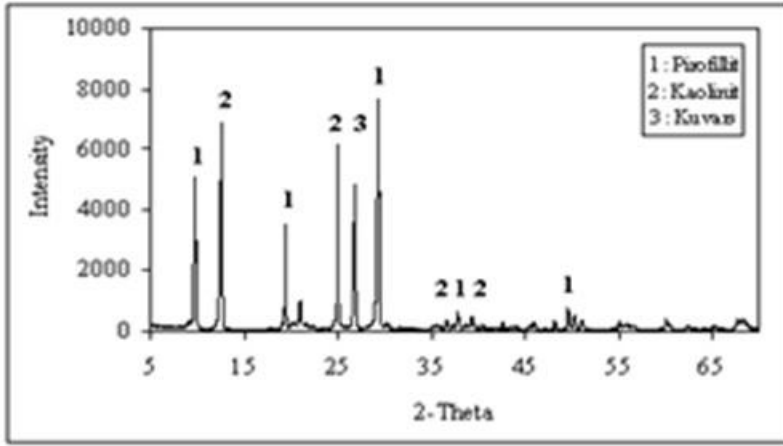
Tablo 10 Aşındırılmalı-yıkama+yaş elek analizi sonuçları

Tane Boyu, mm	Ağırlık, %	Al_2O_3 Tenörü, %	Al_2O_3 Dağılımı,%
-2,000+1,000	19,50	5,92	8,31
-1,000+0,850	13,56	6,31	6,15
-0,850+0,600	8,15	8,52	4,99
-0,600+0,500	4,87	8,42	2,95
-0,500+0,300	6,22	8,68	3,88
-0,300+0,212	3,91	7,93	2,23
-0,212+0,150	3,82	7,95	2,18
-0,150+0,106	4,00	9,76	2,81
-0,106+0,075	3,45	10,58	2,63
-0,075	32,52	27,30	63,87
Toplam/Besleme	100,00	13,90	

Tablo 11 Yaş eleme sonrası en ince fraksiyonun (<0,075 mm) kimyasal içeriği

Bileşen	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
%	27,30	63,90	0,19	0,21	0,38
	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	A.K
	0,24	0,37	0,64	0,13	4,97

Şekil 4 Yaş eleme sonrası en ince fraksiyonun (<0,075 mm) mineral içeriği



Sonuçlar ve Tartışma

Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri, sahip oldukları önemli maden yatakları rezervleri açısından stratejik bir konuma sahiptir. Ne var ki, bu rezervlerin büyük bir bölümü, geçmişten günümüze kadar çeşitli teknolojik ve ekonomik kısıtlamalar nedeniyle tam kapasiteyle değerlendirilememiştir. Bu durum, söz konusu bölgelerin madencilik potansiyelinin yeterince kullanılamamasına yol açmıştır.

Ancak, son yıllarda metal maden fiyatlarında gözlemlenen önemli artışlar ve cevher zenginleştirme teknolojilerindeki kayda

değer ilerlemeler, bu atıl durumdaki maden yataklarının yeniden ele alınmasını ve ekonomik olarak yeniden değerlendirilmesini gündeme getirmiştir. Metal fiyatlarındaki yükselişler, daha önce ekonomik olmayan düşük tenörlü cevherlerin bile işlenebilir hale gelmesini sağlarken, zenginleştirme teknolojilerindeki yenilikler ise karmaşık yapıdaki cevherlerin daha verimli bir şekilde ayrıştırılmasına olanak tanımaktadır. Bu gelişmeler, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'ndeki maden yataklarının potansiyelinin farkına varılması ve ulusal ekonomiye kazandırılması için yeni bir pencere açmaktadır. Dolayısıyla, bu bölgelerdeki maden kaynaklarının detaylı bir şekilde yeniden incelenmesi ve güncel teknolojik imkanlar ışığında ekonomik fizibilitelerinin gözden geçirilmesi, bölgesel ve ulusal kalkınma açısından kritik bir öneme sahiptir.

Pirofillit, Türkiye'nin sahip olduğu stratejik öneme sahip endüstriyel hammaddelerden birisidir. Ülke genelinde yalnızca Malatya'nın Pütürge ilçesi civarında rezervi bulunan pirofillit yatağı, aynı zamanda Ortadoğu'daki en ekonomik pirofillit yatağı olma özelliğini taşımaktadır. Ne var ki, bu önemli kaynağın potansiyeli bugüne kadar tam anlamıyla değerlendirilememiş ve hak ettiği değeri bulamamıştır. Mevcut durumda, üretilen pirofillit cevherinin neredeyse tamamı, beyaz çimento imalatında katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

Pirofillitin kullanım alanının beyaz çimento sektörüyle sınırlı kalmayıp, diğer endüstri kollarına da yaygınlaştırılması, hem mineralin kullanım çeşitliliğini artıracak hem de bölge ekonomisine önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, bölge yatırımcılarının, pirofillit tüketen farklı sektörlerin hammadde standartlarına uygun konsantre pirofillit üretimine odaklanması büyük önem arz etmektedir.

Pirofillitin endüstriyel standartlara uygun hale getirilmesi, kırma, öğütme, temizleme ve zenginleştirme gibi çeşitli proseslere tabi tutulmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Bu zorunluluk, günümüz madencilik sektörünün geneli için de geçerli bir yaklaşımdır. Özellikle düşük tenörlü pirofillit cevherlerinin zenginleştirilmesiyle, seramik ve refrakter sanayinde tüketilebilecek bileşime sahip bir konsantre elde etmek mümkündür. Elde edilecek bu konsantre pirofillit, işlenmiş hammaddeye ihtiyaç duyan diğer sektörlerle de arz edilebilir. Dolayısıyla, Malatya-Pütürge yöresinde kurulacak bir zenginleştirme tesisi, pirofillit cevherinin daha etkin ve rasyonel kullanımını sağlayacaktır.

Cevherin tüvenan (işlenmemiş) halde çimento sanayine satılması yerine, belirli proseslerden geçirilerek kullanım alanlarına göre standart bileşimli konsantre cevher haline getirilmesi, özellikle Avrupa ülkelerine yönelik ihracatta ciddi bir artış potansiyeli taşımaktadır. Türkiye'nin Avrupa'ya en yakın tek pirofillit üreticisi konumunda olması, bu konuda önemli bir coğrafi avantaj sunmaktadır. Bu durum, katma değerli pirofillit ürünlerinin Avrupa pazarına erişimini kolaylaştırarak Türkiye ekonomisine önemli bir döviz girdisi sağlaması mümkün görünmektedir.

Kaynakça

- Birinci, M. & Sarıkaya M. (2004). Pirofillit Cevherinin Aşındırılmalı Yıkama Yöntemi ile Zenginleştirme Olanakları. 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İzmir, s.69-75.
- Birinci M., & Erdemoğlu M. (2016). Enrichment Of Pütürge Malatya Turkey Low Grade Pyrophyllite Ore By Attrition Scrubbing And Flotation. 15th International Mineral Processing Symposium(IMPS 2016), 455-466.
- DPT Raporu, (2001). DPT Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Ö.İ.K. Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayi Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu, 134-151.
- Erdem, A. & Karaoğlu, B. (2005). Malatya-Pütürge Pirofillitlerinin Değerlendirilmesi, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Maden Kaynaklarının Değerlendirilmesi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 21-23 Nisan 2005, Diyarbakır, s.45-51.
- Erdemoğlu, M. & Sarıkaya M. (1999). Malatya-Pütürge Pirofillit Cevherinin Flotasyonla Zenginleştirilmesi, 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 14-15 Ekim 1999 İzmir, s.124-131.
- Erdemoğlu, M. (2023). Pirofillit, Endüstriyel Mineraller El Kitabı (Editörler: Prof. Dr. A.Ekrem Yüce, Prof. Dr. Güven Önal, Prof. Dr. M. Olgaç Kangal, Dündar Ergunalp), İstanbul Maden İhracatçıları Birliği Yayını, İstanbul.
- Industrial Minerals (Consumer Survey), (1993). Raw Materials for the Glass and Ceramic Industries.
- MTA Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi Maden Envanteri, (2000). <http://www.mta.gov.tr/madenlerimiz>
- Mutlu, H.S. & Erdemoğlu, M. (2005). Pirofillitin Vitriye Bünne ve Sır Hammaddesi Olarak Kullanılabilirliği, SERES 2005 III. Uluslararası Katılımlı Seramik, Cam, Emaye, Sır ve Boya Semineri Bildiriler Kitabı, 17-19 Ekim 2005, Eskişehir, s.200-209.

BÖLÜM 2

BAKIR-KURŞUN-ÇİNKO (CU-PB-ZN) YATAKLARINA GENEL BİR BAKIŞ VE BATI ANADOLU'DAN BİR ÖRNEK

HÜSEYİN SENDİR¹
KADİR SARIİZ²

Giriş

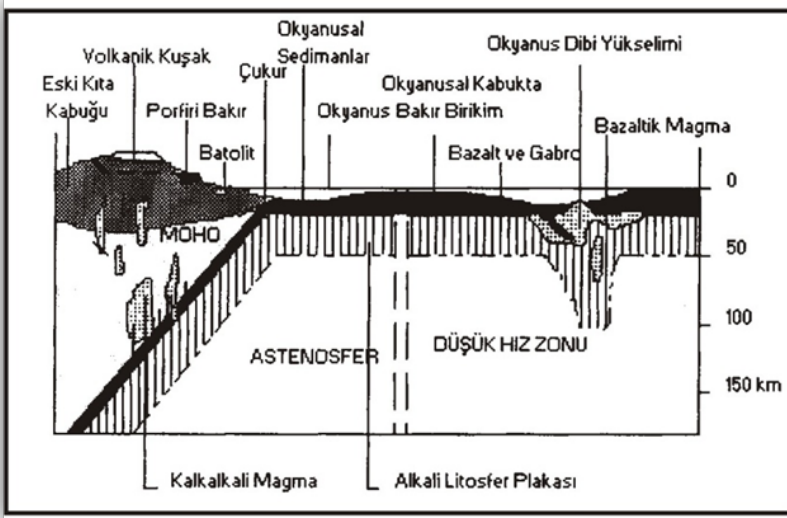
Ülkemizdeki bakır-kurşun-çinko (Cu-Pb-Zn) yatakları birçok araştırmacı tarafından farklı şekillerde sınıflandırılarak incelenmiştir. Sınıflandırmalarda çoğunlukla coğrafik dağılım, kimyasal bileşim ve kökensel özellikler dikkate alınmıştır. Bu yataklar; intraplütönik (porfiri) bakır yatakları, volkanik ve volkano-sedimanter Cu-Pb-Zn yatakları, şeyllerle ilişkili stratiform yataklar, karbonatlı kayaçlarla ilişkili Pb-Zn yatakları ve damar tipi Cu-Pb-Zn yatakları olarak isimlendirilmiştir (Gökçe, 2000). Porfiri sistemler, genellikle aktif levha sınırlarında, özellikle yitim zonlarında oluşan kalkalkalin magmatik yaylarla ilişkilidir (Sillitoe, 1973; Sawkins, 1984).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-7252-7117

² Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği, Orcid: 0009-0008-3422-2724

Bu yatak tiplerinden önemli bir yere sahip olan Porfiri tipi bakır-kurşun-çinko (Cu-Pb-Zn) yatakları, yüzeyin yakınlarında yer alan ve genellikle granitoyidik intrüzyonlarla ilişkili, yaygın fakat düşük tenörlü cevherleşmeler olarak tanımlanır. Bu yataklar, büyük rezervleri ve çeşitli metallerin birlikte bulunabilmesi nedeniyle dünya çapında önemli ekonomik potansiyele sahiptir. Porfiri tip yataklar, çoğunlukla doğrusal gidişli yitim işlevleri ile ilişkili kalkalkalin volkanoplütönik yaylar boyunca oluşurlar (Sawkins, 1984). Bu yatakların çoğunluğu, hareket halindeki litosfer levha sınırlarında görülmekte olup, ada yayları ve kıta kenarlarında kalkalkali magmatizmaya bağlı olarak gelişen plütönik kayaçların yüzeye yakın kesimlerinde (1-2 km) oluşmaktadır (Şekil 1).

Şekil 1 Porfiri bakır yataklarına kaynaklık eden felsik magmanın yitim zonlarındaki gelişimi

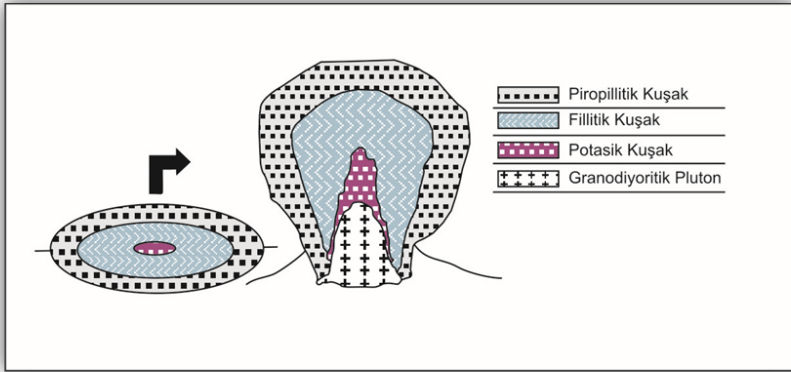


Kaynak: Sillitoe, 1973

Porfiri Sistemlerin Tanımı ve Genel Özellikleri

Porfiri yataklar, genellikle granit, granodiyorit, tonalit ve diyorit gibi kayaların içinde gelişmiş stockwork (ağsı) damar sistemleriyle karakterizedir. Bu damar sistemleri, kayaç içerisinde birbirini kesen kılcal damarlar halinde gelişir ve genellikle potasik, fillitik ve propilitik alterasyon zonları ile gözlemlenir (Lowell ve Guilbert, 1970). Bu yapılar, magmatik intrüzyonun çevresinde yoğunlaşmış hidrotermal akışkanların etkisiyle oluşur (Şekil 2). Merkezde potasik zon (K-feldspat, biyotit), bunu çevreleyen fillitik zon (kuvars-serisit-pirit) ve daha dışta propilitik zon (klorit, epidot, kalsit) bulunur. Cevher mineralleri genellikle potasik ve fillitik zonlar arasındaki geçiş bölgelerinde yoğunlaşır.

Şekil 2 Porfiri bakır yataklarındaki hidrotermal alterasyon modeli

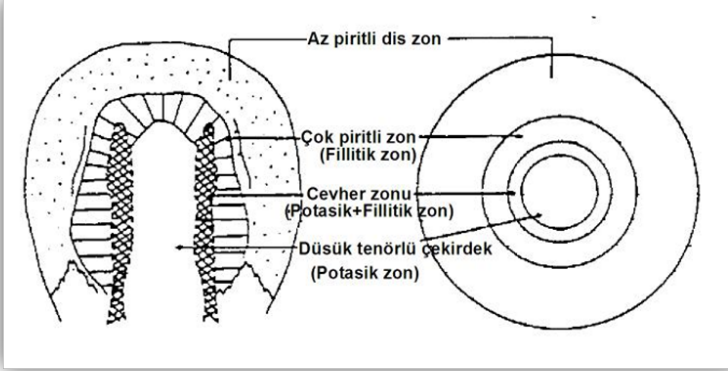


Kaynak: Lowell ve Guilbert, 1970'den yararlanılarak çizilmiştir

Bu sistemlerde yaygın olarak gözlenen cevher mineralleri arasında pirit, kalkopirit, molibdenit, bornit, sfalerit ve galenit mineralleri öne çıkmaktadır (Beane ve Titley, 1981). Bu minerallerin dağılımı, hidrotermal zonların sıcaklık ve kimyasal bileşim farklarına göre belirlenir. Ayrışma kuşaklarının mineral birlikleri ve yatakların yatay ve düşey düzeni en detaylı biçimde Guilbert ve Lowell (1974), Guilbert (1981) tarafından incelenmiştir.

Araştırmacılar, günümüzde de geçerli kabul edilen iç içe gelişmiş dört ayrışma zonu ayırtlamışlardır. Bu zonlar ve oluşan mineraller içten dışa doğru potasik, fillitik, arjilik ve propillitik zonlar olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3) (Tablo 1).

Şekil 3 Porfiri bakır yataklarının plütonik kütle içindeki konumu



Kaynak: Lowell ve Guilbert, 1970

Tablo 1 Alterasyon zonlarında oluşan mineraller

Potasik zon	Kuars, serisit, klorit, biyotit, ikincil ortoklaz, kaolinit, albit
Fillitik zon	Kuars, serisit, kaolinit, klorit, illit, albit, kalsit
Arjilitik zon	Kuars, kaolinit, montmorillonit, klorit
Propillitik zon	Klorit, epidot, kalsit, albit

Kaynak: Gökçe, 2000

Porfiri yataklarda gözlenen en önemli cevher mineralleri pirit, kalkopirit ve molibdenittir. Zaman zaman bornit, kovellin ve kalkosin de izlenebilmektedir. Cevher minerallerinin birbirlerine oranı, ayrışma zonlarına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Bu zonlarda görülmesi muhtemel cevher mineralleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 Alterasyon zonlarına göre görülmesi muhtemel cevher mineralleri

Potasik zon	Kalkopirit, pirit, bornit, molibdenit
Fillitik zon	Pirit, kalkopirit, molibdenit, bornit
Arjilitik zon	Pirit, kalkopirit
Propillitik zon	Sfalerit, galen, gümüş, altın

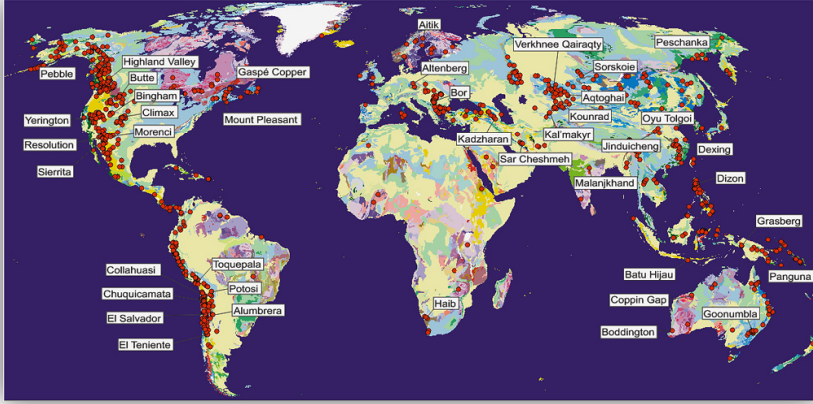
Kaynak: Gökçe, 2000

Jeolojik Ortam ve Koşulları

Porfiri Cu-Pb-Zn yatakları, çoğunlukla levha tektoniğiyle ilişkili olarak ortaya çıkar. Magmatizmanın yoğun olduğu aktif kenar kuşaklarında, granitoidik intrüzyonların yüzeye yaklaşması sonucu hidrotermal sistemler gelişir. Bu sistemler içinde yer alan sıcak ve metalce zengin akışkanlar, çatlak sistemlerini takip ederek cevher minerallerini yerleştirir (Wyllie, 1981). Yeryüzünde bilinen porfiri yatakları, Kuzey ve Güney Amerika kıtalarının batı kesimleri, Batı Atlantik, Güneybatı Pasifik ve Balkanlar, Kafkaslar, İran kuşağında yayılım göstermektedir (Şekil 4).

Porfiri tipte oluşan cevherleşmelere bir örnek Domaniç-Kütahya'daki porfiri bakır-molibden (Cu-Mo) cevherleşmesidir. Yaklaşık 250 km²'lik bir alanda gözlenmektedir. Kuzeybatı Anadolu'da Geç Kretase sonu-Tersiyer başı zaman diliminde Neotetis'in kuzey kolu Sakarya kıtası altına dalmış ve tüketilmiştir. Torid-Anatolid platformu ve kuzeyde bulunan Sakarya kıtası çarpışarak İzmir-Ankara-Erzincan kenet kuşağı oluşmuştur (Şengör ve Yılmaz, 1981). Ardından temel kayalar üzerinde uyumsuz olarak Orta Eosen yaşlı çökel kayaları oluşmuştur. Çarpışmanın ardından, Batı Anadolu'da yoğun volkanik faaliyet ve Oligo-Miyosen döneminde geniş magmatizmalar oluşmuştur (Bingöl ve diğ., 1982, Keller, 1983) (Şekil 5).

Şekil 4 Porfiri yatakların dünya üzerindeki yayılımı



Kaynak: Dünya haritası (Chorlton 2004), porfiri yatakların yayılımları (Kirkham and Dunne, 2000)

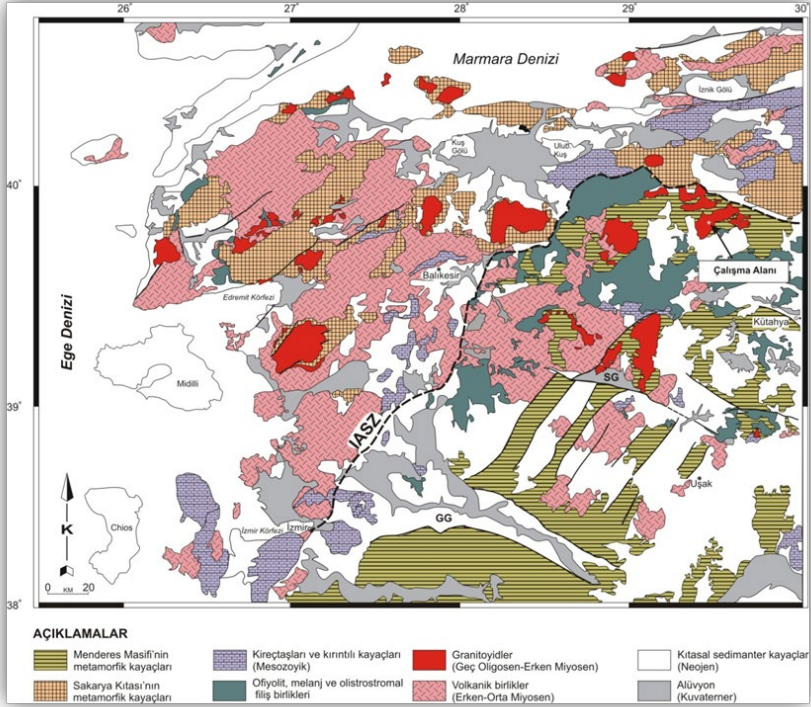
Çalışma alanındaki en yaşlı kaya birimi Devoniyen yaşlı Sarıçayırıyla şistleridir. Permien yaşlı Allıkaya mermerleri açılal uyumsuzlukla bulunur. Boğazova granitoyid kütlesi Eosen yaşlı olup bu birimleri kesmiştir (Şekil 6) (Şekil 7).

Homojen bir dağılım özelliği sunmayan plütonda tonalit, granodiyorit, tonalit porfir, granodiyorit porfir, granit gibi kayaç türleri mevcuttur. Dos-1'den Dos-8'e kadar 8 adet sondaj karotlarından örneklemeler yapılmıştır.

Granitoyid kütlesi içerisinde holokristalin dokulu magmatik kayaçlar ile porfirik dokulu magmatik kayaçlar oluşmuştur. Her iki kaya grubuna ait örnekler aşağıda verilmiştir (Şekil 8) (Şekil 9).

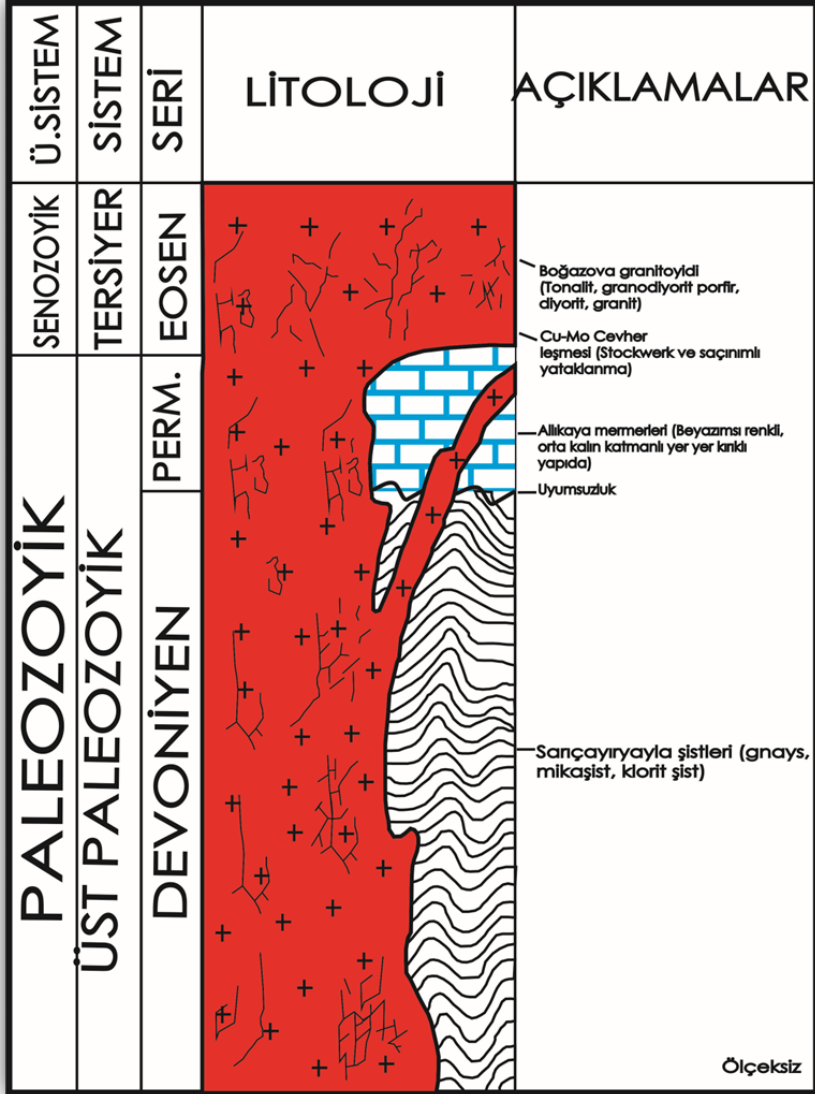
Sondaj örneklerinde yüzeyden derine doğru alterasyon zonları sırasıyla; yüzeysel alterasyon, propillitik zon, fillitik zon ve potasik zon tespit edilmiştir (Şekil 10).

Şekil 5 Batı ve Kuzeybatı Anadolu'daki granitik plütonlar ve çalışma alanı IASZ: İzmir-Ankara suture zoneu, SG: Simav grabeni, GG: Gediz grabeni



Kaynak: Bingöl, 1989

Şekil 6 Çalışma alanının dikme kesiti

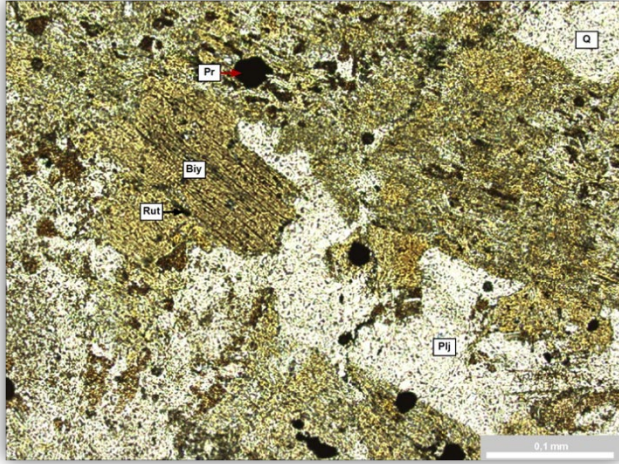


Kaynak: Bacak, 2000' den değiştirilerek (Sendir, 2009)

[illegible]

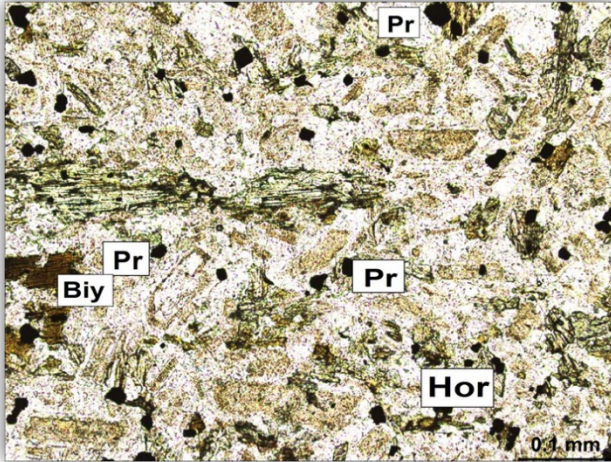
--29--

Şekil 8 Dos 1-5 nolu örnekte belirlenen tonalit kayacının ince kesit görüntüsü (Plj: Plajiyoklaz, Q: Kuvars, Biy: Biotit, Pr: Pirit, Rut: Rutil, tek nikol 5x0,15)



Kaynak: Sendir, 2009

Şekil 9 Dos 1-5 nolu örnekte belirlenen tonalit kayacının ince kesit görüntüsü (Plj: Plajiyoklaz, Q: Kuvars, Biy: Biotit, Pr: Pirit, Rut: Rutil, tek nikol 5x0,15)



Kaynak: Sendir, 2009

--31--

Ekonomik Önemi ve Kullanım Alanları

Porfiri Cu-Pb-Zn yatakları, dünyadaki bakır üretiminin yaklaşık %60'ını karşılamaktadır (USGS, 2022). Bu yataklarda genellikle yan ürün olarak molibden, altın ve gümüş gibi değerli metaller de elde edilir. Bakır, elektrik ve elektronik sanayiinde; kurşun, akü ve korozyon ortamlarında; çinko ise galvanizleme ve alaşım endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Katkı Belirtme ve Teşekkür

Bu çalışma, 1. Yazarın Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yaptığı Doktora çalışmasının verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tez, 1485_4 nolu Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma fonu tarafından desteklenmiştir.

Kaynakça

Bacak, G. ve Kuşçu M. (2000). Kütahya-Domaniç Porfiri Cu-Mo Cevherleşmesinin Jeolojik Özellikleri ve Kökeni, Cumhuriyetin 75. Yıldönümü Yerbilimleri ve Madencilik Kongresi, 683-697, MTA, Ankara.

Beane, R.E. & Titley, S.R. (1981). Porphyry copper deposits. In: Titley, S.R. (Ed.), Economic Geology 75th Anniversary Volume.

Bingöl, E. (1989). Geological Map of Turkey, Scale: 1/2.000.000, Mineral Research and Exploration Institute Publications, Ankara, Turkey.

Bingöl, E., Delaloye, M., Ataman, G. (1982). Granitic Intrusions in Western Anatolia: A Contribution to the Geodynamic Study of this Area, *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 75: 2, 437-446.

Chorlton, L.B. (2004). Generalized Geology of the World: Age and Rock Types Domains, Geological Survey of Canada.

Gökçe, A. (2000). Türkiye'nin Maden Yatakları. MTA Yayınları.

Guilbert, J. M. (1981). Geology and depositional environment of the Oposura Massive Sulfide Deposit, Sonora, Mexico. Southern Arizona, 169.

Guilbert, J.M. & Lowell, J.D. (1974). Variations in zoning patterns in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 69(6), 797–813.

Keller, J. (1983). Potasic Lavas in the Orogenic Volcanism of the Mediterranean Area, *J. Volcano. Geot. Res.* 18, 321-335.

Kirkham, R.V., and Dune, K.P.E. (2000). World Distribution of Porphyry, Porphyry Associated Skarn and Bulk Tonnage Epithermal Deposits and Occurrences, Geological Survey of Canada.

Lowell, J.D. & Guilbert, J.M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4), 373–408.

Pehlivan, A. N. (1979). Uludağ (Bursa)-Orhaneli-Keles-İnegöl Yörelerinde Granit Kenar Zonlarındaki (W, Mo, Pb, Zn, Cu) Mineralizasyonları Ön Raporu. MTA Der. Rap. No: 1621, Ankara (yayımlanmamış).

Sawkins, F.J. (1984). *Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics*. Springer-Verlag.

Sendir, H. (2009). Ortaca (Domaniç-Kütahya) Yöresi Cu-Mo-Zn Cevherleşmelerinin Jeolojik, Petrografik ve Jenetik İncelenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 151s.

Sillitoe, R.H. (1973). The tops and bottoms of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 68(6), 799–815.

Şengör, A.M.C., and Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach, *Tectonophysics*, 75, 181-241.

USGS (2022). *Mineral Commodity Summaries 2022*.

Wyllie, P.J. (1981). *The Way the Earth Works: An Introduction to the New Global Geology and Its Revolutionary Development*. Wiley.

BÖLÜM 3

KURŞUN ÇİNKO CEVHERİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ

TUFAN KIYAK¹
HIKMET SİS²

1. Giriş

Günümüzde dünya genelinde artan nüfus, buna bağlı olarak hızla gelişen sanayi ve teknoloji, metalik madenlere olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Bu durum, geleneksel olarak işletilmesi ekonomik olmayan veya düşük tenörlü olarak değerlendirilen cevher oluşumlarının tekrar gözden geçirilmesini ve değerlendirilmesine yönelik araştırmaların önem kazanmasını sağlamıştır. Bu kapsamda, kurşun ve çinko gibi stratejik metallerin mevcut ve potansiyel rezervlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Yapılan güncel araştırmalar, bu metallerin dünya genelindeki rezervlerinin uzun yıllar boyunca talebi karşılayabilecek düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. Dünya genelinde görünür kurşun rezervi yaklaşık 100 milyon ton, çinko rezervi ise yaklaşık 200 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. ABD, Kanada, Avustralya,

¹ Dr., İnönü Üniversitesi Mühendislik Fak. Maden Mühendisliği Malatya/ Türkiye, Orcid: 0000-0002-5438-3794

² Prof. Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fak. Maden Mühendisliği, Malatya /Türkiye, Orcid: 0000-0001-8840-5448

Çin ve Türkiye, önemli kurşun-çinko yataklarına sahip başlıca ülkelerdir. Türkiye'de Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından 2013 yılında yayımlanan verilere göre, yaklaşık 861 bin ton kurşun ve 2,5 milyon ton çinko rezervi tespit edilmiştir. Bu veriler, Türkiye'nin bu alandaki madencilik potansiyelini ortaya koyması açısından önem arz etmektedir (Mudd ve diğ., 2017, Anonim, 2018).

Kurşun ve çinko dünya genelinde sanayide kullanılan en önemli metallere dendir. Kurşunun en temel kullanım alanları akü imalatı olup, yeraltı kablolarının kurşunla izalasyonu da en önemli tüketim alanlarından bir başkasıdır. Korozyonu önleyen kurşun oksit boyalar, kurşun tetraetil ve tetrametil formlarında benzin içinde oktan ayarlayıcı bileşikler olarak, kabloların kaplanmasında, radyasyonu çok az miktarda geçiren metal olması nedeniyle x-ışınlarından korunmada, renkli televizyon tüplerinin yapımında ve mühimmat imalinde önemli kullanım alanları oluşturmaktadır.

Çinko; demir, bakır ve alüminyumdan sonra sanayide en çok kullanılan metallere dendir. Bu üç metal başlıca demir ve çeliğin korozyona karşı direncinin artmasında ve döküm sanayinde kullanılan alaşımlar ile pirinç alaşımlarının yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca çinko çatı kaplama malzemelerinde, çinko plakaların yapımında, plastik sanayiinde de kullanım yeri bulmaktadır (DPT, 2001).

Bu metallerin birlikte bulunduğu kurşun-çinko yatakları, genellikle hidrotermal süreçlerle şekillenen jeolojik ortamlarda oluşur. Özellikle masif sülfid yatakları, Mississippi Vadisi Tipi (MVT) yataklar ve sedimanter ekshalatif (SEDEX) yataklar, kurşun-çinko mineralizasyonunun en yaygın bulunduğu jeolojik yapılardır. Bu yatakların oluşum süreçlerinin anlaşılması, maden arama ve değerlendirme çalışmalarının yönlendirilmesinde temel bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, bu yazının amacı kurşun ve çinko

madenlerinin kullanım alanlarını, üretim miktarlarını ve bu madenlerin jeolojik oluşum koşullarını bilimsel bir çerçevede özetlemektir.

2. Kuramsal Temeller

2.1. Kurşun Hakkında Genel Bilgiler

Kurşun, insanlık tarafından keşfedilen ve antik çağlardan beri bilinen yedi önemli metalden biridir. M.Ö. 9000 civarında cevherden 300 °C gibi düşük sıcaklıklarda eritilerek çıkarılan ve günlük hayatın çeşitli alanlarında kullanılan ilk metaldir (Rowe, 1983). İlk büyük kurşun yatağı 2600 yıl önce Atina’da keşfedilmiş ve o zamanın günlük hayatının en önemli ekonomik figürlerinden biri olmuştur (Christie ve Brathwaite, 1995). Günümüzde ana kullanım alanı akü imalatı olan, 11,34 g/cm³ yoğunluğundaki kurşun metali, düşük ergime sıcaklığı, yumuşaklığı, alaşım yapma özelliği, doğal şartlara dayanıklılığı, radyasyona karşı soğurma özelliği ile çağımızın stratejik metalleri arasında yer almaktadır (DPT, 2001).

2.1.1. Önemli kurşun mineralleri

Galen (PbS): En önemli kurşun mineralidir. Geniş bir sıcaklık aralığında oluşan hidrotermal damarlarda, kontakt metamorfik çökellerde, nadiren de pegmatitlerde bulunurlar. Galen yaklaşık olarak %86,6 Pb ve %13,4 S den meydana gelmektedir. Sertliği 2,5-2,75 olup, özgül ağırlığı 7-7,4 arasındadır. Yapısında altın, gümüş, antimuan ve selenyum bulunabilir. Genellikle gümüş %0,01-2,0 oranındadır. Bundan dolayı simli kurşun adını alır. Gümüş grisi renginde ve opak görünümündedir. Galeni kristalleşmesi kübiktir ve kolayca ergimektedir (DPT, 2001, URL1).

Serüzit (PbCO₃): Gevrek bir yapıdadır. Serüzit sertliği 3-3,5 arasında ve özgül ağırlığı 6,5’tir. Genellikle değişik renklerde (sarı, gri, beyaz vb.) olmakla birlikte saf serüzit minerali beyaz renge sahiptir. Gruplar halinde veya yalın halde kristalleri gözlenen serüzit

ortorombik kristal yapısındadır. Kurşun yataklarının oksitli zonlarında anglesit, simitsonit, piromorfit ile birlikte oluşur. Galen filonlarının üzerinde bazen şekilli kütleler bazen de yoğun ve kristal halinde bulunur. Elmas ışıldamlı görünümlüdür (DPT, 2001, Anonim, 2022a).

Anglesit (PbSO_4): Gevrek bir yapıya sahip olan anglesitin sertliği 3 olup, özgül ağırlığı ise 6,3'tür. Bileşiminde %68,3 Pb içerir. Yerkabuğunda çeşitli renklerde görülebilen anglesit, ortorombik sistemde kristalleşir. Kurşun yataklarının oksitli zonlarında bulunur (DPT, 2001, Anonim, URL1).

Vulfenit (PbMoO_4): Bileşimindeki Pb içeriği %56,4 oranındadır. Kristal yapısı tetragonal ve vulfenitin sertliği 3'tür. Bu mineralin özgül ağırlığı 6,7-6,9 aralığında değişmektedir. Mineralin rengi beyaz ve sarı rengine yakındır. Hidrotermal kurşun yataklarının oksitli zonlarında ikincil mineral olarak oluşur (DPT, 2001, URL1).

Jamesonit ($\text{Pb}_5\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$): Jamesonit minerali %50,8 Pb içerir ve asbestte benzeyen lifsi yapıdadır. Monoklinik sistemde kristalleşmiş ve sertliği 2-2,5 sertliğine sahiptir. Mineralin özgül ağırlığı 5,5-6 arasındadır. Mineralin hem rengi hem de çizgi rengi gridir. Hidrotermal yataklarda düşük ile orta sıcaklıklarda oluşan Pb-Ag-Zn damarlarında geç evrelerde oluşmuş bir mineraldir (DPT, 2001, URL1).

Piromorfit ($\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{PO}_4)_3$): Galen yataklarında sıkça bulunur ve bileşiminde %75-79 Pb içermektedir. Bu mineralin özgül ağırlığı 6,5-7,14 arasında değişirken, sertliği 3,5-4 aralığındadır. Piromorfit minerali hekzagonal sistemde kristalleşmiş ve apatitle izomorftur. Fosforik asit nedeniyle oluşmuş mineralin tipik kristalleri Keban kurşun yataklarında görülebilmektedir. Kurşun yataklarının oksitli zonlarında ikincil mineral olarak oluşur. Koyu sarı ve beyaz

renklerde bulunan mineral elmas parlaklığındadır (DPT, 2001, URL1).

Vanadinit ($\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{VO}_4)_3$): Hekzagonal sistemde kristalleşmiştir. Mineral piromorfite benzemektedir. Sertliği 3 olan mineralin özgül ağırlığı ise 6,8-7,1 arasındadır. Sarı, turuncu ve koyu kırmızı gibi değişik renklerde izlenir. Ve mineral camsı parlaklıktadır (DPT, 2001, URL1).

Mimetit ($\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{AsO}_4)_3$): Arsenik içeren kurşun yataklarının oksitlenmiş bölgesinde yaygın bir ikinci mineral olarak oluşur. Piromorfite izomorf olan mineral 3,5 sertliğindedir. Mineralin özgül ağırlığı 6,9-7,3 arasındadır. Turuncu ve açık sarı renkte izlenmektedir. Mineral reçinemsi parlaklıktadır (DPT, 2001, URL1).

Burnoit ($\text{Pb}_3\text{Cu}_6\text{SbS}_6$): Bir sülfür mineralidir. Bileşiminde burnoit, bakır, kurşun antimon bulunmaktadır. İçeriğinde %42,6 Pb, %24,6 antimon %19,8 S ve %13 Cu bulunur. 2,5-3 sertliğine sahip olan mineralin özgül ağırlığı 5,7-5,9 arasında değişir. Kristal sistemi rombiktir. Çelik grisi renkte ve metalik parlaklıktadır (DPT, 2001, URL1).

Altait (PbTe): Tipik olarak Au-Te içeren hidrotermal yataklar olarak bulunurlar. Kristalleşme sistemi kübiktir. Bileşiminde %61,8 Pb ve %38,2 Te bulunur. 2,5 sertliğine sahip mineralin özgül ağırlığı 8,1'dir. Kalay beyazı veya sarı renk tonlarında gözlenen mineralin parlaklığı metaliktir (DPT, 2001, URL1).

Krokoyit (PbCrO_4): Mineral monoklinik sistemde kristalleşmiştir. Granit ve kuvars filonlarında bulunur. Kromlu kurşun veya kırmızı kurşun olarak da adlandırılır. Mineralin sertliği 2,5'dur. Mineralin özgül ağırlığı ise 5,9-6,1 aralığında değişir. Saydam ve gevrek yapıdadır. Turuncu sarı ve toz renklerde gözlemlenir (DPT, 2001, URL1).

Lanarkit (Pb_2SO_5): Kurşun sülfat yatataklarının oksitli zonlarında ender görülen bir ikincil mineraldir. Mineral %84,8 PbO içermekte olup sertliği 2-2,5 ve özgül ağırlığı 6,4-7,08 arasındadır. Kristallenme sistemi monoklinikdir. Kristalleri uzun ve iğne şeklindedir. Soluk yeşil, beyaz ve soluk sarı renklerde gözlemlenebilir (DPT, 2001, URL1).

Jordanit ($\text{Pb}_4\text{As}_2\text{S}_7$): Metamorfozlanmış Pb-As oluşumlarında, düşük sıcaklıktaki epitermal damarlarda, epitermal altın-kuvars damarlarında oluşur. Mineral kristal sistemi monoklinikdir. Sertliği 3 olan mineralin özgül ağırlığı ise 6,4 tür. Koyu gri renklidir. Çizgi rengi siyahtır (DPT, 2001, URL1).

Zinkenit (PbSb_2S_6): Mineral çoğunlukla antimon minerali ile birlikte bulunur. Kristallenme sistemi hekzagonalıdır. Sertliği 3-3,5 ve özgül ağırlığı 5,34 tür. Sülfatla ilişkili hidrotermal damarlarda oluşur. Siyah çizgi rengine sahiptir. Mineralde mavi lekeler görülmekte olup koyu ve mavi renklidir (DPT, 2001, URL1)

Bulanjerit ($\text{Pb}_3\text{Sb}_2\text{S}_6$): Bileşiminde Pb içeriği %55-58'dir. Bulanjerit minerali çok ender bulunmaktadır. Mineral rombik sistemde kristalleşmiştir. Antimon mineraline benzemektedir. Gri renge sahip mineralin sertliği 2,5'dir. Mineralin özgül ağırlığı ise 5,8-6,2 arasındadır (DPT, 2001, URL1).

Geokronit (Pb_5SbS_8): Mineral kristal yapısı rombik sistemdedir. Mineralin sertliği 2,3 olup özgül ağırlığı 6,4 ve rengi gridir (DPT, 2001, URL1).

2.1.2. Kurşunun kullanım alanları

Kurşunun başlıca tüketimi günümüzde araçlarda ve acil durum sistemlerinde (örn. hastaneler) kullanılan kurşun-asit piller ile bilgisayarlarda ve forkliftlerde bulunan endüstriyel pillerdir. Kurşun ayrıca uzaktan erişimli güç sistemlerinde, yük dengeleme sistemlerinde, cam ve plastik endüstrilerindeki bileşiklerde kullanılır

(Anonim, 2022b). Kurşun metali ve kurşun bileşikleri çeşitli endüstri dallarında kullanım alanı bulmaktadır. Asitlere ve doğal koşullara dayanaklılık, yumuşaklık, düşük erime sıcaklığına sahip olması, alaşım yapabilme özelliği, radyasyona karşı adsorbsiyon özelliği nedeniyle kurşun metali ve kurşun bileşiklerini çeşitli endüstri dallarında kullanım alanı bulmuştur (Çilingir, 1996).

Yukarda belirtilen özelliklerde dolayı birçok kullanım alanına (Çizelge 2.1) sahip olan kurşun cevherinin 2016-2020 yılları arasında üretim miktarları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Dünya metal kurşun kullanım alanları (Yüce, 1998).

Kullanım Alanı	Tüketim Oranı(%)
Akü imalatı	60,0
Kablo izolasyonu	5,5
Hadde ve diğer ürünler	8,0
Mühimmat	2,5
Alaşımlar	4,0
Kimyasal maddeler ve pigmentler	13,0
Benzin katkısı	3,0
Diğer	4,0
Toplam	100,0

Çizelge 2.2 2016-2020 yılları arasında kurşun cevheri üretim miktarları (Anonim, 2022b).

MADEN ÜRETİMİ x1000 ton	2016	2017	2018	2019	2020
Avrupa	448	451	486	516	496
Meksika	242	243	240	259	240
Peru	314	307	289	308	241
A.B.D.	347	310	280	270	288
Çin	2224	2032	1976	2005	1969
Hindistan	139	175	199	200	202
Avustralya	441	395	447	491	494
Diğer Ülkeler	557	675	676	670	552
Toplam	4713	4588	4593	4720	4482

2016-2020 yılları arasında dünyada gerçekleşen metalik kurşun üretimi Çizelge 2.3'te verilmiştir.

2.2. Çinko Hakkında Genel Bilgiler

Çinko, günümüz dünyasında yaygın ve çok geniş bir kullanım alanı olmasına rağmen, kurşun metaline göre daha kısa bir geçmişe sahiptir. Antik çağ boyunca metal olarak bilinmese de kimyasal alaşımları farklı antik uygarlıklarda biliniyordu. Çinko alaşımlarının kullanımını gösteren en eski kalıntılar M.Ö. 3000 Babil ve Asurlulara aittir. Ayrıca Romalıların da M.Ö 200 lü yıllarda çinko alaşımlı pirinç ve bakırı kullandıkları bilinmektedir (Christie ve Brathwaite, 1995).

Çizelge 2.3 2016-2020 yılları arasında metalik kurşun üretim miktarları (URL2).

METAL ÜRETİM x1000 ton	2016	2017	2018	2019	2020
Avrupa	2001	2083	2015	2015	1857
Kanada	274	274	261	250	187
Meksika	401	423	433	447	405
A.B.D.	1123	1121	1136	1167	1149
Çin	4603	4726	4943	4959	4966
Hindistan	689	812	883	922	856
Japonya	240	239	238	237	237
Kazakistan	133	152	153	131	133
G. Kore	831	800	801	800	762
Avustralya	224	168	189	125	165
Diğer Ülkeler	1027	1098	1133	1133	1033
Toplam	11546	11897	12186	12187	11750

2.2.1. Önemli çinko mineralleri

Sfalerit doğada bulunan ve çinko metalinin üretildiği en önemli minerallerden biridir. Diğer çinko mineralleri genelde altı grupta sınıflandırılmaktadır. Bazı önemli çinko mineralleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 Bazı önemli çinko mineralleri ve kimyasal formülleri (DPT, 2001).

Mineral Grubu	Mineral	Kimyasal Formülü
	Sfalerit	ZnS
	Vurtzit	ZnS
Sülfürlü	ZnS	4Zn+ZnOZn ₅ S ₄ O ₄ ZnS.ZnO
	Zinc-Teallite	(Pb,Zn)SnS ₂
	Goslarit	ZnSO ₄ .7H ₂ O
Sülfatlı	Zinc-Melanterit	(Fe,Zn)SO ₄ .7H ₂ O
	Zinc-Copper Melanterit	(Fe,Zn)SO ₄ .5H ₂ O
	Simitsonit	ZnCO ₃
Karbonatlı	Hidrozinkit	ZnCO ₃ .3Zn(OH) ₂
	Zinkokalsit	(Ca,Zn)CO ₃
	Nicholsonite	(Ca,Zn)CO ₃
	Aurichalcite	2(Zn,Cu)CO ₃ .3(Zn,Cu)OH ₂
	Hemimorfit	H ₂ Zn ₂ SiO ₅ (ZnOH) ₂ SiO ₃
Silikatlı	Vilemit(Troostite)	Zn ₂ SiO ₄ .2ZnO.SiO ₂
	Hardystonite	Ca ₂ ZnSi ₂ O ₇ .2CaO.ZnO.2SiO ₂
	Danalite	3(Fe,Zn,Mn)BeSiO ₄ ZnS
	Zinkit	ZnO
	Zinkspinel	ZnO.Al ₂ O ₃
Oksitli	Zincdibraunite	ZnO.2MnO ₂ .2H ₂ O
	Hetaerolite	ZnO.Mn ₂ O ₃
	Kreitonite	(Zn,Fe,Mg)O.(AlFe) ₂
	Dysluite	(Zn,Fe,Mg)O.(AlFe) ₂ O ₃
	Fanklinite	(Zn,Fe,Mn).(Fe,Mn ₂)O ₄
	Colusit	(Cu,Fe,Mo,Sn,Zn).4(S,As,Te,Sb)
	Zincaluminit	2ZnSO ₄ .4Zn(OH) ₂ .6Al(OH) ₃ .5H ₂ O
Diğer	Hopeite	Zn ₃ P ₂ O ₈ .4H ₂ O
	Tarbuttite	Zn ₃ (PO ₄) ₂ .Zn(OH) ₂
	Descloizite	Pb(Zn,Cu)(OH/VO ₄)

Çinko Blend (Sfalerit, zinkblend): Mineralin kimyasal formülü ZnS 'dir. Bu mineral %67 çinko ve %33 kükürt içerir. Kübik sistemte kristalleşmektedir. İçeriğindeki demir oranı %20'ye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca Mn ve Cd da bulunmaktadır. Mineral 3,5-4 sertliğindedir. Ve mineralin özgül ağırlığı ise 3,9-4,2 arasında değişir. ABD, İspanya, Rusya, Peru, Meksika, Türkiye ve Macaristan büyük sfalerit yatakları bulunmaktadır (DPT, 2001).

Simitsonit (Galmay, Zinkspat): Kimyasal formülü $ZnCO_3$ dür. Kristal sistemi hegzagonaldır. Çoğunlukla agrega şekilli ve yumru görünümlüdür. Simitsonit, sfaleritten sonra önemli bir başka çinko mineralidir. Serüzit, hemimorfit, hidrozinkit, malahit, azurit, kalsit gibi minerallerle birlikte bulunmaktadır. Sertliği 4-4,5 ve özgül ağırlığı ise 4,43 civarındadır. Beyaz, soluk gri, koyu gri, kahverengi, kırmızı tonları, sarı, mavi gibi birçok renkte bulunmaktadır. Bileşiminde önemli miktarda Fe ve Mn bulunmaktadır ve %64 ZnO , %34 CO_2 içerir. Yunanistan, Polonya, Zambiya, ABD, Avusturya, Türkiye önemli simitsonit yataklarına sahiptir (DPT, 2001).

Hemimorfit (Kieselzinkerz, Kalamın): Ortorombik sistemde kristalleşen hemimorfit genelde simitsonit ile birlikte bulunur. Ve bileşiminde %67 ZnO , %25 SiO_2 , %8 H_2O bulunmaktadır. Kimyasal formülü $H_2Zn_2SiO_5$ veya $(ZnOH)_2.SiO_2$ 'dir. Saydam veya yarı saydamdır. Beyaz, mavimsi, yeşil, gri ve safsılıklardan dolayı kahverengi renginde, yuvarlağımsı yapıdadır (DPT, 2001).

Zinkit (Rotzinker, Çinko Beyazı): Hekzagonal sistemde kristalleşen zinkitin kimyasal formülü ZnO 'dur. Yapısında %99 ZnO , %1 FeO , MnO , SiO_2 bulundurulur. Çoğunlukla yaprağımsı ve toprağımsı görünüştedir. Bileşiminde bulunan Mn bulunmaktadır. Bundan dolayı minerale koyu kırmızı renktedir. Çizgi rengi ise portakal sarısıdır. Metamorfik kalkerler içerisinde kalsit, vilemit ve franklinit, ile birlikte bulunur (DPT, 2001).

Vilemit: Hekzagonal sistemde kristalleşmiştir. Bileşiminde %72 ZnO, %26 SiO₂, %2 FeO, MgO, MnO, Fe₂O₃ bulunmakta ve kimyasal formülü Zn₂SiO₄ veya 2ZnO.SiO₂'dir. Görünüşü yağlımsı cilalı, saydam veya yarısaydamdır. Agregaları taneli, kristalleri küçüktür. Çoğunlukla renksiz, mavi, sarı, gri ve yeşilimsi renklerde. Mineralin sertliği 5,5 olup, özgül ağırlığı 3,89-4,1 arasındadır. Ultraviyole ışıkta floresans özelliği vardır. ABD, Zambiya Avustralya'da önemli yataklar bulunmaktadır (DPT, 2001).

Franklinit (Zincoferrit): Mineralin kimyasal formülü (Zn, Mn)O, Fe₂O₃ veya (Fe, Zn, Mn)O, (Fe, Mn)₂O₃ şeklindedir. Kimyasal bileşimde %15-25 ZnO, %10-16 MnO, %60-66 Fe₂O₃ olup, bulunan diğer bileşenler ise MgO, SiO₂, TiO₂, H₂O, CaO'dur. Kristal sistemi kübikdir. Tane şekli yuvarlağımsı halde izlenmektedir. 6-6,5 arasında sertliğe sahip olup ve 5-5,2 özgül ağırlığındadır. Rengi demir siyahı ve metalik pırıltılıdır. Kırmızımsı kahverengi veya siyah çizgi rengine sahiptir (DPT, 2001).

Hidrozinkit (Zincblende): Mineral 2ZnCO₃.3Zn(OH)₂ veya ZnCO₃.2Zn(OH)₂ kimyasal formülüne sahiptir. Hidrozinkitin bileşiminde %74-75 ZnO, %15-16 CO₂, %8-10 H₂O bulunmaktadır. Çoğunlukla amorf haldedir. Toprağımsı veya taneli görünümündedir. Mineralin sertliği 2-2,5, özgül ağırlığı ise 3,2-4 arasında değişmektedir. Beyaz, sarımsı veya grimsi renktedir. Çoğunlukla çinko cevherlerinin bir alterasyonu sonucu oluşmuştur (DPT, 2001).

2.2.2. Çinkonun kullanım alanları

Çinkonun en önemli kullanım alanlarından biri erimiş metalin sonraki amaçlar için bir kalıba dökülmesi anlamında ki pres dökümdür. Pres döküm için kurşun, demir, kadmiyum, kalay gibi diğer elementlere nazaran çinkonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı yüksek saflıkta çinko gereklidir. İlk olarak çinko düşük erime noktası sağlar ve bu da metalin ekonomik ve kolay ergitilmesine yardımcı olur. İkinci olarak, sıvı çinkonun düşük

viskozitesi, düşük basınç ve sıcaklık altında erimiş metalin kalıbın tüm kenarlarına düzgün şekilde akışını sağlar. Düşük sıcaklık ve basınç değerleri sayesinde standart çelikten yapılan ucuz kalıpların kullanım imkânı artar. Soğutulması esnasında herhangi bir çukur veya çatlak oluşturmadığı için sonra ki aşamalarda herhangi bir işleme gerek duymaz (Chatterjee, 2007). Çinkonun ikinci bir kullanım ise galvanizlemedir ki demir yüzeyinin elektrolitik olarak çinko ile kaplanmasıdır. Çinkonun galvanizleme işleminde kullanılması çinkonun üstün özelliklerindedir. Galvanizleme için çinkonun tercih edilmesinin en önemli faktörü uygulandığı demir saçları atmosferik şartlar dahil her türlü korozyona karşı korumasıdır. Bir diğer neden ise çinkonun parlak renginden dolayı son ürün olarak hoş bir görüntü oluşturmastır (Schönnenbeck ve Neumann). Bir başka kullanım alanı ise çinkonun yumuşak ve dövülebilir özelliği sayesinde haddelenmiş ürünlerle ilgilidir. Ve eski zamanlarda olduğu gibi çinko alaşımları halen kullanılmaktadır.

Bir başka yaygın ve önemli kullanım alanı çinko alaşımı pirinçtir. Pirinç bileşimindeki kısıtlamalara bağlı olarak çinko içeriği değişir. Ayrıca uçak ve tekerlerinde, magnezyum esaslı yapı malzemelerinde, boruların press dökümlerinde ve metal süsleme sanatı gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Anyadike, 2002).

2016-2020 yılları arasında dünyada gerçekleştirilen çinko cevheri üretim miktarları Çizelge 2.5'te verilmiştir.

2016-2020 yılları arasında dünyada gerçekleşen metalik çinko üretim miktarları Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.5 2016-2020 yılları arasında çinko cevheri üretim miktarları (URL2).

MADEN ÜRETİMİ x1000 ton	2016	2017	2018	2019	2020
Avrupa	985	1014	1142	1136	1108
Kanada	321	347	305	323	214
Meksika	662	671	691	677	635
Peru	1337	1473	1475	1404	1329
A.B.D.	798	796	824	753	700
Çin	5081	4594	4254	4297	4137
Hindistan	646	828	747	713	731
Kazakistan	351	345	346	288	264
Avustralya	885	852	1136	1337	1317
Diğer Ülkeler	1602	1761	1900	1964	1700
Toplam	12668	12681	12820	12892	12136

Çizelge 2.6 2016-2020 yılları arasında dünyada metalik çinko üretimi (URL2).

METAL ÜRETİMİ x1000 ton	2016	2017	2018	2019	2020
Avrupa	2406	2422	2506	2400	2413
Kanada	691	598	686	655	681
Peru	342	312	334	344	319
Çin	6196	6144	5607	6162	6342
Hindistan	328	818	746	712	714
Japonya	534	524	521	527	498
Kazakistan	326	327	329	318	319
G.Kore	899	847	866	858	860
Avustralya	464	462	490	432	464
Diğer Ülkeler	1074	1032	1018	1072	1032
Toplam	13560	13486	13102	13480	13641

2.3. Kurşun Çinko Yataklarının Oluşum Tipleri

2.3.1. Sediment Mekân Kayaçlı Kurşun-Çinko Yatakları

Sediment mekân kayaçlı Pb- Zn yatakları, bir mağmatik sistemle ilişkisi olmayan ve birincil ürün olarak Pb ve/veya Zn'nin üretildiği yataklardır (Leach ve diğ., 2005). Sediment mekân kayaçlı Pb- Zn yatakları (i)Sedimanter Eksalatif (SEDEX) ve (ii)Missisipi Vadisi tipi (MVT) olmak üzere iki alt sınıfa ayrılmıştır. Bunların her ikisi de Volkanojenik Masif Sülfid (VMS) yataklarından daha düşük sıcaklıklarda oluşur (Leach ve diğ., 2005). SEDEX tipi yatakları hidrotermal aktivitenin sonucudur. Deniz tabanına boşalan hidrotermal çözeltiler yoluyla ikincil minerallerin sedimanları ornatmasıyla oluşmuştur. (Leach ve diğ., 2005; Robb, 2005). Buna karşılık, MVT tipi yataklar, sedimanter havzalardaki çökeltilerin

diyajenezi sırasında düşük sıcaklık ve yüksek tuzluluktaki havza veya formasyon sularının etkisiyle oluşurlar (Robb, 2005).

2.3.2. Volkanojenik masif sülfid (VMS) yatakları

Volkanojenik Masif Sülfid (VMS veya VHMS) yatakları, deniz tabanındaki denizaltı volkanik aktivitenin olduğu yerlerde veya yakınında oluşur (Galley ve Koski, 1999). Bu yataklar çok çeşitli jeotektonik ortamlarda oluşur. Herhangi bir ortamda oluşan VMS yatakları önemli miktarlarda Zn içerebilmesine rağmen, önemli konsantrasyonlarda Pb içeren VMS yatakları tipik olarak kıta kaynaklı sedimanter ve volkanoklastik birimlerin hâkim olduğu sadece yitim üstü kıtasal yaylar içindeki bimodal-felsik magmatik ortamlarda veya olgun yay gerisinde silisiklastik-felsik ortamlarda oluşur (Franklin ve diğ., 2005). Bu fark, eser miktarda Pb, ancak önemli miktarlarda Cu ve Zn içeren ve metallerin kaynağının bazik volkanizma olduğu bimodalmafik, mafik ve pelit-mafik çökellerin bulunduğu sistemle ilişkilidir (Franklin ve diğ., 2005; Jowitt ve diğ., 2012).

2.3.3. Skarn yataklar

Skarn yatakları, mağma kaynaklı hidrotermal çözeltiler ile derin mağma çemberinin çevresindeki kayaçlarla özellikle kireçtaşları ile etkileşimin bir sonucu olarak oluşur (Einaudi ve diğ., 1981; Meinert ve diğ., 2005). Bu yataklar, bölgesel veya kontakt metamorfizma sırasında, metamorfik, magmatik, deniz ve/veya meteorik kökenli sıvıların etkisiyle farklı metasomatik süreçlerle oluşurlar (Meinert, 1992; Meinert ve diğ., 2005). Skarnlar genellikle magmatik plütonlarla ilişkilidir ve bunlara bitişik veya hatta bunların içinde oluşabilir; bu tür cevherleşmelerin kökensel olarak porfiri ve epitermal yataklarla ilişkili olabileceği anlamına gelir (Meinert ve diğ., 2005).

2.3.4. Porfiri yataklar

Porfiri tip yataklar, genel olarak mağmanın yan kayalara sokulumu ile bağlantılı olan, büyük kütleli, düşük ila orta tenörlü maden yataklarıdır (Kirham, 1971; Sillitoe, 2010; Sinclair, 2007) ve dünyanın önemli Mo, Au ve Ag kaynaklarının yanısıra en önemli Cu kaynağıdır (Mudd ve diğ., 2013a). Bu yataklar, yukarıda bahsedildiği gibi, genellikle epitermal, skarn ve manto cevherleşme türleri gibi Pb ve Zn kaynakları açısından daha önemli olabilecek diğer maden yatağı türleri ile ilişkilidir (Hedenquist ve diğ., 1998; Sillitoe, 2010; Sinclair, 2007). Tipik porfir Cu, Cu-Au ve Cu-Mo yatakları, Pb veya Zn açısından önem arz etmemelerine rağmen, her zaman olmasa da porfir tipi W-Mo yatak alt sınıfının önemli miktarda Pb ve Zn içerdii bilinmektedir.

2.3.5. Epitermal yataklar

Epitermal maden yatakları, genellikle magmatik ısı kaynaklarıyla ilişkili yeraltındaki hidrotermal dolaşım sistemleri tarafından üretilir ve bu sistemler tarafından üretilen akışkanlar, yerel su tablasının altındaki 1,5 km'ye kadar olan derinlikte ve en fazla 300 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda oluşurlar (Simmons ve diğ., 2005; Tosdal ve diğ., 2009). Düşük (LS) ila orta sülfidasyon (IS) epitermal alt tipleri en yaygın olarak Pb-Zn cevherleşmeleri ile ilişkilidir (Sillitoe ve diğ., 1998; Simmons ve diğ., 2005). Epitermal cevherleşmeler, tipik olarak volkanik yay ortamlarında gelişen hidrotermal sistemlerin sığ kesimlerinde oluşur (Simmons ve diğ., 2005) ve daha derinlerde, porfir ve skarn sistemleriyle ilişkili olabilirler (Jowitt ve diğ., 2013).

2.3.6. Manto tip yatakları

Manto tipi yataklar, örtü şekilli polimetallik replasman yatakları olup sıklıkla hidrotermal breşleşme ile ilişkili tabakamsı saçınımlı cevherleşmelerdir (Sillitoe, 2003). Bu manto tipi cevherleşmeler aynı zamanda uyumsuz sülfür bacaları ile de

ilişkilendirilebilir. Yatak içindeki tenör değerleri değişken olup geçirimli zonlar, fay ve kırıklar, breşleşmeler intrüzif kontakları gibi yer ve özellikler tarafından kontrol edilirler (Sillitoe, 2003). Terim genellikle Güney ve Orta Amerika'da Cu ve Pb-Zn-Ag cevherleşmelerinin alt tipleri ile ilişkili olarak kullanılır. Bu yatakların oluşumu için hem magmatik-hidrotermal (Wolf ve diğ., 1990), hidrotermal (Kojima ve diğ., 2009) ve metamorfik (Sato, 1984; Wilson ve diğ., 2003) sıvı kökenleri önerilmesine rağmen halen tartışmalıdır. Bu yataklar ile Kupferschiefer ve Zambiya Bakır Kuşağı'nın (Kirkham, 1996) stratiform sediment-mekân kayaçlı Cu cevherleşmeleri arasındaki benzerliklerle desteklense de manto tipi yataklar aynı zamanda plütonik komplekslerle de ilişkili olup, magmatizmanın bu yatakları oluşturan sıvı sirkülasyonunu oluşturmada çok önemli olabileceğini düşündürmektedir (Maksaev ve Zentilli, 2002; Sillitoe, 2003).

2.3.7. Demir oksit bakır-altın (IOCG) yatakları

Demir-Oksit-Bakır-Altın (IOCG) yatak sınıfı ilk olarak dev Olimpik Dam Cu-U-Au-Ag yatağının keşfinden sonra tanımlanmış, ancak günümüzde bir dizi maden yatağını içeren zayıf bir grubu kapsamaktadır (Groves ve diğ., 2010). Kesin olarak (Groves ve diğ., 2010), IOCG yatakları, ekonomik düzeyde Au ve Cu içeren, hafif nadir toprak elementlerin zenginleştiği (LREE) düşük sülfür mineralizasyonu ile ilişkili yüksek miktarda düşük Ti Fe oksit içeren yapısal kontrollü magmatik-hidrotermal cevherleşmedir. IOCG yataklarında Fe, Cu ve Au esas olmak üzere bir dizi elementler bulunur, ancak genellikle önemli veya yan ürün Ag, U, nadir toprak elementleri (REE), Bi, Co, Nb ve P işletilmekle birlikte Pb ve Zn nadiren ekonomik miktarlarda bulunabilir (Corriveau, 2007).

2.3.8. Orojenik altın ve mezotermal damar yatakları

Düşük tuzlulukta, nötr pH'a yakın, karışık H₂O-CO₂ metamorfik sıvılarından oluşan orojenik Au yataklarının (Goldfarb

ve diğ., 2005; Robb, 2005), dünya tarihi boyunca oluştuğu bilinmektedir (Goldfarb ve diğ., 2010) ve yaklaşan levha sınırlarında sıkışma tektoniğinin bir sonucu olarak gelişen bölgesel metamorfizmaya uğramış terrainlerde bulunmaktadır. Burada, bu orojenik Au yatakları, mezotermal damar yatakları olarak sınıflandırılan yataklar ile gruplandırıldı. Her iki yatak türü de önemli miktarlarda Au içermelerine karşın bazı durumlarda yan ürün düzeyinde Pb ve Zn içerirler. Bu yatak tipi, Au'nun baskın olduğu bu yatak sınıfları için tipik olandan daha fazla baz metal bakımından zengin olan orojenik veya mezotermal yatakları içerir (Mudd ve diğ., 2017).

2.3.9. Maden atıkları ve cürufları

Çeşitli türlerdeki maden atıkları, çevresel sorunlardan ziyade giderek artan bir şekilde ekonomik fırsatlar olarak görülmekte ve sıklıkla önemli Pb ve Zn konsantrasyonları içerebilmektedir. Bu atıklar, maden işleme sırasında atılan cevherin ekonomik olmayan veya gang fraksiyonunun ince taneli büyük kısmını içeren artıkları; bu atıklar genellikle öğütme sırasında büyük hacimlerde üretilir ve genellikle oksidasyona veya hava koşullarına maruz kaldıklarında çevresel kirlenme kaynağı olabilen sülfür mineralleri içerir, ancak yeterli konsantrasyonlarda mevcut olmaları durumunda ekonomik açıdan da ilgi çekici olabilirler. Karşılaştırıldığında, baz metalin eritilmesi ve rafine edilmesi sırasında üretilen oksitlerin erimiş çözeltilerinin soğutulması sırasında cüruflar üretilir. Bu atıkları üreten metalurjik süreçlerin, her bir tesiste mevcut özel koşullara uyacak şekilde proje bazında optimize edildiği, yani hem cürufların hem de artıkların fiziksel bileşiminin oldukça değişken olabileceği unutulmamalıdır. Ek olarak, bu malzemelerin işlenmesinde bir takım teknik zorluklar bulunmaktadır (Lottermoser, 2010; Shen ve Forssberg, 2003); Ayrıca, bu kaynakların, bu belgede başka bir yerde açıklanan maden yataklarında barındırılan kaynaklardan daha teorik olabileceği anlamına gelir.

2.4. Türkiye'deki Kurşun-Çinko Yatakları

Türkiye'deki karbonatlı Pb-Zn yatakları, Alp-Himalaya orojenik sistemlerinin bir parçası olan Toros kuşağında yer almaktadır. Torid pasif kıta karbonat istifinde meydana gelen karbonatlı Pb-Zn yataklarının çoğu jeolojik ortam, cevher özellikleri, oluşum sıcaklığı ve izotop jeokimyası nedeniyle Hanilçi ve Öztürk (2011) tarafından MVT olarak tanımlanmıştır (örneğin, Hadim Bozkır bölgesi, Aladağ-Zamantı bölgesi). Hakkâri bölgesindeki Zn-Pb yataklarının ve jeokimyasal verileri, MVT'ye göre biraz daha yüksek homojenizasyon sıcaklığı ve daha düşük tuzluluk, birbirine paralel stratiform cevher zonlarının varlığı ve yüksek As, Mo, Sb, Tl ve Hg gibi iz element içermeleri açısından SEDEX tipi yataklara benzemektedir. MVT ve SEDEX Pb-Zn yatakları dışında, karbonat mekân kayaçlı Horzum (Adana-Türkiye) Pb-Zn yatağı ise MVT'den daha yüksek oluşum sıcaklığına (ortalama 235 °C) ve daha yüksek sıcaklıktaki mineral parajenezine (örneğin, bornit, arsenopirit ve arjantit) sahip olmasından dolayı CRD-tip (carbonate-replacement type) Pb-Zn yatağı olarak tanımlanmıştır (Hanilçi ve diğ., 2019).

Türkiye'deki karbonatlı Pb-Zn yataklarının madencilik tarihi Roma dönemine kadar uzanmaktadır. 2019 yılı için, Türkiye'de Toros kuşağındaki karbonatlı yataklardan yıllık ortalama %20 Zn ve %8 Pb tenörlü yaklaşık 0,2 Mt Pb-Zn karbonat-oksit cevheri üretilmektedir. Günümüzde madencilik sığ derinliklerde (0-50 m) gerçekleşmektedir ve sondaj programları sınırlıdır. Genel olarak Toros kuşağının karbonatlı istifleri, özellikle Hakkâri bölgesi dünya ölçeğinde rezerve sahip yataklar bulunabilecek bir potansiyeli barındırmaktadır (Hanilçi ve diğ., 2019).

2.4.1. Horzum ve Pınargözü (Adana) Pb-Zn yatakları

Adana ilinin yaklaşık 97 km kuzeyinde yer alan Horzum ve Pınargözü Pb-Zn yatakları Horzum Yaylası yerleşiminin sırasıyla

yaklaşık 1,5 km ve 7 km kuzeyindedir. 1965 ve 1997 yılları arasında, yataklardan %30 Zn tenörlü yaklaşık 500.000 ton oksit-karbonat cevheri ile yaklaşık 400.000 ton %7-14 Zn tenörlü sülfürlü cevher üretilmiştir. Yatakların kanıtlanmış rezervleri yaklaşık 500.000 ton oksit-karbonat cevheridir (Akmatal, 2015).

Bölgenin jeolojisi, Geyik Dağı Birimi'ne ait Paleozoyik kırıntılı ve karbonatlı kayalardan oluşmaktadır. Pb-Zn cevherleşmeleri, kalın tabakalı, masif, koyu gri dolomitik kireçtaşı ve Orta-Üst Kambriyen gri kireçtaşı tarafından barındırılır ve kırık dolgulu ve tabakalara bağlıdır (Hanılçı ve diğ., 2019)

Pb-Zn cevherleri, K-G yönelimli bölgesel ölçekli yapısal elemanlar tarafından kesilen D-B ve KB-GD doğrultulu faylar boyunca açık damar dolgusu veya kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşlarını replase ederek oluşmuştur. Açık boşluk dolgu cevheri damar ve huni şeklinde bir geometri gösterse de, tabakaya bağlı tip cevher stratabound bir geometri gösterir. Cevherleşmeler oksitlenerek yüzeyde oksiti-karbonatlı cevhere dönüşmüştür ancak derinliklerde birincil sülfürlü cevhere geçmektedir. Oksidik cevher, simithsonit, (hidro)zinkit, serüzit, Fe-(hidr)oksit ve nadir galen içerir. Birincil sülfürlü cevher mercikleri sfalerit, pirit ve galen içerir ve oksitlik cevher zonu içinde korunmuş olarak gözlenir.

2.4.2. Hadim-Bozkır (Konya) Bölgesi Pb-Zn yatakları

Hadim-Bozkır (Konya) bölgesindeki karbonatlı Pb-Zn yatakları Hadim yerleşiminin 20 km batısında yer almaktadır. Cevherleşmeler Kızılgeriş-Katranbaşı ve Küçüksu bölgesinde yoğunlaşmaktadır. 1965-1990 yılları arasında ÇİNKUR tarafından ortalama %35 Zn+Pb (Zn>%25) tenörlü yaklaşık 100.000 ton oksitli-karbonatlı cevher üretilmiştir. Bu yataklar için güncel rezerv verisi bulunmamaktadır.

Bölgedeki Pb-Zn yatakları, Siyah Aladağ Birliği'ne ait Girvanellalı kireçtaşlarının üzerindeki Alt Permiyen kireçtaşları

içinde yer alırlar. Katranbaşı–Kızılgeriş yatağı K40°-50°B doğrultulu ve 40–5° KD eğimlidir; Küçüksu yatağı K30°–40°B doğrultulu ve 30–35°GD eğimlidir.

Cevher kütleleri tabaka-bağımlı (stratabound) ve genellikle içinde bulunduğu karbonatların doğrultusuna uyumlu merccekler şeklinde ortaya çıkar. Cevher kalınlıkları 0,5 ile 3 m arasında değişmekte olup, cevher zonu Kızılgeriş-Katranbaşı'nda en az 600 m, Küçüksu'da 200 m uzunluğundadır.

Cevherler, demir sülfürlerin yüzey oksidasyonu nedeniyle oldukça gözenekli, yumuşak ve kahverengimsidir. Cevher kütleleri, başlıca simithsonit ve seruzit olmak üzere karbonatlı Pb-Zn mineralleri içermekte, ancak galena ve sfalerit gibi bazı sülfürlü cevher mineralleri de yer yer cevher içinde korunmuştur. K-G yönlü faylar Katranbaşı cevher gövdesini kesmekte ve K35°D yönlü kırıklar karbonatlı cevher ile doldurulmuştur. Dolomitleşme, karbonatlarda yaygın bir alterasyon tipidir ve bu zonlar pirit, sfalerit ve galen gibi saçınımlı sülfidler içerir (Hanilçi ve Öztürk, 2011).

2.4.3. Göktepe (Karaman) Pb-Zn±F±Ba cevherleşmeleri

Göktepe (eski adıyla Fariske) bölgesindeki karbonatlı Pb-Zn±F±Ba cevher zuhurları Göktepe yerleşiminin yaklaşık 10 km kuzeydoğusunda ve batısında yer almaktadır. Kuzeydoğu Göktepe'deki Pb-Zn±F±Ba oluşumları Kuzubögedi, Makam, Düden), Üçtepele, Pınarüstü, Sarıpınar, Haydar, Uçandere ve Tufandağ cevherleşmeleri olarak KD-GB doğrultulu olarak yer almaktadır (Kuşçu, 1985).

Göktepe bölgesindeki cevherleşmeler, tabakaya bağımlı (stratabound) ve damar tipindedir ve 10 ila 300 m uzunluğunda ve 0,3 ila 1 m kalınlığındadır. Cevher zonu 2 ila 25 m arasında uzanır ve silisleşme ve dolomitleşme ile temsil edilen alterasyonla açıkça tanımlanır. Cevher topluluğu galena, sfalerit, florit, kalsit ve nadir barit içerir. Simitsonit, seruzit ve Fe-(hidr)oksit de mevcuttur.

Göktepe Pb-Zn±F±Ba cevherleşmeleri Siyah Aladağ Nap Birimi'nin karbonatlı kayaçlarında bulunur. Cevherleşme tabakalara bağlı, epijenetik, damar şekilli ve breşleşmiş, sfalerit, galena, pirit, markazit, florit, dolomit ile kalsit, kuvars gangi ile nadir barit içermektedir. Yan kayaçlarda dolomitleşme gelişmiştir. Cevherleşme alanı ve çevresinde magmatik kayaç bulunmamaktadır. Tüm bu özellikler MVT yataklarının özelliklerine benzer ve Göktepe bölgesi karbonatlı Pb-Zn±F±Ba cevherleşmesinin formasyon suları tarafından oluşturulduğunu gösterir (Kuşçu, 1985).

2.4.4. Gazipaşa (Antalya) Ba-Pb-Zn cevherleşmesi

Gazipaşa ilinde yaygın Ba-Pb-Zn cevherleşmeleri, Antalya Birliği'ne ait ileri diyajenetik özellikler gösteren Permien kireçtaşları (Bıkcı Formasyonu) içinde meydana gelmiştir (Bozkaya ve Yalçın 2005). Önemli cevherleşme alanları Karalar, Burhan Mahallesi, Aydap ve Yuları'dır (Petrascheck, 1967; Sadıklar, 1978; Sadıklar ve Amstutz, 1981; Ayhan 1982; Gökçe ve Bozkaya, 2003).

Karalar Ba-Pb-Zn yatakları (Boyalık, Büyük Ocak ve Sulu Ocak), Permien karbonatlarının çatlak ve kırıkları içinde damarlar halinde bulunur. Karalar'daki cevherleşmeler yer yer breş-dolgu ve ağsal damarlar olarak Permien karbonatları ile Triyas kayaçları arasındaki bindirme dokanağı boyunca gelişmiştir. Cevher baritçe zengin olup içerisinde sfalerit, pirit, nadir kalkopirit, limonit, kuvars ve kalsitin yanı sıra %15 galen içermektedir (Gökçe ve Bozkaya, 2003). Cevher zonunda gelişen alterasyon silisleşme ve ankeritleşmeden oluşmaktadır (Petrascheck, 1967).

Cevherleşme, rekristalize kireçtaşlarında tabakaya bağımlı (stratabound), kırık-dolgusu, karstik-dolgu ve breşler şeklinde bulunur. Cevherleşme, KB-GD gidişli kırıklara yerleşmiş baskın olarak damar tipidir. Cevher parajenezinde birincil mineraller olarak galena, sfalerit, tennantit, tetrahedrit, pirit ve kalkopirit, ikincil

mineraller olarak kovellit, kalkosit, simitsonit, seruzit, anglezsit, limonit, malakit-azurit ve Fe-hidr(oksit) içerir (Ayhan, 1981).

2.4.5. Ortakonuş (Anamur) Pb-Zn yatakları

Yatak Anamur yerleşim yerinin 18 km kuzeydoğusunda yer almaktadır. 1800'lerin ortalarından II. Dünya Savaşı'na kadar yaklaşık 100.000 ton cevher çıkarılmış ve ihraç edilmiştir. 1985 ve 1989 yılları arasında maden işletmesi için yeniden açılan yatakta, %29 Zn ve %6 Pb tenörlü yaklaşık 10.000 ton cevher üretilmiştir (Demir, 1998).

Ortakonuş Pb-Zn yatağı Aladağ Birliği'nin Üst Triyas karbonatları içinde tabakaya bağımlı (stratabound) merccekler ve küçük damarlar halinde bulunur. Cevher, galena, sfalerit, pirit ve markazit gibi sülfür mineralleri ve ikincil mineraller olarak hematit, anglezsit, simitsonit, plumbojarosit içerir. Gang mineralleri barit, dolomit ve kalsitir. (Gümüş, 1989).

2.4.6. Aladağlar-Zamantı Pb-Zn yatakları

Aladağlar-Zamantı Pb-Zn provensi, Kayseri ve Niğde il sınırında Doğu Toros Dağları'nda yer almaktadır. Ekonomik olarak, Türkiye'deki en önemli karbonat mekân kayaçlı Pb-Zn yatakları Aladağlar ve Zamantı Nehri'nin doğu ve batı taraflarında yoğunlaşmıştır (Ayhan, 1984; Çevrim, 1984; Hanilçi ve Öztürk, 2011). Madencilik faaliyetleri Hititler döneminden Tunç Çağı'na kadar uzanır (Ayhan, 1984; Yıldırım, 2008). Bölgede 50'den fazla Pb-Zn zuhuru bulunmakta, ancak bunlardan sadece 37'sinde 1998'e kadar ara ara üretim yapılmıştır (Demir, 1998). Günümüzde Delikkaya, Suçatı, Göynük ve Ayvan yatakları ile Havadan bölgesindeki birkaç yatakta üretim devam etmektedir. Aladağ-Zamantı provensinde 2015 yılına kadar toplamda 5,7 Mt karbonatlı-oksitli Pb-Zn cevheri üretildiği tahmin edilmektedir (Hanilçi ve Öztürk, 2011)

KAYNAKÇA

Akmetal M. (2015) Horzum kurşun/çinko sahası [Horzum lead/zinc licenced mine area].<http://www.akmetalmadencilik.com/horzum-kursuncinko-sahasi>. Accessed 19 June 2017

URL 1. <http://www.handbookofmineralogy.org/search.html?p=all>

URL 2. <http://www.ilzsg.com>

URL 3. <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgimerkezi/mineraller>

Anyadike N. (2002). lead and Zinc Threats and Opportunities in the Years Ahead. Abington: Woodhead Publishing.

Ayhan A. (1981) Die Genese Der Blei-Zink-Lagerstaetten Von Aydap Und Yulari Bei Gazipaşa (Antalya) Und Ihre Remobilizations Probleme. Bull Min Res Exp 95–96:57–68

Ayhan A. (1982) Galena-bearing barite occurrences between Burhan Mahallesi–Yuları Köyü (Gazipaşa–Antalya, Turkey). Geol Bull Turkey 25:105–117 (in Turkish with English abstract)

Ayhan A. (1984). Genetic comparison of lead–zinc deposits of Central Taurus. In: Tekeli O, Göncüoğlu MC (eds) International symposium on the Geology of the Taurus Belt, September 1983, General Directorate of Mineral Research and Exploration Ankara, Ankara-Turkey, pp 335–342

Bozkaya Ö. ve Yalçın H. (2005). Diagenesis and very low-grade metamorphism of the Antalya Unit: mineralogical evidence of Triassic rifting, Alanya-Gazipaşa, Central Taurus Belt, Turkey. J Asian Earth Sci 25:109–119

Chatterjee, K. (2007). Uses of Metals and Metallic Minerals. New Delhi: New Age International Publishers.

Christie T. ve Brathwaite B. (1995). *Mineral Commodity Report 6 Lead and Zinc*. New Zealand: Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd.

Corriveau L. (2007). Iron oxide copper-gold deposits: a Canadian perspective. In: Goodfellow, W.D. (Ed.), *Mineral Deposits of Canada*. Mineral Deposits Division, Geological Association of Canada, pp. 307–328

Çevrim M. (1984). Die Zink-Blei-vererzungen des Aladag-Gebietes/TÜRKİE mit betrachtungen zur palaokastentwicklung PhD thesis Aachen, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, p 184 (unpublished)

Çilingir Y. (1996). Metalik Cevherler ve Zenginleştirme Yöntemleri (Cilt 1) D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Baskı Ünitesi No: 198, İzmir.

Demir N. (1998). Niğde-Çamardı-Tekneli yöresindeki çinko-kurşun maden yataklarının bölgesel jeolojik evrimi ile ilişkileri [Relations with regional geological evolution of zinc-lead deposits in Niğde-Çamardı-Tekne region]. PhD thesis Çukurova University, p 159 (in Turkish, unpublished)

DPT, (2001). 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı, madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, Ankara

Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J., (1981). Skarn deposits. *Economic Geology 75th Anniversary Volume*, pp. 317–391.

Franklin J.M., Gibson H.L., Jonasson I.R., Galley A.G. (2005). Volcanogenic massive sulfide deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, pp. 523–560.

Galley, A.G. ve Koski, R.A. (1999). Setting and characteristics of ophiolite-hosted volcanogenic massive sulfide deposits. *Rev. Econ. Geol.* 8, 221–246.

Goldfarb R.J., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C.J.R. ve Gosselin, P. (2005). Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, pp. 407–450.

Goldfarb R.J., Bradley D. ve Leach, D.L. (2010). Secular variations in economic geology. *Econ. Geol.* 105 (3), 459–466.

Gökce A. ve Bozkaya G. (2003) Karalar geology and fluid inclusion characteristics of the Karalar (Gazipaşa-Antalya) Barite – Galena deposits. *Geol Bull Turk* 46:1–16 (in Turkish with English abstract)

Groves D.I., Bierlein F.P., Meinert L.D. ve Hitzman, M.W. (2010). Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Econ. Geol.* 105, 6

Gümüş A. (1989) Metalik Maden yatakları [Metallic ore deposits]. *Bilim Ofset, İzmir*, p 528 (in Turkish)

Hanilçi N. ve Öztürk H. (2011) Geochemical/isotopic evolution of Pb-Zn deposits in the Central and Eastern Taurides, Turkey. *Int Geol Rev* 53(13):1478–1507

Hanilçi N., Öztürk H. ve Kasapçı C. (2019) Carbonate-Hosted Pb-Zn Deposits of Turkey, *Mineral Resources of Turkey* pp 497–533

Hedenquist, J.W., Arribas Jr.A. ve Reynolds, T.J. (1998). Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: far

Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Econ. Geol.* 93, 373–404.

Jowitt, S.M., Jenkin, G.R.T., Coogan, L.A., Naden, J. (2012). Quantifying the release of base metals from source rocks for volcanogenic massive sulfide deposits: effects of protolith composition and alteration mineralogy. *J. Geochem. Explor.* 118, 47–59.

Jowitt, S.M., Mudd, G.M., Weng, Z. (2013). Hidden mineral deposits in Cu-dominated porphyry- skarn systems: how resource reporting can occlude important mineralization types within mining camps. *Econ. Geol.* 108 (5), 1185–1193.

Keskin A., Caner Y., Asar K. ve Cuhruk M. V. (1985). Çinko-Kursun Metal Sanayi A.Ş., Etibank Bülteni, 75, 3-32.

Kirkham R.V. (1971). Intermineral intrusions and their bearing on the origin of porphyry copper and molybdenum deposits. *Econ. Geol.* 66, 1244–1249.

Kirkham R.V. (1996). Volcanic redbed copper. In: Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I. (Eds.), *Geology of Canadian Mineral Types*. Geological Survey of Canada, pp. 241–252

Kojima, S., Trista-Aguilera, D., Hayashi, K.I. (2009). Genetic aspects of the manto-type copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. *Resour. Geol.* 59 (1), 87–98.

Kuşçu M. (1985) Pb-Zn occurrences of the Göktepe (Ermenek-Konya) district. *Bull Geol Soc Turk* 28:35–46 (in Turkish with English Abstract)

Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Large, R.R., Garven, G., Allen, C.R., Gutzmer, J. ve Walters, S. (2005). Sediment-hosted lead-zinc deposits: a global perspective. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P.

(Eds.), Economic Geology 100th Anniversary Volume. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, pp. 561–608.

Lottermoser, B. (2010). Mine Wastes - Characterisation, Treatment, Environmental Impacts. 3rd edition. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

Maksaev V. ve Zentilli M. (2002). Chilean strata-bound Cu-(Ag) deposits: an overview. In: Porter, T.M. (Ed.) Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective vol. 2. Portergeo, PGC Publishing, Adelaide, SA, Australia, pp. 185–205.

Meinert, L.D. (1992). Skarns and skarn deposits. Geosci. Can. 19, 145–162.

Meinert, L.D., Dipple, G.M., Nicolescu, S. (2005). World skarn deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), Economic Geology 100th Anniversary Volume. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, pp. 299–336.

Mudd, G.M., Weng, Z. ve Jowitt S.M. (2013a). A detailed assessment of global Cu resource trends and endowments. Econ. Geol. 108 (5), 1163–1183.

Mudd G. M., Jowitt S. M. ve Werner T. T. (2017). The world's lead-zinc mineral resources: Scarcity, data, issues and opportunities. Ore Geology Reviews 80 (2017) 1160–1190

Petrascheck W.E. (1967) Batı Toros kalkerlerindeki kurşun çinko yatakları [Lead zinc deposits in carbonates of West Tauride]. Maden Tetkik Arama Enst 68:38–48 (in Turkish with English Abstract)

Robb, L. (2005). Introduction to Ore-Forming Processes. Blackwell Publishing, Oxford, UK

Rowe, D. J. (1983). Lead Manufacturing in Britain: A History. Routledge.

Sadıklar MB (1978) Schwerspat-und Bleiglanz-Vorkommen und ihre geologisch petrogr. Lage im Gebiet der Dörfer Kıcık, E. Güney und Seyfe (Zeytinada) bei Gazipaşa-Antalya (Turkei). Dipl. Arb. Univ, Heidelberg, p 111

Sadıklar M.B. ve Amstutz G.C. (1981). Kıcık, Endişegüney ve Seyfe (Gazipaşa/Antalya-Türkiye) yöresindeki tabakaya bağlı barit-galen zuhurları [Stratabound galena-barite occurrences in Kıcık, Endişegüney and Seyfe (Gazipaşa/Antalya-Turkey) region]. Bull Min Res Exp 95–96:113–123 (in Turkish)

Sato, T. (1984). Manto type copper deposits in Chile: a review. Bull. Geol. Surv. Jpn. 35 (11), 565–582.

Schönnenbeck, M., ve Neumann, F. (nd). History of Zinc, its production and usage. Rheinzink.

Shen H. ve Forssberg E. (2003). An overview of recovery of metals from slags. WasteManag. 23 (10), 933–949.

Sillitoe, R.H., Steele, G.B., Thompson, J.F.H. ve Lang, J.R. (1998). Advanced argillic lithocaps in the Bolivian tin-silver belt. Mineral. Deposita 33, 539–546.

Sillitoe, R.H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. Mineral. Deposita 38 (7), 787–812

Sillitoe, R.H., Steele, G.B., Thompson, J.F.H. ve Lang, J.R. (1998). Advanced argillic lithocaps in the Bolivian tin-silver belt. Mineral. Deposita 33, 539–546.

Sillitoe, R.H. (2010). Porphyry copper systems. Econ. Geol. 105 (1), 3–41.

Simmons, S.F., White, N.C. ve John, D.A. (2005). Geologic characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In:

Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, pp. 485–522.

Sinclair, W.D. (2007). Porphyry deposits. In: Goodfellow, W.D. (Ed.), *Mineral Deposits of Canada*. Mineral Deposits Division, Geological Association of Canada, pp. 223–243.

Temur S. (1986). Genetic study of pyrite-bearing zinc-lead deposits in the Horzum (Kozan-Adana) district. *Bull Earth Sci* 13:31–48

Tosdal, R.M., Dilles, J.H. ve Cooke, D.R. (2009). From source to sinks in auriferous magmatic-hydrothermal porphyry and epithermal deposits. *Elements* 5, 289–295.

Williams P.J., Barton M.D., Johnson D.A., Fontboté L., de Haller A., Mark G., Oliver N.H.S. ve Marschik, R. (2005). Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, pp. 371–405.

Wilson, N.S.F., Zentilli, M., Spiro, B. (2003). A sulfur, carbon, oxygen, and strontium isotope study of the volcanic-hosted El Soldado manto-type copper deposit, Chile: the essential role of bacteria and petroleum. *Econ. Geol.* 98 (1), 163–174.

Wolf, F.B., Fontboté, L., Amstutz, G.C. (1990). The Susana copper (-Silver) deposit in Northern Chile: hydrothermal mineralization associated with a Jurassic volcanic arc. In: Fontboté, L., Amstutz, G.C., Cardozo, M., Frutos, J. (Eds.), *Stratabound Ore Deposits in the Andes*. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 319–338

Yıldırım S. (2008). History of lead-zinc mining in the Anatolia. In: Öztürk H, Hanılçı N, Kahriman A, Özkan S (eds) *The*

geology, mining, and existing problems of Turkish Pb-Zn deposits. Istanbul University, Istanbul, pp 5–32 (in Turkish with English abstract)

Yüce, A. (1998). Türkiye Kurşun Envanteri. İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, İstanbul, 28s.

BÖLÜM 4

ARGUVAN (MALATYA) LİNYİTİNİN TERMAL KARAKTERİZASYONUNUN ARAŞTIRILMASI

AYDAN AKSOĞAN KORKMAZ¹
İSMAİL BENTLİ²

Giriş

Ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin en önemli göstergelerinden birisi enerji üretimidir. Enerji üretiminin tüketimden fazla olması, sanayinin gelişmesine ve milli gelirin artmasına neden olan önemli etkenlerden biridir. Enerji üretimi ise onu sağlayan kaynakların bulunmasına ve bu kaynaklardan optimum düzeyde yararlanılmasına bağlıdır. Bu açıdan günümüzde enerji kaynağı olarak kullanılan kömür, bitümlü şeyl, asfaltit, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar büyük önem taşımaktadır.

Kömür, organik ve inorganik maddelerin kompleks bir karışımıdır. Mineral madde olarak da isimlendirilen kömürün inorganik kısmı, değişik kompozisyonlarda ve türlerde olabilmektedir. Kömürlerin kükürt ve mineral madde içerikleri,

¹ Doç.Dr., Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Hekimhan Meslek Yüksek Okulu, Madencilik Teknolojisi, Orcid: 0000-0002-3309-9719

² Doç.Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-3775-7341

kömürün kullanımını belirleyen en önemli faktörlerdendir. Yüksek kül ve kükürt içeriği, kömürün kullanılmasında her aşamada ciddi sorunlar ortaya çıkarmaktadır (Laskowski, 2001: 13; Özbayoğlu & Özbayoğlu, 2006: 13).

Türkiye yüksek kül ve kükürt içeren, düşük kalorifik değere sahip, rezervi yüksek linyit yataklarına sahiptir. Kömürlerin bu haliyle kullanılması ile önemli teknolojik ve çevresel problemler ortaya çıkmaktadır (Haykırı & ark. 2011: 13).

Malatya-Arguvan (Parçikan) linyitleri, enerji ve endüstride kullanılabilir özellikte, önemli bir rezerve sahiptir (Önal, 1995: 13). Fakat düşük kalorifik değeri, yüksek kül ve kükürt içeriği bu linyitlerin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu yüzden, kömürün kalitesinin ve kalorifik değerinin artırılması gerekmektedir. Literatürde Arguvan linyitinin yıkanabilirliği ve zenginleştirilebilirliği ile ilgili, Birinci (2013: 13), Korkmaz, Bentli & Sis (2017: 13) ve Korkmaz & Bentli (2017: 13) tarafından çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Malatya-Arguvan linyitinin termal karakterizasyon çalışmaları Doktora tez çalışması kapsamında Korkmaz (2017: 13) tarafından araştırılmıştır.

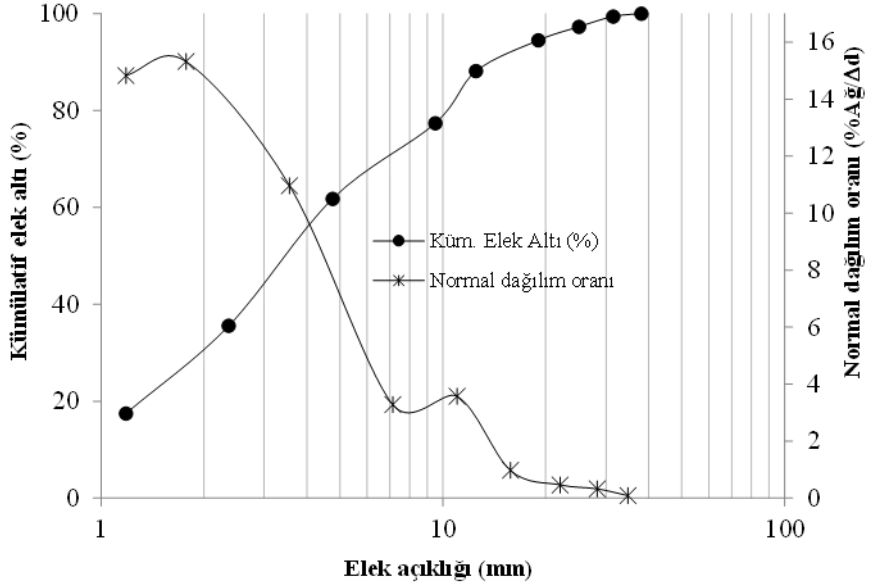
Tane Boyu Analizi

Araştırmada kullanılan Malatya- Arguvan linyiti, yeraltından çıkarılan kömürün boşaltıldığı silo çıkışından belirli periyotlarla yeterli miktarda alındıktan sonra 750 kg'a kadar indirilmiştir. Daha sonra numune azaltma yöntemleriyle laboratuvar çalışmaları kapsamında kullanılacak temsili örnekler 2'şer kg'lık poşetlerde saklanmıştır.

Linyit örneğinin orijinal bazda elek analizi sonuçları Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde, orijinal baza göre Arguvan linyitlerinin yaklaşık %88'inin -12 mm, normal dağılım oranı grafiğine göre ise örneklerin büyük oranda 19 mm boyutunun altında

olduğu belirlenmiştir. Ortalama tane boyutu ise 6,1 mm olarak hesaplanmıştır.

Şekil 1. Orijinal bazda Malatya-Arguvan (Parçikan) linyitinin elek analiz sonuçları



Kaynak: (Korkmaz, 2017)

Kısa Analiz

LECO marka CHNS-932 cihazıyla havada kuru bazda yapılan elementel analiz sonuçlarına göre Arguvan linyitinin %31,80 C, %3,54 H, %0,66 N ve %3,88 S içerdiği belirlenmiştir. ASTM standartları ile belirlenen havada kuru baz analiz değerlerine göre hesaplanan orijinal, kuru ve saf kömür (kuru-külsüz) baz değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 Malatya-Arguvan linyitinin kısa analizi

İçerik	Orijinal	Havada Kuru	Kuru	Kuru-Külsüz
	Baz	Baz	Baz	Baz
Kaba Nem (%)	15,98	-	-	-
Nem (%)	22,67	7,96	-	-
Kül (%)	31,73	37,77	41,04	-
Uçucu Madde (%)	21,56	25,66	27,88	47,28
Sabit C (%)	24,04	28,61	31,08	52,72
Toplam S (%)	3,23	3,85	4,18	-
AID (kcal/kg)	2068	2576	2851	4747

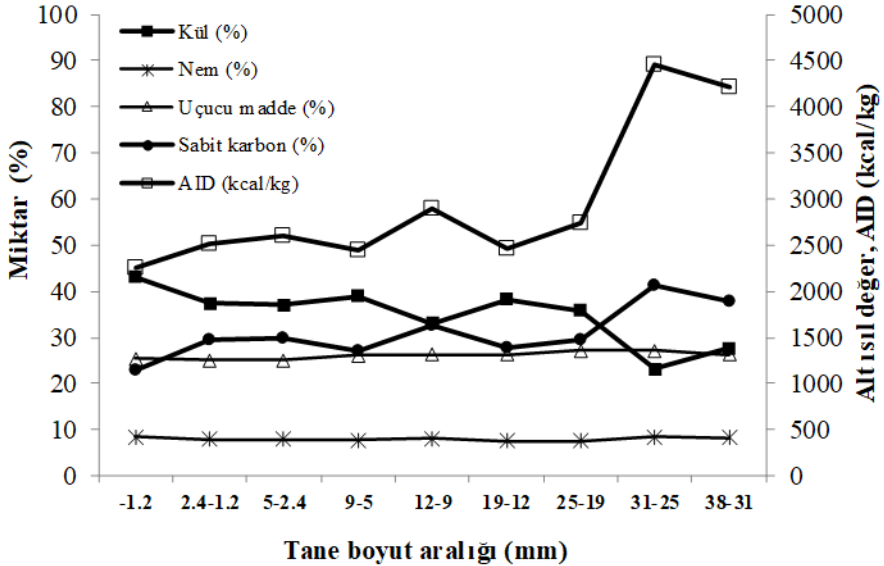
Kaynak: (Korkmaz, 2017)

Nem oranı, linyitin kömürleşme derecesini gösteren, kalitesini ve kullanımını etkileyen en önemli özelliktir. Bu bakımdan, linyit sınıflandırılmasında, orijinal nem oranı birinci derecede etkili olmaktadır. Orijinal nem oranı göz önünde tutularak yapılan dış görünüş linyit sınıflamasına göre, %22,67 nem içeren Arguvan linyiti sert linyit sınıfına girmektedir. Sert linyitler parça sağlamlığı ve yıkanabilirliklerinin nispeten iyi olmasıyla bilinmektedirler (Kemal & Arslan, 2010: 13).

Arguvan linyitinin diğer bir karakteristik özelliği de %37,77 gibi yüksek bir oranda küle sahip olmasıdır. Normalde sert linyitlerde bu kadar yüksek oranda kül içeriği beklenen bir durum değildir. Saf kömür bazında %47,28 uçucu madde içeren Arguvan linyiti, Riediger katı yakıt sınıflamasına göre sert linyit sınıfına girmektedir (Kemal & Arslan, 2010: 13).

Havada kuru baza göre gerçekleştirilmiş olan Arguvan linyitinin tane boyutuna göre kül, nem, uçucu madde ve sabit karbon değişimleri Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’ye göre, Arguvan linyitinde uçucu madde ve nem içeriği tane boyuna bağlı olarak hemen hemen hiç değişmezken, kül ve sabit karbon içeriklerinde anlamlı bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. 19 mm’den iri malzeme miktarı sadece %5,5’dir. Dolayısıyla tane boyutu değişimine göre içeriklerde belirgin bir farklılık olmadığı belirlenmiştir. Ancak tane boyutuna bağlı olarak kalorifik değerleri, beklendiği gibi kül içeriği ile ters orantılı olarak değişmiştir. ASTM sınıflamasına göre, kuru-külsüz (saf kömür) bazda üst ısıl değeri 4747 kcal/kg olan Arguvan linyiti Alt bitümlü-C sınıfına dahildir (Speight, 2005: 13).

Şekil 2. Havada kuru baza göre Arguvan linyitinin tane boyutuna bağlı olarak kısa analiz değerlerinin değişimi

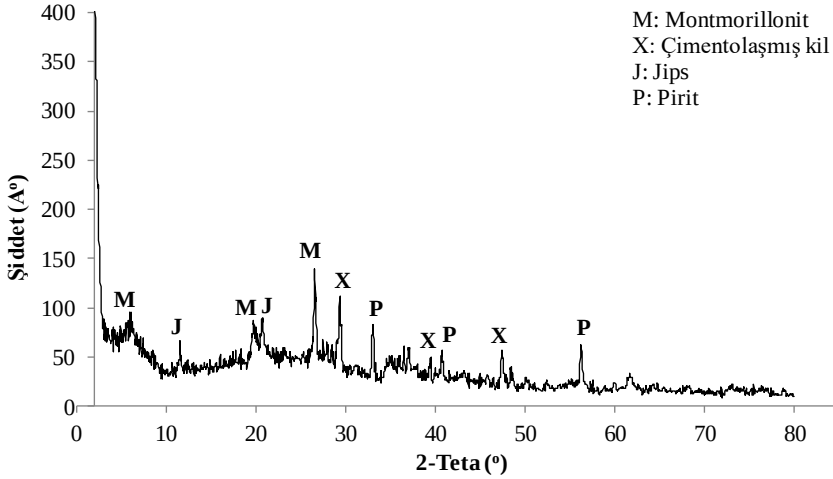


Kaynak: (Korkmaz, 2017)

Mineralojik ve Petrografik Analiz

Arguvan linyit örneğinin XRD analizi sonucu incelendiğinde (Şekil 3), heterojen linyit yapısı içerisinde belirgin olarak kil minerallerinden Montmorillonit ($(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$), Jips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), Pirit (FeS_2) ve çimentolaşmamış kil minerallerine ait piklere rastlanmıştır.

Şekil 3. Malatya-Arguvan linyit örneğinin XRD pikleri



Kaynak: (Korkmaz, 2017)

Havada kuru bazda %37,77 kül içeriğine sahip Arguvan linyitinin Ankara MTA Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında yaptırılan petrografik analiz sonuçlarına göre;

- Maseral ve mineral dağılımına bakıldığında; maseral dağılımının %59 vitrinit (hüminit), %7 eksinit (liptinit) ve %6 inertinit grubundan; mineral dağılımının ise %6 framboidal pirit ve %22 diğer mineral maddelerden oluştuğu belirlenmiştir.

- Mikrolitotip dağılımında %31 klarit, %21 duroklorit, %12 vitrit, %29 karbominerit %7 diğer mikrolitotipler bulunmaktadır. Buna göre, %15 monomaseralik, %34 bimaseralik, %22 trimaseralik ve %29 karbominerit gruplarından oluştuğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar Abakay, Majumder & Bakır'ın (2016) çalışması ile uyumludur.

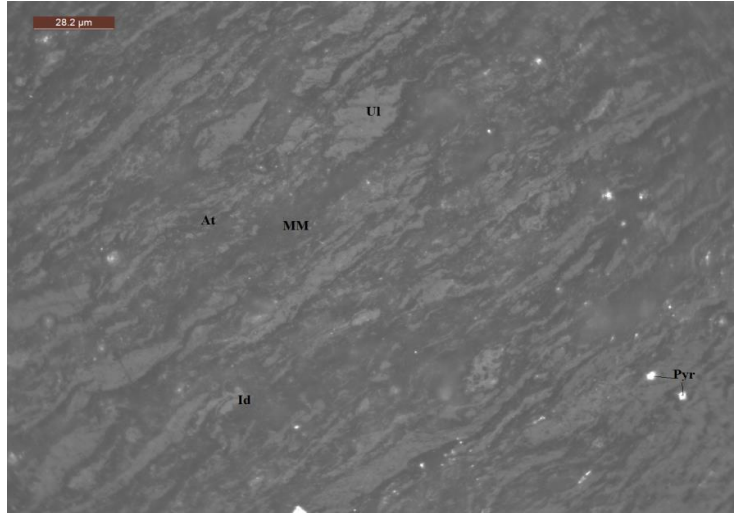
Kömürleşme başlangıcında bitkilerin hava ile teması, su altında kalma şartları, jelleşme durumu, ortamın asidikliği, bakteri ve mantarlaşıma durumlarına göre, kömürün yapıtaşları olan maseraller oluşmaktadır. Kurak ve sıcak ortamlarda veya zamanlarda inertinit gruplarının ve nemli atmosfer ortamlarında da vitrinit gruplarının oluştuğu düşünülmektedir (Kemal & Arslan, 2010: 13). Arguvan linyitinde %59 vitrinit (hüminit) grubu maseralin bulunması oluşum ortamının yağışlı olduğuna işaret etmektedir. Koklaştırma açısından vitrinit grubu önemli bir maseral grubudur. Kömürlerde vitrinit grubunun uçucu madde oranının %19-35 (saf kömür bazında) olması istenmektedir. Arguvan linyitinin saf kömür bazında %47,3 uçucu madde içermesinden dolayı koklaşma ürününün parça değil de toz haline çıkması beklenen bir durumdur.

Kömürlerde genellikle %5-10 arasında bulunan eksinit grubu, Arguvan linyitinde beklendiği gibi %7 eksinit (liptinit) oranına sahiptir. Bu miktar esasen koklaştırma sırasında plastikleşme için yeterli sayılabilecek derecededir. Hidrojence zengin yüksek uçucu madde içerdiklerinden dolayı çoğunlukla katran ve gaz ürün olarak alınmaktadır.

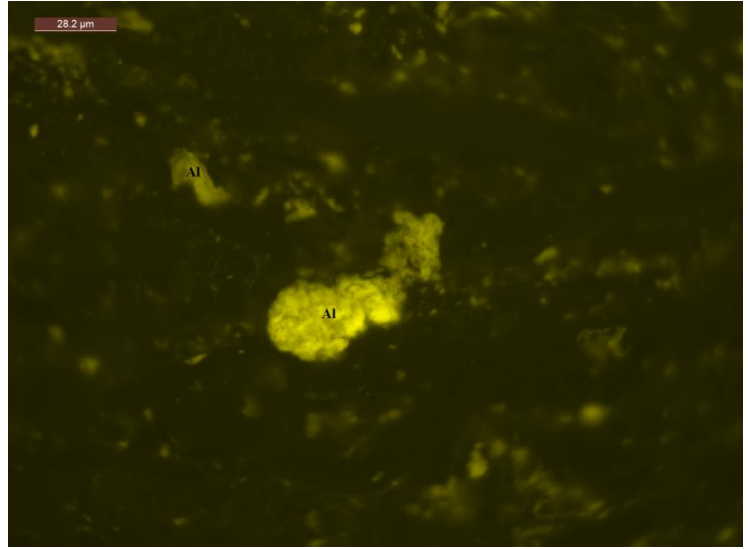
Arguvan linyitinde %6 oranında bulunan inertinit grubu maseraller, miktarın az olması ve oksitlenme ürünü olduklarından koklaştırmada herhangi bir etkilerinin olmadığı düşünülmektedir. Termik parçalanma sonucu katran ve gaz ürünleri vermektedir.

Arguvan linyitinin petrografik analizinde en önemli bulgulardan biri de pirit ile birlikte mineral madde miktarının hacimce %28 olmasıdır. Bu da linyitin gravite ve flotasyon zenginleştirmesinin zor olacağına işaret etmektedir. Şekil 4’de Arguvan linyitinin ince kesit resimlerinden görüldüğü gibi, linyitin içerdiği safsızlıkların (kil, kireçtaşı vb.) çok ince dağılımlı olması, bunların oluşumlarının kömürleşme esnasında (sinjenetik) meydana geldiğini göstermektedir.

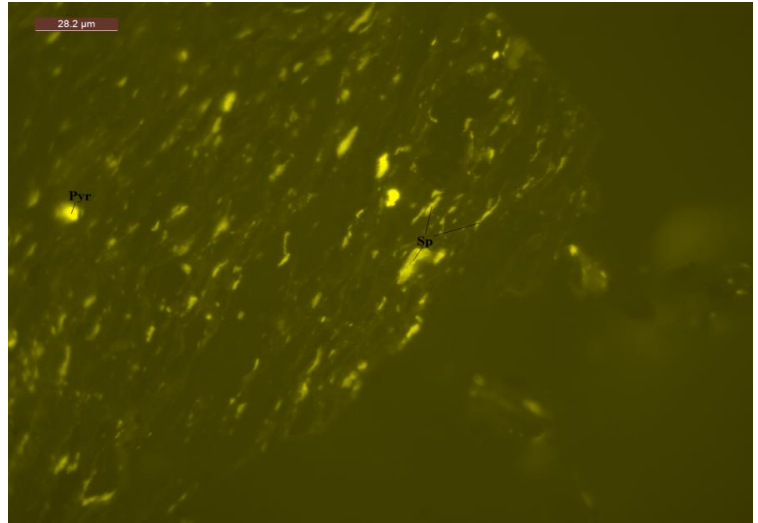
*Şekil 4. Malatya-Arguvan linyitinin ince kesitte maseral görüntüsü
(Ul: Ülminit, At: Atrinit, Id: İnertodetrinit, Pyr: Framboidal pirit,
MM: Mineral madde, Sp: Sporinit, Al: Alginit)*



(a)



(b)



(c)

Kaynak: (Korkmaz, 2017)

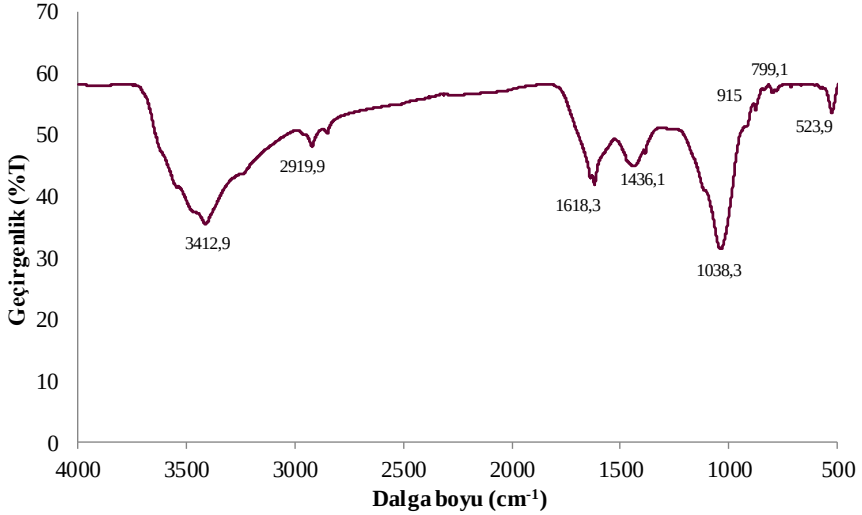
Şekil 4’de, önemli miktarda framboidal (küresel) piritin çok ince boyutta (yaklaşık 30 mikron altı) dağılım gösterdiği izlenmiştir. Buna göre gravite zenginleştirmesinde çalışma parametrelerinin

önemli olacağı ortaya çıkmıştır. Arguvan linyitinin mikrolitotip analizinden elde edilen %29 karbominerit grubunun bulunması linyitle beraber yüksek miktarda mineral madde (kil, sülfür, karbonat, kuvars ve çeşitli mineraller) ve piritin bulunduğunu göstermektedir. Karbominerit miktarının yüksekliği zenginleştirme ve koklaştırma yöntemlerinde istenen özelliklerin sağlanmasının zor olacağına işaret etmektedir.

FTIR Analizi

Yapısal analizi desteklemek ve fonksiyonel grupları belirlemek amacıyla yapılan FTIR spektrumunu Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5’de yaklaşık 3413 cm^{-1} dalga boyunda görülen pik, sudaki hidroksil gruplarına ya da fenolik bileşiklere bağlı olarak ortaya çıkan tipik O-H gerilme pikidir. Alifatik yapının göstergesi olan ve hidrokarbon türlerine bağlı olarak ortaya çıkan C-H titreşim bandı ise 2920 cm^{-1} değerinde görülmektedir. 1618 cm^{-1} piki aromatik yapıdaki C=C ve C=O siklo olefin gerilmelerini, 1436 cm^{-1} pik yapı içerisindeki metal (Ca, Mg, Na, K) iyonlarına ait karboksilat gruplarını belirtmektedir. 1038 cm^{-1} civarındaki pik Si-O-Al/Fe/Mg vb. gerilmelerini, 915 cm^{-1} ve 800 cm^{-1} piki C-H aromatik bileşenlerine ait yapıları göstermektedir. 524 cm^{-1} civarındaki pik ise Si-O eğilme titreşimlerini veya kaolinitleri işaret etmektedir (Zhang & ark., 2015; Lievens & ark., 2013; Elbeyli & Pişkin, 2006; Kizgut, Baran, & Çuhadaroglu, 2003).

Şekil 5. Malatya-Arguvan linyit örneğinin FTIR spektrumu

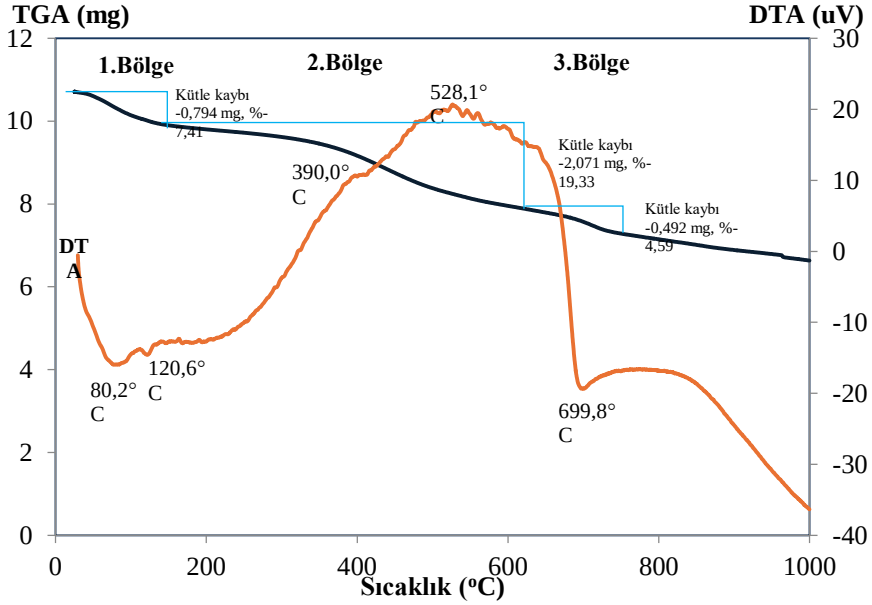


Kaynak: (Korkmaz, 2017)

DTA/TG Analizleri

Arguvan linyitinin termodinamik davranışını anlayabilmek amacıyla hava ortamında yapılan termal gravimetrik (DTA-TG) analiz değişim eğrileri Şekil 6'da gösterilmiştir. DTA eğrisi 3 belirgin bölgeye ayrılabilir. Yaklaşık 80°C ve 121°C'de görülen kaba nem ve bünye nemine bağlı olan pikler 1.Bölgeyi, 390°C'de başlayan ve 528°C'ye kadar devam eden pik uçucu madde çıkışı olan 2.Bölgeyi, sabit karbonun yanması sonucu 528°C ve 700°C'ler arası ise 3.bölgeyi göstermektedir. TGA eğrisinden uçucu madde ve katranın çıktığı 2.bölge ve 3.Bölgede ağırlık kaybı yaklaşık olarak %23,92 olarak belirlenmiştir. Linyitin kısa analizinden hesaplanan uçucu madde miktarı %25,66 değeri ile DTA'dan hesaplanan %23,92 uçucu madde miktarının birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

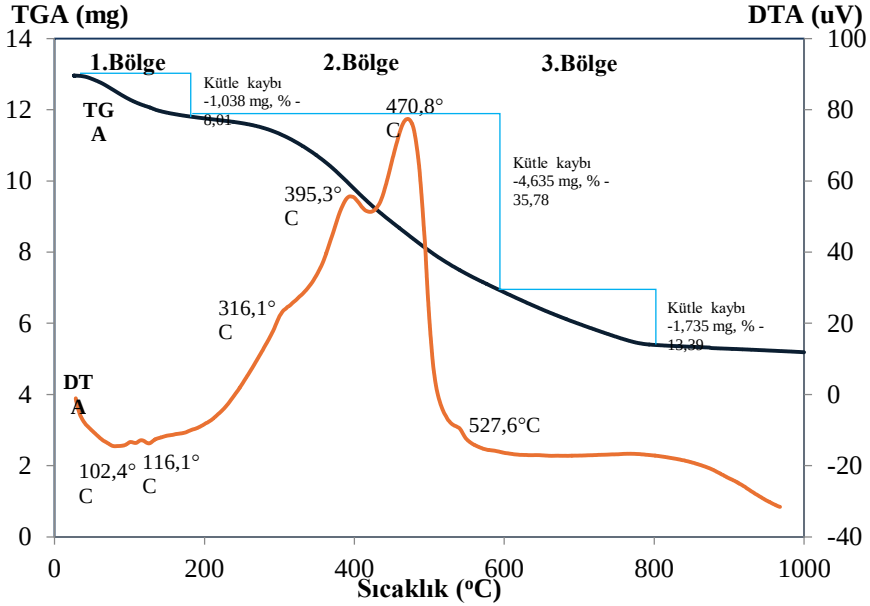
Şekil 6. Arguvan linyitinin hava atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi



Kaynak: (Korkmaz, 2017)

Linyitlerin termal karakterizasyonu tespit edilirken daha anlaşılır olması amacıyla hava yerine genellikle Azot (N_2) gazı kullanılmaktadır. Bununla beraber, piroliz işlemlerinde genellikle inert gaz olarak N_2 kullanılması da DTA/TG değişimlerinin Azot (N_2) ile yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Malatya-Arguvan linyitlerinin Azot (N_2) atmosferindeki termogravimetrik analiz (DTA/TGA) sonuçları Şekil 7’de gösterilmektedir.

Şekil 7. Arguvan linyitinin Azot (N_2) atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi



Kaynak: (Korkmaz, 2017)

Şekil 7'deki DTA eğrisinde 3 Bölge görülmektedir. DTA eğrisinde yaklaşık 102°C ve 116°C'de görülen bünye nemi ve CO₂ uzaklaşmasına bağlı olan pikler 1.Bölgeyi 316°C'de başlayıp 471°C'de sona eren uçucu madde çıkışı 2.Bölgeyi, karbonat (CO₃) parçalanma başlangıcı sıcaklığı olan 528°C'deki pik ise 3.Bölgeyi göstermektedir. Shi & ark. (2013) 300-400°C arasında DTA grafiklerinde görülen piklerin alifatik yapıdaki karbon-oksijen, kükürt-azot ve kükürt-kükürt arasındaki bağların kopmasından, 400-500°C arasında görülen piklerin alifatik yapıdaki karbon-karbon, oksijen-hidrojen ve aromatik yapıdaki karbon-azot bağlarının kopmasından ve 500-600°C arasındaki piklerin ise aromatik karbon ve alifatik yapıdaki karbon bağları ile oksijen-kükürt bağlarının kopmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Kaynakça

- Laskowski, J.S. (2001). *Coal flotation and fine coal utilization*, Elsevier, USA.
- Özbayoğlu, G. & Özbayoğlu, M.A. (2006). A new approach for the prediction of ash fusion temperatures: A case study using Turkish lignites, *Fuel*, 85 (4), 545-552.
- Haykırı Açma, H. Yaman, S. Özbek, N. & Küçükbayrak, S. (2011). Mobilization of some trace elements from ashes of Turkish lignites in rain water, *Fuel*, 90 (11), 3447-3455.
- Önal, M. (1995). Miocene stratigraphy and lignite potential of the northern " part of the Malatya graben basin, East Anatolia-Turkey, *Proceedings of the International Earth Sciences Colloquium on the Aegean region (IESCA-1995)*, İzmir, (pp. 607–621).
- Birinci, M. (2013) Determination of washability characteristics of Parçikan (Malatya) lignite, *Proceedings of the 17th International Coal Preparation Congress*, İstanbul, Turkey, (pp. 189-192).
- Korkmaz, A.A. Bentli, İ. & Sis, H. (2015) Malatya-Arguvan Linyitlerinin Gravite Yöntemleriyle Zenginleştirilmesi, *24nd International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET2015*, 14-17 Nisan 2015, Antalya, (pp. 676-681).
- Korkmaz, A.A. & Bentli, İ. (2017). Determination of Washability Characteristics of Arguvan (Malatya) Lignite by Different Washability Index Method, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39 (14), 1572-1580.
- Korkmaz, A.A. (2017). Zenginleştirme Yöntemlerinin Değişik Linyitlerin Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Etkisi, Doktora Tezi, *FBE Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İnönü Üniversitesi, Malatya*.

- Kemal, M. & Arslan, V. (2010). Kömür Teknolojisi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, No.33, İzmir, Türkiye.
- Speight, J.G. (2005). *Handbook of Coal Analysis*, Wiley-Interscience Press, USA
- Abakay Temel, H. Majumder, A.K. & Bakır, Y. (2015). An assessment of Malatya-Arguvan lignite and Southeastern Anatolia region lignites (Turkey), *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 37 (11), 1202-1209.
- Zhang, W. Jiang, S. Wang, K. Wang, L. Xu, Y. Wu, Z. Shao, H. Wang, Y. & Miao, M. (2015). Thermogravimetric Dynamics and FTIR Analysis on Oxidation Properties of Low-Rank Coal at Low and Moderate Temperatures, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 35, 39-50
- Lievens, C. Ci, D. Bai, Y. Ma, L. Zhang, R. Chen, J.Y. Gai, Q. Long, Y. & Guo, X. (2013). A study of slow pyrolysis of one low rank coal via pyrolysis–GC/MS, *Fuel Processing Technology*, 116, 85-93.
- Elbeyli, İ.Y. & Pişkin, S. (2006). Combustion and Pyrolysis Characteristics of Tunçbilek Lignite, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 83, 721-726.
- Kizgut, S. Baran, Y. & Çuhadaroglu, D. (2003). Reactivity and Characterisation of Various Rank Turkish Bituminous Coal Chars, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 71, 857-865.
- Shi, L. Liu, Q. Guo, X. Wu, W. & Liu, Z. (2013). Pyrolysis behavior and bonding information of coal—A TGA study, *Fuel Processing Technology*, 108, 125-132.

BÖLÜM 5

KÖMÜRÜN TERMAL ANALİZİ

AYDAN AKSOĞAN KORKMAZ¹

Giriş

Kömür, yaygın bulunabilirliği ve fiyatlarının nispeten istikrarlı olması nedeniyle önemli bir enerji kaynağı olmaya devam etmektedir. Enerji üretiminde temel bir kaynak olarak rol oynayan kömür, elektrik üretimi için sürdürülebilir bir altyapı sağlamak adına güvenilir ve maliyet açısından uygun kömür temini gereksinimi doğurmaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda kömür üreten ülkelerdeki artan talep ve jeopolitik gerilimler, arz-talep dengesini zorlamakta, bu durum fiyat artışlarına ve kömür tedarikinde istikrarı sağlama konusunda zorluklara yol açmaktadır. Buna karşılık, biyokütle kaynaklı ham maddeler son dönemlerde daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Ancak, bu alternatif enerji kaynağının elektrik talebini karşılayacak tedarik kapasitesine sahip olmaması ve biyokütle enerjisi üretim tesislerinin inşaa maliyetlerinin yüksekliği, bu alandaki en önemli zorluklar arasında yer almaktadır (Kato, 2022:73). Bu bağlamda, karbon yakalama, kullanım ve depolama teknolojilerindeki ilerlemeler sağlanana kadar, kömürün yerel ve küresel düzeyde birincil enerji kaynağı olarak kullanımının devam

¹ Doç.Dr., Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Hekimhan M.E.S. MYO, Madencilik ve Maden Çıkarma, Orcid: 0000-0002-3309-9719

etmesi öngörülmektedir. Dolayısıyla, halen yeterince kullanılmayan ancak büyük rezervlere sahip düşük ranklı kömür, orta-uzun vadeli bir perspektifle, termal kömürün yerine enerji üretiminde alternatif bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Imamura & ark., 2018: 49).

Düşük ranklı kömür, yüksek nem oranı ve uçucu madde içeriği ile tanımlanır ve birim ağırlık başına ısı değeri düşüktür. Bu tür kömürün yüksek nem içeriği, taşıma verimliliğini olumsuz yönde etkileyerek, genellikle sadece kömür üretimi yapılan bölgelere yakın alanlarda kullanımını sınırlamaktadır; bu durum, kömür üzerinde kurutma veya reformasyon işlemleri uygulanmadığı sürece geçerlidir.

Kurutma ve reformasyon işlemleri sırasında, kömürün ısı değerinin artırılması ve yakıt verimliliğinin korunabilmesi için belirli bir miktar uçucu maddenin muhafaza edilmesi kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, "geliştirme" terimi, düşük ve orta sıcaklıklarda kömüre uygulanan kuru damıtma işlemini ifade eder. Bu işlem, kömürün uçucu bileşenlerini uzaklaştırarak kalorifik değerini artırır. Ancak, bu geliştirilmiş kömür, bazı uçucu maddeleri hâlâ barındırmakta olup, bu da onun kendiliğinden tutuşma eğilimini artırır ve taşıma ile depolama koşullarını olumsuz şekilde etkiler (Imamura & ark., 2025: 73).

Kömür, belirli koşullar altında dışarıdan bir ateş kaynağı olmaksızın kendiliğinden yanmaya başlama potansiyeline sahiptir. Bu tür bir kömürün kendiliğinden tutuşması genellikle dış bir ısı kaynağı olmadan gerçekleşen yavaş bir oksidasyon süreci ile başlar. Uygun bir ortamda, kömür içinde biriken ısı, sıcaklığın artmasına neden olur. Kendiliğinden tutuşma, genellikle yeterli oksijenin sağlandığı ancak biriken ısının dağılması için yeterli bir yol bulunmadığı durumlarda meydana gelir. Kömürün oksidasyon süreci ilerledikçe salınan ısı daha fazla kömür tarafından depolanır, bu da sıcaklığın üssel olarak artmasına yol açar. Sonuç olarak, bu durum

termal bir geri dönüşüme neden olarak kömürün yanmasına sebep olabilir (Wang, 2020: 1).

Kömürün kendiliğinden tutuşması, çevre, değerli ve yenilenemeyen doğal kaynaklar, ekonomi, yaşam, mülk ve insan sağlığı üzerinde büyük zorluklar yaratmaktadır. Bu etkiler, doğal kaynaklar ve insan yaşamı açısından yerel veya bölgesel düzeyde çok kritik olsa da, bu durum sera gazı salınımına yol açacağından küresel ısınma nedeniyle oldukça önemlidir (Gbadamosi & ark., 2021: 2659).

Kendiliğinden tutuşma tehlikeleri, madencilik faaliyetleri ve üretimi üzerinde sürekli güvenlik sorunları yaratmasına rağmen, kömürün karmaşık kimyasal yapısı ve fiziksel koşulları nedeniyle kendiliğinden tutuşma mekanizmaları tam olarak anlaşılmamıştır. Kimyasal ve fiziksel özellikler arasındaki etkileşimler doğrultusunda, aynı sınıftaki kömürler veya farklı koşullarda bulunan aynı kömürler, farklı kendiliğinden tutuşma potansiyellerine sahip olabilir. Örneğin, düşük sınıf kömürler, uzun bir oluşum sürecinde genç ve olgunlaşmamış bir metamorfik aşamada yer alır. Bu tür kömürlerin yüksek uçucu madde içeriği, bol miktarda gözenekli yapısı, geniş iç yüzeyi ve büyük miktarda nem içerdiği bilinmektedir. İşleme sırasında kuruma ve yeniden ıslanma meydana geldiğinde, kömür çevresel ortamdan nemi adsorbe ederken su buharı yoğunlaşmasının etkisiyle ıslanma ısısı oluşur. Bu süreçte az miktarda ısı üretildiği halde, bu ısı, kömürün kendi kendine ısınması için ilk enerjiyi sağlar. Isı tam olarak dağılmadan yavaşça birikmeye başladığında, kömürün kendi kendine ısınması meydana gelir. Zorunlu ilk ısı ve yeterli oksijen ile kömür, gözenekli yapısının yüzeyinde oksijen tarafından oksitlenir ve daha fazla ısı salınır. Kendi kendine ısınma potansiyelini etkileyen bu faktörler, fiziksel koşullar, kimyasal özellikler ve çevresel duruma bağlı olarak kontrol edildiğinden, oksidasyon sürecini analiz etmek ve nicel olarak

değerlendirmek için hem deneysel hem de teorik yöntemler gereklidir (Wang, 2020: 4).

Türkiye'nin enerjide dışa olan bağımlılığı, yerli kömür rezervlerini etkili bir şekilde değerlendirmeyi gerektirmektedir. Bu amaçla, termogravimetrik ve kinetik analizler yaparak yerli kömürün termal kapasitesini anlamak büyük önem taşımaktadır.

Kömürün Kendiliğinden Yanması

Tüm yakıtların ortak bir özelliği, yüksek sıcaklık ortamına girdiğinde, her birinin belirli bir dizi yanma süreci aşamasından geçmesidir. Bu aşamalar sırasıyla ısıtma, nemin buharlaşması, uçucu maddelerin buharlaşması ve yanması, ayrıca kömürleşmiş maddenin yanması olarak sıralanabilir. İşlem koşullarına bağlı olarak, bu aşamalar birbiri ardına veya aynı anda gerçekleşebilir. Yakıt yanma süreci, son derece karmaşık ve çok aşamalı bir fizikokimyasal değişim süreci olup, bu nedenle aynı anda meydana gelen olayları analiz etmek pratikte oldukça zordur.

Kömürleşmiş maddenin yanması, kömür yanma sürecinin en belirleyici aşamalarından biridir. Genellikle, uçucu maddelerin salınması aşaması tamamlandıktan hemen sonra başlar; ancak bazı durumlarda bu aşamalar paralel olarak da gerçekleşebilir. Yakıtın yanma süreci sırasında, hava akımından gelen oksijen, yakıtın yüzeyine taşınarak bir oksidasyon reaksiyonuna girer. Yanma süreci, daha fazla dönüşüme uğrayan kararsız ürünlerin oluşumuyla sonuçlanan bir dizi dolaylı reaksiyonla devam eder. Bu mekanizma son derece karmaşıktır, çünkü yanma odasındaki sıcaklık ve akış koşulları, reaksiyonları şekillendirir. Yanan kömür, en basit düzeyde, element karbonun yüksek sıcaklıkta karbondioksit oksidasyonu süreci olarak tanımlanabilir (Kijo-Kleczkowska & ark., 2022: 124840).

Kömür, sürekli ve yeterli hava temini sağlandığı sürece ve üretilen ısı serbest bırakılmadığı takdirde, kendiliğinden ısınma

sürecine devam eder. Kömür, atmosfer koşullarına maruz kaldığında kimyasal bir reaksiyona girer ve ekzotermik bir reaksiyon gerçekleşir. Bu reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı birikerek reaksiyon hızını artırır ve nihayetinde kömürün tutuşma noktasına ulaşmasına neden olacak şekilde termal kaçak meydana gelir. Kömür oksidasyonu, esasen havadaki oksijenin kömür yüzeyiyle reaksiyona girerek gerçekleşen bir katı/gaz reaksiyonudur. Havadaki oksijen, kömürle birleşerek kömürün sıcaklığını artırır. Reaksiyon ilerledikçe, kömürdeki nem buharlaşarak atmosferi terk eder ve ardından genellikle belirgin bir kokuya sahip uçucu maddeler serbest kalır (Onifade & ark., 2022: 2703).

Kendiliğinden tutuşma, önemli ekonomik kayıplara ve çevresel problemlere yol açmaktadır. Kömür rezervlerinin istenmeyen bir biçimde yanması, değerli doğal kaynakların doğrudan kaybına neden olabilir. Ayrıca, bu durum madencilik faaliyetlerini kesintiye uğratar ve yer altındaki çalışma alanlarının kapanması gerektiğinde dolaylı olarak kömür kaynaklarının kaybına yol açar. Madenciliği yapılmayan kömür damarları tahrip olur ve yangından etkilenmeyen kömür rezervleri de çıkarılamaz hale gelir. Bu süreç, ekipman ve personelin verimsiz bir şekilde kullanılmasına ve boşa kalmalarına yol açar (Wang, 2020: 4).

Birincil oksidasyon mekanizmasının, alifatik grupların oksijenle reaksiyona girmesi olduğu öne sürülmüştür (Tahmasebi & ark., 2012: 85). Kendiliğinden tutuşma süreci, bu grupların oksijeni tüketmesi ve katı oksijenli bileşikler oluşturmasıyla başlar, bu bileşikler daha sonra termal olarak ayrışarak karbon monoksit, etilen, hidrojen ve diğer gaz halindeki oksidasyon ürünlerine dönüşür. Bu gazlar, genellikle kömür yatağı metaninin durumu için göstergeler olarak kullanılır (Jia & ark., 2022: 2880).

Deng ve arkadaşları, kömürün yanma sırasında salınan gazlarla kömür sıcaklığı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. 70°C'nin altında, kendiliğinden tutuşmaya uğrayan kömürün sıcaklığının

zamanla yavaşça arttığı, oksijen tüketim oranı ve ısı yoğunluğun sıcaklıkla orantılı olarak attığı ve 100°C'nin üzerine çıktığında hızlandığını belirlemişlerdir. CO konsantrasyonu, oksijen tüketim oranı ve ısı salınımı hızı gibi parametrelerin, ısıtmanın erken evresinde sıcaklık arttıkça arttığını gözlemlemişlerdir (Deng & ark., 2016: 218).

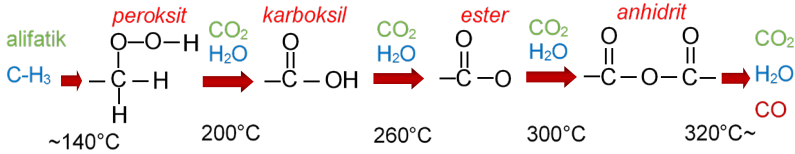
Ön oksidasyon sıcaklığı arttıkça, kömür daha hidrofobik hale gelir. Bu hidrotermal dehidrasyon, organik ve inorganik maddelerin büyük bir kısmını ortadan kaldırır ve bu kayıp, dehidrasyon sıcaklığı arttıkça artar. Kaybolan organik maddeler, ağırlıklı olarak yağlı uçucu bileşenler ve oksijen içeren fonksiyonel gruplardır, inorganik maddeler ise CaSO₄ ve Fe içeren minerallerin çözünmesi sonucu kaybolur. Hidrotermal olarak dehidrate edilmiş kömürün kritik ateşleme sıcaklığı, ham kömüre göre daha düşüktür; bu durum kömürün daha büyük mesoporoziteye sahip olmasına bağlanabilir (Liao & ark., 2016: 473).

Kömür oksidasyonu teorisi, kömürün kendiliğinden yanmasını açıklamak için yaygın olarak kabul edilen bir yaklaşımdır. Kömürün kendiliğinden tutuşmasının ürünleri düzenli ve ölçülebilirdir; bu nedenle, CO, C₂H₄, C₂H₂ ve diğer gazlar, kendiliğinden tutuşmayı tahmin etmek için gösterge gazları olarak kullanılmaktadır (Li & ark., 2019: 28). Son yıllarda birçok araştırmacı bu konu üzerinde çalışmalar yapmıştır (Liu & ark., 2025: 101231 ; Gao & ark., 2024: 108114; Shi & ark., 2023: 128631 ; Niu & ark., 2022: 133923; Wang & ark., 2022: 121806). Bu araştırmalar, kömürün kendiliğinden yanma reaksiyonlarının kendi kendini hızlandıran, oksidatif ekzotermal reaksiyonlar olduğunu göstermiştir. Kömür ile hava temas ettiğinde, fiziksel adsorpsiyon ve yerel kimyasal adsorpsiyon meydana gelir ve küçük miktarda ısı salınır. Isının birikmesi, kömürün sıcaklığının yavaşça artmasına neden olur. Bu sıcaklık artışı, havadaki oksijen molekülleri ile kömür yüzeyindeki moleküllerdeki fonksiyonel gruplar arasındaki

oksidasyon reaksiyonlarını teşvik eder. Bu reaksiyonlar büyük miktarda ısı salınımına yol açar. Bu ısı kömürde birikir ve nihayetinde sıcaklık, kendiliğinden yanmaya neden olan tutuşma noktasına ulaşır. Yanma, çoğunlukla CO, CO₂ ve H₂O olmak üzere büyük hacimlerde gaz salınımına yol açar (Chen & ark., 2021: 967).

Şekil 1'de kömür için egzotermik oksidasyon reaksiyon şeması verilmiştir. Bu şemaya göre, 140 °C ile 320 °C arasındaki sıcaklıklarda, alifatik hidrokarbonların (-CH₃) bir dizi oksidasyon reaksiyonuna girdiği varsayılmaktadır. 320 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda, fonksiyonel gruplar CO, CO₂ ve H₂O'ya ayrışır. Bu reaksiyonlar egzotermik olduğundan, kömürün kendiliğinden tutuşması, esas olarak alifatik hidrokarbonlar ve oksijen içeren fonksiyonel gruplarla ilgili oksidasyon reaksiyonlarına bağlanabilir (Hiroyasu & ark., 2014: 2402).

Şekil 1. Oksidasyon reaksiyonları nedeniyle kömürdeki fonksiyonel grup değişiklikleri



Kaynak: Hiroyasu & ark., 2014: 2402

Genel olarak, yanma reaksiyonlarının zincirleme reaksiyonlar olarak kabul edilebileceği ve oksijenin, katı maddelerdeki C-C bağlarını CO₂'deki C=O bağlarına dönüştüren reaksiyonların enerji bariyerlerini düşürebilen bir başlatıcı olarak işlev gördüğü kabul edilmektedir. Ancak, daha yüksek Bağ Ayrışma Enerjisi (BDE) değerlerine sahip bağların oksijenle reaksiyona girmesinin daha zor olduğu da düşünülmektedir. Kömürlerde ve kömürleşmiş materyallerde karbon içeren 8 ana kovalent bağ bulunmaktadır ve bu bağların BDE değerleri Tablo 3'te

gösterilmektedir. Bu bağlamda, yanma davranışlarının kömürlerdeki ve kömürleşmiş materyallerdeki bağlardan etkilendiği sonucuna varılabilir (Guo & ark., 2021: 120749).

Tablo 1 Hidrokarbonlardaki bağ türleri ve bağların BDE değerleri (kJ/mol)

Bağ türü	C _{ar} =C _{ar}	C _{ar} -C _{ar}	C _{ar} -H	C _{ar} -O	C _{ar} -C _{al}	C _{al} -H	C _{al} -C _{al}	C _{al} -O
BDE	728	478	468	417	361	344	282	240

Kaynak: (Guo & ark., 2021: 120749).

Kömürlerin kendiliğinden yanma davranışı, farklı tekniklerle yapılan çeşitli laboratuvar test yöntemleriyle değerlendirilebilir. Bu yöntemlerden R70 adyabatik testi ve kritik kendi kendine ısınma sıcaklığı (CSHT) yöntemi sıklıkla kullanılmış olsa da, termal kütle analizörü (TGA) testi nispeten yeni bir nicel yöntemdir. Bu yöntem, kısa bir test süresi içinde sıcaklık ve ağırlık değişimlerini ölçebilir. Her bir yöntemin, kömürlerin kendiliğinden tutuşma eğilimini sınıflandırmak için kendine özgü özellikleri ve indeksleri vardır. Farklı yöntemlerin eğilim indeksleri arasındaki ilişkiler belirlenmelidir. Yaygın olarak kullanılan bu üç yöntemin birleşimiyle, kendiliğinden tutuşma eğiliminin değerlendirilmesindeki kesinlik büyük ölçüde artırılabilir (Wang, 2020: 5).

Termoanalitik Yöntemler

Termal analiz, bir numune kütleindeki değişimi göstermeye ve bu değişimlerin hangi sıcaklık aralıklarında meydana geldiğine dair bilgi edinmeye olanak tanır. Ayrıca, test edilen maddede ısı emilimi veya salınımıyla ilgili herhangi bir değişiklik olup olmadığını fark etmeyi ve termal işlem sırasında ekzotermik ve endotermik etkileri belirlemeyi sağlar.

Termogravimetri, temel varsayımı, test edilen numunenin kütleindeki değişimi zamana bağlı olarak değişken sıcaklığa göre

kaydetmek olan bir enstrümantal analitik yöntemdir. Numunenin kütlesindeki değişime ilişkin ölçüm sonucunda iki eğri elde edilir. Bunlar termogravimetrik eğri (TG) ve bunun diferansiyeli olan termogravimetrik diferansiyel eğridir. Bu eğriler, numunenin kütlesinde değişikliğe neden olan her reaksiyonun tam başlangıcını ve sonunu belirlemeye olanak tanır (Kijo-Kleczkowska & ark., 2022: 124840).

Difansiyel termal analiz (DTA), bir referans kullanılan bir termal analiz yöntemidir. Örnek ve referans malzeme, aynı fırında ısıtılır. Örnek sıcaklığı ve referans malzeme sıcaklığı arasındaki fark, programlı ısıtma ve soğutma döngüleri sırasında kaydedilir. DTA eğrisi, örnek malzeme ile referans malzeme arasındaki sıcaklık farkını sıcaklık veya zamana karşı çizen bir eğridir. Sıcaklık farkının grafiği, örnekte meydana gelebilecek ekzotermik ve endotermik reaksiyonları ortaya koyar. DTA, deney sırasında ısı üretimini takip ederek kömürlerin kendiliğinden ısınma fenomenini incelemek için kullanılabilir (Wang, 2020: 38).

DTA'dan yararlanılarak saptanabilen, kömürle ilgili özellikler aşağıdaki gibidir (Kissinger, 1957: 1702):

- Tahmini yaş
- Çeşitli gaz atmosferlerinde karbonizasyon, piroliz, hidrojenasyon
- Kendiliğinden tutuşma eğilimi, tutuşma sıcaklığı
- Mineral bileşenleri, faz değişimleri, erime sıcaklıkları
- Ekzotermik ve endotermik tepkimelerde söz konusu olan ısı
- Yanma eğrisi

Arens, bir ısı analiz gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken çeşitli deneysel faktörler ileri sürmüştür (Arens, 1951).

Daha sonra başka araştırmacılar bu faktörleri incelemiş ve tüm ısı analiz yöntemleri için geçerli olacak şekilde genelleştirmişlerdir (Mackenzie & Mitchell, 1962: 420; Voina & Todor, 1978: 619).

Bu faktörler kısaca şöyle sıralanabilir;

- Fırın sıcaklığının yükselme hızı
- Numune kabının geometrisi
- Fırın sıcaklığı ile diferansiyel sıcaklığın ölçüldüğü yerler
- Isıl çiftlerin özellikleri
- Numunenin yoğunluğu ve yığın yoğunluğu
- Numune kabının kapaklı olup olmadığı
- Fırın sıcaklığı ve atmosferi

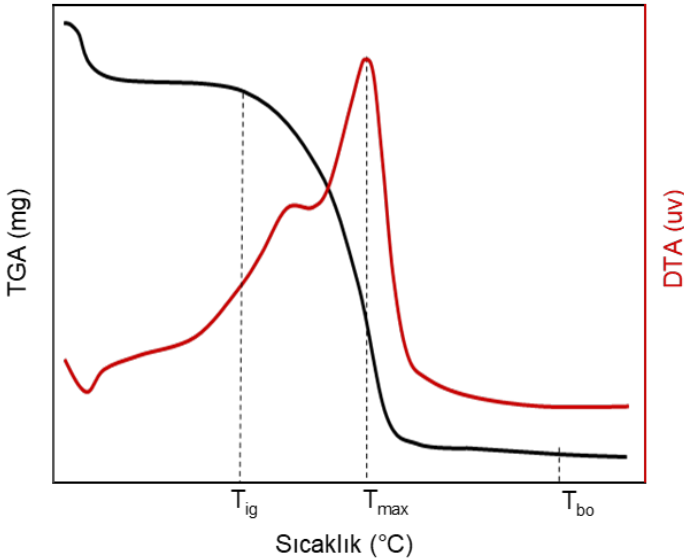
Termoanalitik sonuçların tekrarlanabilirliği ve kıyaslanabilirliği açısından, bu faktörler mümkün olduğu kadar sabit kalmalıdır. Isıl analiz sonuçları verilirken tüm deney koşulları belirtilmelidir.

Termoanalitik yöntemler genellikle 10–20 mg'lık örneklerle yapılan bir mikron ölçeğinde inceleme olarak kabul edilir. Göreceli olarak kısa bir deney süresi içinde küçük bir kömür örneği üzerinde kömürün oksidasyon süreci, tam olarak kontrol edilen bir ortamda simüle edilebilir. Kinetik teoriyle test verileri işlenerek, ölçülen sıcaklık ve ağırlıklar, kömürün ön-üstel faktörünü ve aktivasyon enerjisini hesaplamak için kullanılabilir; bu da kendiliğinden ısınma eğiliminin iyi bir göstergesidir. Örneklerin sıcaklıkları ve ağırlıkları, süreç boyunca analizör tarafından hassas bir şekilde ölçülür ve grafikler (TG, DTG, DTA vb.) çizilir.

Termal analiz verileri, termogravimetri/diferansiyel termal analizör (TG/DTA) kullanılarak, farklı kömürleri karakterize etmek ve yüksek sıcaklıklar ve ısınma hızlarında yanma profillerini değerlendirmek için kullanılabilir. (Şekil 2). TG/DTA eğrisinden

başlangıç tutuşma sıcaklığı (T_{ig}), maksimum yanma hızı sıcaklığı (T_{max}), maksimum yanma hızı (R_{max}) ve kömür yanma sıcaklığı (T_{bo}) parametreleri elde edilebilir. T_{ig} , özellikle kendiliğinden tutuşmaya yatkın olan düşük rütbeli kömürlerde, kömürün yanma özellikleri açısından önemli bir özelliktir (Umar & ark., 2024: 012031). Başlangıç tutuşma sıcaklığı, DTA eğrisinin ilk zirvesinden başlangıç sıcaklığı çıkarıldığında elde edilir, bu aynı zamanda TG eğrisinin baz çizgisinden sapmaya başladığı sıcaklıktır (Fadhil & ark., 2015: 438). T_{max} , yanma hızının maksimum olduğu sıcaklıktır. T_{max} , kömürün reaktivitesiyle ilişkilidir. T_{max} ne kadar düşükse, kömür havayla/oksijenle o kadar reaktiftir ve kendiliğinden tutuşma potansiyeli o kadar yüksektir. Kömür kalıntısının (char) yanma sıcaklığı (T_{bo}), T_{max} sonrası minimum DTA zirvesi olarak belirlenir. Bu, yanma sürecinin tamamlandığını gösterir (Issac & ark., 2020: 1).

Şekil 2. TG/DTA yanma parametreleri



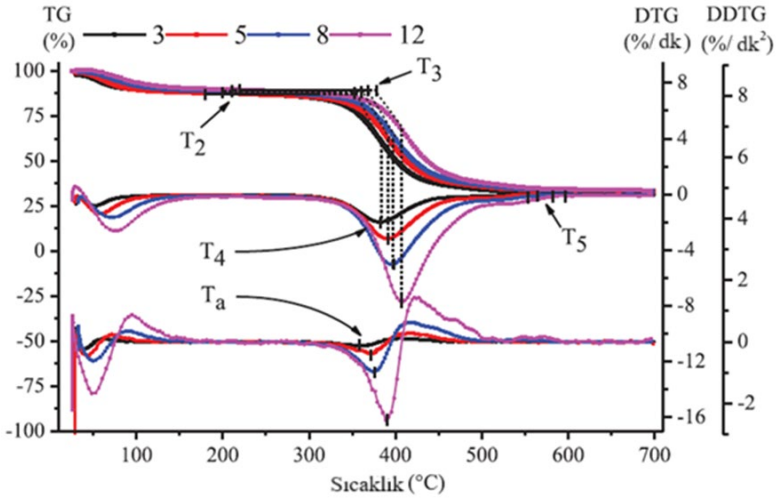
Kaynak: Umar & ark., 2024: 012031

Chen ve arkadaşları, Şekil 3'de farklı ısıtma hızlarında ısıtılan linyit kömürleri için TG, DTG ve DDTG (ikinci türev termogravimetrik) eğrilerini açıklamıştır. Şekil 3'den, TG eğrisinde altı karakteristik sıcaklık noktası görülmektedir. Kritik sıcaklık T1, kömür reaksiyon süreci sırasında ağırlık kaybı hızının ilk maksimum zirve noktasıdır. Bu sıcaklıkta, oksijen ile kömürde bulunan aktif gruplar arasındaki reaksiyon hızı belirgin şekilde hızlanır, bu da oksijen tüketim oranı, su buharlaşması ve salınan gaz üretim miktarının artmasına yol açar. Maksimum ağırlık sıcaklığı T2'de, büyük miktarda katı oksitlenmiş ara ürünler oluşur, bu da kömürün ağırlığının maksimum değere ulaşmasına neden olur. Bu, kömürün TG eğrisinde bir zirve noktasına ulaştığını gösterir. DTG eğrisinin maksimum kütle kaybı oranının zirvesine dik bir çizgi çizilir. Dik çizginin TG eğrisini kestiği noktada bir teğet çizilir. Teğet çizgisi ile kütle kaybı başlangıç çizgisinin kesiştiği noktadaki sıcaklık (T3), kömür örneğinin tutuşma sıcaklığıdır. Bu sıcaklıkta, kömürdeki çözünme reaksiyonu büyük miktarda aktif grup üretir, bu da kömür ile oksijen arasındaki bileşik yoğunluğunu belirgin şekilde hızlandırır. Sonuç olarak, DDTG eğrisi zirve noktasına ulaşır. Maksimum kütle kaybı oranı, T4 ile gösterilir. Bu sıcaklık noktası, kimyasal reaksiyonun maksimum yoğunluğunu gösterir. Bu noktada, aktif yapı tüketimi en yüksek seviyeye ulaşır ve DTG eğrisinde minimum olarak gösterilir. Yanma sıcaklığı T5, kömür örneğinin yanması tamamlandıktan sonra kütlelerinin değişmediğini gösterir. Yanma sonucu kalan madde, genellikle silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve demir oksitleri (Fe_2O_3) içeren kömür külüdür ve genellikle CaO , MgO , K_2O ve Na_2O içerikleri daha düşüktür (Jia & ark., 2022: 2880; Chen & ark., 2021: 967).

Kömürün kendiliğinden yanması, bu karakteristik sıcaklıklara dayanarak dört aşamaya ayrılabilir. Aşama I, başlangıç sıcaklığı 30°C ile kritik sıcaklık T1 arasındaki su buharlaşması ve kütle kaybı aşamasıdır. Aşama II, oksijen emilimi ve ağırlık kazancı

aşaması olup, T1–T2 arasındaki sıcaklık aralığında gerçekleşir. Aşama III, T2 ile T5 arasındaki sıcaklık aralığında gerçekleşen yanma aşamasıdır. Aşama IV, yanma sonrasında T5 ile sona eren tükenme aşamasıdır (Chen & ark., 2021: 967).

Şekil 3. Farklı ısıtma hızlarında ısıtılan linyit kömürü örneklerine ait Termogravimetrik (TG), Diferansiyel Termogravimetrik (DTG) ve İkinci Dereceden Termogravimetrik (DDTG) eğrileri.



Kaynak: Chen & ark., 2021: 967

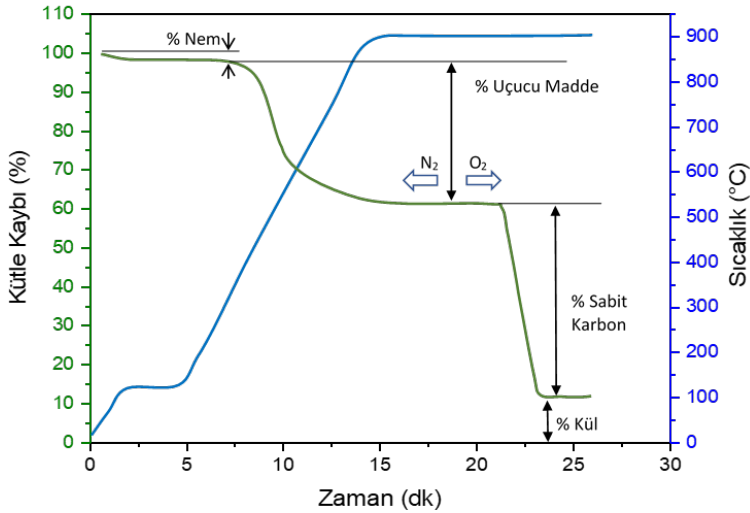
TGA Verileriyle Kömürün Kısa Analizinin Belirlenmesi

Kömürün temel bileşenleri nem, organik madde ve mineral maddeden oluşur. Kül, yakıtın yanmayan kısmıdır ve mineral bir maddeden türetilmiştir. Nemle birlikte, kül, yakıtın kalitesini düşürür. Uçucu bileşenler, düşük moleküler ağırlıklı hidrojen, metan, karbon monoksit, karbon dioksit gibi bileşiklerin yanı sıra yüksek moleküler yapıya sahip katranlar ve bitümler gibi maddelerden oluşur. Yanma sırasında, yakıt ardışık veya kısmi olarak örtüşen süreçlerden geçer: ısıtma, buharlaşma, uçucu bileşenlerin uzaklaşması ve karbonun yanması. Kömürün yanmasında, karbonun yanması, yanma sürecinin en uzun ve belirleyici aşamasıdır. Kömür,

fosil bir organik materyaldir. Birçok ham madde ve doğal polimere kıyasla çok daha yüksek ısı direnci ile karakterizedir.

Kömürün kendiliğinden tutuşma eğilimi, genellikle kömürün kısa (proximate) analizinden elde edilen nem, uçucu madde ve sabit karbon gibi kalite parametreleri kullanılarak değerlendirilebilir. Geleneksel olarak, kısa analiz (nem, kül, uçucu madde, sabit karbon) ASTM standartlarına göre yapılmaktadır. Ancak, bu analizler zaman alıcı olup, önemli miktarda laboratuvar ekipmanı gerektirmektedir. Buna karşılık, TGA tekniği, kömür kalite parametrelerini belirlemek için daha hızlı bir yöntem sunarak kısa analize alternatif bir yaklaşım sağlayabilir (Şekil 4).

Şekil 4. Kömürün termal analizine ait TG eğrisi



Kaynak: Wang, 2020: 104

Bunun için kömür örneği 50 mesh boyutundan daha küçük boyuta öğütülmelidir. Yaklaşık 40 mg'lık örnek, platin kaplara yerleştirilip, cihazın fırınına yüklenir. Örnek, 85 °C/dakika sabit bir ısıtma hızıyla, sabit bir azot gazı akışı (60 mL/dakika) altında 110

°C'ye kadar ısıtılır. Ardından, 3 dakika boyunca izotermal koşullarda tutulur. Bu süreçteki ağırlık kaybı, kömürün nem miktarını gösterir. Örnek, saf azot atmosferinde 80 °C/dakika hızla 900 °C'ye kadar ısıtılmaya devam edilir. Daha sonra, sıcaklık 900 °C'de 7 dakika boyunca sabit tutulur. Bu süreçteki ağırlık kaybı, kömürdeki uçucu madde miktarını belirler. 7 dakikalık izotermal koşulun ardından, sıcaklık 900 °C'de tutulmaya devam edilirken, gaz akışı saf oksijene (60 mL/dakika) değiştirilir. Bu işlem 5 dakika daha sürer. Bu süreçteki ağırlık kaybı, kömürün sabit karbon içeriğini gösterir. Testin sonunda kalan ağırlık ise, kömürün kül içeriğini temsil eder.

Kijo-Kleczkowska ve arkadaşları, kömürlerin tipik termogravimetrik TG/DTG eğrilerinde görülen pikler ve sebeplerini şu şekilde açıklamışlardır (Kijo-Kleczkowska & ark., 2022: 124840).

- Genellikle gözlenen ilk pik su kaybı ile ilişkili olup, 100-150°C arasında gerçekleşir.
- İkinci pik, 420-440°C arasında meydana gelir, karbonun kimyasal ayrışmasından kaynaklanır ve birincil gaz salınımına karşılık gelir.
- İkincil gaz salınımı ise 560°C'ye kadar olan sıcaklıklarda gerçekleşir.

Sürecin eşzamanlı kromatografik analizi, gaz salınımını belirlemeye olanak sağlar:

- Metan (CH₄), yaklaşık 400°C'ye kadar daha küçük miktarlarda salınırken, miktarı hızla artarak yaklaşık 590-600°C'de maksimuma ulaşır, 900°C'de metan çıkışı son bulur.
- Hidrojen (H₂) salınımı, 500°C'de başlar, maksimuma 800-810°C'de ulaşır ve ardından kademeli olarak azalır.

- Karbonmoksit (CO) salınımı iki aşamada gözlenir. İlk aşama, yaklaşık 250°C'den başlayıp yaklaşık 480°C'de maksimuma ulaşırken, ikinci aşama yaklaşık 760°C'de maksimum sıcaklığa ulaşır.
- CO₂ için iki maksimum salınım noktası (430°C ve 615°C) mevcuttur.
- 410 ve 530°C arasındaki sıcaklık aralığında, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₈ gibi hidrokarbonlar salınırken, daha yüksek sıcaklıklarda, sülfür (H₂S, SO₂), azot (HCN, NH₃, azot oksitleri) ve fosfor bileşenleri gibi diğer gazların çıkışı gözlenir.

TGA Verileriyle Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi

Bir reaksiyonun aktivasyon enerjisi, reaksiyon hızının sıcaklıkla nasıl değiştiğini belirleyen bir parametredir. Aktivasyon enerjisi, bir kimyasal tepkimenin başlaması için gerekli olan enerji miktarını ifade eder. Her kimyasal tepkime, kendine özgü bir aktivasyon enerjisine sahip olup, bu enerji değeri, tepkimenin gerçekleşebilmesi için aşılması gereken minimum enerji seviyesini temsil eder. Aktivasyon enerjisinin yüksek olması, tepkimenin başlama aşamasının daha zor olacağını gösterir. Bu nedenle, yüksek aktivasyon enerjisine sahip reaksiyonlar genellikle daha yavaş gerçekleşir (Aksoğan Korkmaz & Toptaş, 2023: 1648).

Aktivasyon enerjisi değerleri, kimyasal bileşim, fiziksel yapı, fizikokimyasal özellikler ve mineral içeriği gibi bir dizi faktörden etkilenmektedir. Ayrıca, linyit gibi karmaşık heterojen yapıya sahip materyallerde, nominal olarak aynı örnekler üzerinden dahi tutarlı deneysel sonuçlar elde etmek her zaman mümkün olmayabilir. Düşük aktivasyon enerjisine sahip bir linyit türü, termal işlemlerin daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebileceğini gösterir. Bu durum, enerji maliyetlerini azaltabilir ve işlemlerin daha ekonomik hale gelmesini sağlayabilir (Aksoğan Korkmaz & Toptaş, 2024: 25).

Eğer bir kömür kendiliğinden tutuşma potansiyeline sahipse, kömürün oksitlenmesi için düşük bir aktivasyon enerjisi (E_a) bile yeterlidir. Bu nedenle, daha az aktivasyon enerjisi daha yüksek bir kendiliğinden tutuşma potansiyelini, tersi ise daha düşük bir potansiyeli gösterir. Kendiliğinden tutuşma eğiliminin bir göstergesi olarak E_a ile kömürün bozunumu sırasında elde edilen kütle kaybı verileri ile kinetik parametreler Arrhenius ve Coats ve Redfern yöntemleriyle hesaplanabilir (Borah, Barua & Baruah, 2005: 977).

Termal analiz kinetiğini belirlemek için kullanılan tüm yöntemler, Arrhenius denkleminde dayanmaktadır. Arrhenius eşitliği, Eşitlik (1-5) şeklinde ifade edilmiştir (Kang & ark., 2025: 1519; Sahoo & ark., 2025: 1).

$$\frac{dw}{dt} = kW^n \quad (1)$$

$$k(T) = A_r \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = A_r \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) W^n \quad (3)$$

Birinci dereceden reaksiyon kinetiği ($n = 1$) varsayıldığında ve Eşitlik (3) düzenlendiğinde;

$$\left[\left(\frac{dw}{dt}\right) \frac{1}{W}\right] = A_r \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

Eşitlik (4)'ün her iki tarafının logaritması alındığında;

$$\log \left[\left(\frac{dw}{dt}\right) \frac{1}{W}\right] = \log A_r - \frac{E}{2,303RT} \quad (5)$$

$1/T$ 'ye karşı $\log \left[\left(\frac{dw}{dt}\right) \frac{1}{W}\right]$ grafiği çizildiğinde, grafiğin doğrusal kısmının eğimi $\left(\frac{-E_a}{2,303R}\right)$ olarak elde edilir ve buradan görünür aktivasyon enerjisi (E_a) hesaplanabilir. $1/T = 0$ noktasında ise, çizginin kesişim noktası ile Arrhenius sabiti (A_r) bulunur.

Coats-Redfern kinetik modeli, aktivasyon enerjisinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Coats-Redfern denklemi için $n \neq 1$ durumu, Eşitlik (6) ve Eşitlik (7)'de verilmiştir (Xi & ark., 2021: 2305).

$$\ln \left[\frac{1-(1-\alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] = \ln \left[\left(\frac{A_r R}{\beta E_a} \right) \left(1 - \frac{2RT}{E_a} \right) \right] - \left[\frac{E_a}{RT} \right] \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{(W_o - W_t)}{(W_o - W_f)} \quad (7)$$

Burada;

k = Spesifik hız sabiti

dw/dt = Ağırlık kayıp oranı

E_a = Görünür aktivasyon enerjisi (kJ/mol)

T = Mutlak sıcaklık (K)

R = İdeal gaz sabiti (8,314 J/molK)

A_r = Arrhenius sabiti

β = Isıtma hızı (°C/dk)

n = Reaksiyon derecesi

α = t zamanında reaksiyona giren kütle fraksiyonu

W_o = ilk ağırlık, W_t = t zamanındaki ağırlık, W_f = son ağırlık

$1/T$ 'ye karşı $\ln \left[\frac{1-(1-\alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right]$ grafiği çizildiğinde, grafiğin doğrusal kısmının eğimi $\left(\frac{-E_a}{R} \right)$ olarak elde edilir ve buradan görünür aktivasyon enerjisi (E_a) hesaplanabilir.

$n = 1$ için Coats-Redfern denklemi, Eşitlik (8) kullanılır.

$$\ln \frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2} = \ln \frac{A_r R}{\beta E_a} - \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

Kaynakça

Aksoğan Korkmaz, A. & Toptaş, Y. (2023). Parçikan bitümlü şeylinin termal analiz kinetiği ve reaksiyon mekanizması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(4), 1648-1660.

Aksoğan Korkmaz, A. & Toptaş, Y. (2024). Bazı Türk linyitlerinin termal analiz yöntemiyle kinetik olarak değerlendirilmesi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 10(1), 25-36.

Arens, P. L. (1951). *A study on the differential thermal analysis of clays and clay minerals*. Wageningen University and Research.

Borah, D., Barua, M., & Baruah, M. K. (2005). Dependence of pyrite concentration on kinetics and thermodynamics of coal pyrolysis in non-isothermal systems. *Fuel Processing Technology*, 86(9), 977-993.

Chen, X., Ma, T., Zhai, X., Lei, C., & Song, B. (2021). Spontaneous combustion characteristics of coal by using the simultaneous thermal analysis–Fourier transform infrared spectroscopy technique. *Combustion Science and Technology*, 193(6), 967-986.

Deng, J., Zhao, J., Zhang, Y., Huang, A., Liu, X., Zhai, X., & Wang, C. (2016). Thermal analysis of spontaneous combustion behavior of partially oxidized coal. *Process Safety and Environmental Protection*, 104, 218-224.

Fadhil, M., Hassan, S., Aniza, N., Hassan, A., & Aris, S. (2015). Ignition and Burnout Temperature Study of Poultry Processing Dewatered Sludge (PPDS). *Applied Mechanics and Materials*, 695, 438-442.

Gao, F., Jia, Z., Cui, Z., Li, Y. D., & Jiang, H. (2024). Evolution of macromolecular structure during coal oxidation via FTIR, XRD and Raman. *Fuel Processing Technology*, 262, 108114.

Gbadamosi, A. R., Onifade, M., Genc, B., & Rupprecht, S. (2021). Spontaneous combustion liability indices of coal. *Combustion Science and Technology*, 193(15), 2659-2671.

Guo, X., Xiao, Y., Zhao, L., Shi, L., Xue, X., Li, X., & Liu, Z. (2021). Combustion behaviors of various coals and chars: From covalent bonds' and radicals' perspective. *Fuel*, 297, 120749.

Imamura, A., Mori, E., Takeda, S., Kato, K., Miyawaki, J., & Yoon, S. H. (2025). Suppression of the spontaneous combustion of upgraded brown coal. *Carbon Reports*, 4(1), 73-80.

Imamura, A., Sekimoto, K., Takeda, S., Kosuge, K., Kato, K., Igarashi, M., & Mizuno, M. *Development of Australian Brown Coal Utilization Technology for Power Generation~ Development of Low Rank Coal Utilization Technologies~, Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd. Technical Review 9 (2018) 49–56.*

Issac, M., De Girolamo, A., Dai, B., Hosseini, T., & Zhang, L. (2020). Influence of biomass blends on the particle temperature and burnout characteristics during oxy-fuel co-combustion of coal. *Journal of the Energy Institute*, 93(1), 1-14.

Jia, H., Yang, Y., Ren, W., Kang, Z., & Shi, J. (2022). Experimental study on the characteristics of the spontaneous combustion of coal at high ground temperatures. *Combustion Science and Technology*, 194(14), 2880-2893.

Kang, T. J., Lee, J. H., Lee, D. H., Kim, H. S., & Kang, S. H. (2025). Effect of High Temperature on CO₂ Gasification Kinetics of Sub-Bituminous Coal Fly Ash. *Sustainability*, 17(4), 1519.

Kato, T. (2022). Accelerated promotion of woody biomass heat utilization. *Nihon Enerugii Gakkai Kikanshi Enermix*, 101, 73-77.

Kijo-Kleczkowska, A., Szumera, M., Gnatowski, A., & Sadkowski, D. (2022). Comparative thermal analysis of coal fuels, biomass, fly ash and polyamide. *Energy*, 258, 124840.

Kissinger, H. E. (1957). Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Analytical Chemistry*, 29(11), 1702-1706.

Li, J., Li, Z., Yang, Y., Duan, Y., Xu, J., & Gao, R. (2019). Examination of CO, CO₂ and active sites formation during isothermal pyrolysis of coal at low temperatures. *Energy*, 185, 28-38.

Liao, J., Fei, Y., Marshall, M., Chaffee, A. L., & Chang, L. (2016). Hydrothermal dewatering of a Chinese lignite and properties of the solid products. *Fuel*, 180, 473-480.

Liu, J., Wang, T., Zhong, L., Serageldin, M. A., & Pan, W. P. (2025). Review of organic pollutants in coal combustion processes and control technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 109, 101231.

Mackenzie, R. C., & Mitchell, B. D. (1962). Differential thermal analysis. A review. *Analyst*, 87(1035), 420-434.

Niu, H. Y., Sun, Q. Q., Bu, Y. C., Chen, H. Y., Yang, Y. X., Li, S. P., ... & Tao, M. (2022). Study of the microstructure and oxidation characteristics of residual coal in deep mines. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133923.

Onifade, M., Genc, B., Said, K. O., & Gbadamosi, A. R. (2022). On the spontaneous combustion liability of South African coal: A report. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(9), 2703-2721.

Sahoo, K., Raja, K. N., Kumbhakarna, N., & Kumar, S. (2025). Kinetic and thermodynamic parameters of petroleum pitch pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA): Part I. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-23.

Shi, Q., Jiang, W., Qin, B., Hao, M., & He, Z. (2023). Effects of oxidation temperature on microstructure and spontaneous combustion characteristics of coal: A case study of Shendong long-flame coal. *Energy*, 284, 128631.

Tahmasebi, A., Yu, J., Han, Y., & Li, X. (2012). A study of chemical structure changes of Chinese lignite during fluidized-bed drying in nitrogen and air. *Fuel Processing Technology*, 101, 85-93.

Umar, D. F., Madiutomo, N., Monika, I., Setiawan, L., Wijaya, T., & Daranin, E. A. (2024, July). Low-rank coal upgrading to optimize its utilization as fuel. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1378, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.

Wang, C. P., Deng, Y., Zhang, Y. T., Xiao, Y., Deng, J., & Shu, C. M. (2022). Coal oxidation characteristics and index gases of spontaneous combustion during the heating and cooling processes. *Fuel*, 307, 121806.

Wang, X. (2020). *Spontaneous combustion of coal: Characteristics, evaluation and risk assessment*. Switzerland: Springer.

Xi, Z., Shan, Z., Li, M., & Wang, X. (2021). Analysis of coal spontaneous combustion by thermodynamic methods. *Combustion Science and Technology*, 193(13), 2305-2330.

Voina, N. I., & Todor, D. N. (1978). Thermal analysis of coal and coal ashes. In *Analytical methods for coal and coal products* (pp. 619-648). Academic Press.

BÖLÜM 6

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALARININ ZEMİN İYİLEŞTİRME, İNŞAAT UYGULAMALARI VE YOL YAPIMINDA KULLANIMI

ÇIĞDEM CEYLAN¹
ÖZGÜR YILDIZ²

Giriş

Atık kavramı ve sürdürülebilirlik olgusu, insanlık tarihi kadar eski bir geçmişe sahiptir. Kentleşme ve modernleşme süreçleriyle birlikte, atık türleri ve miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Genel anlamda, üretim ve tüketim faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan ve tekrar kullanılamayan malzemeler atık olarak tanımlanmaktadır (Christensen, 2011). İnşaat sektörü ise küresel ölçekte ham madde tüketiminin yaklaşık %60'ını, enerji kullanımının %50'sini ve su tüketiminin %50'sini oluşturmaktadır.

¹ Dr Öğr. Üyesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak. İnşaat Mühendisliği Malatya/ Türkiye, Orcid: 0000-0002-5961-3085

² Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, İstanbul /Türkiye, Orcid: 0000-0002-3684-3750

Bununla birlikte, inşaat faaliyetleri sonucu ortaya çıkan atıklar, dünya genelinde hava kirliliğinin %23'ünü ve çöp sahalarındaki atıkların %50'sini oluşturmaktadır (Rydén, 2015).

Konut, yol, köprü, tünel ve istinat duvarları gibi yapıların deprem, sel, bakım-onarım, yıkım veya yenileme süreçleri sonucunda ortaya çıkan atıklar, genel olarak inşaat ve yıkım atıkları (İYA) kapsamında değerlendirilmektedir. Konut, hastane, fabrika gibi yapıların tadilatı, yıkımı, güçlendirilmesi sonucunda veya kara, demir ve hava yolları yapımı, bakım- onarımı veya yıkımı ile İYA ortaya çıkabilmektedir. Bunların dışında deprem gibi doğal afetler sonucunda da İYA ortaya çıkar. Bu atıklar, yapı malzemelerinin türüne bağlı olarak çeşitlilik göstermekle birlikte, ağırlıklı olarak beton, kiremit, tuğla, ahşap, metal, plastik, cam, asfalt ve mermer gibi doğal taş parçalarını içermektedir (Eckbo, Okkenhaug, & Hale, 2022). Shen ve diğerleri inşaat atıklarını; arazi kazısı veya formasyonu, inşaat ve bina inşaatı, saha temizliği, yıkım faaliyetleri, yol çalışmaları ve bina yenileme dahil olmak üzere çeşitli inşaat faaliyetlerinden kaynaklanan inşaat molozu, moloz, toprak, beton, çelik, kereste ve karışık saha temizleme malzemeleri olarak tanımlamıştır (Shen vd., 2004).

İnşaat yıkım atıkları inşaat harfiyatı ve geri dönüştürülebilen atıklar olarak iki şekilde sınıflandırılabilir (Tablo 1). Bunlardan çamur, kil, toprak, kum ve çakıl inşaat atığı olarak, ahşap, cam, demirli ve demir içermeyen metaller, plastik, kauçuk ve asfalt geri dönüştürülebilen inşaat atıkları (endüstriyel atık) olarak değerlendirilebilir. İnşaat yıkım atıklarından olan tuğla, kiremit ve beton ise geri dönüştürülebilen inşaat harfiyatları arasındadır (Lai vd., 2016).

Tablo 1. İnşaat yıkım atıkları

İnşaat Yıkım Atıkları			
Karışık inşaat atıkları	İnşaat harfiyatı		
	Geri dönüştürülen malzemeler		Tekrar kullanılan malzemeler
	İnşaat atıkları (endüstriyel atık)	Tuğla Kiremit Beton	Çamur Kil Toprak Kum Çakıl
	Ahşap Cam Demirli metaller Demir içermeyen metaller Plastik Kauçuk Asfalt		

(Lai vd., 2016, uyarlanmıştır)

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri birçok araştırmacıya göre dünya kara depremlerinin en büyüğüdür. Türkiye sınırları içerisinde toplam 11 ilde etkisini gösteren deprem, Suriye'de de hissedilmiş olup, ciddi can kayıplarına ve yapısal hasarlara yol açmıştır (Yıldız & Kına 2023, Yıldız, Zeybek & Sönmezer 2024). Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı 2023 raporuna göre Kahramanmaraş Depremleri sonrası toplam 11 ilde 518.009 bina acil yıkılması gereken, ağır hasarlı veya yıkık olarak tanımlanmıştır (TC. Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023). Deprem sonrası oluşan inşaat ve yıkıntı atıklarının toplam miktarının yaklaşık 200 milyon ton olduğu öngörülmektedir İnşaat uygulamalarında kullanılan malzemeler dikkate alındığında, bu yıkıntı atıkları içerisinde demir, cam, seramik, tuğla gibi bileşenlerin de bulunduğu bilinmektedir. Kahramanmaraş Depremlerinde ortaya çıkan İYA kütleli dağılımları Tablo 2’de verilmiştir (Dogdu & Alkan 2023).

Tablo 2. Kahramanmaraş Depremleri sonucu 11 ilde ortaya çıkan toplam İYA miktarı

İYA atık türü	Toplam	İYA atık türü	Toplam
Yaklaşık kütleli atık miktarı (ton)	96.867.683,00	Bitümlü karışımlar ve ahşap atıklar (ton)	21.698.360,99
¹ Tehlikeli maddeler (ton)	1.453.015,25	Betonarme atık miktarı (ton)	38.747.073,20
Toprak ve taş karışımı (ton)	16.273.770,74	Hurda demir atığı miktarı (ton)	935.317,00
Mineral fraksiyon atığı (ton)	57.151.932,97		
Kontamine olmuş toprak ve taşlar veya asbestli inşaat malzemeleri karışımı Geri dönüşüm için yüksek bir potansiyele sahip beton, tuğla, kiremit ve seramik karışımları			

(Dogdu & Alkan 2023)

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, sadece 2020 yılında toplam atık miktarı 104,8 milyon tondur (Dogdu & Alkan 2023). Kahramanmaraş Depremleri sonucu ortaya çıkan atıkların yaklaşık 200 milyon ton olduğu göz önüne alındığında, sadece bir gecede ortaya çıkan atık miktarının büyüklüğü daha iyi anlaşılmaktadır. Bu atıkların geri dönüştürülerek yeniden kullanıma kazandırılması, hem ekonomik açıdan kaynak verimliliğini artırmak hem de çevresel kirliliğin önlemesi açısından önem arz etmektedir.

İnşaat ve yıkım faaliyetleri sonucu oluşan tehlikeli ve tehlikesiz atıkların entegre yönetimi, çevresel kirliliğin azaltılması ve sürdürülebilir ekonomik stratejiler çerçevesinde etkin bir afet yönetiminin sağlanması açısından kritik bir öneme sahiptir. Araştırmacılar, esas olarak arazi bozulması, kaynak tükenmesi, atık

üretimi ve çeşitli kirlilik biçimlerini içeren inşaat faaliyetlerinin neden olduğu olumsuz etkilere ilişkin kapsamlı çalışmalar yapmışlardır (Abramovitz vd. 2001). Bu malzemelerin bir kısmının asbest ve uçucu organik bileşikler içerebilmesi nedeniyle çevresel ve insan sağlığı açısından risk teşkil ettiği bilinmektedir (Esin & Cosgun 2007). 1 m² inşaat ve yıkım atığının depolanması; 1,5 ton yeraltı suyunun kaybına ve 53 gr toprağın bozulmasına yol açmaktadır (Luo vd. 2022). Özellikle yeraltı su kaynakları, tarım alanları ve genel bitki örtüsü üzerinde olumsuz etkiler yaratabilen bu atıkların, uygun depolama sahalarında kontrollü bir şekilde yönetilmesi büyük önem taşımaktadır. İnşaat ve yıkım atıklarının geri dönüşümü ve yeniden kullanımı sadece doğal kaynaklara olan talebi azaltmaz aynı zamanda, atık malzeme stok alanlarını ve inşaat maliyetlerini de düşürür (Saberian, 2020).

İnşaat ve tasarım aşamalarında malzeme atıklarının en aza indirilmesi le ilgili olarak Saez ve diğerleri (2013) prefabrik sistemlerin benimsenmesi, inşaat alanında geri dönüşüm malzemelerinin yeniden kullanımı, inşaat alanının planlanması ve atık yönetimi için uygun alan oluşturulması ile sağlanabileceğini belirtmişlerdir (Saez, 2013). Konu ile ilgili son zamanlarda yapılan çalışmalar incelendiğinde inşaat ve yıkım atıklarının zemin iyileştirme, yol yapımı ve alt yapı çalışmalarında, dolgu malzemesi olarak ve yeni inşaat yapımı çalışmalarında yeniden kullanım alanlarının değerlendirildiği görülmektedir.

İnşaat ve yıkım atıklarının değerlendirilmesi aşamasında ilk işlem atıkların bulundukları alandan depolama alanlarına taşınmasıdır (Şekil 1). Sonrasında demir, ahşap, PVC, cam vb kirlletici parçaların geri dönüştürülebilir malzemeler arasında sayılan beton ve asfalttan ayrılması gerekir. Yıkım atıkları genelde iri kütleler halindedir. Bu nedenle ön ayırma işleminden sonra çeneli ve darbeli kırıcılar kullanılarak boyut küçültmesi yapılır. Bu aşamada ihtiyaç duyulması halinde metal kısımların da ayrıştırılabilmesi

amacıyla manyetik ayırıştırıcılar kullanılabilir. Sonrasında titreşimli eleklerden geçirilerek istenilen boyutta ayırıştırma işlemi yapılabilir.

Şekil 1. İnşaat ve yıkım atıklarından geri dönüştürülmüş agrega üretim şeması



(Bansal, Mishra & Bishnoi 2016, uyarlanmıştır)

Beton agregası, beton veya harç yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı malzeme ile bir araya getirilen, organik olmayan, doğal veya yapay malzemenin genellikle 100 mm'yi aşmayan büyüklüklerdeki kırılmamış veya kırılmış tanelerin oluşturduğu bir yığındır (Güçlüer vd., 2017, Özışık, 1998). Geri dönüştürülmüş beton agregaları ise; inşaat ve yıkım atıklarından ayırma, kırma eleme gibi işlemlerden sonra elde edilen agregalardır. Üretim süreçleri ise hemen hemen benzerdir. Tablo 3'de doğal ve geri kazanılmış agregalar arasındaki farklar verilmiştir (Şen & Eren 2021).

Tablo 3. Doğal agregalar ve geri kazanılan agregalar arasındaki farklar

Doğal Agregalar	Geri kazanılan agregalar
Çeşitli kayalardan çıkarılır	İnşaat ve yıkıntı atıklarından üretilir
Madencilik faaliyetleri çevresel ıslah gerektirir	Geri dönüşüm, çevre kirliliklerini azaltır
Kalitesi çıkarıldığı kaynağın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır	Kalitesi içerisinde bulunan geri dönüştürülmüş maddelerin safsızlığına bağlıdır
Üretim prosesi kırma, eleme ve karıştırma işlemlerinden oluşur	Üretim prosesi doğal agregalar üretimine benzer ancak öncelikle içerisindeki metal, ahşap vb. safsızlıkların ayrıştırılması gerekir
Çıkarılan kaynağın mesafesi taşıma maliyetlerinin yüksek olmasına neden olur	İhtiyaca yakın yerlerde geri dönüşüm tesisi kurularak taşıma maliyetleri düşürülebilir

(Şen & Eren 2021)

Üç çeşit geri dönüştürülmüş agregalar tanımlaması yapılmıştır (Yavan & Bozbey 2023). Bunlar;

Tip 1: Öncelikle duvar molozlarından elde edilenler (Kargir kalıntılardan elde edilenler, (birim hacim ağırlık, $1,5 \text{ g/cm}^3$),

Tip 2: Öncelikle beton molozlarından elde edilenler (Beton kalıntılarından elde edilenler, (birim hacim ağırlık, $2,0 \text{ g/cm}^3$),

Tip 3: Doğal agregalar (%80) ile geri kazanılmış agreganın (%20) karışımı ile elde edilenler, (birim hacim ağırlık, $2,4 \text{ g/cm}^3$).

Bu çalışmada; deprem kuşağında yer alan ülkemizde yürütülen kentsel dönüşüm faaliyetleri kapsamında, özellikle son depremler sonrasında ortaya çıkan ve gelecekte meydana

gelebilecek inşaat ve yıkım atıklarının miktarı göz önünde bulundurularak, bu atıkların kullanım alanları ele alınmıştır.

İnşaat ve Yıkım Atıklarının Kullanım Alanları

İnşaat ve yıkım atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregaları inşaat sektörünün birçok kolunda farklı amaçlarla kullanılabilir (Tablo 4). Genel olarak dolgu malzemeleri, zemin malzemeleri, toprak dolgu malzemesi, yol kaplamalarının altında ya da yol alt temel malzemesi olarak ve yeni asfalt içinde kullanılabilir (Wahi vd., 2016, Demir 2009).

Tablo 4. İnşaat uygulamalarında inşaat ve yıkım atıklarının potansiyel uygulama alanları

Geri dönüştürülmüş malzeme	Kullanım Şekli	Uygulama alanı
Kırılmış beton	Agrega	Beton yol ve apronlar Drenaj çalışmaları Sığ depolama tankı Boru ve menfezler Kanalizasyon/su arıtma tesisleri İstinat yapıları geçirgenlik destekleri Geri dönüştürülmüş betonarme yapıları yatak malzemeleri
Kırılmış beton/tuğla		Bina bölme duvarları Zemin ve temel Çöp/ atık bertaraf tesisi
Kırılmış beton	Yeni asfaltta agregası	Temel kaplama malzemeleri
Kırılmış beton/tuğla	Bağlanmamış temel tabakası olarak	Pistler, araba yolları ve apronlar Otoparklar ve diğer bahçeler
Kırılmış beton/ tuğla veya	Dolgu malzemesi	Kablo kanalları

geri dönüştürülmüş agrega (<4,75mm)		
--	--	--

(Wahi vd., 2016)

Betonu oluşturan maddeler arasında agregası, toplam beton hacminin yaklaşık %60-75'ini oluşturarak, betonda çok önemli bir rol oynar ve betonarme bir yapının inşası için vazgeçilmez konumdadır. Diğer inşaat malzemeleri ile mükemmel yapısal performans göstermesi, ekonomik etkenler, hava koşullarına dayanıklılığı, yüksek mukavemetli oluşu ve düşük bakım maliyeti nedeniyle inşaat işlerinde yapı malzemesi olarak beton kullanılmaktadır (Kosmatka, Panarese & Kerkhoff 2002). Geri dönüştürülmüş beton (GDB) agregası ile yapılan çalışmalar hem Türkiye hem de dünyada ciddi şekilde çalışılmış ve günümüzde konuyla ilgili önemli adımlar atılmıştır.

Zemin İyileştirme Uygulamalarında İY Atıkları Kullanımı

Zayıf zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmaları zemin iyileştirme başlığı altında toplanır. İnşaat uygulamalarında, atık malzemelerin yeniden kullanımıyla ilgili teknik ve uygulamalı birçok örnek bulunmaktadır. Bu kapsamda, geoteknik uygulamalar, söz konusu süreçte önemli bir rol üstlenmektedir. Atık lastikler, taş tozu, endüstriyel atıklar, uçucu kül ve inşaat molozları gibi malzemeler, mühendislik uygulamalarında değerlendirilen başlıca atık bileşenleri arasında yer almaktadır (Yıldız & Ceylan 2023). Zeminlerin farklı özelliklere sahip olması zemin iyileştirme yöntemlerinde de çeşitliliğe neden olmaktadır. Genel olarak zemin iyileştirme işlemlerinde amaç; taşıma gücünü, makaslama dayanımını artırmak, oturmaların istenilen seviyeye indirilmesi, sıvılaşma riskini azaltmak, geçirimsizliği düşürmek, zemin taneler arası boşlukları minimuma indirmek, kaba taneli zeminlerde sertliği, ince taneli zeminlerde ise kıvamı artırmaktır (Bagriacik & Mahmutluoglu 2020). İyileştirme işlemleri ile zeminin mekanik özellikleri geliştirilirken, inşaat maliyetleri de düşürülmüş olur

(Saadat & Bayat 2022). Genel olarak, katkı malzemeleri ile karışım tekniği kullanılarak yapılan iyileştirme, zemine kolay uyum sağlaması yönünden zemin durumunu iyileştirmek için büyük etkiye sahiptir. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, atıksu arıtma çamurları gibi sanayi atıkları, pirinç kabuğu gibi tarım atıkları, kırılmış beton, kırılmış tuğla gibi inşaat ve yıkım atıkları, lastik parçaları gibi plastik ve kauçuk atıklar, biyopolimerler zemin iyileştirmede kullanılan atıklara örnek olarak verilebilir (Yıldız & Ceylan, 2023, Vural, Akgül & Aydın 2017).

İY atıklarının özellikle depremlerden sonra depolama, hava kirliliği ve benzeri ortaya çıkardığı sorunlar dikkate alındığında bu atıkların birçok alanda olduğu gibi zemin iyileştirme çalışmalarında da kullanımı söz konusu olmuştur. Bu atıklarının zeminin zayıf özelliklerini iyileştirme amaçlı kullanımı konusunda birçok araştırmacı çalışma yapmış ve sürdürülebilir bir kalkınma sağlayacağı görüşüne varmışlardır.

Özellikle yüksek plastik özelliğe sahip killi zeminler yüksek su tutma kapasiteleri, şişme oturma özellikleri nedeniyle ortaya çıkan büyük hacimsel değişimler göstermeleri nedeniyle sorunlu zeminlerdendir. Bu tip zeminler sıkıştırma gibi mekanik veya kireç, uçucu kül, çimento kullanımı gibi kimyasal ya da geosentetik kullanımı gibi teknolojik yöntemler kullanılarak iyileştirilebilir. Son zamanlarda geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılarak zemin iyileştirme çalışmaları dikkat çekmektedir.

Jain ve Chawda; %5, 10 ve 25 oranlarında ince ve kaba taneli İY atıkları kullanarak şişme özellik gösteren zeminde yaptıkları çalışmada katkı miktarının artmasına bağlı olarak Plastisite İndeks (PI) değerlerinin düştüğünü, özgül ağırlık (Gs) değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Katkı miktarının artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık (MDD) değerlerinin arttığını, optimum su içeriği (OMC) değerlerinin düştüğünü, ayrıca Kaliforniya Taşıma Oranı (CBA) değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Yazarlar killi zeminin

iyileştirilmesinde İY atık kullanımı ile, çimento veya kireç kullanımına benzer sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir (Jain & Chawda 2016).

Abhijit vd 2014'te montmorillonit ile %10, 12 ve 14 oranlarında İY atıkları kullanarak yaptıkları çalışmada; zemin özelliklerinin katkı kullanımıyla önemli ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Çalışma sonunda yazarlar, PI değerlerinin katkı içeriğinin artmasına bağlı olarak düştüğünü, MDD artarken OMC değerlerinin düştüğünü ortaya koymuşlardır. Yazarlar %10 oranında İY atığı kullanılması durumunda emniyetli taşıma gücünün 1411 kN/m³ değerinden 2148 kN/m³ değerine yükseldiğini belirtmişlerdir. Yazarlar optimum İY atığı içeriği ile montmorillonitin şişme özelliğinin düştüğünü belirtmişlerdir (Abhijith, Murthy & Kavya 2014).

Kumlu ve siltli zeminlerde sıklıkla karşılaşılan sorunlardan biri olan sıvılaşma, deprem sırasında binalarda ve altyapıda meydana gelen hasarın başlıca nedenlerinden biridir (Huang & Yu 2013). Sıvılaşma, genellikle suya doygun, düşük bağlayıcılığa sahip kumlu ve siltli zeminlerde, tekrarlı dinamik yükler veya deprem gibi ani dinamik etkiler nedeniyle taneler arası sürtünmenin kaybolmasıyla zeminin geçici olarak akışkan bir durum göstermesi olarak tanımlanabilir (Seed & Idriss 1971).

Kumlu zeminler taneler arası bağın olmadığı zeminlerdir. Taneler arasında suyun varlığı durumunda derinliğe bağlı olarak boşluk suyu basıncı gerçekleşir. Deprem veya tekrarlı dinamik yükler altında, drenajın mümkün olmadığı durumlarda efektif gerilim değerleri sıfırlanır ve zemin sıvı gibi davranmaya başlar. Bu tip zeminlerde yapılan iyileştirmeler, taneler arası boşlukların azaltılması, taneler arasında bir bağ oluşturulması esaslarına dayanır. Bu amaçla dinamik kompaksiyon, vibrasyon gibi mekanik uygulamaların yanında jet grouting, çimento enjeksiyonu gibi yöntemler uygulanmaktadır. Yine taneler arası boşluk suyu basıncını

düşürmek amacıyla özel drenaj uygulamaları da yapılmaktadır. Bu tip zeminlerde İY atığı kullanılarak zemin özelliklerinin iyileştirilebildiği birçok araştırmada ortaya konulmuştur.

Bağrıaçık ve Mahmutoglu; kumlu zeminde İY atığı kullanarak yaptıkları çalışmada, İY atığı kullanımının zemin taşıma gücünde 3,09'a varan bir artış sağladığını ve içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerlerinde de sırasıyla 1,11 ve 26,69 kata varan artışlar meydana getirdiğini ifade etmişlerdir. Kumlu zemin için iyileştirme derinliğinin optimum değerinin 520 kPa basınç değerine kadar $H/D=0,75$ (H: zemin iyileştirme derinliği, D: Model temel çapı) olarak belirlemişlerdir. Yazarlar çalışmaları sonucunda, İY atığı içerisinde bulunan CaO içeriğinin; yüksek aderansa neden olabileceği, dolayısıyla daha yüksek taşıma gücünün elde edilmesinin sebebinin bu durum olabileceğine vurgu yapmışlardır (Bağrıaçık & Mahmutluoglu 2020).

Sharma ve Shrivastava; kumlu zeminde GDB agregası kullanarak yaptıkları çalışmada, GDB agregası kullanımı durumunda kumlu zeminin MDD ve OMC ve CBR değerlerinde iyileşmelere neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Yazarlar, GDB agregası kullanımının zemin kesme dayanımı ve taşıma gücünde artışlar sağladığını ve zemin uygulamalarında uygun dolgu ve takviyeli dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Sharma & Shrivastava 2023).

Mekanik Stabilizasyonda İY Atıklarının Kullanımı

Zemin stabilizasyonu, sıkıştırılabilirlik, mukavemet, geçirgenlik ve dayanıklılık gibi geoteknik özelliklerini iyileştirmek için zayıf zeminlerde stabilize edici maddelerin (bağlayıcı malzemeler) kullanılmasını içerir. Afrin vd zemin stabilizasyonunu; zeminin kayma dayanım parametrelerini iyileştirme ve böylece zeminin taşıma kapasitesini artırma süreci olarak tanımlamışlardır (Afrin, 2017). Mekanik stabilizasyon ise; zeminin gradasyonunu

değiştirerek zeminin özelliklerini iyileştirme işlemidir (Afrin, 2017, James & Pandian 2015). İyileştirme işlemleri, yol yüzeylerini ve diğer geoteknik uygulamaları güçlendirmek için kuru birim ağırlığın, taşıma kapasitesinin, hacim değişikliklerinin, kumların ve diğer atık malzemelerin performansının artırılmasını içerir (Firoozi, 2017). Stabilizasyon işlemleri ile bir zeminin sıkıştırılabilirliği arttırılabilir, geçirimsizlik özellikleri azaltılabilir veya kayma dayanımı arttırılabilir. Bu şekilde önceden sahip olamadığı bir taşıma gücüne sahip olması sağlanabilir. Bu nedenle zeminin sıkıştırılması işlemleri geoteknik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Zemin sıkıştırma işlemleri ile zeminde kazanılan faydalar şu şekilde özetlenebilir (Browne, 2006):

- Zemin dayanım ve şev stabilitesinde iyileşme
- Yol alt tabakalarında taşıma kapasitesinde artış,
- Zemin oturma miktarının azaltılması/ önlenmesi,
- Zeminde donma, çözülme gibi nedenlerle hacim değişimlerinin önlenmesi

Zemin sıkıştırma işlemleri büyük oranda tane boyutu ve şekli ile ilişkilidir. İri taneli zeminlerde taneler arasında boşluk olması durumu ile bu boşlukların daha ince taneler tarafından doldurulması durumu farklılık gösterir. Boşlukların daha ince taneler tarafından doldurulması durumunda zemin yoğunluğu artar. Taneler arası boşluklarda suyun bulunması durumu da boşluk suyu basıncının artmasına dolayısı ile efektif gerilimin azalmasına neden olur. Sıkıştırma işlemleri bu nedenle tane boyu dağılımı, tane şekli ve zemin su içeriğinden etkilenir.

Azam ve Cameron yol yapım çalışmalarında %20 geri dönüştürülmüş kil ve %80 GDB agregası kullanarak zemin iyileştirme çalışması yapmışlardır. Karışımların esneklik modülü değerlerinin 300 MPa ‘dan yüksek çıkmasına rağmen, kalıcı gerilim

oranının şartname sınırları altında kalması nedeniyle, yazarlar karışımın alt temel tabakası olarak kullanımının daha uygun olacağını belirtmişlerdir. Yazarlar nem içeriğinin kayma dayanımı, elastisite modülü ve kalıcı gerilim değerleri üzerinde etkili olduğunu, nem içeriğinin artmasıyla elastisite modülünde düşüş gözlenirken, kalıcı gerilim değerlerinde artış gerçekleştiğini belirtmişlerdir (Azam & Cameron, 2013).

Sahada mekanik sıkıştırma işleminde elde edilen verilerle, laboratuvar ortamında yapılan deneylerle elde edilen veriler karşılaştırılarak saha sıkışma durumu hakkında bilgi edinilebilir. Laboratuvar ortamında yapılan proktor veya modifiye proktor deneyleri ile zemin sıkışması; zemin kuru birim hacim ağırlık, su içeriği, sıkıştırma enerjisi ve zemin türüne bağlı olarak kontrol edilebilir. Saha sıkıştırması ise, sıkıştırılan zeminin türüne bağlıdır. Kıl gibi ince taneli zeminler keçi ayağı silindiri kullanılarak verimli bir şekilde sıkıştırılırken, taneli malzemeler genellikle titreşimli silindir kullanılarak daha kolay bir şekilde optimum sıkışmaya ulaşır.

Teknolojik gelişmeler doğrultusunda ortaya çıkan atıkların etkin bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla, zemin stabilizasyonu süreçlerinde çeşitli atık türleri farklı zemin tipleri üzerinde incelenmiş ve uygulanmıştır. Stabilize edici malzemeler; nanomalzemeler, lifler, polimerler, zemin iyileştirmeye yönelik biyolojik malzemeler ve endüstriyel atık malzemeler olmak üzere beş grupta sınıflandırılmıştır (Yıldız & Ceylan, 2023, Torres, 2024). Günümüzde İY atıkları da bu amaçla kullanılan atıklar haline gelmiştir.

Yaghovbi vd üst yapı malzemesinde GDB agregası kullanarak, darbe ve statik yöntemle sıkıştırma işlemlerini denemiş ve performans analizi yapmışlardır. Yazarlar bu amaçla agrega kırılması, zemin- su özellikleri, sertlik ve esneklik gibi özellikler üzerinde odaklanmışlardır. Sonuç olarak sıkıştırma yönteminin

hazırlanan zemin- su, sertlik ve esneklik üzerinde önemli rol oynadığını, bu nedenle sadece hedef olarak bir kuru birim hacim ağırlık üzerinde odaklanmayıp, sıkıştırma yönteminin de etkili olduğunu belirtmişlerdir. Sıkıştırılmış numunelerin sertlik ve esneklik özellikleri, sıkıştırma işlemi sırasında numunelerin paketlenme yapısında meydana gelen farklılıklar nedeniyle uygulanan sıkıştırma türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir (Yaghoubi, 2018).

Kimyasal Stabilizasyonda İY Atıklarının Kullanımı

Zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılan katı atıklar; belediye, endüstriyel, tarımsal ve özel atıklar olarak sınıflanabilir (James & Pandian 2015). Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, kalsiyum karbür, atıksu arıtma çamurları endüstriyel, pirinç kabuğu, şeker kamışı, mısır koçanı gibi atıklar tarımsal, kauçuk atıklar, cam parçaları, katı atık arıtma çamuru gibi atıklar da belediye atıklarına örnek olarak verilebilir. Deniz kabukları, biyopolimerler, madencilik atıkları gibi atıklar da özel atıklar olarak değerlendirilebilir. Bu atıkların bir kısmı dayanımı ve sertlik özellikleri gibi nedenlerle mekanik stabilizasyonda kullanılırken bir kısmı da kimyasal özellikleri nedeniyle kimyasal stabilizasyonda kullanılır.

Zemin özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan atıkların cinsi, atık uygulanacak zeminin kimyasal özelliklerini değiştirebilir. Kimyasalların zemin performansını artırdığı iki temel mekanizma vardır. Bunlar (Asgari vd. 2015);

- Çimentolaşma nedeniyle tane boyutunda ve kesme dayanımında artış, plastisite özelliklerinde değişim ve deformasyon davranışlarında düşme,

- Sıkışmayı kolaylaştıracak nemin elde edilmesi ve kimyasal olarak bağlanma.

Geoteknik uygulamalarda, şişme ve büzülme özellikleri nedeniyle mühendislik açısından en fazla zorluk çıkaran zemin türü şişme özelliğine sahip killerdir. Bu tür zeminler, su ile temas ettiklerinde önemli ölçüde şişme eğilimi gösterirken, su kaybı durumunda ise hacimlerinde belirgin bir büzülme meydana gelir. Bu özellikleri nedeniyle, özellikle inşaat uygulamalarında ciddi yapısal problemlere yol açma potansiyeline sahiptirler. Bu tür zeminlerin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla uygulanan zemin iyileştirme yöntemleri, geoteknik alanında birçok araştırmacının yoğun olarak üzerinde çalıştığı konuların başında gelmektedir.

Zemin iyileştirme uygulamalarında kireç ve çimento kullanımı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Kohezif zeminlere %2,5 ila %10 oranında sönmüş kireç ilave edildiğinde, kireç ile kil mineralleri arasında bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmektedir. Bu süreçte, kilin yapısında bulunan sodyum (Na) ve hidrojen (H) iyonları, kirecin içerdiği kalsiyum (Ca) iyonları ile yer değiştirerek iyon değişimi meydana getirir ve bu reaksiyon sonucunda su açığa çıkar. Açığa çıkan su, kalsiyum hidroksit $[Ca(OH)_2]$ tarafından absorbe edilir. Karıştırılan zeminin bileşimi, karbonatlaşma sürecinin etkisiyle zamanla olgunlaşarak mekanik özelliklerinde iyileşme ve dayanım artışı gösterir (Gokyigit, Eksi & Yıldız, 2024).

Zeminde çimento kullanımı ile kalsiyum silikat ve alüminat hidrasyon ürünleri ile zemin taneleri arasında kimyasal bir bağ oluşur. Bu durum zeminin LL, PI ve şişme potansiyelinin düşmesine, kayma dayanımının artmasına neden olur (Croft, 1967). Şişme özelliğine sahip bu tip zeminlerde çimento kullanımını yerine inşaat yıkım atıklarının kullanılabilmesi durumunda aşırı çimento kullanımının önüne geçilmiş olunacaktır.

Almsedeen ve diğerkleri yaptıkları çalışmada, organik zeminlerin stabilizasyonunda GDB agregasının kullanımını incelemişlerdir. Organik zemine farklı oranlarda (%10, %15 ve %20) GDB agregası eklenerek bu ilavelerin stabilizasyon üzerindeki etkileri değerkendirilmiştir. Yazarları yaptıkları çalışma sonucunda, GDB agregası kullanımının karışım numunelerinin MDD değerklerinde bir artış sağladığını, aynı zamanda OMC değerklerinde bir düşüş meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, tek eksenli basma dayanım değerklerinde de bir artış gerçekteştğini belirtmişlerdir. Karışım numuneleri üzerinde gerçekteştirdikleri SEM-EDX ve XRD analizleri ile, GDB agregaları ile organik zemin arasında pozitif bir etkileşim olduğunu ortaya koymuşlardır (Almsedeen vd., 2024).

Sharma ve Sharma; killi zeminde %24 oranında İY atığı kullanımı durumunda CBR değerklerinde %143 oranında artış elde etmeleri yanında, hidrolik iletkenlik (k) değerklerinin de arttığını belirtmişlerdir. Yazarlar %24 İY atığı kullanımı ile zayıf zeminin dayanım ve geçirimlilik özelliklerinde belirgin bir iyileşme gerçekteştğini, dolayısı ile düşük yoğunluklu yollarda, alt temel kaplamalarında, sığ temellerde etkili bir şekilde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (Sharma & Sharma 2020).

Yol Yapımı ve Altyapı Çalışmalarında İY Atıklarının Kullanımı

İlk yol yapımında, yolu yapan insanların zemin mekaniği ilkelerini tam olarak anlamadıkları kabul edilebilse de sezgisel (ve deneysel) olarak, toprağı ağır bir yük uygulandığında, özelliklerinin amaçlarına daha uygun, mekanik olarak daha stabil bir yol sağlayacak şekilde geliştiğini biliyorlardı (Lvovska, Lytvynenko & Kariuk, 2018).

Sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için GDB agregalarının yol yapımında kullanımı ile karbon ayak izi, zararlı emisyonlar azaltılabilirken aynı zamanda doğal kaynakların korunması da

sağlanabilir (Fanijo vd., 2023). Gelişen teknolojiyle beraber artan inşaat yıkım malzemelerinin yeniden kullanımı ile ilgili olarak birçok araştırmacı, yıkımların neden olduğu atıkların yeniden kullanımı ve bu sayede maddi gelir yanında artan CO₂ yoğunluğunu da en aza indirmeye çaba harcamaktadır.

İY atıklarından agregaların yol alt temel/ temel malzemesi olarak yeniden kullanımı yanında, otoyol inşaat çalışmalarında beton kaplamadan elde edilebilecek geri dönüşümlü agregalar beton veya asfalt malzemesi olarak tekrar kullanılabilir (Fanijo vd. 2023). GDB agregalarının farklı katmanlara yönelik kullanım performanslarının, agregaya yüzeyine yapışan kalıntılardan önemli ölçüde etkilendiği birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Geri dönüştürülmüş beton agregalarının farklı kullanım alanlarındaki görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir (Verian, Ashraf & Cao 2018).

Şekil 2. GDB agregası görüntüsü (a. Yol yapımında GDB agregası b. Bina yıkımında GDB agregası c. GDB agregaya yüzeyine yapışmış harç ve kırılmış kayaç parçaları)



(Verian, Ashraf & Cao 2018)

Yol yapımında zemin tane boyu dağılımı önem arz etmektedir. Örneğin “Yollar Fenni Şartnamesine” göre; dona hassas olmayan taban malzemesinde 0,075mm’den daha büyük tane miktarının %12’den fazla olmaması istenirken, alt temel ve temel tabakası için tane boyu dağılımının şartname sınırları verilmiştir (Orhan, Işık & Özer 2003).

Yol yapımında geri dönüştürülmüş malzeme kullanımında geçirimsizlik dikkat edilmesi gereken bir konudur. İYA kullanımında florasan lambalardaki civa, kurşun bazlı boya, asbest benzeri içerikler yeraltı sularını kirletebilir. Bu nedenle geri dönüşmüş agrega kullanımı durumunda bu konuya dikkat edilmesi gerekir.

Sadati ve Khayat yaptıkları çalışmada GDB agregasının sert kaplama yapımında kullanımını araştırmışlardır. %30 ve %40 oranında GDB agregası ile elde ettikleri örnekleri referans numune ile karşılaştıran yazarlar, karışımların 28 ve 91 günlük basınç dayanımlarının gerekli kriterleri sağladığını, yarma ve çekme dayanımlarında ise sırasıyla %6 ve %7'lik düşüş gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Yazarlar 56 günlük elastisite modül değerlerinin %30 GDB agregası için %22, %40 GDB agregası için %14 oranında azaldığını, çekme ve eğilme dayanım değerlerinin referans numune ile benzerlik gösterdiğini belirtmişlerdir (Sadati & Khayat 2016).

Albayati ve diğerleri sürdürülebilir kaplama betonu ve asfalt karışımlarda kireç kullanarak GDB agregası kullanımını incelemişlerdir. Yazarlar hidratlı kireç kullanımının, GDB agrega yoğunluğunu ve reaktiviteyi artırdığını, böylece GDB agregasının mekanik dayanımında iyileşme gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir. GDB agrega kullanımı ile viskozitede ve Marshal duraylılığında referans numuneye göre artış gerçekleştiğini, aynı zamanda üst yapı beton karışımları için istenilen hava boşluğunu içerdiğini belirten yazarlar, bu sayede mekanik özelliklerde iyileşme elde ettiklerini belirtmişlerdir. Sonuç olarak GDB agregası kullanımının asfalt betonun dayanımını artırdığını ve agrega miktarının artmasıyla nem duyarlılığının ve kullanım ömrünün arttığını belirtmişlerdir (Albayati vd., 2018).

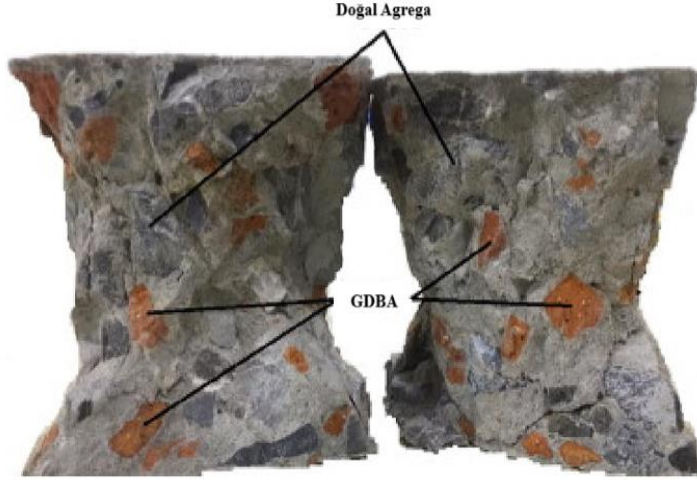
Hidrolik olarak bağlanmış malzemeler, agregaların ve granüler agregaların çimento gibi bağlayıcı malzemeler ile karıştırılması sonucu elde edilmektedir. Buna karşın, bağlayıcısız üstyapı malzemeleri, çimento gibi herhangi bir bağlayıcı

içermeksizin taş ocağı ürünleri, doğal çakıllar ve geri dönüştürülmüş malzemelerden oluşmaktadır. Geleneksel olarak, doğal kırma taşlar yol temeli ve alt temel inşaatlarında granüler bağlayıcısız malzeme olarak kullanılmaktadır. Ancak, doğal agrega kaynaklarının giderek tükenmesi ve atık miktarının azaltılmasına yönelik küresel gereksinimler doğrultusunda, geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkıntı (İY) atıkları gibi alternatif ve sürdürülebilir malzemelerin doğal agregaların yerine kullanımına yönelik çalışmalar artış göstermektedir (Tuladhar, Marshall & Sivakugan 2020).

İnşaat Yapımında İY Atıkları Kullanımı

Beton doğası gereği çevreye zararlı bir bileşendir. İnşaat sektöründeki hızlı gelişim, inşaat ve yıkım atıklarının artmasına dolayısı ile çevresel sorunların oluşmasına neden olmuştur. Beton atıklarının inşaat katkı malzemesi olarak yeniden kullanılması, doğal kaynakların korunmasına ve atık depolama alanlarının kullanımının azaltılmasına katkı sağlarken, çevresel sürdürülebilirliğin artırılmasına da olanak tanımaktadır. Şekil 3’de doğal agrega ve GDB agrega kullanılarak elde edilen beton görüntüsü verilmiştir (Fanijo vd., 2023).

***Şekil 3.** Doğal agrega ve GDB agregası kullanılarak elde edilen kırılmış beton görüntüsü*



(*Fanijo vd., 2023*)

Beton üretiminde ana bileşenlerden biri olan agregalar, tane boyutuna bağlı olarak ince ve iri agrega olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İnce agregalar daha çok kum veya kırma taştan oluşur. İri agregalar beton karışımlarında dayanım belirleyen bileşenlerdendir. GDBA agregaları ise, yıkılmış betonun iki aşamada kırılması ve ardından elenerek donatı, ahşap, plastik vb. kirleticilerin uzaklaştırılmasıyla üretilen atık betondan elde edilen bir malzemedir (Deshpande, Londhe & Kulkarni 2014).

Dünyada beton tüketiminin kişi başına yılda iki buçuk ton olduğu tahmin edilmektedir. Beton bileşenlerinin en önemli girdisi olan agregalar ise bu tüketimde yaklaşık 13,12 milyar ton olarak yer almaktadır (Mohammed vd., 2015). Beton üretiminde kullanılan doğal agregalar yerine geri dönüştürülmüş agrega olarak inşaat ve yıkım atıklarının kullanılması ile hem doğal kaynaklar korunacak hem de atık miktarı azaltılmış olacaktır.

Beton agregasına alternatif olarak farklı oranlarda; inşaat ve yıkım atıkları, atık arıtımı kalıntıları, metalurji endüstrisi yan ürünleri ve diğer farklı endüstri kollarının yan ürünleri iri ve ince

agrega olarak beton üretiminde kullanılmaktadır (Alqarni vd., 2021). Yıkım alanlarından elde edilen betonun agrega olarak yeniden kullanımı ve bunun yeni üretilecek betonun özellikleri üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde değerlendirmek amacıyla kapsamlı bilimsel araştırmalar yürütülmüştür (Ajdukiewicz, & Kliszczewicz, 2002).

Beton üretiminde kullanılan agrega yerine GDB agregası kullanımı konusu detaylı çalışmayı gerektiren bir durumdur. GDB agregası şekil ve içerik açısından doğal agregalardan farklıdır. Köşeli bir yapısının olması nedeni ile, kırılmış agregalı beton, yuvarlak agregalı betonla aynı işlenebilirliğe ulaşmak için biraz daha yüksek çimento içeriği gerektirir (Nedeljković vd., 2021).

Beton kalitesindeki düşüş, öncelikle kullanılan atığın kalitesine bağlıdır. Aynı karışım oranı ve işlenebilirlikte %100 agrega ikamesine sahip geri dönüştürülmüş agregalı betonla, normal betondan yaklaşık %10-25 daha düşük ortalama basınç ve çekme dayanımına ve %5-35 daha düşük elastisite modülüne sahiptir. Üretim sırasında bünyesinde oluşan çatlaklar nedeniyle geri dönüştürülmüş iri agregalar sıvıların nüfus etmesine ve emilmesine karşı daha hassas hale gelir (Collivignarelli vd., 2020).

Yine GDB agregası kullanımında, betonun basınç ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinde belirli düzeyde bir azalmada meydana gelmektedir. Ancak, yapılan çalışmalar, betona %30 oranında GDB agregası ilavesinin dayanım üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ve GDB agregası içeren yüksek dayanımlı betonun, doğal agrega kullanılan beton ile karşılaştırıldığında mühendislik özellikleri ve dayanıklılık açısından benzer performans gösterdiğini ortaya koymaktadır (Limbachiya, 2000). GDB agregasının içerdiği kirlenici miktarı, özgül ağırlığı ve emilimi beton sağlamlığına ve dayanımına etki eder (Verian, Ashraf & Cao, 2018).

Geleneksel beton ile GDB agregası arasındaki temel fark, GDB agregası içeriğinde doğal agregaların yanında bu agregalara bağlı harçtan oluşan bir GDB agregası içeriğidir. Bu nedenle GDB daha geçirimli bir hal alır. Sonuçta daha fazla su geçirimliliği ve daha düşük bir dayanım özelliği gösterir (Pacheco vd., 2017). GDB agregalarının su içerikleri %3-12 aralığında iken, doğal agregalarinki %1-5 arasındadır (Shi vd., 2016). Bununla birlikte literatür çalışmaları GDB özelliklerinin geleneksel betonla karşılaştırıldığında yönetmeliklere uygun sonuçlar elde edildiğini göstermektedir (Gonzalez-Fonteboia & Martínez-Abella 2007).

Tamamen GDB agregası ile üretilen betonun normal iri agregalardan üretilen betona kıyasla taze, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinde bir azalmaya neden olabileceği belirtilmiştir (Alqarni, 2021). Bu nedenle araştırmacılar tamamen GDB agregası kullanmak yerine toplam agrega miktarının bir kısmını GDB agregası kullanarak beton üretimini araştırmaktadırlar. Bunun yanında alternatif katkı malzemeleri de denenmektedir. Batayneh ve diğerleri (2007) yaptıkları çalışmada; beton üretiminde plastik ve cam atıklarını %20 oranında ince agrega malzemesi olarak, beton parçalarını da %20 oranında iri agrega olarak kullanmışlardır. Elde ettikleri numuneler üzerinde bir dizi fiziksel ve mekanik deneyler yapmış ve belirtilen malzemelerin 25 MPa'a kadar düşük dayanımın istendiği yerlerde beton üretiminde agrega olarak başarı ile kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Batayneh, Marie & Asi, 2007). GDB agregalarının yüksek su emilimi, doğal agrega betonunkine eşdeğer taze ve sertleştirilmiş özelliklere sahip beton yapmak için puzolanik malzemeler ve süper plastikleştirici kullanımını gerektirir. GDB agregası için bir dizi iyileştirme çalışmalarına örnek Tablo 5'de verilmiştir (Shi vd., 2016).

Tablo 5. GDB agregası iyileştirme uygulamaları

İyileştirme Uygulamaları	Fiziksel Uygulamalar	Kimyasal Uygulamalar
Yapışık harcın sökülmesi	Mekanik öğütme	Asit içinde ön ıslatma
Yapışık harcın güçlendirilmesi	Suda ön ıslatma Polimer emülsiyonu Dolgu kireç takviyesi veya kalsiyum karbonat biyodepozisyonu	-Puzolanik çözelti - Sodyum silikat - Karbonatlaşma

GDB agregaları üzerinde yer alan harç betonun birçok özelliği üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. İsmail ve Rahmi yaptıkları çalışmada GDB agregaları yüzeylerine yapışmış gevşek harç parçacıklarını çıkarmak veya en aza indirmek için farklı asitlerin kullanılmasının, fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirebileceğini, yeni çimento hamuru ile agrega arasındaki yüzey temasını artırabileceğini dolayısıyla bu işlemlerin betonun mekanik dayanımında önemli bir iyileşme ile sonuçlanabileceğini belirtmişlerdir (İsmail, & Ramli, 2013).

Shi ve diğerleri yaptıkları çalışmada, geri dönüşümlü agrega kullanarak elde ettikleri beton numuneler üzerinde bir dizi çalışma yapmış ve beton yapısını ve dayanım özelliklerini daha iyi hale getirebilmek için geri dönüştürülmüş agregaya ön işlem olarak CO₂ kullanımı ile karbonatlaşma işleminin uygulanmasını önermişlerdir (Shi vd., 2016).

Sonuç ve Öneriler

Son yüz yılda dünya üzerinde gerçekleşen büyük depremler, kentsel dönüşüm projeleri, tadilat çalışmaları ve benzeri nedenlerle inşaat yıkım atıkları oldukça büyük boyutlara ulaşmıştır. Beton atıklarının geri dönüşümü ve yeniden kullanımı, doğal kaynakların korunmasında ve çevresel etkilerin en aza indirilmesinde hayati rol oynamaktadır.

Yapılan araştırmalar sonucunda inşaat uygulamalarında inşaat yıkım atıklarının yeniden kullanımı ile elde edilecek kazanımlar ve araştırmacıların önerileri şu şekilde özetlenebilir;

Beton üretiminde agrega olarak tamamen GDB agregası kullanmak yerine maksimum %30 oranında kullanılması durumunda, doğal agrega kullanarak üretilen beton özelliklerine benzer mühendislik ve dayanım değerleri elde edildiği belirtilmektedir.

Geri dönüşümlü beton agregaları farklı kalitelerde, farklı özelliklerde betonlardan üretildiği için homojenlik göstermeyebilir. Bu nedenle farklı kimyasal bileşimlere sahip olabilirler.

GDB agregası doğal agregalar yüzeyinde bir harç tabakası içerirler. Bu durum daha yüksek bir geçirimsiliğe ve sonuçta daha düşük bir dayanıma neden olur. Herhangi bir iyileştirme olmaksızın düşük dayanımın (25MPa) istendiği uygulamalarda GDB agregası kullanımı uygun görülmektedir.

GDB agregalarının inşaat uygulamalarında kullanımı öncesinde HCl, Na_2SiO_3 , karbonatlaşma gibi ön işlemlerden geçirildiğinde daha yüksek dayanım değerlerine kavuşabileceği belirtilmektedir. GDB agregaları yüzeyine yapışmış harcın temizlenmesi veya minimuma indirilebilmesi amacıyla kullanılacak asitlerin, asit türüne bağlı olarak miktarı ve uygulama yöntemi üzerinde daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

GDB agregalarının geoteknik uygulamalarda başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için GDB agrega üretim sürecinde kalite kontrolü ve GDB agregalarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin ortaya konulabilmesi için kapsamlı testlerin yapılması gerekir. Genel olarak tane boyu dağılımı, taşıma gücü, geçirimsizlik özellikleri ön plana çıkmaktadır.

GDB agregalarının yol yapımında kullanımı sırasında bünyesinde özellikle yeraltı suyuna zarar verebilecek civa, asbest gibi içeriklere dikkat edilmesi gerekmektedir.

Etkili yıkım uygulamaları, malzeme kullanımı ve geri kazanımı konusunda önemli faydalar sağlayabilir. Beton ve diğer malzemelerin yeniden kullanımı, inşaat yıkım alanında ayırma, ayrıştırma işlemlerinin düzgün yapılmasına bağlıdır. Bu amaçla gelişmiş bir yıkım tekniğinin uygulanabilmesi önem arz etmektedir.

Kaynakça

Abhijith, B. S., Murthy, V. S., & Kavya, S. P. (2014). Study of the effectiveness in improving montmorillonite clay soil by construction and demolition waste. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 1(5), 1-4.

Abramovitz, J. N., Brown, L. R., Dunn, S., Flavin, C., French, H., Gardner, G., ... & Starke, L. (2001). The Trends That Are Shaping Our Future.

Afrin, H. (2017). A review on different types soil stabilization techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(2), 19-24.

Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and concrete composites*, 24(2), 269-279

Albayati, A., Wang, Y., Wang, Y., & Haynes, J. (2018). A sustainable pavement concrete using warm mix asphalt and hydrated lime treated recycled concrete aggregates. *Sustainable Materials and Technologies*, 18, e00081.

Almsedeen, A., Ishak, M. F., Muhammad, N., Siddiqua, S., & Zakaria, M. N. (2024). Rejuvenating Organic Soil Behavior with Crushed Waste Concrete: Experimental and Mineralogical Investigations. *International Journal of Integrated Engineering*, 16(9), 130-142.

Alqarni, A. S., Abbas, H., Al-Shwikh, K. M., & Al-Salloum, Y. A. (2021). Treatment of Recycled Concrete Aggregate to Enhance Concrete Performance. *Construction and Building Materials*, 307, 124960.

Asgari, M. R., Baghebanzadeh Dezfuli, A., & Bayat, M. (2015). Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey

soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 1439-1452.

Azam, A. M., & Cameron, D. A. (2013). Geotechnical properties of blends of recycled clay masonry and recycled concrete aggregates in unbound pavement construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(6), 788-798.

Bagriacik, B., & Mahmutluoglu, B. (2020). A new experimental approach to the improvement of sandy soils with construction demolition waste and cement. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(13), 539.

Bansal, A., Mishra, G., & Bishnoi, S. (2016). Recycling and reuse of construction and demolition waste: sustainable approach. In *The 7th International Conference on Sustainable Built Environment, ICSBE*.

Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste management*, 27(12), 1870-1876.

Browne, M. J. (2006). *Feasibility of using a gyratory compactor to determine compaction characteristics of soil* (Doctoral dissertation, Montana State University-Bozeman, College of Engineering).

Christensen, T. H. (2011). Introduction to waste management. In *Solid waste technology and management* (pp. 3-16).

Collivignarelli, M. C., Cillari, G., Ricciardi, P., Miino, M. C., Torretta, V., Rada, E. C., & Abbà, A. (2020). The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: A review. *Sustainability*, 12(19), 7903.

Croft, J. B. (1967). The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. *Geotechnique*, 17(2), 119-135.

Demir, İ. (2009). İnşaat yıkıntı atıklarının beton üretiminde kullanımı ve beton özelliklerine etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 105-114.

Deshpande, N., Londhe, S., & Kulkarni, S. (2014). Modeling compressive strength of recycled aggregate concrete by Artificial Neural Network, Model Tree and Non-linear Regression. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(2), 187-198.

Dogdu, G., & Alkan, S. N. (2023). Deprem Sonrası Oluşan İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Değerlendirilmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri. *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1, 38-50.

Eckbo, C., Okkenhaug, G., & Hale, S. E. (2022). The effects of soil organic matter on leaching of hexavalent chromium from concrete waste: Batch and column experiments. *Journal of Environmental Management*, 309, 114708.

Esin, T., Cosgun, N. (2007). A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey. *Build. Environ.* 42 (4), 1667–1674.

Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., & Liu, J. (2023). A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability. *Cleaner Materials*, 9, 100199.

Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8, 1-16.

Gokyigit Arpacı, E. Y., Eksi Akbulut, D., & Yildiz, O. (2024). Enhancing water resistance of earthen buildings by using admixture materials. *Architectural Engineering and Design Management*, 20(2), 320-336.

Gonzalez-Fonteboia, B., & Martínez-Abella, F. (2007). Shear strength of recycled concrete beams. *Construction and Building Materials*, 21(4), 887-893.

Güçlüer, K., Günaydın, O., Tekin, Ö. F., & Şahan, M. F. (2017). Farklı Tipte Agregada Kullanımının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 107-114.

Huang, Y., & Yu, M. (2013). Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes of the twenty-first century. *Natural hazards*, 65, 2375-2384.

Ismail, S., & Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44, 464-476.

Jain, A., & Chawda, A. (2016). Appraisal of Demolished Concrete Coarse and Fines for stabilization of clayey soil. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 5(9), 715-719.

James, J., & Pandian, P. K. (2015). Soil stabilization as an avenue for reuse of solid wastes: a review. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, 58(1), 50-76.

Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Kerkhoff, B. (2002). *Design and control of concrete mixtures* (Vol. 5420, pp. 60077-1083). Skokie, IL: Portland cement association.

Lai, Y. Y., Yeh, L. H., Chen, P. F., Sung, P. H., & Lee, Y. M. (2016). Management and recycling of construction waste in Taiwan. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 723-730.

Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and structures*, 33, 574-580.

Luo, W., Liu, S., Hu, Y., Hu, D., Kow, K. W., Pang, C., & Li, B. (2022). Sustainable reuse of excavated soil and recycled concrete aggregate in manufacturing concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 342, 127917.

Lvovska, T., Lytvynenko, T., & Kariuk, A. (2018). Soil compaction methods development. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 636-641.

Mohammed, T. U., Hasnat, A., Awal, M. A., & Bosunia, S. Z. (2015). Recycling of brick aggregate concrete as coarse aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), B4014005.

Nedeljković, M., Visser, J., Šavija, B., Valcke, S., & Schlangen, E. (2021). Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 38, 102196.

Orhan, M., Işık, N. S., & Özer, M. (2003). Zeminlerin ince tane büyüklüğünün doğru belirlenmesinin önemi. *Politeknik Dergisi*, 6(4), 671-675.

Özışık, G., (1998). *Beton İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.*

Pacheco, J., de Brito, J., Ferreira, J., & Soares, D. (2017). Dynamic characterization of full-scale structures made with recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4195-4205.

Rydén, M. (2015). Impact of different concrete types on the LCA of NCC Composite bridge.

Saadat, M., & Bayat, M. (2022). Prediction of the unconfined compressive strength of stabilised soil by Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Non-Linear Regression (NLR). *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), 80-91.

Saberian, M., Li, J., Perera, S. T. A. M., Ren, G., Roychand, R., & Tokhi, H. (2020). An experimental study on the shear behaviour of recycled concrete aggregate incorporating recycled tyre waste. *Construction and Building Materials*, 264, 120266.

Sadati, S., & Khayat, K. H. (2016). Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 126, 691-700.

Saez, P., Merino, R., González, A.S., Porras-amores, C. (2013). Best practice measures assessment for construction and demolition waste management in building constructions. *Resour. Conserv. Recycl.*, 75, 52–62.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, 97(9), 1249-1273.

Şen, B. N., & Eren, Z. (2021). Döngüsel Ekonomi Modeli Kapsamında Erzurum İli Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Yol Yapımında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. *Sürdürülebilir Çevre Dergisi*, 1(2), 41-52.

Sharma, A., & Sharma, R. K. (2020). Strength and drainage characteristics of poor soils stabilized with construction demolition waste. *Geotechnical and Geological engineering*, 38(5), 4753-4760.

Sharma, A., & Shrivastava, N. (2023). Geotechnical characterization of construction and demolition waste material blended with sandy soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(4), 43.

Shen LY, Tam VWY, Tam CM, Drew D. (2004). Mapping approach for examining waste management on construction sites. *J Constr Eng Manag*; 130:472–81.

Shen LY, Tam VWY, Tam CM, Drew D. (2004). Mapping approach for examining waste management on construction sites. *J Constr Eng Manag*; 130:472–81.

Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review. *Journal of cleaner production*, 112, 466-472.

TC. Strateji ve Bütçe Başkanlığı (2023) (01/04/2025 tarihinde <https://www.sbb.gov.tr/2023-yili-genel-faaliyet-raporu/> adresinden ulaşılmıştır).

Torres, J. L. C., Tugen, F., Zhang, K., & Chávez, M. A. G. (2024). Chemical and Mechanical Soil Stabilization Techniques for Foundations. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1-21.

Tuladhar, R., Marshall, A., & Sivakugan, N. (2020). Use of recycled concrete aggregate for pavement construction. In *Advances in construction and demolition waste recycling* (pp. 181-197). Woodhead Publishing.

Verian, K. P., Ashraf, W., & Cao, Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 30-49.

Vural, I., Akgül, T., & Aydin, E. (2017). İnşaat Yıkıntı Atıkları Kullanılarak Zeminlerin Serbest Basınç Dayanımının İyileştirilmesi. In *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017 (ISITES2017 Baku-Azerbaijan)*.

Wahi, N., Joseph, C., Tawie, R., & Ikau, R. (2016). Critical review on construction waste control practices: legislative and waste management perspective. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 224, 276-283.

Yaghoubi, E., Disfani, M. M., Arulrajah, A., & Kodikara, J. (2018). Impact of compaction method on mechanical characteristics

of unbound granular recycled materials. *Road Materials and Pavement Design*, 19(4), 912-934.

Yavan, O., & Bozbey, İ. (2023). Sürdürülebilir İnşaat Sektörü İçin Geri Dönüşüm Beton Agregası. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 155-165.

Yıldız, Ö., & Kına, C. (2023). Geotechnical and structural investigations in Malatya province after Kahramanmaraş Earthquake on February 6, 2023. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 686-703.

Yıldız, Ö., & Ceylan, Ç. (2023). Stabilization of Zeolite and Bentonite with Sewage Sludge Ash. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(2), 431-443.

Yıldız, Ö., Zeybek, A., & Sönmezer, Y. B. (2024). Investigation of the earthquake-induced liquefaction and seismic amplifications after Pazarcık (Mw7.7) and Elbistan (Mw7.6) earthquakes. *Environmental Earth Sciences*, 83(21), 1-21.

BÖLÜM 7

GEOTEKNİK UYGULAMALARDA YAPAY ZEKA KULLANIMI

ÇIĞDEM CEYLAN¹
ÖZGÜR YILDIZ²

Giriş

Yapay zeka; akıllı makine bileşimi amacıyla bilim ve mühendisliğin uygulanması olarak tanımlanabilir (Bello vd., 2015). Daha önce insan zekasının dahil olduğu düşünülen görevleri bilgisayarın yerine getirmesini sağlayacak şekilde tasarlanmış, karmaşık soru çözümünde insanların zeka davranışlarına dayalı araçların kullanılmasını içerir.

Yapay zekanın geniş, eksik, taraflı ve hatta hatalı verileri analiz etme yeteneği, onun 21. yüzyılın en hızlı gelişen sektörlerinden biri yapmıştır. Yapay zeka çeşitli unsurları tahmin eder, gözlemler, tanır, ortaya çıkarır ve sınıflandırır. Hatta değişkenler arasında fiziksel

¹ Dr Öğr. Üyesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak. İnşaat Mühendisliği Malatya/ Türkiye, Orcid: 0000-0002-5961-3085

² Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, İstanbul /Türkiye, Orcid: 0000-0002-3684-3750

bağlantılar kurulamasa bile doğru tahminlerde bulunabilir (Saif, 2025).

Yapay zeka; veri kümelerini analiz etmek, verileri sınıflandırmak, yeni kalıpları belirlemek ve sonraki eğilimleri en kısa sürede tahmin etmek için bir dizi istatistiksel, olasılıksal ve optimizasyon aracı uygulayarak zayıf kesinlik, belirsizlik ve belirsiz gerçek arasında bir denge bulmayı amaçlayan çeşitli metodolojilerin ortaya çıkan bir koleksiyonudur (Onyelowe vd., 2023). Bunun geoteknik mühendisliği gibi inşaat mühendisliğinin çeşitli alt disiplinlerinde uygulanması; karmaşık ve analitik olarak çözümü zor matematiksel problemlerin yüksek doğrulukla ve kısa sürede çözüme ulaşması ile günümüzde önemli teknolojik ilerlemelerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Yapay zeka, yüksek çözünürlüklü veri analizi ve dinamik modelleme yaklaşımları, geoteknik mühendisliği uygulamalarında karar destek mekanizmalarının etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Yapay zeka kullanımı, saha seçim süreçlerinin optimize edilmesine, geoteknik tasarım parametrelerinin hassas şekilde ayarlanmasına ve potansiyel geoteknik risklerin öngörülerek etkin biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Böylece, geoteknik projelerin hem teknik yeterlilik hem de sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda başarıyla yürütülmesi mümkün hale gelmektedir.

Yapay zeka kullanımında kullanılan bilginin kalitesi oldukça önemlidir. Bilginin kalitesi eksikse, sonucun doğruluğu da tartışılır hale gelir, hatta bazı yapay zeka teknikleri geçerliliğini yitirir (Ebid, 2021).

Yapay zeka model eğitimi için gereken veri seti sayısı modelin doğruluğunu etkileyen en önemli faktördür. Veri seti sayısı yapay zeka teknikleri için sınırlayıcı bir etken olmasına rağmen genel

olarak kullanımlarının birçok avantajı vardır. Bunlar arasında (Baghbani vd., 2022, Raman vd., 2017).

(i) Yapay zeka yöntemleri, karmaşık ve doğrusal olmayan süreçleri modelleme ve girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişki hakkında herhangi bir başlangıç varsayımı olmaksızın modelleme yapma yeteneğine sahiptir;

(ii) YZ teknikleri, çeşitli bağlamlarda tahmin, izleme, seçme, tespit ve tanımlama için iyi bir şekilde kullanılabilir,

(iii) YZ teknikleri, parametreler arasındaki fiziksel ilişkiler bilinmediğinde bile doğru tahmin yapabilir,

(iv) Kurallar bilinmese bile yapay zeka araçları, örüntüler oluşturmak için büyük miktarda veriyi analiz etme yeteneğine sahiptir ve birçok durumda eksik veriler bile oluşturabilir

Günümüzde geoteknik mühendisliği alanında yapay zekâ temelli çalışmaların temel amacı, hem teorik hem de uygulamalı süreçlerde doğruluk, hız ve güvenliği artırarak bütüncül bir katkı sağlamaktır. Bu doğrultuda, bu çalışma kapsamında son yıllarda gerçekleştirilen güncel araştırmalara ve ilgili literatüre yer verilmektedir.

Geoteknik Uygulamalarda Kullanılan Yapay Zeka Teknikleri

Geoteknik mühendisliği zemin ve kaya ortamlar ve bunların mühendislik özellikleri ile ilgilenen bir bilim dalıdır. Oluşum ortamları, oluşum özellikleri, yaşı ve daha birçok faktöre bağlı olarak zemin ve kayalar oldukça karmaşık fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler taşırlar. Aynı oluşum ortamına ve oluşum özelliklerine sahip olsa bile, farklı su içeriği ve çevresel koşullara bağlı olarak da değişiklik gösterebilirler. Bu nedenle mühendislik davranışlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar oldukça zahmetli ve uzun süren çalışmalardır.

Geoteknik uygulamalarda, zemin veya kaya birimlerinin özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla laboratuvar ortamında ve arazi üzerinde çeşitli çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu süreçte numune alma, laboratuvar deneyleri, sonuçların analiz edilmesi ve yerinde yapılan arazi testleri gibi aşamalar yer almakta olup, tüm bu çalışmalar hem zahmetli hem de zaman alıcıdır. Ayrıca, laboratuvar veya arazi koşullarında yapılan deneylerde, bazı özelliklerin hesaplamalara tam olarak dahil edilememesi veya numunelerin doğal ortam koşullarını yeterince temsil edememesi gibi etmenler, elde edilen sonuçlarda farklılıkların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Özellikle karmaşık geoteknik koşullara ve çok boyutlu tasarım parametrelerine sahip inşaat sahalarında, mühendislik verilerinin doğruluk ve güvenilirliğini sağlamak, yalnızca geleneksel saha çalışmaları ve klasik ölçüm yöntemleri ile mümkün olamamaktadır.

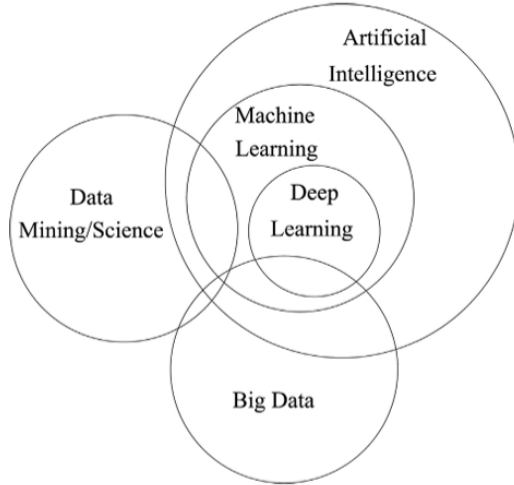
Geoteknik uygulamalarda yapay zeka kullanımı ile ilgili bu işlemlerin hızlandırılması hem zaman kaybını önleyecek hem de mühendislik çalışmalarında kolaylık sağlayacaktır. Şev stabilitesi analizleri, tünel tasarım uygulamaları, taşıma gücü analizleri, sıvılaşma hesaplamaları gibi karmaşık geoteknik uygulamalarda yapay zeka kullanım çalışmaları, özellikle son yıllarda geoteknik mühendislerinin oldukça dikkatini çeken konuların başında gelmektedir.

Yapılan araştırmalar yapay zeka çalışmalarının başarı ve doğruluğunun veri küme sayısına, türüne ve girdi parametrelerinin seçimine bağlı olduğunu göstermektedir. Zemin ve kayanın heterojen yapıya sahip olması, su içeriği ve çevresel koşullardan etkilenmesi, onun mühendislik davranışının tahmin edilmesini zorlaştırırken konu ile ilgili analitik ve sayısal çözümlemelerde de sınırlamalar ortaya çıkmaktadır (Baghbani vd., 2022). Geoteknik uygulamalarda sayısal yöntemler malzemelerin davranışını sanal

ortamda inceleme olanağı sağlaması, hızlı ve ekonomik olması nedeniyle oldukça avantaj sağlar. Ancak malzemelerin heterojen olması ve etki faktörlerinin karmaşık olması, gerçekçi bir modelleme yapmayı zorlaştırır. Dolayısı ile geleneksel hesaplamalar, oluşturulan modellerin basitleştirilmesine yol açmakta ve yöntemlerin tahmin doğruluğu üzerinde kısıtlamalara yol açmaktadır.

Görev ön plana çıktığında yapay zeka türleri; belirli görevleri yerine getiren dar (weak AI) yapay zeka, insan zekasına yakın genel amaçlı zeka yöntemi olan genel (strong AI) yapay zeka ve insan zekasını aşan hayali ve teorik düzeydeki süper (süper AI) yapay zeka yöntemleri olarak sınıflandırılabilir (Oke, 2008). Kullanılan teknik ön plana çıktığında ise Makine öğrenmesi (Machine Learning, ML), derin öğrenme (Deep Learning, DL), Büyük veri (Big data, BD) gibi türlerinden bahsedilmektedir (Şekil 1).

Şekil 1. *Yapay zeka yöntemleri*



(Salehi & Burgueño, 2018, Kurani vd., 2023, Wazirali vd., 2023)

Yapay zeka yöntemleri kullanılan verilerin türü, büyüklüğü, kalitesi, yeterliliği, zorluk derecesi uygulama alanı gibi faktörlerle birbirlerinden farklılıklar gösterirler. Tablo 1’de yapay zeka yöntemlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 1. Yapay zeka yöntemlerinin karşılaştırması

Durum	ANN	ML	DL	EL
Zorluk	Orta	Orta	Yüksek	Orta-yüksek
Veri ihtiyacı	Orta	Düşük-orta	Yüksek	Orta-yüksek
Yorumlanabilirlik	Düşük	Yüksek	Düşük	Orta-yüksek
Verim	Göreve dayalı, orta-yüksek	Göreve dayalı, orta-yüksek	Bazı görevlerde ileri teknoloji	Geliştirilmiş performans
Uygulamalar	Çeşitli	Çok yönlü	Belirli alanlarda baskın	Farklı
Uyumluluk	Karmaşıklık a eğilimli	Karmaşıklık a eğilimli	Yetersiz veriye eğilimli	Topluluk ile hafifletildi

(Yaghoubi vd., 2024)

Yapay sinir ağıları (Artificial Neural Networks- ANN)

Yapay zeka yöntemleri içerisinde ön plana çıkan yöntem %52 oranıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemidir (Baghbani vd., 2022).

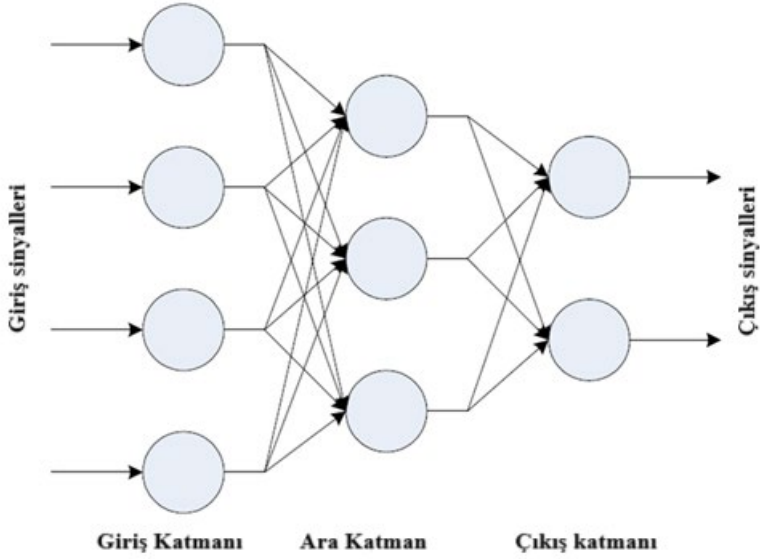
Huang ve Fu yapay sinir ağılarını; veri işleme ve bilgi temsili için büyük ölçekli hesaplamalar yapabilen, birbirine sıkıca bağlı ve yapay nöronlar veya düğümler olarak tanımlanan basit işlem elemanlarından oluşan bir yapı olarak tanımlamışlardır (Huang & Fu, 2019). Haykin ise; deneysel bilgiyi depolamak ve kullanıma hazır hale getirmek için sinirsel bir eğilime sahip olan basit işlem birimlerinden oluşan büyük ölçüde paralel dağıtılmış bir işlemci olarak yapay sinir ağılarını tanımlamıştır (Liébana-Cabanillas vd., 2017). Son yirmi yıldır yapay sinir ağıları inşaat, makine, trafik, çevre hidrojeoloji gibi birçok mühendislik alanında temel ilgi alanı haline gelmiştir (Onyelowe vd., 2023). Aslında bu yöntem insan beyin hücrelerinin davranışını taklit eden bir yöntemdir. Günümüzde Yapay Sinir Ağları (YSA); kişiselleştirilmiş reklamlar, sanal asistanlar, otonom sürüş gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında kullanımı ile oldukça etkileyici sonuçlar elde edilmiştir (Lagaros, 2023).

YSA; karmaşık modeller ve tahminler içeren zorlukların çözümü amacıyla kullanılan bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. İnsan beyninin bilgi işleme mekanizmalarından etkilenen çalışmalar, yapay sinir ağlarının karmaşık çok katmanlı yapısını tanımlamıştır (Wazirali vd., 2023).

Yapay sinir ağıları; giriş katmanı (input), ara katman (hidden) ve çıkış katmanı (output) olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır (Şekil 2) (Wazirali vd., 2023). Girdiler ve çıktılar arasındaki karmaşık ilişkileri modellemede sofistike, sağlam ve çok verimli

sonuçlar veren, yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Kalinić vd., 2021).

Şekil 2. Basit YSA modeli



(Chao vd., 2018, Shah vd., 2023)

Giriş katmanını olarak tanımlanan ilk adım hataları azaltmak ve hesaplamaları geliştirmek için bilgi edinir (Yaghoubi vd., 2024). Verileri nöronların ara katmanına aktarma işlevine sahiptir (Shah vd., 2023). Bu aşamada herhangi hesaplama yapılmaz.

Ara katmanlar ise gizli katmanlar olarak bilinir. Klasik bir yapay sinir ağı modelinde bir veya birkaç ara katman bulunabilir. Nöronun ara katmanı daha sonra verileri çıkış nöronunun üçüncü katmanına aktarır. Hesaplamalar girdi ve çıktı katmanları arasındaki karmaşık ilişkiyi anlamak için kullanılan geri yayılım kullanılarak her katmana öğretilir (Shah vd., 2023).

YSA modeli geliştirme prosedürü altı adımdan oluşmaktadır. Bunlar: değişkenlerin (girdi ve çıktı) seçilmesi, veri tabanının toplanması ve eğitim ve doğrulama gruplarına ayrılması, ağ mimarisinin belirlenmesi, bağlantı ağırlıklarının optimize edilmesi, önceden belirlenmiş kriterlere göre eğitimin sonlandırılması ve YSA'nın doğruluğunun onaylanmasıdır (Saif, 2025).

Bir yapay sinir ağının oluşturulması, yapay sinir ağı yapısının kendisini belirleyenler ve yapay sinir ağının nasıl eğitileceğini belirleyenler olmak üzere iki kısımda yorumlanabilecek parametreleri içerir (Yoo, 2019). Oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan yapay sinir ağları modellemesinde, kaç tane ara katman kullanılacağı, bu katmanlara kaç tane nöron yerleştirileceği ve çıktı katmanında hangi fonksiyonların kullanılacağı belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Ancak bunun için net bir kural yoktur (Kalinić vd., 2021).

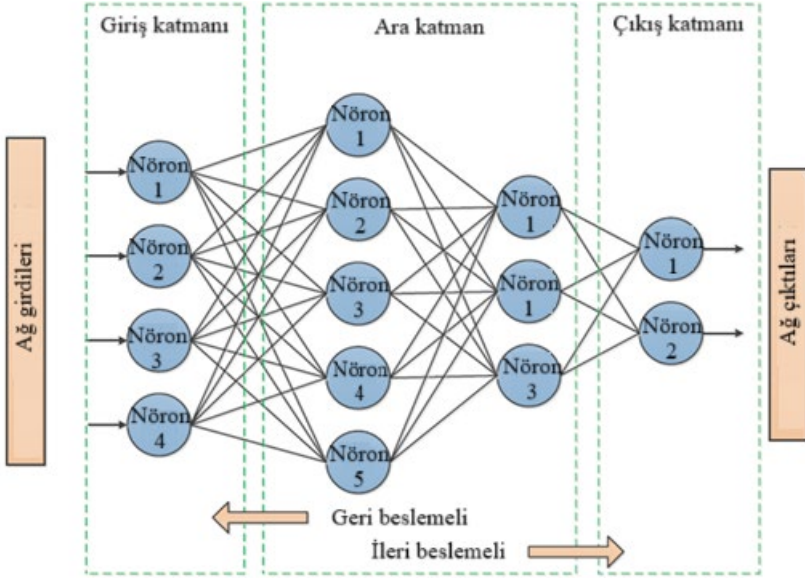
YSA'nın üç temel yapısı vardır; ileri beslemeli model (Feed-Forward Neural Network- FFNN), geri beslemeli model (Back Propagation Neural Network- BPNN) ve kendi kendini organize eden rekabet modeli (Abdolrasol, 2021).

FFNN modelinde; geri besleme bağlantıları olmaksızın veriyi girdi katmanından çıktı katmanına doğru, gizli katmanlar aracılığıyla tek yönlü ve düzenli bir şekilde işlenir. Hiperparametrelerin özenle seçilmesini gerektirse de, bu ağ yapısı karmaşık veri örüntülerini öğrenme konusunda yüksek bir etkinliğe sahiptir (Yaghoubi vd., 2024). Şekil 3'de İleri besleme ve geri yayılım algoritmaları ile yapay sinir ağı yapısı yer almaktadır (Abdolrasol, 2021).

BPNN modeli; zamana bağımlı verilerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yapay zeka yöntemidir. Bu yöntem,

önceki zaman adımlarındaki bilgileri içsel bellek yapısı aracılığıyla işleyerek, ardışık veri örüntülerini öğrenme kapasitesine sahiptir (Abdolrasol, 2021).

Şekil 3. İleri besleme ve geri yayılım algoritmaları ile yapay sinir ağı yapısı.



(Abdolrasol, 2021)

Yapay sinir ağlarının diğer yapay zeka yöntemlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları verilmiştir (Abdolrasol, 2021):

- Diğer derin öğrenme tahmin tekniklerinden farklı olarak YSA'lar, verilerin nasıl dağıtılması gerektiği gibi girdi değişkenleri üzerinde herhangi bir zorlayıcı kısıtlamaya ihtiyaç duymaz.
- ML oluşturma becerileri: YSA'lar olayları öğrenebilir ve benzer olaylara daha iyi ulaşmak için yorumlama yoluyla akıllıca kararları sıralayabilir.

- Çoklu işlem yeteneği: YSA'lar aynı anda birden fazla görevi yerine getirebilme güçleri ile sayısal verimlilik sağlayabilirler.
- Hataları tolere edebilme yeteneği; YSA'lar bazı hücreler bozulsa bile çıktı sonuçları üretebilir ve bu avantaj YSA'ların hataları tolere edebilmesini sağlar.
- Genelleme yeteneği; YSA'lar başlangıçtaki girdi ilişkilerinden öğrenir öğrenmez, anonim verilerdeki bilinmeyen ilişkileri varsayabilir, böylece modeli genelleştirir ve bilinmeyen verileri tahmin etmesine izin verir.

YSA öğrenimi sırasında dağıtık bellek kullanımında önemli bir süreç, örnekleri ayarlamak ve bu örnekleri ağı görüntüleyerek ağı istenen çıktıya göre telkin etmektir. Bu süreç, ağın örneklerle doğru orantılı bir şekilde ulaşmasını ve seçmesini sağlar ve olayın tüm özellikleriyle ağı gösterilmemesi durumunda ağı yanlış çıktılar verebilir.

Makine Öğrenmesi (Machine Learning- ML)

Makine öğrenimi yapay zeka uygulamaları konusunda bir dönüm noktası sayılabilecek bir yöntemdir. Makine öğrenimi (ML), yapay zekâ alanının en yaygın ve önemli alt dallarından biridir. Bu yaklaşım, açık bir şekilde programlanmaksızın tahminlerde bulunmak veya kararlar almak amacıyla, "eğitim verisi" olarak adlandırılan örnek veri kümelerine dayanarak matematiksel modellerin oluşturulmasını sağlar (Wazirali, 2023, Ahmad vd., 2022). Makine öğrenimi, özellikle sınıflandırma, regresyon ve kümeleme gibi yüksek boyutlu verileri içeren görevler için analitik modellemeyi otomatikleştirmeyi amaçlamaktadır (Yaghoubi vd., 2024). Bu yöntemin temel amacı verilerden öğrenmektir (Mahesh, 2020). Tablo 2’de Makine öğrenme türleri verilmiştir.

Tablo 2. Makine öğrenme türleri

Tür	Alt tür
Denetimli öğrenme (Supervised Learning)	Decision tree
	Naive bayes
	Support Vector Machine
Denetimsiz öğrenme (Unsupervised Learning)	Principal Component Analysis
	K-means
Yarı denetimli öğrenme (Semi-supervised Learning)	Generative Models
	Self Training
Pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement Learning)	
Çoklu görev öğrenimi (Multi-task Learning)	
Topluluk öğrenmesi (Esemble Learning)	Boosting
	Bagging
Sinir Ağları (Neural Learning)	Supervised Neural Network
	Unsupervised Neural Network
	Reinforced Neural Network
Deneyime dayalı öğrenme (Intanced Based Learning)	k-Nearest Neighbor
Derin öğrenme (Deep Learning)	

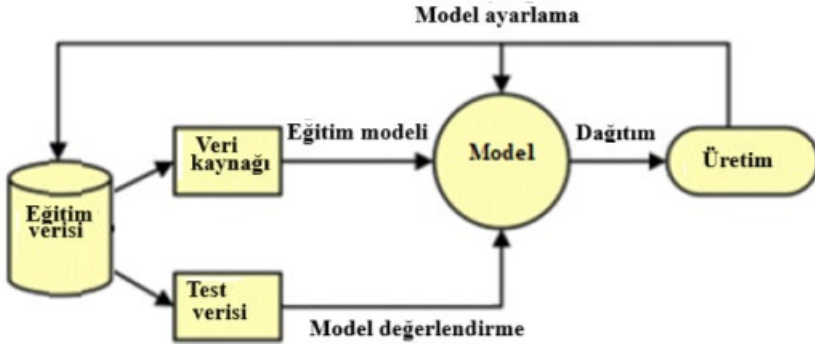
(Mahesh, 2020)

Denetimli öğrenme (Supervised Learning):

Denetimli öğrenme, giriş-çıkış çiftlerine dayalı olarak bir girdiyi bir çıktıya dönüştüren bir işlevin öğrenilmesi süreci olup, makine öğrenmesi alanının temel görevlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu süreç, etiketlenmiş eğitim verileri üzerinde gerçekleştirilen işlev çıkarımı (function extraction) işlemine dayanır. Denetimli makine öğrenmesi algoritmaları, dışsal denetim ve etiketlenmiş veriler gerektiren algoritmalar olarak tanımlanabilir. Giriş veri kümesi genellikle eğitim ve test veri kümelerine ayrılır

(Şekil 4). Eğitim veri kümesinde, tahmin edilmesi veya sınıflandırılması gereken bir hedef değişken bulunmaktadır. Tüm algoritmalar, eğitim veri kümesindeki örüntüleri öğrenir ve bu öğrenilen örüntüleri test veri kümesine uygulayarak tahmin veya sınıflandırma işlemlerini gerçekleştirir (Mahesh, 2020). Denetimli öğrenme, tahmin görevlerini tanımlamak için kullanılır çünkü amaç, ilgilenilen belirli bir sonucu tahmin etmek/sınıflandırmaktır (Jiang vd., 2020). Denetimli öğrenme görevinin standart bir formülasyonu sınıflandırma problemidir. Kullanıcının, fonksiyonun birkaç girdi-çıkıttı örneğine bakarak bir vektörü birkaç sınıftan birine eşleyen bir fonksiyonu tahmin etmesi gerekir (Nasteski, 2017). Sonuç olarak pekiştirmeli öğrenme, tek bir cevabın doğru olmadığı, ancak genel bir sonucun istendiği belirli bir görev için bir algoritmayı eğitme tekniğidir (Choi vd., 2020).

Şekil 4. Denetimli öğrenme veri akış şeması



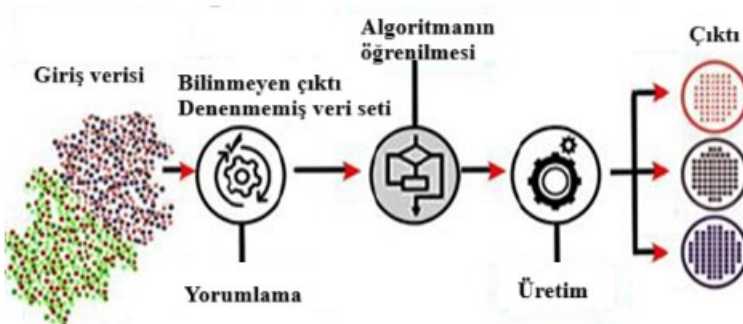
(Mahesh, 2020)

Denetimsiz öğrenme (Unsupervised learning)

Denetimsiz öğrenme, istenilen sonuca ilişkin önceden herhangi bir bilgiye sahip olmaksızın, verilerdeki kalıpların veya yapısal düzenlemelerin belirlenmesini amaçlayan bir öğrenme

yaklaşımıdır. Bu yöntemde, gözetimli öğrenmenin aksine, veri üzerinde doğru yanıtlar veya rehberlik sağlayacak bir öğretmen bulunmamaktadır. Algoritmalar, verilerdeki anlamlı yapıları bağımsız bir şekilde keşfetmek ve ortaya çıkarmak amacıyla çalışmaktadır. Denetimsiz öğrenme algoritmaları, veri kümelerinden çeşitli özellikleri otomatik olarak öğrenmekte; ardından, yeni veri örnekleriyle karşılaştıklarında, bu önceden öğrenilmiş temsiller aracılığıyla sınıflandırma işlemleri gerçekleştirebilmektedir. Denetimsiz öğrenme teknikleri, ağırlıklı olarak kümeleme (clustering) ve boyut indirgeme (feature reduction) gibi amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır (Şekil 5) (Mahesh, 2020). Denetimsiz makine öğrenimi yöntemleri, mevcut denetimli makine öğrenimi yöntemleriyle birlikte, bir ağın kendi kendini yönetmesi, izlemesi ve optimize etmesi için olanak tanırken, aynı zamanda zamanında eyleme geçirilebilir bilgilerin sağlanmasıyla insan yöneticilerinin süreç içerisinde etkin bir şekilde yer almasını mümkün kılacak daha uygun bir yaklaşım sunmaktadır (Usama vd., 2019).

Şekil 5. Denetimsiz öğrenme veri akış şeması

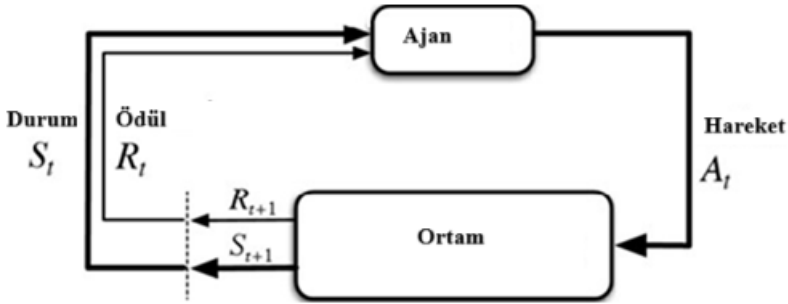


(Mahesh, 2020)

Pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement learning)

Bu kavram, bir etmenin çevresiyle etkileşime girerek aldığı geri bildirim sinyallerinden yararlanmak suretiyle beklenen ödülleri maksimize edecek bir strateji geliştirmeyi amaçlayan bir öğrenme sürecini ifade etmektedir (Yaghoubi, 2024). Sürecin temelinde, bir "ajanın" (agent) belirli bir ortam (environment) içerisinde nasıl hareket etmesi gerektiğini öğrenmesi yer almaktadır (Şekil 6). Ajan, gerçekleştirdiği her eylem sonucunda bir ödül (reward) veya ceza (punishment) ile karşılaşır. Bu bağlamda, öğrenme sürecinin nihai amacı, uzun vadede elde edilebilecek toplam ödülü maksimize edecek bir politika geliştirmektir. Vaat ettiği şey, görevin nasıl başarılabileceğini belirtmeye gerek kalmadan ödül ve ceza yoluyla programlama ajanlarına yol gösterici olmaktır (Ahmad vd., 2022).

Şekil 6. Pekiştirmeli öğrenme veri akış şeması



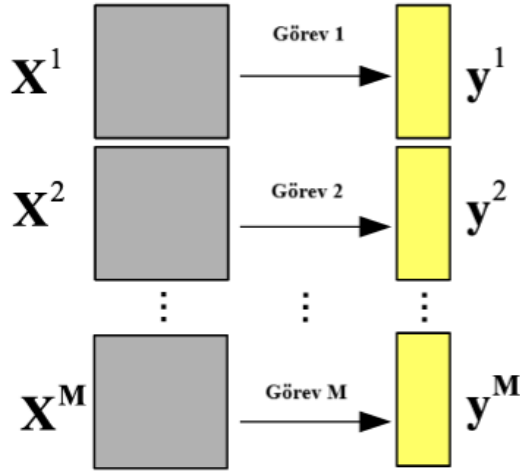
(Mahesh, 2020)

Çoklu görev öğrenimi (Multitask Learning, MTL)

Bu yöntemin temel varsayımı, öğrenme sürecindeki tüm görevlerin veya en azından bunların bir alt kümesinin birbirleriyle ilişkili olduğudur (Şekil 7). Bu bağlamda, farklı görevler arasındaki paylaşılan bilgilerin, her bir görev ayrı ayrı öğrenildiğinde elde edilecek sonuçlara kıyasla, birlikte öğrenilmesi durumunda daha

yüksek bir öğrenme performansı sağlayacağı öngörülmektedir. Birbiriyle ilişkili birden fazla öğrenme görevini aynı anda optimize etmeyi amaçlayan çoklu görev öğrenme, doğal dil işleme, konuşma tanıma, bilgisayarla görme, multimedya veri işleme, biyomedikal görüntüleme, sosyo-biyolojik veri analizi, çoklu modalite veri analizi gibi çeşitli uygulama alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Thung & Wee, 2018). Çoklu görev öğrenimi, makinelerin insan öğrenme faaliyetlerini taklit etmesinin bir yolu olarak görülebilir, çünkü insanlar genellikle bilgiyi bir görevden diğerine aktarır ve bu görevler ilişkili olduğunda bunun tersi de geçerlidir (Zhang & Yang, 2018).

Şekil 7. Çoklu görev öğrenimi veri akış şeması



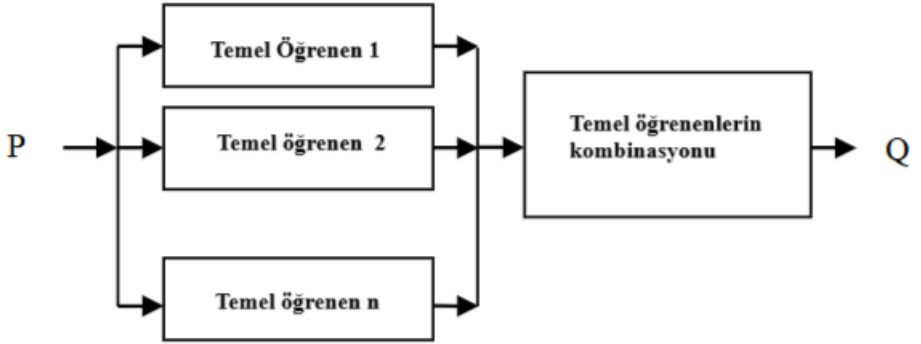
(Thung, & Wee, 2018)

Topluluk Öğrenmesi (Esemble Learning, EL)

Topluluk öğrenimi, belirli bir makine öğrenimi görevini çözmek için birden fazla tümevarımcının oluşturulması ve birleştirilmesi anlamına gelir (Sagi & Rokach, 2018). Topluluk öğrenmesi fikri temelde, bir topluluğun genelleme yeteneğinin, genellikle tek bir öğrencinininkinden çok daha güçlü olduğu teorisine

dayanmaktadır. Teknik açıdan bakıldığında, topluluk öğrenmesi temel olarak iki alt prosedür olarak uygulanmaktadır: zayıf bileşen öğrencileri eğitmek ve üye öğrencileri seçici olarak daha güçlü bir öğrencide birleştirmek (Huang vd., 2009). Şekil 8’de topluluk öğrenmesi veri akış şeması verilmiştir.

Şekil 8. *Topluluk öğrenmesi veri akış şeması*

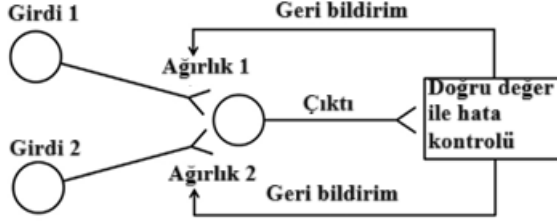


(Rincys & Gupta, 2020)

Sinir ağıları (Neural Networks, NN)

Bu süreç, formülize edilmesi veya standartlaştırılması güç bir durumda insan öğrenmesini taklit etmektedir. İnsan sinir sistemi, bilgi iletimi için sinapsta birbirine bağlanan nöronlardan oluşur. Tekrarlanan öğrenme süreciyle, her bir sinir bağlantısı güçlendirilebilir veya zayıflatılabilir. Sinir ağı ve makine öğrenimi bağlamında, nöronlar girdiyi çıktıya bağlamakta olup, her bir nöron sinir uçları aracılığıyla birbirine bağlanır. Her sinapsta, giriş nöronlarından gelen bilgiler bir ağırlıklandırma tekniği ile toplanır. Bu ağırlıklı değerler, yinelemeli öğrenme süreciyle ayarlanır (Şekil 9) (Jung & Kim, 2016).

Şekil 9. Sinir ağıları veri akış şeması



(Jung & Kim, 2016)

Deneyime dayalı öğrenme (Intance based learning, IBL)

Örnek tabanlı öğrenme (IBL), birkaç önemli sebepten dolayı tercih edilen bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. İlk olarak, insan kavram oluşumunu destekleyerek öğrenme sürecine katkı sağlar. İkinci olarak, doğal kavramların çok biçimli ve belirsiz yapısı, birçok tümevarımsal öğrenme yönteminin genel kavram tanımları oluşturmasını zorlaştırmaktadır. Bu tür durumlarda, örnek tabanlı yaklaşımlar, belirsizlik ve çok biçimlilik içeren kavramlarla daha iyi performans göstermektedir. Üçüncü olarak, örnek tabanlı öğrenme algoritmaları basit ve anlaşılması kolay olup, uygulama açısından büyük bir avantaj sunmaktadır. Bu nedenle, IBL yöntemleriyle elde edilen sonuçlar, diğer öğrenme teknikleriyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir nitelikte olabilmektedir (Zhang, 1992).

Derin öğrenme (Deep Learning, DL)

Makine öğrenmesi, günümüzde bilgi erişimi, içerik filtreleme, öneri sistemleri ve tüketici elektroniği gibi çok çeşitli uygulama alanlarında merkezi bir rol üstlenmektedir. Geleneksel makine öğrenmesi yaklaşımları, ham verinin doğrudan işlenmesine uygun olmadığından, yoğun olarak özel mühendislik ve alan bilgisi gerektiren anlamlı özellik çıkarıcıların tasarlanmasını zorunlu

kılmıştır. Temsil öğrenme (representation learning) yöntemleri, sistemlerin ham girdilerden görev için gerekli temsilleri otomatik olarak keşfetmesine olanak tanırken, derin öğrenme (deep learning) bu süreci çok katmanlı, doğrusal olmayan yapıların kompozisyonu ile gerçekleştirerek giderek soyutlaşan temsiller üretir. Bu mimariler, yüksek boyutlu verilere gömülü karmaşık yapıların keşfinde üstün başarı göstermekte ve görüntü tanıma, konuşma tanıma, ilaç etkileşimi tahmini, parçacık fiziği analizi, genomik varyantların etkilerinin öngörülmesi ve doğal dil işleme gibi alanlarda önceki yöntemleri aşan performans sağlamaktadır. Derin öğrenmenin, minimal insan müdahalesi gerektirmesi ve hesaplama kaynakları ile veri hacmindeki artıştan etkin biçimde yararlanabilmesi, bu paradigma için gelecekte daha geniş ölçekli başarıların önünü açmaktadır (Hinton vd., 2015). Derin öğrenmede amaç verideki karmaşık örüntüleri anlayabilen algoritmalar geliştirmektir. Bunu, çok katmanlı ve birbirine bağlı düğümlerden oluşan yapay sinir ağları (neural networks) kullanarak başarır (Yaghoubi vd., 2024).

Derin öğrenmenin en önemli avantajı; geniş veri kümeleriyle eğitilmesi ve bu sayede karmaşık örüntüleri tanıyıp yüksek doğrulukta tahminler yapabilmesidir. Ayrıca klasik makine öğrenme algoritmalarında gereken özel mühendislik bilgisi ihtiyacını ortadan kaldırarak, özellikleri otomatik olarak keşfetme yeteneğine sahiptir. Böylece büyük hacimli verileri hızlı bir şekilde işleme ve zamanla performansını geliştirme kapasitesi öne çıkar (Yaghoubi vd., 2024).

Yapay Zeka Yöntemlerinin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı

Geoteknik mühendisliği; zemin ve kaya ortamlarla ve bunların mühendislik özellikleri ile ilgilenen bir bilim dalıdır. Bu malzemeler farklı kökenlerden ve oluşum mekanizmalarından kaynaklanan, doğal anizotropik ve heterojen özellikler sergileyerek, anlama ve

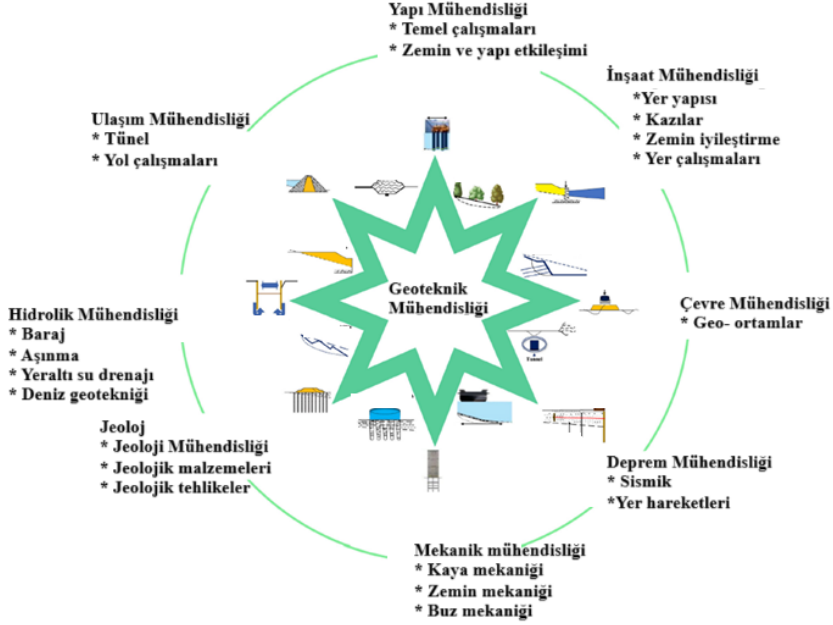
tahmin etmede çoğu zaman zorluklar ortaya koymaktadır. Zemin ve kaya ortamının özelliklerini ortaya koyarken kullanılan laboratuvar veya arazi çalışmaları gibi geleneksel yöntemler hem zaman alması hem de ekonomik açıdan oldukça maliyetli olmasına karşılık, yapay zeka yöntemleri zaman açısından oldukça hızlı olması ve hata payını minimuma indirmesi nedeniyle son yirmi yıldır önem kazanmıştır.

Geoteknik mühendisliği birçok alt disiplini bünyesinde barındıran bir alandır. Genel olarak yapı, ulaşım, genel inşaat uygulamaları ve benzeri alanlarda kendine yer bulmuş bir bilim dalı olarak özellikle son yıllarda gelişme gösteren bir konumdadır. Şekil 10'da geoteknik mühendisliği temel ilgi alanları verilmiştir (Yaghoubi vd., 2024).

Yapay zeka türlerinin gelişmesiyle geoteknik uygulamalarda da yapay zeka kullanılmaya başlamış ve bu konuda oldukça önemli adımlar atılmaya başlamıştır. Zemin temel özellikleri, deprem etkileri, şev stabilite analizleri ve daha birçok alanda önemli adımlar atılmıştır. Geoteknik uygulamalarda yapay zekanın kullanım alanları incelendiğinde dokuz temel alan ön plana çıkmaktadır (Moayedi vd., 2020, Baghbani vd., 2022, Saif, 2025). Bunlar;

- Donmuş zeminler ve zeminlerin termal özellikleri,
- Kaya mekaniği,
- Alt zemin ve kaplamalar, heyelan ve zemin sıvılaşması,
- Şev stabilitesi,
- Sığ ve kazık temeller,
- Tünel açma ve kullanılan ekipmanlar,
- Barajlar,
- Doymamış zeminler

Şekil 10. Geoteknik Mühendisliği ve alt dalları



(Yaghoubivd., 2024)

Geoteknik uygulamalarda yapay zekanın kullanımı ile, kullanıcıların işini oldukça kolaylaştıracak derinlemesine veri analizi ve karmaşık modelleme yöntemleri için gereken gelişmiş araçlar sağlanmıştır. Geoteknik mühendislikte yapay sinir ağları, veri odaklı tahmin ve sınıflandırma problemlerinde önemli başarılar göstermiştir. Özellikle büyük veri setlerinin mevcut olduğu durumlarda, yapay sinir ağları, fiziksel modellerin yerine veya onların destekleyicisi olarak kullanılabilir.

Kok-Kwang Phoon & Wengang Zhang yaptıkları çalışmada; hem denetimli öğrenme hem de denetimsiz yöntemlerinin arasında saha araştırmaları, zemin malzemelerinin davranışlarının modellenmesi, temel ve istinat yapıları, şev stabilitesi, heyelanlar,

tüneller ve yeraltı boşlukları ile sınılaşma gibi birçok geoteknik uygulamada kullanıldığını belirtmişlerdir (Phoon & Zhang, 2023). Geoteknik uygulamalarda en fazla kullanılan yöntemin %27 oranıyla yapay sinir ağıları yöntemi olduğu belirtilmiştir (Phoon & Zhang, 2023).

Wengang Zhang ve diğerleri yaptıkları çalışmada; zemin özelliklerinin tahmini ve sınıflandırmasında YSA, görüntü tanıma ve karmaşık veri setlerinin analizinde derin öğrenme yöntemini kullanmışlar ve zemin sınıflaması, heyelan duyarlılığı gibi alanlarda yapay zeka yöntemlerinin başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Yazarlar; model doğruluğunun artırmak için veri setlerinin kaliteli ve kapsamlı olması gerektiğı ve elde dilen modellerin saha verileriyle doğrulanması gerektiğine dikkat çekmişlerdir (Zhang, 2023).

Kennedy C. ve diğerleri yaptıkları çalışmada geoteknik uygulamalarda yapay zeka kullanımı ile ilgili olarak; laboratuvar zorunluluğunun kısmen de olsa azaltılabileceğı, mühendislik tasarım ve uygulamalarında daha hızlı ve doğru sonuçlar alınabileceğini belirtmişlerdir (Onyelowe vd., 2023).

Abduhameer ve diğerleri; barajlarda tehlike potansiyel seviyesi (hazal potential level, HPL) belirlenmesi amacıyla yapay zeka yöntemlerini kullanmışlardır. Yaklaşık 6500 data kullanan yazarlar; baraj yüksekliğı, uzunluğu, yaşı, depolama alanı, havza büyüklüğü, akarsu verileri gibi verileri kullanarak, Yüksek, orta, düşük gibi tehlike tanımlamaları yapmışlardır. Yazarlar yaptıkları çalışmada karar ağaçları ve destek vektör makineleri performansının başarılı olduğunu ayrıca modelleme başarısının da %80 olduğunu belirtmişlerdir (Assaad & El-Adaway, 2020).

Salimi ve diğ erleri, tünel açma makinelerinin performansı konusunda yapay zeka kullanımı ile ilgili çalışma yapmış ve bu tür makinelerin performansının doğru tahmin edilmesi proje maliyetlerini optimize etmek ve projenin zamanında tamamlanması gibi konularda önemli bir başarı sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Kayanın türü, sertliği, sıkışma, zemin ve makine özelliklerini girdi olarak kullanan yazarlar, tünel açma makineleri için bir performans indeksi belirlemişlerdir. Yazarlar denedikleri yapay zeka yöntemleri içerisinde en iyi başarıyı yapay sinir ağları yöntemiyle elde ettiklerini belirtmişlerdir (Salimi vd., 2015).

Özellikle veri işleme ve gelişmiş yazılım olanaklarının kullanımıyla geoteknik karakterizasyon, kompozit zemin malzemelerinin davranışlarının öngörülmesi ve parametrik ilişkilerin belirlenmesi, yerel zemin koşullarının sismik dalgalar üzerindeki etkilerini incelenmesi ve sensitivite analizlerinin gerçekleştirilmesi, derin kazı modellerinin deformasyonlarının öngörülmesi, zemin sıvılaşma modellerinin geliştirilmesi gibi zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği problemleri üzerinde yapay zeka tabanlı model ve yazılımlar ile çalışılmaktadır (Yıldız & Cabalar, 2025, Yıldız & Ceylan, 2022, Yıldız , 2021, Cabalar vd., 2023, Cabalar vd., 2021, Yıldız, 2024, Yıldız, 2023, Yıldız & Berilgen, 2020, Yıldız & Cabalar, 2022, Cabalar vd. 2024).

Benzer  alışmalar birçok araştırmacı tarafından denenmiştir, ve yazarlar konu ile ilgili önemli başarılardan bahsetmektedirler. Tablo 3’de konu ile ilgili yapılmış yayınlardan bir kısmı verilmiştir.

Tablo 3. Geoteknik uygulamalarda kullanılan yapay zeka yöntemleri için örnek çalışmalar

Kaynak	Kullanılan Yapay Zeka Yöntemi	İnput	Output	Başarı Durumu
(Yaghoubi vd., 2024)	YSA, DL, GMDH, LSSVM	Literatür Derleme	Literatür Derleme	Geoteknik uygulamalarda DL yönteminde en yüksek başarı elde edildiği belirtilmiştir..
(Liu, & Liang, 2024)	Convolutional Neural Network (CNN), LSTM	Sürtünme açısı, Dilatasyon açısı, Birim hacim ağırlık, Elastisite modülü, Poisson oranı, Gerilme mesafesi. Uygulanan yük	Stabilite değeri	Taşıma gücü hesaplamalarında başarılı olduğu belirtilmiştir.
(Bagińska, & Srokosz, 2019)	Deep Neural Network (DNN)	Temel boyu, Temel derinliği, Temel uzunluğu, Birim hacim ağırlık, Sürtünme açısı, Taşıma gücü	Taşıma gücü	DNN yöntemin daha başarılı olduğu belirtilmiştir.
(Baghbani vd., 2022)	Deep Learning (DL), ReLU-activated ANN	Literatür derleme	Zemin ve kayanın bazı geoteknik özellikleri	DL yönteminin başarılı olduğu belirtilmiştir.
(Taleb vd., 2019)	ANN	Likit Limit, Plastik Limit, Kireç içeriği	Plastisite indeksi, Maksimum kuru yoğunluk,	ANN yönteminin başarılı olduğu belirtilmiştir.
(Dehghanbanadaki vd., 2019)	ANN	Çimento içeriği, Dolgu malzemesi içeriği, Kır süresi	Tek eksenli basma dayanımı	ANN yönteminin başarılı olduğu belirtilmiştir.

Tablo 3. Geoteknik uygulamalarda kullanılan yapay zeka yöntemleri için örnek çalışmalar (Devam)				
Kaynak	Kullanılan Yapay Zeka Yöntemi	İnput	Output	Başarı Durumu
(Khatti & Grover, 2022)	ANN (Denetimli öğrenme)	Likit Limit, Plastik Limit, Kum içeriği, İnce malzeme içeriği	Plastisite indeksi, Optimum su içeriği	ANN yönteminin başarılı olduğu belirtilmiştir.
(Thapa, 2024)	ML	Tane boyu dağılımı, Nem içeriği, Nano- kömür içeriği, Biyokömür içeriği	Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)	CBR hesaplamalarında başarılı olduğu belirtilmiştir.
(Xu, & Zhao, 2022)	ANN	Zemin özelliklikleri, Eğim açısı, Yeraltı su seviyesi, Yağış miktarı, Sismik aktivite verileri	Heyelan stabilite katsayısı	Kullanılan modelin heyelan stabilite değerlendirmelerinde başarı ile kullanılabileceği belirtilmiştir.
(Ihara, 2024)	ANN	Zemin kuru birim hacim ağırlığı, ince malzeme oranı, maksimum tane büyüklüğü, özgül ağırlık	Zemin karışımının maksimum kuru birim hacim ağırlığı	Oluşturulan modelin zemin sıkışma parametreleri tahmininde başarılı olduğu belirtilmiştir.
(Ahmad, 2021)	ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)	Sodyum hidroksit, Sodyum silikat, Uçucu kül oranları, Kürlenme süreleri, Sıcaklık	Basınç dayanımı	Kullanılan modelin uçucu kül karışımı geopolimer malzemelerde basınç dayanımı hesaplamalarında başarılı
(Hosseini, 2020)	ANN	Çimento oranı, Su/çimento oranı, Kür süresi, Plastisite indeksi	Konsolidasyonsuz basınç dayanımı	Oluşturulan modelin zemin iyileştirme çalışmalarında başarı ile kullanılabileceği belirtilmiştir.

Tablo 3. Geoteknik uygulamalarda kullanılan yapay zeka yöntemleri için örnek çalışmalar (Devam)

Kaynak	Kullanılan Yapay Zeka Yöntemi	Input	Output	Başarı Durumu
(Maheshwari & Padmanabhan, 2025)	ANN	Zemin yoğunluğu, Kırılma açısı, Kohezyon, Eğim açısı, Su içeriği, Permeabilite, Yağış miktarı, Zemin türü	Sıvılaşma potansiyeli	Oluşturulan modelin zemin sıvılaşma hesaplamalarında ve zemin iyileştirme çalışmalarıda başarı ile
(Ahmad, 2007)	ANN	Kazık çapı, Kazık elastik modülü/zemin elastik modülü, Zemin Poisson oranı, Uyarım frekansı/zemin frekansı, Zemin	Kinematik yer değiştirme faktörü, Normalleştirilmiş eğilme momenti	Oluşturulan modelin geleneksel yöntemlere göre daha hızlı ve pratik olduğu belirtilmiştir.

Sonuç

Yapay zekâ uygulamalarının geoteknik mühendisliğinde kullanımı, mühendislik süreçlerinin hızlandırılması, daha güvenilir ve verimli verilerin elde edilmesi ile zaman ve maliyet tasarrufu sağlanmasını amaçlamaktadır. Bu bağlamda, risk tahmini, veri analizi, optimizasyon ve karar destek sistemlerinde daha doğru ve güvenilir sonuçlara ulaşmak mümkün hale gelmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalar, yapay zekâ uygulamalarının etkinliğinin artırılabilmesi için temiz, güvenilir ve yeterli miktarda veriye duyulan gereksinime özellikle vurgu yapmaktadır. Bu nedenle, yeterli büyüklükte ve kalitede bir saha veri havuzunun oluşturulması, yapılan araştırmaların geliştirilmesi ve alandaki uygulamaların iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Zemin davranışı ve yapı etkileşimi, geoteknik mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılan temel uygulama alanlarından biridir. Yapay zekâ destekli çalışmalar, özellikle zemin taşıma kapasitesi, sıvılaşma potansiyeli ve oturma tahminleri gibi risk unsurlarını öngörmeye yönelik olarak yoğunlaşmaktadır. Bu tür çalışmalar, mühendislerin projelerin erken aşamalarında daha güvenli, verimli ve optimize tasarımlar geliştirmelerine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, temel türü ve tasarımına yönelik yapay zekâ uygulamaları, mühendislik projelerinde hem ekonomik avantaj hem de yapısal güvenlik sağlanmasına olanak sunmaktadır.

Yapay zekâ, kullanılan tekniklere bağlı olarak gerçek zamanlı sensör verilerinin analizini gerçekleştirebilme kapasitesine sahiptir. Bu yetenek sayesinde, zemin stabilitesi, heyelan ve deprem gibi zemin hareketleriyle ilgili yapısal ve risk analizleri yapılabilir; bu da gerekli önleyici tedbirlerin ve müdahalelerin zamanında alınmasına imkân tanımaktadır.

Kaynaklar

Abdolrasol, M. G. M., Hussain, S. M. S., Ustun, T. S., Sarker, M. R., Hannan, M. A., Mohamed, R., Milad, A. (2021). *Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review. Electronics* 2021, 10, 2689.

Ahmad, I., El Naggar, M. H., & Khan, A. N. (2007). Artificial neural network application to estimate kinematic soil pile interaction response parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(9), 892-905.

Ahmad, M., Rashid, K., Tariq, Z., & Ju, M. (2021). Utilization of a novel artificial intelligence technique (ANFIS) to predict the compressive strength of fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 301, 124251.

Ahmad, R., Wazirali, R., & Abu-Ain, T. (2022). Machine learning for wireless sensor networks security: An overview of challenges and issues. *Sensors*, 22(13), 4730.

Assaad, R., & El-Adaway, I. H. (2020). Evaluation and prediction of the hazard potential level of dam infrastructures using computational artificial intelligence algorithms. *Journal of Management in Engineering*, 36(5), 04020051.

Bagińska, M., & Srokosz, P. E. (2019). The optimal ANN Model for predicting bearing capacity of shallow foundations trained on scarce data. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(1), 130-137.

Baghbani, A., Choudhury, T., Costa, S., & Reiner, J. (2022). Application of artificial intelligence in geotechnical engineering: A state-of-the-art review. *Earth-Science Reviews*, 228, 103991.

Benbouras, M. A., & Lefilef, L. (2023). Progressive machine learning approaches for predicting the soil compaction parameters. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(2), 211-238.

Bello, O., Holzmann, J., Yaqoob, T., & Teodoriu, C. (2015). Application of artificial intelligence methods in drilling system design and operations: a review of the state of the art. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 5(2), 121-139.

Cabalar, A. F., Karabas, B., Mahmutluoglu, B., & Yildiz, O. (2021). An IDW-based GIS application for assessment of geotechnical characterization in Erzincan, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(20), 2129

Cabalar, A. F., Akbulut, N., Demir, S., & Yildiz, O. (2023). Use of a biopolymer for road pavement subgrade. *Sustainability*, 15(10), 8231.

Cabalar, A. F., Ibrahim, M. A., Yildiz, O., & Yavuz, A. (2024). Effects of sewage sludge ash and stone powder on the properties of a silt. *Construction and Building Materials*, 450, 138586.

Chao, Z., Ma, G., Zhang, Y., Zhu, Y., & Hu, H. (2018, November). The application of artificial neural network in geotechnical engineering. In *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 189, p. 022054). IOP Publishing.

Choi, R. Y., Coyner, A. S., Kalpathy-Cramer, J., Chiang, M. F., & Campbell, J. P. (2020). Introduction to machine learning, neural networks, and deep learning. *Translational vision science & technology*, 9(2), 14-14.

Dehghanbanadaki, A., Sotoudeh, M. A., Golpazir, I., Keshtkarbanaemoghadam, A., & Ilbeigi, M. (2019). Prediction of geotechnical properties of treated fibrous peat by artificial neural networks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(3), 1345-1358.

Ebid, A. M. (2021). 35 Years of (AI) in geotechnical engineering: state of the art. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(2), 637-690.

Hinton, G., LeCun, Y., & Bengio, Y. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.

Hosseini, S. A. A., Mojtahedi, S. F. F., & Sadeghi, H. (2020). Optimisation of deep mixing technique by artificial neural network based on laboratory and field experiments. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 14(2), 142-157.

Huang, F., Xie, G., & Xiao, R. (2009, November). Research on ensemble learning. In *2009 international conference on artificial intelligence and computational intelligence* (Vol. 3, pp. 249-252). IEEE.

Huang, Y., & Fu, J. (2019). Review on application of artificial intelligence in civil engineering. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 121(3), 845-875.

Ihara, S., Furuhata, S., Noda, S., Nagai, H., Kikuchi, Y., & Tatsuoka, F. (2024). Estimating the compacted dry density of gravelly soil with oversized particles. *Transportation Geotechnics*, 49, 101379.

Jiang, T., Gradus, J. L., & Rosellini, A. J. (2020). Supervised machine learning: a brief primer. *Behavior therapy*, 51(5), 675-687.

Jung, S. K., & Kim, T. W. (2016). New approach for the diagnosis of extractions with neural network machine learning. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 149(1), 127-133.

Kalinić, Z., Marinković, V., Kalinić, L., & Liébana-Cabanillas, F. (2021). Neural network modeling of consumer

satisfaction in mobile commerce: An empirical analysis. *Expert Systems with Applications*, 175, 114803.

Khatti, J., & Grover, K. S. (2022). Determination of suitable hyperparameters of artificial neural network for the best prediction of geotechnical properties of soil. *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, 10(5), 4934-4961.

Kurani, A., Doshi, P., Vakharia, A., & Shah, M. (2023). A comprehensive comparative study of artificial neural network (ANN) and support vector machines (SVM) on stock forecasting. *Annals of Data Science*, 10(1), 183-208.

Lagaros, N. D. (2023). Artificial neural networks applied in civil engineering. *Applied Sciences*, 13(2), 1131.

Liu, Y., & Liang, Y. (2024). Integrated machine learning for modeling bearing capacity of shallow foundations. *Scientific Reports*, 14(1), 8319.

Liébana-Cabanillas, F., Marinković, V., & Kalinić, Z. (2017). A SEM-neural network approach for predicting antecedents of m-commerce acceptance. *International Journal of Information Management*, 37(2), 14-24.

Mahesh, B. (2020). Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR).[Internet]*, 9(1), 381-386.

Maheshwari, B. K., & Padmanabhan, G. (2025). Liquefaction and reliquefaction mitigation of sand specimen treated with prefabricated vertical drains: An experimental investigation. *Geotextiles and Geomembranes*, 53(1), 295-310.

Moayedi, H., Mosallanezhad, M., Rashid, A. S. A., Jusoh, W. A. W., & Muazu, M. A. (2020). A systematic review and meta-analysis of artificial neural network application in geotechnical

engineering: theory and applications. *Neural Computing and Applications*, 32, 495-518.

Nasteski, V. (2017). An overview of the supervised machine learning methods. *Horizons. b*, 4(51-62), 56.

Oke, S. A. (2008). A literature review on artificial intelligence. *International Journal of Information and Management Sciences*, 19(4), 535-570.

Onyelowe, K. C., Mojtahedi, F. F., Ebid, A. M., Rezaei, A., Osinubi, K. J., Eberemu, A. O., ... & Rehman, Z. U. (2023). Selected AI optimization techniques and applications in geotechnical engineering. *Cogent Engineering*, 10(1), 2153419.

Phoon, K. K., & Zhang, W. (2023). Future of machine learning in geotechnics. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 17(1), 7-22.

Raman, D. V., Anderson, J., & Papachristodoulou, A. (2017). Delineating parameter unidentifiabilities in complex models. *Physical Review E*, 95(3), 032314.

Rincy, T. N., & Gupta, R. (2020, February). Ensemble learning techniques and its efficiency in machine learning: A survey. In *2nd international conference on data, engineering and applications (IDEA)* (pp. 1-6). IEEE.

Sagi, O., & Rokach, L. (2018). Ensemble learning: A survey. *Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery*, 8(4), e1249.

Saif, F. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Geotechnical Engineering: Applications, Optimization Strategies, Modeling Approaches, and Future Prospects. *Environ Sci Ecol: Curr Res*, 6(2), 10113.

Salehi, H., & Burgueño, R. (2018). Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. *Engineering structures*, 171, 170-189.

Salimi, A., Moormann, C., Singh, T., & Jain, P. (2015, November). TBM performance prediction in rock tunneling using various artificial intelligence algorithms. In *11th Iranian and 2nd Regional Tunnelling Conference "Tunnels and the Future"*.

Shah, A., Shah, M., Pandya, A., Sushra, R., Sushra, R., Mehta, M., ... & Patel, K. A comprehensive study on skin cancer detection using artificial neural network (ANN) and convolutional neural network (CNN). *Clinical eHealth*. 2023; 6: 76–84.

Taleb Bahmed, I., Harichane, K., Ghrici, M., Boukhatem, B., Rebouh, R., & Gadouri, H. (2019). Prediction of geotechnical properties of clayey soils stabilised with lime using artificial neural networks (ANNs). *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(2), 191-203.

Thapa, I., Ghani, S., Waris, K. A., & Basha, B. M. (2024). Prediction of California Bearing Ratio of nano-silica and bio-char stabilized soft sub-grade soils using explainable machine learning. *Transportation Geotechnics*, 49, 101387.

Thung, K. H., & Wee, C. Y. (2018). A brief review on multi-task learning. *Multimedia Tools and Applications*, 77(22), 29705-29725.

Usama, M., Qadir, J., Raza, A., Arif, H., Yau, K. L. A., Elkhatib, Y., & Al-Fuqaha, A. (2019). Unsupervised machine learning for networking: Techniques, applications and research challenges. *IEEE access*, 7, 65579-65615.

Xu, J., & Zhao, Y. (2022). Stability Analysis of Geotechnical Landslide Based on GA-BP Neural Network Model. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2022(1), 3958985.

Yaghoubi, E., Yaghoubi, E., Khamees, 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. *Neural Computing and Applications*, 36(21), 12655-12699.

Yıldız, Ö., & Berilgen, M. M. (2020). Artificial neural network model to predict anchored-pile-wall displacements on Istanbul greywackes. *Teknik Dergi*, 31(4), 10147-10166.

Yıldız, Ö. (2021). Correlation between Spt and Pmt results for sandy and clayey soils. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 22(2), 175-188.

Yıldız, Ö., & Cabalar, A. F. (2022). Cyclic direct shear testing of a sand with waste tires. *Sustainability*, 14(24), 16850.

Yildiz, Ö., & Ceylan, Ç. (2022). Geotechnical characterization of zeolite-sand and bentonite-sand mixtures. *Acta Geotechnica Slovenica*, 19(2), 15-32.

Yıldız, Ö. (2023). Influence of input motion and surface layer properties on seismic site response: A stochastic simulation method-based MLR model. *Near Surface Geophysics*, 21(3), 195-216.

Yıldız, Ö. (2024). Integrated GIS-based mapping and ANFIS modelling for seismic and geotechnical characterization of soil properties. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(9), 3708-3721.

Yıldız, Ö., & Fırat Çabalar, A. (2025). Predictive Modeling and Experimental Analysis of Cyclic Shear Behavior in Sand–Fly Ash Mixtures. *Applied Sciences* (2076-3417), 15(1).

Yoo, Y. (2019). Hyperparameter optimization of deep neural network using univariate dynamic encoding algorithm for searches. *Knowledge-Based Systems*, 178, 74-83.

Wazirali, R., Yaghoubi, E., Abujazar, M. S. S., Ahmad, R., & Vakili, A. H. (2023). State-of-the-art review on energy and load forecasting in microgrids using artificial neural networks, machine learning, and deep learning techniques. *Electric power systems research*, 225, 109792.

Zhang, J. (1992). Selecting typical instances in instance-based learning. In *Machine learning proceedings 1992* (pp. 470-479). Morgan Kaufmann.

Zhang, Y., & Yang, Q. (2018). An overview of multi-task learning. *National Science Review*, 5(1), 30-43.

Zhang, W., Pradhan, B., Stuyts, B., & Xu, C. (2023). Application of artificial intelligence in geotechnical and geohazard investigations. *Geological Journal*, 58(6), 2187-2194.

BÖLÜM 8

CONSIDERATIONS IN INSITU STRESSES AND ENGINEERED WORKS

Mehmet Kemal GOKAY ¹

Introduction

A part of the volumetric cavities in/on the Earth's crust have been excavated by humans and animals for protection and access purposes since the beginning of observable history. In the early days of humanity, natural caves in the Earth's crust and underground cavities dug manually were used as living spaces by human communities. Since then, caves and underground excavated shelters, cities, etc. have been used to meet different human needs. Beside these macro-scale underground spaces, micro-scale rock spaces as voids and porosities have their direct impact on the reservoir properties of the rock masses. These volumes also have their considerable economic values in cases of their groundwater, oil, natural gases deposition capacities. Surface structures which have been engineered through experiences to improve urban life have their modelled volumetric spaces. These surface urban structures can also be in the form of bridges, dams, highways, ports, etc. to improve urban life services & requirements. Engineers or experts who have duties officially to provide these surface and underground spaces for their societies, have been asked to hold the responsibilities of their

¹ Prof. Dr., Konya Technical University, Mining Engineering Department, Konya/Turkey,
Orcid: 0000-0003-3792-9414, mkgokay@gmail.com

engineered structures' (works') stabilities as well. Structural elements forming surface and underground constructions have their stress-strain behaviours which should be modelled to stay stable to supply service to humans. As far as the material science improvement levels, the deformations which might be expected at the man-made constructions' elements can be estimated with certain risk levels according to modelled spaces, and material properties of man-made construction elements (beams, columns, slabs, pipes, pins, connections etc.). Researches on man-made materials and metallurgical sciences have been getting deeper to supply better composite and compound materials that gradually withstand high levels of stress, strain, temperature, and harsh surrounding environments, etc.

Engineered structures and their stabilities are not concerned only about the factors that depend on their material properties. If the mechanical stability analyses are going to be performed for a spacecraft industry, material properties which are concerning for the stability of the materials are considered deeply with the influencing forces (radiations, inner lining capsule artificially controlled atmospheric pressure, etc.). If there is an engineered structure (surface/underground) modelled for any solid planetary crust, modelled spaces in this structure are then required to be engineered through the material properties of the designed elements (including structural elements and planetary crust soils & rocks) and forces acting through that planetary crust. Research on stresses-displacements (occurring around underground spaces, and foundations of surface structures) at the Earth crust then could be pioneering works for the future settlements on moons, planets, and other satellites of the planets.

Rock mass mechanical behaviours are then getting enhanced not for the cases for the Earth; those researches will definitely be meaningful for the futuristic planetary settlement projects. Stresses (especially vertical & horizontal insitu stresses) in the Earth crust have major influences on natural and man-made structures. As Zang & Stephansson (2010), stated, insitu crustal stresses differentiate "regionally and locally". Their magnitudes can reach levels high enough "leading to natural or man-made mechanical failure". Since the stresses are developed in the Earth's crust due to gravity, plate

tectonics, and several other minor forces, these stresses have always been ready to be differentiated in magnitudes & directions all over the time. Thus, all the natural and man-made structures in/on the Earth's crust are under the influence of these insitu stresses. Therefore, Zang & Stephansson (2010), noted that "to better use and save our resources there is an obvious need for a greater understanding of mechanical stresses in the Earth's crust". Stephansson & Zang (2014), presented ISRM suggested methods for rock stress estimation through the "establishing a model for the insitu stress at a given site". The published contributions in this field of research have their positive impacts in understanding these stresses and their results formed at the rock formations of the Earth crust.

Vertical & horizontal stresses at the Earth crust

Available forces directing the displacements in/on Earth crust other than the main governing force which is Earth gravity are the means originated through; chemical reactions, radioactive decaying, organic activities etc. There are other important forces influencing the Earth crust listed by Griggs (1939a) which had been suggested in the various theories of orogenesis. These are; the Tidal force (due to "tidal pull of the moon and sun"); the Polflucht force (concept forwarded by Wegener in 1922, (Wegener, 1924), to express the "component of the centrifugal force during the rotation of the Earth that acts tangentially to the Earth's surface", Wikipedia, (2025a)); the Coriolis forces that cause precession and "act differentially on parts of different density, and produce a component of force which tends to make the continents move" (Griggs, 1939a); "compression due to thermal contraction of the Earth"; "viscous drag of convection currents in the substratum". These forces are related to positions and movements of Earth in its galactic systems and they are going to be refined as the developments in Earth & space sciences are enhanced.

It is also known that there are additional propositions for the main forces acting on the Earth crust which enlarge the considerations in the related concepts. Greitzer (2021), for instance, proposed an idea that the Earth rotation axis was changed in geological time which caused the differences in centrifugal force direction acting on Earth mass. Greitzer anticipated also that

centrifugal force is the main force “moves the continents and also partly the magma in the mantle, asthenosphere”. The author put this proposition to understand the movement of the crustal parts of Earth in geological eras.

Main influences on rock masses at Earth crust then can be listed briefly through; i) Earth gravity and its rotations related facts, ii) influences of other galactic masses like moon and sun, iii) heat related influences (thermal contraction of Earth, convection currents in Earth magma, heat transferred from other galactic sources mainly from the sun, etc.), iv) magnetism, v) sounds, vi) lights, vii) chemical reactions and radioactive activities of the Earth materials, viii) etc. These could be accepted as the factors directing the stresses formed in Earth solid mass to supply rapid or slow displacements.

When the time and their influential levels are considered, especially the Earth gravity and forces causing the continents of Earth crusts moving accordingly are the most important ones influencing solid rock masses of Earth crusts besides the heat related effects (Fig.1a, 1b). High temperature levels and high stresses in depth influences the behaviours of solid rock materials in the Lithosphere. When the Earth’s available materials are “partially melted Earth crust rock materials” or “melted form of Earth materials as magma”, high temperature & pressure are influencing factors as the other forces listed above in conceptual considerations. In engineering practices, structures which are planned in/on Earth crust then are accepted that they are under influences of the forces applied on the Earth crusts as well. When the time is included into the evaluation to predict the strength behaviours of rock masses, rock masses formation progress and their overloading conditions in geological eras should also be evaluated for their time-dependent strength characteristics. Brown & Hoek (1978) stated that determination of complete insitu stress states in the Earth’s crust “can be a difficult, expensive and often frustrating task”. The authors surveyed the related literature and “tabulated a wide range of stress measurement data”. According to the results Brown & Hoek supplied then; vertical compressive stress, (σ_v), increases as the depth, (z), of the overburden increases. This fact was then forwarded (Fig. 1c) through the relation, ($\sigma_v=0.027z$). The curves limit the plots of the measured insitu data in Fig.2a demonstrated also that insitu

average horizontal stress $\sigma_{h(av)} > \sigma_v$ until the depth of 500 m (from the ground surface), (Brown & Hoek, 1978). The main causes of vertical stress, σ_v , and lateral (horizontal) stresses [maximum horizontal stress, $\sigma_{h(max)}$ and minimum horizontal stress, $\sigma_{h(min)}$, (average horizontal stress is then; $[\sigma_{h(av)} = (\sigma_{h(max)} + \sigma_{h(min)}) / 2]$), are the forces influencing the Earth's mass listed mostly above. Brown & Hoek listed the insitu stress measurements tests performed in the world until 1978, and they listed 120 location related data through the graphs given in Fig.1c and Fig.2a. In addition, the authors supplied earlier research related to the σ_v and σ_h estimation equations offered through different studies. For instance; Hoek (2007), also pointed to the works about the insitu stress states and mentioned the study performed by Sheorey (1994), “who developed an elasto-static thermal stress model of the Earth”.

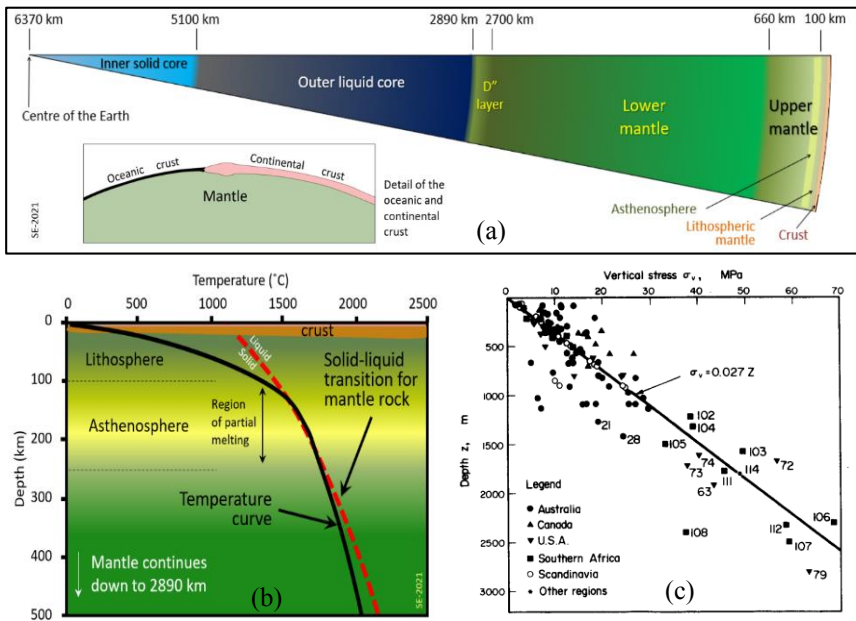


Figure 1. a) Earth's interior parts with their depth from the Earth's surface, (Earle, 2021). b) Temperature differentiation in depth of the Earth, “temperature and partial melting in the Upper Part of the Mantle”, (Earle, 2021). c) Insitu vertical stress, (σ_v), differentiation with depth from the Earth's surface (Brown & Hoek, 1978).

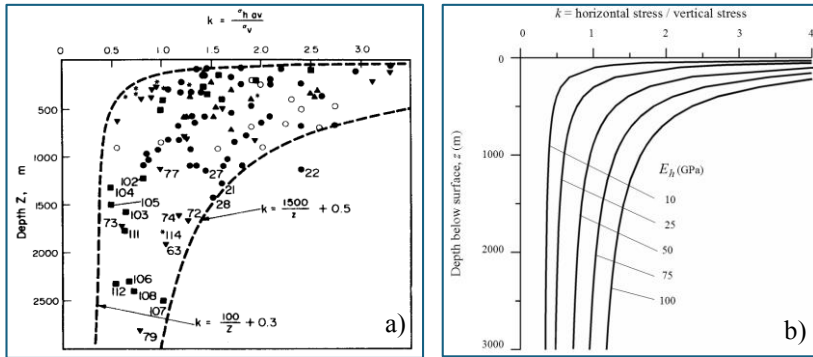


Figure 2. a) Vertical stress, (σ_v), and insitu stress ratio, ($k = \sigma_{h(av)} / \sigma_v$), differentiation with depth (Brown & Hoek, 1978), b) Stress ratio, (k), change in depth for different deformation modulus, E_h (in GPa), “based upon Sheorey’s equation (after Sheorey, 1994), given by Hoek, (2007).

This model includes; “curvature of the crust, variation of elastic constants, density and thermal expansion coefficients through the crust and mantle”. His model supplied an approach to estimate the ratio of horizontal stress to vertical stress, ($k = \sigma_h / \sigma_v$). He used depth (in metres) and average deformation modulus of “the upper part of the Earth’s crust measured in a horizontal direction” as E_h (in GPa). The graph given in Fig.2b presented the differentiation of “ k ” with depth from the Earth’s surface plotted according to different E_h values. As Hoek (2007), stated that this graph is similar to the one (Fig.2a) given by Brown & Hoek (1978).

When the volumetric Earth segment (with 1m^2 base area) is isolated hypothetically for its mechanical behavioural evaluations, (if the forces listed above are under evaluation), illustrative Fig.3 can be supplied to enhance understanding the strength of rocks and the stresses formed due their weights and the other factors. Understanding the Earth crust behaviours for their fracturing and stress-strain states like mountain formations, faults, folds, plate tectonics, and earthquakes, the forces causing the micro & macro scale displacements play main governing roles. Solid rock materials as an Earth crust over mantle is the material resisting these forces according to their different thicknesses and material properties. Deformations (strains) in vertical and lateral directions in the Earth’s

crust caused by insitu vertical stress and additional factors should be considered deeply with their time-dependent impacts as well. Ercelebi (1997) stated that insitu field stresses in the Earth's crust are important design parameters for underground structures. At this point, the statement supplied by The United States Geological Survey, USGS, notes the Earth crust thickness variations as follows; "Beneath the oceans, the crust varies little in thickness, generally extending only to about 5 km. The thickness of the crust beneath continents is much more variable but averages about 30 km; under large mountain ranges, such as the Alps or the Sierra Nevada, however, the base of the crust can be as deep as 100 km", (USGS, 2002). Since the maximum uniaxial compressive strength, UCS, of a "rock material" (which was reported for a diabase by Attewell & Former, 1976) is around 350 MPa, this level of vertical stress is formed around 12963 m in depth due to gravity.

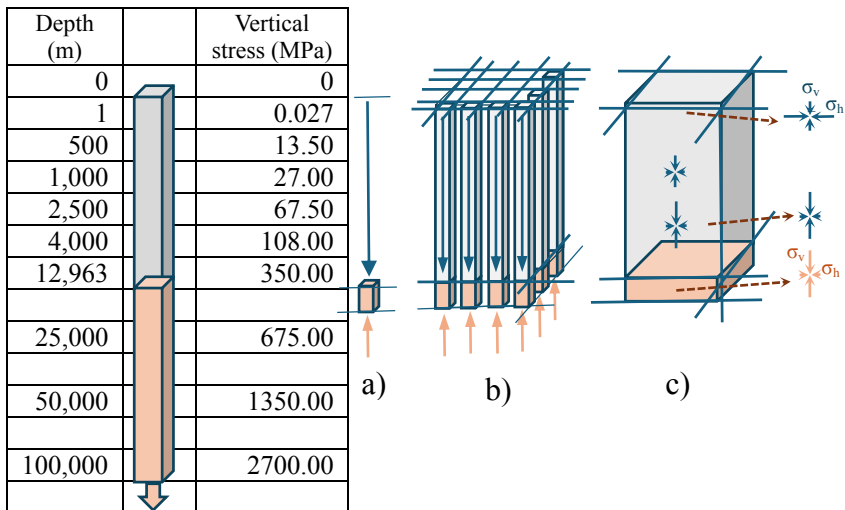


Figure 3. a) Vertical stress calculated according to the equation ($\sigma_v=0.027z$) supplied by Brown & Hoek (1978), b) Conceptually isolated individual columns, ($V=(1m^2$ base area). (12063m depth)) form the vertical stresses tabulated, c) Isolated volume selected from Earth crust which includes vertical and horizontal forces in different depth levels (intensity of them σ_v and σ_h change with depth).

Thus, if there is no other influencing factor on solid Earth mass (rocks), all the “rock material” samples could be crushed and fully fractured due to σ_v just below this 12963 m depth. If the Earth crust is considered as a combination of unattached isolated volumetric prism with square (1m^2) base area (Fig.3b), the downward vertical stress is calculated for the base of this prism at the depth of 12963 m is 350 MPa. This value is the same for all the neighbouring isolated prisms shown at Fig. 3b. These prisms are hypothetical and their loading conditions do not include any other forces besides the Earth gravity. However, the Earth crust is a solid rock mass complex that includes; different rock formations, numerous faults, folds, fractures and too many structural defects. These continental solid rock plates seem to have been displaced over the Earth’s magma layer due to the Earth gravity and continental drift forces are the main forces affecting the Earth crust rock masses. Their combined influences then form the insitu stress state at any locations positioned in 3D at the Earth crust.

On the other hand, Hoek, (2007) supplied also the following consideration which enhance engineers’ insitu σ_v & σ_h related background knowledge. By using the general insitu σ_v & σ_h estimation approach, rough values of these stresses which are influencing a tunnel positioned 1000 m deep in the crust could be calculated as; $\sigma_v = 0.027 (1000\text{m}) = 27 \text{ MPa}$. Assume that for a supplied field data; $k=1.3$, $E_h=75 \text{ GPa}$ and $\sigma_h = 35.1 \text{ MPa}$ values could be determined for the targeted tunnel positions. However, Hoek (2007) wrote that these stress outputs “likely to exceed the strength of the rock and that the question of stress measurement must be considered in more detail”. Thus, Hoek here pointed out the overestimated results originated from the graphs (general estimation) given in Fig.1c & 2.

Researchers in time-dependent strength characteristics of rock masses have supplied that the strengths of the rocks are generally decelerating when they have been kept under long-time persistent overburden loads. Thus, the example supplied above in Fig.3a should then be re-evaluated for time dependency of the rock masses, (Fig.4). If the strength of the “diabase rock material” tested in the rock mechanics laboratory was obtained as 350 MPa, due to insitu conditions (including discontinuities, water contents, weakness

zones etc.) uniaxial compressive strength of the “diabase rock mass” should then be less than this lab. value. In common consideration, 1/8 or 1/10 amount of “strength decreasing ratio” is mentioned for the UCS values obtained from the “rock materials”. Then the diabase rock mass uniaxial compressive strength can be considered around 35-50 MPa. Actually, when the strength of the diabase rock is considered through its geological features and the time of its orogenesis, the strength of diabase rock mass has changed gradually, (Fig.4). The strength of the isolated diabase rock material cannot be similar for the diabase rock material samples taken just after this rock’s formation time from hydrothermal fluid, (UCS- t_0), and the diabase rock samples of current sampling time, (UCS- t_{sampling}), for the lab. tests. Extended period of 3D loading time decreases the strength characteristics of the diabase. This is time-related strength value deterioration including creep behaviour of the solid rocks. It can also be thought that the strength values of any rock materials can be different in future (UCS- t_{future}) if it stays continuously under (constant or variable) 3D loading states.

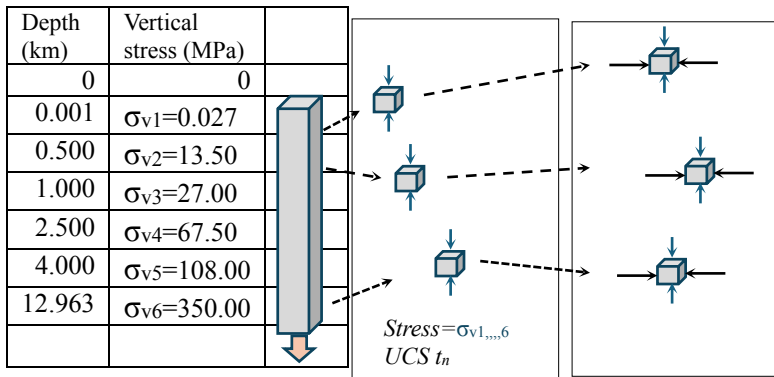


Figure 4. Vertical stress calculated, ($\sigma_v=0.027z$), over conceptual unit cubes of massive rock mass in different depths. When the time-dependency of the rock strength is under consideration, if the same vertical stresses are effective on the cubes, their strength values are expected to be differentiated as the time is changed (UCS- t_n).

There are also other influencing factors on the strength values of the rock masses. Discontinuity content differentiations are prime factors in this consideration. In addition to these features, different depth levels in Earth crust could have their different levels of 3D [σ_v , $\sigma_{h(max)}$, $\sigma_{h(min)}$] stresses. For the similar example case, (including the diabase rock material test samples), expected strength values which can be obtained through rock mechanic laboratory tests then should be differentiated according to the test samples locations, (depths and loading-time related factors, etc.). These influences can be considered in a logical sense but the levels of their impacts need to be evaluated through comprehensive research activities.

These researches may include if the vertical stress level originated due to weight of overburden rocks have any undulations due to differentiating gravity value (intensity), and the overburden thickness (depth) since at the beginning times (Eras) of the Earth's crust. Rock engineering context had initiated the definitions of rock strengths in different applied influences like; compressive, tensile, shear, impact, bending, etc. forces). Classifications of rock materials according to their compressive strength values were an early attempt to define differences in "rock material" behaviours even for the same rock type. "Rock mass" classification systems (which take account of offered expertise rating procedures) have then been introduced to overcome "rock mass" characterisation in the context of rock engineering. These systems can also be accepted as definitions of expert-knowledge and engineering-expertise, (recommendation, advise), transferring schemes as well. Providing rock failure criteria and stress-strain calculations (through finite element methods, discrete element methods, etc.) have supplied deformation values for the engineered project sites to compare (analyses, evaluations) with the actual field test results. As the rock engineering researchers have pointed out, additional rock mass strength differentiation could be the combined influences of; discontinuities, groundwater saturation cases, 3D stress differentiations in magnitudes & directions, time-dependence behaviours for the applied 3D stress states, etc.

If the time-dependency on "rock material" or "rock mass" strength variations is selected for a research case, vertical stresses might be calculated according to the equation, $\sigma_v = 0.027z$ (Brown & Hoek, 1978) for the conceptual unit cubes of massive rock mass at

different depths. When this conceptual research case enhanced to include time-dependent strength behaviours of the assumed rock cubes, type of strength values (compressive, tensile, shear, etc.) should be supplied with the indications of time parameter, (t_n), as well (*like: t_0 : strength values just after the rock orogenesis, $t_{sampling}$: strength values for the sampled rock materials or rock masses, t_{future} : strength values of the same rock types for the case samples in future time*). This conceptual consideration is an example which defines “dynamic characteristics” of rock strength which need to have re-evaluation in rock failure criteria by including time as an effective decision parameter.

In the rock strength context, one of the hard rock materials was listed as granitic rock (Griggs, 1939b). He wrote that; “the normal compressive strength of granitic rocks tested in the laboratory is 2000 to 3000 kg/cm²”, (around 196 - 294 MPa). Actually, these rock material strength value intervals are high enough to continue further analyses for the definition of the rock discontinuity properties and rock classification features for specific rock engineering projects. Griggs added also that high horizontal stresses in the Earth crust influence the strength of the rock masses, “greatly increase this strength”. He noted also that “high temperature, solutions, and long periods of stress applications, undoubtedly change the strength of rocks” as well.

Thus, when engineers have involved projects dealing with the strengths of the rock masses in/on the Earth crust to supply their design models and engineering considerations, they need to analyse primary insitu stresses and their 3D directions, (even in time-scale for certain project types). Engineers should include all the influencing forces to form additional stresses on the targeted rock masses, and the influences effective on the strength of the rock masses like; time, groundwater, natural gasses, temperature, chemical reactions, etc.

Rock strength characteristics in the Earth’s crust

Stress-strain differentiations in uniaxial compressive strength, UCS, tests result in different curves to characterize the rock material behaviours under ISRM uniaxial compressive test procedure. The resultant curves can also be evaluated for the rock materials

toughness characteristics through their covering graph areas under their stress-strain curves. These areas are rock materials' toughness values and they are related to the energies stored in the rock materials before their total collapses, failures. In a conceptual approach, it can be said that the failed rock material samples in the UCS tests are releasing most of their stored energy during the tests. Small part of this energy may stay in the broken rock fragments as the locked energy. When the UCS test times in concern through applied standard loading rates in the hydraulic press, time to handle brittle and ductile rock behaviours are possibly obtained in different time periods. It depends on the type of rock material, even in the same rock type, it can possibly be different. Ductile behaviours can also present strength softening and strength hardening type failure types as well which influence the breakage time of test samples differently. Beside the toughness values obtained from standard rock materials' UCS tests, these values can also be determined (with their energy storage conditions) in different UCS test procedures including time-dependent behaviours of the rock material samples. This procedure contains constant long-lasting vertical load, (lower than their UCS values obtained under ISRM test standards), application to the test samples. Applying low level vertical loads in long periods of time causes creeps at the rock samples which means the rock materials are getting failure stages by supplying strains in those long-periods of loading time. In these cases, areas under the stress-strain curves of these creep behaviour tests should logically be different from the ones obtained from standard ISRM test procedures for UCS.

When the targeted parameter is selected as the energy stored in the rock materials before their failure in the UCS tests, loading rates then directly influence the resultant stored energy levels. Force acting to rock masses in Earth crust are listed before, when the resultant 3D insitu stress levels are considered, overburden loads due to gravity can hypothetically be thought as “stable long-term stress cause” in the Earth crust (at least certain period of time interval in geological eras). Gravity differentiation even in minor levels might also be evaluated if there is a requirement in the projects. The other main influencing force on the Earth crust is caused by “viscous drag of convection currents in the substratum” (Griggs, 1939a), and its effects are continental drifts among the plates of Earth crust. Drifts

of the plates are different in amounts and directions over the mantle. Since one of the influencing factors of insitu stresses is the continental drift related forces, the resultant insitu 3D stress fields in certain Earth crust location are then in different influencing levels as well. Differences in the continental drifts' directions and resultant 3D stress states in geological eras have provided time related differences as well. Therefore, obtaining UCS test samples from the borehole carrots which were drilled and obtained from different depths of Earth crust should include close examination of 3D stress-states at that depth levels as well. Because each UCS sample obtained from these carrots has its background 3D loading history according to the depth.

When the time-dependency is considered for the strength of rocks; Griggs, (1939b), words given above shows that recognition of long-term loading effects on the strength of rocks since the early progresses years of rock mechanics. Griggs presented his reasoning in rock deformations as the results of experimental works covering "the flow of rocks", (Griggs, 1940). He pointed to the following "environmental factors" which were essential to be studied for their influences on the time-dependent strength characteristics of rocks; a) confining pressure, b) shear stress, c) temperature, d) time, and e) the presence of solutions. He supplied tested rock creep graphs of Alabaster rock samples surrounding with H₂O and HCL solutions (with 205 kg/cm², (20.104 MPa) loading in 24° C). He wrote that creep "was considerably more rapid" for the tests including HCL solutions than the ones having only water as a surrounding fluid. His findings included creep deformations of Alabaster rock samples tested under constant vertical loads [vertical stresses: a) 9.81 MPa, b) 12.26 MPa, c) 14.71 MPa, d) 17.75 MPa, e) 20.10 MPa, f) 24.52 MPa, g) 29.42 MPa] surrounding with distilled water in 24°C testing temperature conditions for 100 days testing time. Creep deformations here seemed lower but stayed extended for low level of vertical load values, on the other hand high level of vertical loads caused high creep deformations in relatively short periods of time. He wrote the followings for the creep tests of Alabaster; "Although the normal strength of the alabaster is greater than 500 kg/cm², (49.03 MPa), we see here that when immersed in water and subjected to a differential stress of 300 kg/cm² (29.42 MPa) it flows very

rapidly, and rupture occurs in less than 3 days of constant application of this stress difference”. Whereas, creep deformations (flow of the sample) was “at a slower rate” for the test performed under a constant stress level of 24.52 MPa, Griggs (1940).

Hardy (1959) mentioned early studies in rock related strength tests and he wrote that “Early in the investigation, it was realized that the test results were influenced by the rate and duration of loading”. He mentioned the limited works on time-dependent properties of rock for those years. He wrote about Griggs (1939b) works and he added that there were “very little appears to have been done” about creep behaviours of rocks in the late 1930s. Hardy pointed in 1959 that creep behaviour of rocks is required to be understood for “further development of research in the fields of underground failure, comminution, explosives, and seismology”. Lajtai, (1991), mentioned that time-dependency testing of rock mass had been prevented due to practical considerations. According to him, “the influence of time on long term performance at the site scale has been long recognized”. For instance, he pointed to Lauffer (1958) work which had noted “time and span as being the most important parameters in tunnel stability”. As Lajtai stated that time influences rock strength and deformation, even the hard crystalline rock strengths are decreased under long-term static and dynamic (loading rate variations) types loading conditions. Lajtai reported in 1991 that, “most rocks” that stay under static long lasting loading conditions “suffer a reduction in strength of about 50% (Lajtai & Schmidtke, 1986; Lajtai & Bielus, 1986)”.

As it is stated before continental drift displacements originated by “viscous drag of convection currents in the substratum”. When time-dependent rock behaviours are under consideration, rock masses under long-lasting overburden loads (due to gravity) and stresses originated due to convection movements are the main factors to be focused. Stacey (1963) mentioned about the assumption where “the whole mantle” is “undergoing convective motion with a uniform strain rate”. He wrote that “the average stress causing the convection”, “may be equated to the average creep strength of the mantle”. Stacey predicted “not less than 1 cm/year movement in the mantle” to have continental drift. Thus, “the maximum creep shear strength of the mantle consistent with convection of 1 cm/year is then

3000 kg/cm² “, (294.2 MPa). According to Stacey “this is not an unreasonable figure”, (Stacey, 1963).

Increasing temperature of the rocks and increasing overburden stress on them are known facts for the rocks situated in deeper and deeper locations. Stacey presented Fig.5 to illustrate these relations together with the creep strength differentiation curve with depth. He proposed that the creep strength at near surface levels is about 1800 - 1900 kg/cm² (176.5 - 186.3 MPa) and it decreases down to 550 - 650 kg/cm² (53.96- 63.7 MPa) at the depth of around 100 km. Then the creep strength level supplied in increased manner to reach 1100 - 1200 kg/cm² (107.9 - 117.7 MPa) levels at 300 km depth where overburden stress, pressure, is about 60000 kg/cm² (5884 MPa) and surrounding temperature around 600°K. When the strength of the rocks in deep Earth crust is under consideration, the rheological behaviour description given in jbp (2020), can be reviewed to evaluate rock mass folds in ductile conditions.

Think about the “rock mass” which is a solid medium, massive or fractured, including their different natures of chemical compositions, discontinuity content, and mineral grain differences. Understanding strength characteristics of the “rock material” samples obtained from this rock mass through standard ISRM laboratory tests. If the strength test durations were recorded and averaged for a rock material, it can be called also as “Testing Time - Rock behaviour”, (Tt-Rb) for the standard loading rates at the standard ISRM test procedure. Further strength characteristics can also be considered for extra short, (St-Rb), and long, (Lt-Rb) periods of testing times. Thus, defining different mechanical behaviours of “rock materials” and “rock masses”, actually directly depends on time-dependent characteristics of the performed tests. The researchers & engineers working on rock behaviours should follow standard ISRM tests procedures but they should also be known for time-dependent behaviour of the rocks they are concentrated on for their project decisions. Actually, as the engineering projects leaned gradually into geothermal energy sources, and urban underground spaces, time-dependent rock strength behaviours need to be researched in more detail including the influences of porosities, cohesions, friction angles, groundwater contents, etc.

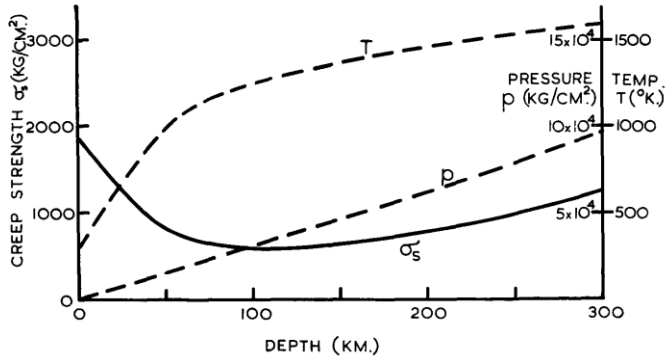


Figure 5. Creep strength differentiation with depth of Earth. Temperature and overburden stress are also predicted to change (Stacey, 1963).

In jpb, (2020), it was pointed to rheological behaviour which is a kind of mechanical behaviour of the lithosphere and it was written that it means “knowing how it flows”. When considered the solid mass is Earth crust, the influences of; i) stress (*due to Earth’s gravity and other forces influencing the crust*), ii) strains (*which are the results of the applied stresses*), and iii) time (*which is the duration of the influencing forces*) are important features to be considered while researching about the faults, folds, thrust, etc. In Earth crust, 3D stress-strain conditions depend also on “*the thermal structure, the fluid content, the thickness of compositional layers and various boundary conditions*” for the targeted positions of the crust (Jpb, 2020). When the time-dependent behaviours of engineered structures, considering St-Rb and Lt-Rb is meaningful by referencing standard Tt-Rb conditions. But when the time considered for Earth crust orogenesis, duration of dynamic and static load applications can also be defined as, (Jpb, 2020); i) “Up to hundreds of seconds, (the time scale of seismic waves)”, ii) “Over a few to thousands of years (e.g. load of ice cap)”, iii) “On long geological times (more than 1 million years)”. Deformations observed in solid materials including rocks can be defined in their elastic and/or plastic behaviours. These are additional definitions for rock behaviours like; recoverable “*elastic deformation & thermal expansion*” and/or permanent deformation “*plastic & viscous flow, creep, brittle deformation, cracking-faulting etc.*”, (Jpb, 2020).

Influences of insitu stresses on engineering works

Fairhurst (2003) was one of the researchers who concentrated measurements of stresses in the rock masses. His focusing statement in one of his paper was underlining the rock mass stress conditions as; “the distribution of forces in rock masses is a central concern of rock mechanics, both with respect to understanding basic geological processes such as plate tectonics and earthquakes, and the design of engineered structures in and on rock masses”. Fairhurst defined the main sources of force acting on the Earth masses as; gravity and tectonic forces (due to crustal movements). Stress states in rock masses have their complex structural conditions, insitu stresses and rock strength interactions through the time after the rock orogenesis have their own special conditions which cannot be appraised totally. The rates of 3D rock loading and corresponding strains-to-fracturing circumstances in full scale of rock masses’ existence period (as a part of Earth crust) are complicated to be fulfilled. These stress-strain relations occurred in the past periods of time, influence surely the stress and fracture states of the rock masses found at their current positions in Earth crust now. However, determination of the state of stress in 3D conditions and fracture, (discontinuity), distributions in rock masses help the design engineers working at the rock related projects. Leeman’s (1964), reviews about the rock stress measurements were then indications of this subject importance.

For instance, Hast, (1967), mentioned “the view” which engineers have held that “the bedrock is the reliable, stable foundation on which a building can be erected without risk of damage through movements of the foundation”. Hast added that “It is assumed that the only appreciable and potentially dangerous forces normally acting in the solid rock are the vertical ones due to the weight of the overlying material”. However, as Hast noted, these assumptions and views were not “consistent”. According to the author “the bedrock is the outermost part of the solid crust, and far from being free from horizontal forces and shearing stresses, it seems to be the site of one of the greatest stress fields existing on the planet; of this field nothing substantial is yet known”. He wrote that the force at the back of seismic evidence, formation of mountain

chains, the secular uplift and depression of land masses & seabeds has evidence of horizontal stress involvements.

Hast, (1967), supplied examples and graphics of horizontal stress measurements obtained in different depths of mines (up to 1000 m). Horizontal stresses obtained from the Fennoscandian bedrock resulted in “the horizontal principal stresses $\sigma_1 + \sigma_2$ is 180 kgf/cm² at ground level”. The author reported that a similar sum of the horizontal principal stresses at 100 m depth was 300 kgf/cm² (which was “10 times greater than the dead weight”), and at 1000 m depth was 1000 kgf/cm². Similar report was given by Kropotkin, (1972), as well. He mentioned stress measurements at mines and he wrote that the results “suggested that much of the Earth’s crust is in a state of horizontal compression”. He also pointed out that “the average of the two principal horizontal stresses usually exceeds the hydrostatic (geostatic) pressure”. Kropotkin wrote the stress differentiations in Earth crust and he supplied the earlier studies concerned about Earth crust related vertical and horizontal stresses including the studies which had mentioned the changes happened in the crust radius, (expansions, contractions) in earlier geologic times. Bamford, (1976), wrote that “measurements of vertical and horizontal compressive stresses in rock masses show a global tendency for a linear increase with depth, with the horizontal stresses being a function of, and greater than, the vertical stresses due to gravity”. The author wrote about the studies which had mentioned the evidence of rock mass failures caused by horizontal stress fields. He wrote about: the Hast’s “examples of large scale rock failures” due to “horizontal maximum principal compressive stresses”; Brown et al. (1970) report about a dam site where there were tension fractures at Precambrian gneiss originated due to dominant horizontal compressive stresses; Earthquake followed after the filling of the Koyna reservoir in 1967 (Balakrishna & Gowd, 1970; Sbar & Sykes (1973) report mentioned about the rock mass buckling upward at Eastern North-America due to high horizontal compressive stress and quarrying influences.

In 1993 Cornet surveyed the insitu stress measurement techniques available. He listed them as; “borehole deformation cells, borehole inclusion stress-meters, door-stopper, hydraulic jack methods, the photo stress method, resistivity and sonic methods”. He

noted the review studies about insitu stress measurements realised by Fairhurst, (1968), Leeman, (1969), (included 350 references, as Cornet reported), Kovari, (1977), and Stephansson (1986).

When the underground voids, cavities, caves, and other spaces are considered, induced 3D stresses developed around them have characteristics dependent on primary 3D field stress states, and the rock masses behaviours there. At the beginning of this Century, these stresses were explained with the knowledge of information presented for the Earth crust related movements, faulting and folding etc. concepts. Works developed to explain solid material fracture reasoning have then applied to rock mechanics subjects through the rock masses in which massive and then discontinuous material characteristics (natural, solid, Earth crust material). Mine galleries, tunnels and excavated spaces for different human requirements have their prerequisites including safety & health rules. Therefore, their stabilities are main issues to be followed in their design which primary insitu stresses play main role in the design considerations. Underground excavation related studies include the rock mechanics concepts which are directly connected to 3D induced stress distributions around the excavated spaces. Gercek & Genis, (1998) evaluated the stabilities of underground spaces which included the insitu (primary) stresses' directions. The authors wrote about instability case potentials for the underground openings which are influenced through unequal insitu principal stresses (σ_v , $\sigma_{h(max)}$, $\sigma_{h(min)}$).

Engineers who have to decide on rock mechanics related concepts in a project, would like to determine accurate and up-to-date 3D insitu stress state of the project sites. Understanding the cause of the field stresses, their magnitudes & directions are required for sound design works in mining, civil, oil, geothermal, ground, rock engineering fields. Stress field data help engineers to understand rock formations' structural behaviours, (faults, folds, tectonic plate displacements, etc.), and fluid & gas, (groundwater, oil, natural gas etc.), flow through them. Fairhurst (2003) also pointed out the coverage of the engineering projects, and he stated that parameters required for the specific projects need to be evaluated according to the possible opportunities of the planned and operated activities. Thus, measuring "the stress-state and the

coverage engineered works” before a tunnelling project are not the same scale with “the cases where there is a tunnel advancing through the rock masses”. In the second circumstances, tunnel convergences can possibly be recorded for the specific time periods to estimate mechanical behaviours of the rock masses surrounding the tunnels.

Mark, (1991), stated the horizontal stress influences on longwall coal mining operations and wrote that “horizontal stresses can also be highly destructive”. He mentioned the presence of E-NE horizontal stress fields at Eastern US coalfields. He had compiled the studies of 20 years up to 1991 through 25 mines, and literature; and he wrote that; coalfields at Appalachian & Warrior coal basin mostly (67% of the measurements) have maximum horizontal stress, $\sigma_{h(max)}$, directions in between N80E and N50E. He reported also that the magnitude of $\sigma_{h(max)}$ was determined more (by a factor of 2 or more) than vertical insitu stress, σ_v , at 90% of observations. He studied influences of insitu horizontal stress on longwall mining openings through the collected information from the site works of 45 longwall operations in the US and information obtained from literature. According to Mark, (1991), (after determination of horizontal stress problems), longwall entry layouts arrangement is “often the most effective control strategy”. Thus, $\sigma_{h(max)}$ direction and the longwall gate entries should be as parallel as possible. The angle between these two directions changes their interaction impact. In later years, as Mark, et al. (1998) pointed out, the first study about the quantification of the longwall headgate stress concentration through 3D finite element modelling was supplied by Su & Hasenfus, (1995). Mark, et al. reported that Su & Hasenfus finding was pointing the angle between longwall headgate directions and the maximum horizontal stress, $\sigma_{h(max)}$, influencing the headgate stress concentration and they supplied their interchanging graphics. According to them; when the angle is changing between 0°-90° the headgate is under “stress concentration”. They pointed out that the worst concentration is obtained for 70°. The headgate “stress relieves conditions with the angle between 90°-180° (with the best headgate stress conditions at 160°).

Dolinar, (2004), studied the insitu horizontal stress & strain differentiation at the bedded formations in Eastern & Midwestern US. He analysed the cases (40 data sites) for their depth and the

elastic modulus of rocks there. He mentioned the low strain zone effective at the Eastern US and high strain zones at a portion of Southern West-Virginia. This study was performed at 40 mine sites in the Eastern US and the results were supplied as relations (linear regressions) among; horizontal stress, elastic modulus, and depth [site depth; 275-2300 ft, (84-701 m)]. Dolinar, (2004) wrote in his thesis that “excess maximum horizontal stress”, (Bickel, 1993), and “maximum horizontal stress” versus “the elastic modulus” regressions provided R^2 values in the range of 0.71-0.91 for the sites; Central Appalachian, Northern Appalachian, Eastern mid-continent, Eastern US, regions. Dolinar (2003, 2004) wrote that it had been already revealed, insitu horizontal stress increase with the depth from the surface of the Earth’s crust, one of the factors here is the increase of vertical stress with depth, the other component of the horizontal stress is formed due to the influences of the other forces caused by tectonic, thermal, and the other forces listed earlier. Then, excess horizontal stress was defined as “the component of the horizontal stress that exceeds that due to gravity”, (Dolinar, 2004).

Dolinar in 2003 noted that studies on maximum horizontal stress in the US had already defined horizontal stress directions. But according to him, their magnitude differentiation “is not very well understood”. Since the horizontal stresses have caused “severe ground control problems in mining, oil, and problems in underground coal and limestone mines throughout the Eastern US”, he worked on the subject to define horizontal stresses magnitudes and their variations there. Dolinar (2003) stated that “the elastic modulus is the main factor controlling the magnitudes of the horizontal stress”. He wrote that 81 to 91 % variations of the maximum horizontal stresses determined for his study sites in the Eastern and Mid-Western US were “explained” by the elastic modulus of the rocks.

Vasil'ev & Vasil'ev, (2013), presented that horizontal stresses which are higher than vertical stresses in the Earth’s crust “are initiated by contact friction between rock mass layers”. The authors summarized the general coal mining stress conditions as the mines opened in deeper locations. They wrote that as the mining operation “advances to deeper levels, stress–strain state of rocks is altered quantitatively and qualitatively and mine safety is worsened, which

is also contributed to by seismic events, rock bursts and shocks". They stated also that Dinnik's concept (Dinnik, 1925; Dinnik, et al. 1938; Erzhanov, 1966) was used in calculation of stresses in rock masses, especially horizontal stresses. Vasil'ev & Vasil'ev, (2013) pointed to the statement given by Kurlenya & Kulakov, (1998) which was; "a watershed in the rock mechanics was the discovery of horizontal stresses 3-10 times as high as the vertical stresses in the 1960s". Vasil'ev & Vasil'ev, (2013), wrote also about Coulomb's wedge theory, (Coulomb, 1776; Wikipedia, 2025b), which "has physical formula of horizontal stresses, taking account of rock strength, although this formula does not yield values of horizontal stresses higher than vertical stresses". According to Vasil'ev & Vasil'ev, (2013), note, the Dinnik formula "was derived from the condition of vertical compression of a body with absolutely rigid side walls that resist the vertical loading. Therefore, horizontal stresses cannot be higher than vertical". Thinking of the origination of horizontal stresses in the Earth's crust has been one of the concerns to understand faults, folds, over thrust faults, earthquake inclusive rock masses behaviours since early years of mechanics related to Earth crusts. Since the early stress-strain measurements had related to deep mine conditions and deep borehole drillings, the stress-strain conditions embedded at the rock masses around the measurement sites might have been debated accordingly. At this point, studies supplying new data and understanding about the movements detected for the plates of the Earth with related vertical & horizontal stress fields are going to enlighten the steps in understanding rock behaviours that constitute the Earth's crust. Vasil'ev & Vasil'ev, (2013), mentioned the basic principle approaches for vertical & horizontal stress conditions in the crust. Then they presented an understanding for higher horizontal stresses in the crust. They proposed a fact that "the contact friction between layers in rocks, specifically, between roof and stratum, and the elasticity and plasticity approaches to describing the said mechanism are quite applicable". According to the authors, if layered rock masses are "under the action of ground pressure", the weaker beds, (rock layers), "deform horizontally", "toward an outcrop, which causes friction stresses, and the latter give rise to normal horizontal stresses".

Agapito & Gilbride, (2002), pointed out the importance of the horizontal stresses in mine stability. He noted that high horizontal stresses had been recognised at mines “as causes of sudden failures, including violent bursts, at shallow depths”. According to the authors, recognition of high horizontal stresses which influence underground spaces’ roof stability was realised 1940’s. He mentioned the “subsequent stress measurements” in the world which had been realised and showed that “horizontal stresses much higher than vertical stresses in many areas of the world”. These authors listed the “evidences of stability problems” that happened due to high horizontal stresses” on the bases of earlier studies. Some of these studies; Rock burst problem during tunnelling, (*depth < 150 m; the rock mass was massive granite; “high horizontal stress was linked to nearby thrust faulting and tight folding”*), (Bird, 1942); Rock bursting problem in the Khor Gold Field, India. (*depth ~150 m; “measurements showed horizontal stress greatly exceeding the vertical stress”*), (Isaacson, 1957); Stress measurements in igneous & metamorphic rocks (*“horizontal stress, as much as 8 times higher than the vertical stress”*), (Terzaghi & Richart, 1952; Terzaghi, (1962); Survey on stress measurements throughout the world (*“horizontal stress exceeding vertical stress at depths of less than 1000 m and tending to equalize at greater depths”*), (Hoek & Brown, 1980); White-Pina copper mine, Michigan, US, study (*where sedimentary rock strata were in concerns, high horizontal stresses were realised due to “low angle shear failures near the roof corners of entries, crushing at mid-span, lateral offsetting of strata in roof bolt holes”*), (Parker, 1966); Ground problems in coal mines at South Central West-Virginia, US (*overcoring measurements “indicated that high horizontal stresses were probably the major cause of ground problems”*), (Aggson, (1978a, 1978b); Horizontal stress determination works for Bechley Seam in 5 coal mines located South central West Virginia, (*“confirmed the presence of high horizontal stresses, 3 to 5 times higher than the calculated vertical stresses”*), (Agapito et al. 1980).

The statement given by Agapito & Gilbride, (2002) is presenting the importance of the in-situ stress measurements for engineering works & structures in rock masses. They wrote the evaluation of Mark & Mucho (1994) as; “a review of longwall mine

design for control of high horizontal stresses found that more than 20 years after recognition of their impact, the industry seldom considered horizontal stresses in mine design". According to Agapito & Gilbride, this fact "was found perplexing since some mines had been forced to close because of stability problems caused by high horizontal stresses". These authors performed numerical analyses by using distinct element code, UDEC, (Itasca, 2000), to understand failure conditions by differentiating insitu stress conditions. Their analyses supplied further roof failure conditions when the horizontal stress to vertical stress conditions changed from 2:1 state to 3:1 state. Mark & Gadde, (2010), stated that the works performed during the 2000-2010 period had shown "clearly that horizontal stress is a critical factor affecting roof stability in underground coal mines". Their study related "deep-seated and shallow in situ stresses in several of the world's coalfields". This study included the evaluation of "more than 350 stress measurements from underground coal mines". They concluded that horizontal stress magnitude "increases with depth, at rates that range from 0.8 to 2.0 times the vertical stress, just as the *WSM critically stressed crust model* predicts", WSM represents here the "World Stress Map", (Heidbach, et al. 2016; Heidbach, et al. 2018). Mark & Gadde, (2010), noted that "the stress regimes encountered in underground coal mines are closely linked to those that exist deep in the Earth's crust".

Genis's (2002) work which was reviewing induced stress related approaches for cavities to evaluate deep seated underground galleries under static & dynamic effects. Their influences at these galleries were worked together with their stress-strain states around them. He concluded similar results defining; longest axis of underground spaces in underground should be along with $\sigma_{h(max)}$ (maximum insitu horizontal stress) direction which is a good solution if the vertical insitu stress, (σ_v), is not higher than the horizontal ones ($\sigma_{h(max)}$, $\sigma_{h(min)}$). For the case of insitu $\sigma_v > \sigma_h$ conditions, it is better to have galleries where their longest axis of underground spaces in underground coincide with $\sigma_{h(min)}$.

Gadde, (2003), conducted 3D finite element modelling study to understand influences of the angle between insitu maximum horizontal stress, $\sigma_{h(max)}$, and longwall entries and intersections. The

author also worked about the effects of in-situ stress ratios on the longwall openings related to mine developments. He took “typical” entry width and lithology for his models like the ones at Pittsburgh seam workings in the US. According to his results for the stabilities of longwall entries; “the best condition” occurred when the entries were excavated parallel to the direction of $\sigma_{h(max)}$. He wrote also that “the worst condition” was the 90° case for this angle. Gadde mentioned the work of Gale (1991), for the location of “cutter” in the mine openings. Actually this work outputs applicable only to longwall face areas which have single rock material, and it “cannot explain the change in cutter location behind the face”. Gale (1991) provided the orientations (angels) between longwall entry directions and $\sigma_{h(max)}$ and it was noted the stability conditions for the entries as; 0°: good conditions; 45°: roof/floor breakage biased; 90°: roof/floor breakage centred (Gadde, 2003).

Yilmaz, (2006), studied coal mining layouts for the stability of their underground openings. He specially worked on the instabilities caused by anisotropic insitu stresses through 2D-3D numerical analyses. In these analyses he worked on the effects of anisotropic horizontal stress on the direction of the excavations. He concluded that coal mine pillars’ critical dimensions depend on the maximum horizontal stress directions as well.

Mark, et al. (2006) focused on the importance of in-situ horizontal stresses in underground coal mining. Their paper abstract included the statement that; “during 1995 alone”, insitu horizontal stresses “were largely responsible for the closing of two longwall mines in the United States”. These authors mentioned also the stress measurements results in mines located in Eastern US and they referred to the work of Mark & Mucho (1994) which stated that the magnitude of insitu maximum horizontal stress are “typically” greater than the 3 times of insitu vertical stresses, [$\sigma_{h(max)} > (\sim \text{typically}, 3.\sigma_v)$]. Since there are two perpendicular directions in horizontal plane, the authors noted that the maximum insitu horizontal stresses, $\sigma_{h(max)}$, which have “typically E-NE direction” in Eastern US) are 40% higher than the insitu minimum horizontal stress, $\sigma_{h(min)}$.

Gray, et al. (2013), studied in-situ “stress fields in two coal mines and in a coal seam gas field in Eastern Australia at depths of up to 600 m”. The stresses measured by using “multiple overcore measurements (50 to 100 per site) undertaken from the surface at each site”. They concluded that variations observed in the measured insitu stresses through sedimentary rock sequences. These variations “influenced by local geological structures such as faults and folds. It is found that faults are invariably stress relief features”. According to these authors, sedimentary rock strata which have “stiffer” in character “tend to carry more stress” than the strata which have lower modulus (elastic modulus). That means, horizontal stress magnitudes which can be determined from sedimentary rock layers positing downward sequence along the borehole “widely varying” as well. Gray, et al. (2013) stated that by using; tectonic strain, elastic modulus and Poisson’s ratios of the rock masses “it is possible to calculate the stresses that exist”. They provided a graph illustrating changing of maximum and minimum stress distribution in different strata with depth. In this example, maximum tectonic strain plotted as getting increased linearly with depth (more or less; 2 MPa increase, (up to around 10.2 MPa), in the depth from 400 to 555 m); the condition for minimum tectonic strain was plotted in reverse manner and this strain decrease linearly with depth (more or less; 1 MPa decrease, (down to around 2 MPa), in the depth from 400 to 555 m); In these depth interval the rock strata downward sequences, (siltstone, sandstone, coal, carb shale), their elastic modulus, and Poisson’s ratios were determined. Since the maximum elastic modulus value had been obtained for the sandstone strata here (by covering the influence of Poisson’s ratio of the layer), the maximum and minimum horizontal stresses levels were determined for the sandstone layer. The authors wrote about their measurement experiences obtained at Southern NSW mine in Australia, and stated that “how complex the distribution of tectonic strains and stresses can be in an area where there is significant structural disturbance. According to them these differentiations could be “quite sudden”. Kang, et al. (2010), reported about 204 hydraulic fracturing studies, (campaigns), which were insitu stress measurements in between 2002-2010 at 49 coal mines in China. The differences in data were related to the differences “in both the strength and deformation

modulus of strata located in varying geological environments and different coal districts”. In these measurements, when there are large faults and folds at the measurement location, change in maximum horizontal stress direction and related stress values were observed. In this work it was revealed that insitu stresses’ magnitude differentiation had the following outputs (for the performed coal mine measurements at the depth interval of 100-800 m): a) Insitu stress order-I: $\sigma_{h(max)} > \sigma_{h(min)} > \sigma_v$ “*type found mainly in relatively shallow coal mines (<400 m)*”; b) Insitu stress order-II: $\sigma_{h(max)} > \sigma_v > \sigma_{h(min)}$ “*type usually appears in moderately deep coal mines (400-600 m)*”; c) Insitu stress order-III: $\sigma_v > \sigma_{h(max)} > \sigma_{h(min)}$ “*type has widespread distribution, but appears mainly in moderately deep to deep coal mines*. They also noted that for the deep coal mine which is under wide influence of the geological structures, the insitu stress magnitude order could also be as; $\sigma_{h(max)} > \sigma_v > \sigma_{h(min)}$.

As described in the WSM web site, “it is a collaborative Project” to “characterize the crustal stress pattern and to understand the stress sources”. WSM has open-access records and covers 42830 data-records in its last release in 2016, (WSM database release 2016). These records are helpful in the analyses related to “Earth science disciplines such as geodynamics, hazard assessment, reservoir geomechanics, and geotechnical applications”. When the natural energy resources (fossil fuels, coals, mineral, geothermal, radioactive, etc.), and urbanisation requirements in/on the Earth crust are under considerations, insitu stress conditions, (influencing the targeted reservoir & orebody zones), have their critical importance to model operational projects in related engineering fields (mining, city planning, structural stability in civil engineering, underground spaces excavated for mining and urban projects like galleries, tunnels, stations, stopes, etc.

When the dynamic forces are in consideration for the Earth’s crust, earthquakes measurements have supplied information about the dynamic waves, insitu stress directions and their magnitudes as well. Irmak, (2016), for instance studied on the earthquake that happened at Bala (Ankara, Turkey) region and stated that; “especially for the middle and lower crust, for which borehole measurements are not possible, the analysis of focal mechanisms is the only tool for insitu stress measurements”. Irmak worked on the

focal mechanism of 37 earthquakes that were used to define active tectonic and present-day stress fields in the Bala (Ankara, Turkey) region. The slip rate determined for this region was 0.83 mm per year and the main maximum horizontal stress had NW-SE orientation.

Hayavi, et al. (2016), wrote also that, accurate insitu stress estimation works are important to collect information about geological formations, groundwater flow conditions, well fracturing operations, drilling operations, oil & gas production stimulation, wellbore stability analysis, and geomechanics-reservoir simulations in oil industry. They presented the results of “new method for estimation of minimum and maximum horizontal stresses in tectonically active area based on the modification of linear poroelastic model and *minifrac* test results”.

Zhang & Zhang, (2017), presented the importance of the 3D stress state determination for the oil industry, they wrote “minimum horizontal stress is very critical for fracture gradient prediction, spacing design and wellbore stability assessment”. They noted that rock masses lithological differences highly influence the horizontal stress. They presented, for instance, horizontal stress differentiation deep down to 2286 m (7500 ft). They supplied a graph illustrating change of minimum horizontal stress with the depth which “measured from min-frac tests in Colorado (modified from Warpinski and Teufel, 1989)”. The rock masses through the profile interchanging vertically in different order through sandstone, shale and coal seams. The authors pointed out that Poisson’s ratios of the rock masses have influence on horizontal stress state in the rock masses. For instance, they pointed to different minimum horizontal stress levels for sandstone and shale layers in the borehole they worked. They wrote that “it can be observed that the sandstone normally has a smaller minimum horizontal stress, because of its smaller Poisson's ratio”. The work supplied by Warpinski & Teufel, (1989), included “52 hydraulic fracture measurements of the minimum insitu stress and 22 anelastic strain recovery, (ASR), measurements”. The tests were performed “in the non-marine section of the Cretaceous Mesa Verde in the Piceance basin” in Colorado, US. The rock masses (layers) encountered, (which the measurements supplied), in this study were sandstones, shales, mudstones, siltstones, and coals. Warpinski & Teufel, (1989),

provided a table presenting the change of maximum in horizontal stress directions in sandstone and shale layers between the depth of 4906-7154 ft (1495.3-2180.5 m) (through ASR strain and orientation data). These authors wrote that the measurement “show the effect of lithology on the magnitudes of the stresses”.

In order to evaluate the high horizontal stress influences on the Pittsburgh seam longwall mine (Eastern US), the stress values were monitored at a longwall headgate by Zhang, et al. (2019). The works were performed to prevent roof falls in the headgate under high horizontal stress conditions. The monitoring works included stress changes in the pillars, deformations in the roof, and load in the cable bolts. The measurements revealed that “the magnitude of the maximum horizontal stress is typically 3 times greater than the vertical stress, and about 40% greater than the minimum horizontal stress”. The study performed about “seven cases of headgate failures caused by high horizontal stress in different coal seams in the United States” by Mark, et al. (1998) showed that “roof stability is affected, to a large extent, by rock type, entry orientation, and longwall orientation”. Karadeniz, (2019) worked on wellbore stability analyses which cover evaluation of rock strength and induced stresses variations. Boreholes related to exploration or production purposes in the Earth resources have their instability problems including breakouts (stress induced cross-section enlargements; induced stresses > compressive strength of the surrounding rocks) and drilling induced fractures (induced stresses > tensile strength of the surrounding, wellbore wall, rocks). Karadeniz (2019) studied the values and directions of insitu horizontal stresses at Kazan (Ankara, Turkey). The determined direction values were; $\sigma_{h(max)}$: N78.75E and $\sigma_{h(min)}$: N11.25W which were determined from marl-sections breakouts of a certain borehole at this region at 78-150 m in depth. The magnitudes of maximum horizontal stress were determined for marl-section together with slight differences according to the solution method for the borehole used as follows: Kirch (10.08-10.28 MPa), Barton et al. (1988): (11.42-12.40 MPa), and numerical solution used by Karadeniz (2016) by using ϕ_b (angle of half-width of breakout): (11.50-12.50 MPa), and by using rd (breakout depth): (12.46-19.20 MPa).

Iannacchione, et al. (2020) reported the layout change at The Subtropolis Mine, Petersburg, Ohio, US. This limestone mine has underground room & pillar mining methods for its operation. The authors noted that instability problems occurred due to “excessive concentrations of lateral stress caused the mine operator to implement a change in layout design”. They mentioned the mine personnel’ observations about the roof shears which have average N55°E orientation. Since the shearing directions are generally in the perpendicular to “the direction of lateral movement”, Iannacchione, et al. wrote that “the direction of the principal lateral stress should be” around N35°W, ($\sigma_{h(max)}$, the maximum horizontal stress). Due to stability problems encountered in the mine, room & pillar excavation layout (advancing) direction was changed from NS direction to the direction of $\sigma_{h(max)}$ in Feb. 2018. The studies performed to monitor the instabilities after the layout differentiation “has provided evidence that suggests the stress control mine layout can be successful in reducing strata instabilities within headings”.

Ghorbani, et al. (2020) stated that rock masses including clay minerals or anhydrite provide volumetric increase when they have opportunity to contact with water. The authors wrote that, swelling pressure limit and swelling strain limit are associated with 3 types of swelling as follows; a) Osmotic swelling (pres.lim. 2 MPa, strain lim. 25%); b) Intracrystalline clay swelling (pres.lim. 100 MPa, strain lim. 125%); c) Anhydrite swelling (pres.lim. 7 MPa, strain lim. 125%). Since the limit values are high, tunnel support systems should be different from the conventional ones. Stress occurred due to swelling of the special clay minerals and anhydrite and their levels and directions influence the induced stress conditions around underground openings. Actually, effects of volumetric increase of the swelling rocks are not similar in the directions of insitu 3D stress orientations. Hawlader, et al. (2005) stated that “the swelling deformation is anisotropic due to the inherent rock structure”. They also supplied the information by Lo, et al. (1979) who had mentioned, “the free swell potential of Georgian Bay shale”, (Canada), “in the vertical direction is three to five times that in the horizontal direction within the 2%–6% range of calcite content”. Hawlader, et al. (2005) wrote also that “these shales are typically in a highly anisotropic insitu stress state, with the horizontal stress

much higher than the vertical stress”, ($k=10$ for the rocks at the Darlington cold-water intake tunnel, Lo & Lukajic, 1984). For engineering projects, localisation of swelling rock types like shale, marl, etc.; along the underground spaces, (tunnels, galleries, etc.), under the foundation areas, and other rock mass related projects might provide different swelling outcomes in times due to their water contact opportunities (amount of water and contact duration).

At this point the research performed by Reiter, (2021), should be presented for the direction changes occurred in insitu horizontal stresses. Above, the explanation for the excess amount measured for local $\sigma_{h(max)}$ levels is supplied through the literature. Reiter pointed out the directional differences of horizontal stresses other than the expected directions according to main tectonic movements. Reiter, (2021) noted that the $\sigma_{h(max)}$ (the maximum compressive horizontal stress) direction “in the upper crust is governed on a regional scale by the same forces that drive plate motion”. However, the author wrote “*several regions are identified, where stress orientation deviates from the expected orientation due to plate boundary forces (first order stress sources), or the plate wide pattern*”. According to the author, several other stress sources had been “identified” for the cause of the horizontal stress rotation in the upper Earth’s crust. Rock mass related heterogeneities like; “density, petrophysical or petrothermal properties, discontinuities like faults” are potential causes of this stress rotation in the horizontal plane. Reiter mentioned model study outputs predict that density or Poisson’s ratio differentiation in the crust can change stress orientation (less than or equal to) 17° , this difference can be valued up to 78° for the case of elastic modulus variations in the crust. Discontinuities on the other hand disturb the rocks massive characteristics, then influence horizontal stress rotation. Reiter wrote that for the similar stiffness values of the crust, existing low friction discontinuities separating the rocks cause around 19° rotation. Then Reiter concluded that “*material contrasts are capable of producing significant stress rotation for larger areas in the crust*”.

High horizontal deformations obtained from tunnel convergence measurements at the entrance of T3-tunnels of Kirkdilim-Lacin highway (Corum, Turkey) were related to insitu horizontal stress by Atakan et al. (2021). They wrote that “the high

horizontal deformations could be caused by substantial horizontal stresses”. They mentioned that strike-slip faults’ influences might be the causes of high horizontal stress level at their study locations.

Insitu vertical and horizontal stresses can also be measured through hydraulic fracturing at boreholes. This method supplies opportunities to determine horizontal stress states at the specific borehole depths and it can be different in different depth levels of the same borehole, (where the rock mass types can also be different in different depths). Bozdogan (2022) explained hydraulic fracturing applications for thermal energy source rock masses, and described how the hydraulic rock fracture, (extensions), directions differentiated with the insitu maximum and minimum horizontal stresses. His studies were performed on the Southern flank of the Menderes Graben for geothermal reservoir potentials. He noted that his studies included determination of “the principal stress and fracture orientations that control the propagations of fractures occurring in the reservoir rock masses”. Similar works have already been followed in oil & gas industry to determine rock fracture directions and then enhance, stimulate, the fracturing propagation to step-up the productivity from the depleted oil & gas fields.

Ziaie, et al. (2023), for instance supplied insitu stress estimation which were based on the data “*gathered from 7 directional wells drilled into a strike-slip fault reservoir in Southern Iran*”. The study performed for the gas reservoir and it had been explored after the 1990s. The data collected here covered; vertical stress, minimum horizontal stress, horizontal stress direction, pore pressure, Poisson's ratio of formations. Basirat & Hassani, (2024), worked also to estimate insitu stress ratio “k” by using convergence measurement results. Their works were based on the data obtained from 16 tunnels in 5 different road & railway projects in Iran. They wrote that tunnels had overburden thickness varying between 5-350 m. They collected convergence data from 85 measurement stations. They estimated σ_v , σ_h and “k” values by using 20 approaches supplied in between years of 1976 and 2021. Since, “insitu stress versus depth diagram” plots of their data had outputted “no significant relationship”, they grouped the collected data in different ordered manners to reach any meaningful decision. They supplied a relation between “k” and depth for the rock masses which had RMR

ratings higher than 20. The regression analysis values, R^2 , (for the “k” and “depth” relations were then determined as 0.51-0.57 for the depth values changing between 10-350 m.

Another study included hydraulic fracturing data from Western Turkey realised at Thrace basin, (Celen, 2024). The researcher worked on fracture modelling through “discrete fracture network” to handle “hydraulic fracturing simulations” in “unconventional reservoir rocks” of Thrace region (including tight sandstone and gas shale formations). He simulated hydraulic fracturing with 600 m³ volume, covering vertical & horizontal well “configurations aligned with the maximum and minimum horizontal stress directions”. He wrote the data related to test-wells opened in vertical, maximum & minimum horizontal stress directions. The data included induced fractures’ trend/plunge angles, their apertures, and the fractures’ related areas & volumes in the developed model. Modelling study here included the influences of insitu stress distributions in the Earth crust section in this region and as the Celen (2024) wrote, “outcomes of this research are expected to contribute to optimizing hydraulic fracturing designs and improving hydrocarbon recovery efficiency”.

Rockbursts have occurred in underground hard rock mining conditions. Their occurrences and locations are related to 3D insitu stress states. Then, estimation of insitu stresses, (their directions & magnitudes) are important work to be realised. He et al. (2024) wrote about a deep valley tunnel in Southwest China (at the West bank of the Dadu river, Jinkouhe country, Sinchuan). The tunnel had a rockburst type problem. The authors noted that “*rockburst are expected to occur over 63.52 % of the total length of the tunnel*”. The study performed by these authors was then concentrated on the evaluation of “*insitu stress tensor in deep tunnels in hard rock starting from the geological structure, topography, and insitu stresses measured in the tunnel area, using multivariate linear regression*”. Rockbursts at the positions of the tunnels had taken place even at depth less than 300 m. The reason for their occurrences were thought by the authors as the insitu stress distribution at the valley where the tunnel had been constructed.

Conclusions

Engineering works in/on Earth crust are directly under influences of 3D stresses acting in the crust. All the forces causing these stresses, and their magnitude & direction differentiations have been important research fields for mineral, coal, oil, natural gas, and geothermal resource industries, besides civil and rock engineering concepts in general. Since, the projects include their surface and underground structures which have their particular regulations in countries, engineers should be ready to evaluate stability of the engineered structures & natural features (slopes & caves, etc.) with the coverage of 3D stress state of Earth crust. When the stabilities of man-made structures are under consideration, stresses induced due to their weights and secondary (induced) stress conditions originating because of their surface/underground excavations are prime concerns in engineering designs. Vertical insitu stress originating due to Earth's gravity has its consideration since at the beginning of the engineering works. But, horizontal insitu stress influences have been researched and quantified mostly in the last 50 years. Supplying futuristic urban underground spaces including modern living volumes, metro tunnels, depots, warehouses, shelters, etc. have their architectural, civil engineering and urban planning considerations. However, these underground structures and all the other engineered surface works should be supplied with their stability considerations. Then, 3D stress distributions in Earth crust have their effects on these works to be analysed. Insitu stress related researches and their examples in different locations for different engineering applications are reviewed here to present its significance. Experiences obtained from mining and oil & gas industries, (*insitu stress-states and related rock mass behaviours & features*), are then valuable assets for other engineering applications in geothermal energy explorations, urban underground spaces including underground cities, underground metro tunnels & stations.

References

Agapito, J.F.T. & Gilbride, L. (2002) Horizontal stresses as indicators of roof stability, *Preprint 02-056, SME Annual Meeting, Feb.2002*, 25, p27.

Agapito, J.F.T., Mitchell, S.J., Hardy, M.P., Aggson, J.R. & Hoskins, W.N. (1980) A study of ground control problems in coal mines with high horizontal stresses, *The State of the Art in Rock Mechanics, Proceedings 21st US Symposium on Rock Mechanics*, Univ. of Missouri-Rolla, pp820-825.

Aggson, J.R. (1978a) Coal mine floor heave in the Beckley coal bed, an analysis, *USBM, RI 8274*.

Aggson, J.R. (1978b) In situ stress fields and associated mine roof stability, *Soc. of Min. Eng. of AIME, Mining and Exploration Division Mini-Symposium Series*, No: 78-1.

Atakan, A., Yilmaz, M., Arslan, B., & Samur, C. (2021) The effect of horizontal-vertical stress ratio on the deformation of T3 tunnel (Corum, Turkey), (in Turkish), *MUHJEO'2021, Ulusal Müh. Jeo. & Jeotek. Semp.* Oct. 21-23th 2021, Istanbul, Turkey.

Balakrishna, S. & Gowd, T.N. (1970) Role of fluid pressure in the mechanics of transcurrent faulting at Koyna (India), *Tectonophysics*, 9, pp301-321.

Bamford, W.E. (1976) Evolution of stresses in rock masses, as related to compressive strengths and plate tectonics, *Institution of Engineers*, 76, pp63-70.

Basirat, R. & Hassani, R. (2024) Estimation of insitu stress ratio based on the monitoring results of convergence meter, *Geotech. Geol. Eng.*, 42, pp795-805.

Bickel, D.L. (1993) Rock Stress determinations from overcoring-An overview. *US Bureau of Mines Bull.* B 694, p146.

Bird, J. (1942) Rock burst - a Symposium, *AIME Technical Paper*, No:1468, May1942.

Bozdogan, O. (2022) Utilization of reservoir characterization and hydraulic fracturing for reservoir stimulation modelling of Enhanced Geothermal Systems (EGS), *MSc Thesis*, Graduate School of Science and Eng., Hacettepe Univ., Ankara, Turkey, p126.

Brown, E.L., Charalambakis, S., Crepeau, P.M. & Le Francois, P. (1970) The foundations of Daniel Johnson dam

(Manicouagan 5). *Trans. 10th Int. Cong. Large Dams*, Montreal, 1970, V2, pp631-650.

Brown, E. & Hoek, E. (1978) Trends in relationships between measured in situ stresses and depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15, pp211-215.

Celen, F. (2024) Discrete fracture network (DFN) modelling and hydraulic fracturing (HF) simulations in FracMan for tight sandstone and gas shale unconventional reservoirs of Thrace region, *MSc Thesis*, Graduate School, Istanbul Tech. Univ., Istanbul, Turkey, p129.

Cornet, F.H. (1993) *Stresses in Rock and Rock Masses*, Chapter 12 in *Rock Testing and Site Characterization, Principles, Practice and Projects* (Ed: Hudson J.A.), Pergamon, pp297-327, ISBN 9780080420660,

Coulomb, C.A. (1776) *Essai sur une Application des Règles de Maximis et Minimis à quelques Problèmes de Statique, relatifs à l'Architecture*, (Essay on the Application of the Rules of Maxima and Minima to Certain Problems of Statics Related to Architecture). *Mémoires de l'Académie des Sciences*, (in French).

Dinnik, A.N (1925) On rock pressure and the computation of vertical mine shaft shorings, *Inzhenernyi Rabotnik*, No: 7.

Dinnik, A.N., Morgaevskii, A.V., & Savin, G.N. (1938) Stress distributions around underground mine workings, *Proceedings of the Conference on Rock Pressure Control*, (in Russian), Izd-vo AN SSSR, Moscow-Leningrad.

Dolinar, D.R. (2003) Variation of horizontal stresses and strains in mines in bedded deposits in the eastern and midwestern United States, *Int. 22nd Conf. on Ground Control in Mining*, 5-7th Aug.2003, Morgantown, WV, US, pp178-185, URL: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/9293>.

Dolinar, D.R. (2004) Analysis of the variation of horizontal stresses and strains in bedded deposits in the Eastern and Midwestern United States, *MSc Thesis*, The College of Engineering & Mineral Resources, West Virginia Univ. US., p120.

Ercelbi, S.G. (1997) Analysis of in situ stress measurements, *Geotechnical & Geological Eng.*, 15, pp235-245.

Earle, S. (2021) Environmental geology, Webpage, <https://environmental-geol.pressbooks.tru.ca/chapter/Earths-interior/>, Retrieved in Jan. 2025.

Erzhanov, Z.S. (1966) A.N. Dinnik's fundamental studies on rock mechanics. *Soviet Applied Mechanics*, 2, 8, pp51-54.

Fairhurst, C. (1968) Methods of determining in-situ rock stresses at great depth. *Technical Report no. 1-68*, Missouri River Division, Corps of Engineers, Omaha, NE, US.

Fairhurst, C. (2003) Stress estimation in rock: a brief history and review, *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.*, 40, 7-8, pp957-973.

Gadde, M.M. (2003) Effect of in-situ stresses on the stability of coal mine development workings, *MSc Thesis*, Mining Eng., Dept. of Mining Eng., West Virginia Univ., Morgantown, WV, US, p130.

Gale, W.J. (1991) Strata control utilising rock reinforcement techniques and stress control methods in Australian coal mines, *The Mining Engineer*, 150, 352, pp247-253.

Genis, M. (2002) Investigation of the effect of geometrical design parameters on the dimensions of failure zone occurring around deep underground openings under static and dynamic conditions, *PhD Thesis*, Graduate School of Natural & Applied Sciences, Zonguldak Karaelmas University, Turkey, p387.

Gercek, H. & Genis, M. (1998) Effect of anisotropic in situ stress field on the stability of underground openings, *Proc. of the 4th National Rock Mech. Symp.*, Oct.22-23th 1998, Zonguldak, Turkey, pp235-246.

Ghorbani, M., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Masoudi, R. (2020) A critical review on the developments of rock support systems in high stress ground conditions, *Int. J. of Min. Sci. & Tech.*, 30, 5, pp555-572.

Gray, I., Wood, J., & Shelukhina, Y. (2013) Real stress distributions in sedimentary strata, *The 6th Int. Symp. on In-situ Rock Stress*, Aig. 20-22nd 2013, Sendai, Japan, pp20-22.

Greitzer, Y. (2021) The Centrifugal Force behind the Movement of Continents - Change in the Axis of the Rotating Earth in Relation to Convection Currents, *J. of Science and Technology*, 6, 3, pp2456-5660.

Griggs, D. (1939a) A theory of mountain building, *American Journal of Science*, 237, 9, pp611-650.

Griggs, D. (1939b) Creep in rocks, *The Journal of Geology*, 47, 3, pp225-251.

Griggs, D. (1940) Experimental flow of rocks under conditions favouring recrystallization, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 51, pp1001-1022.

Hast, N. (1967) The state of stresses in the upper part of the Earth's crust, *Engineering Geology*, 2, 1, pp5-17.

Hardy, H.R. (1959) Time-dependent deformation and failure of geologic materials, *The 3rd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, Golden, Colorado, April 1959, Paper: ARMA-59-0176.

Hawlader, B.C., Lo, K.Y., & Moore, I.D. (2005) Analysis of tunnels in shaly rock considering three-dimensional stress effects on swelling, *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 1, pp1-12.

Hayavi, M.T. & Abdideh, M. (2016) Estimation of in-situ horizontal stresses using the linear poroelastic model and minifrac test results in tectonically active area, *Russian Journal of Earth Science*, 16, ES4004, doi:10.2205/2016ES000576.

He, B.G., Li, H.P., Feng, X.T. & Meng, X.R. (2024) Estimating the complete in-situ stress tensor along deep tunnels with frequent rockbursts near a steep valley, *Bulletin of Eng. Geo.& the Env.*, 83:1.

Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K., Ziegler, M., & Wsm Team. (2016). World stress map database release 2016. *GFZ Data Serv.*, 10, 1.

Heidbach, O., Rajabi, M., Cui, X., Fuchs, K., Müller, B., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Wenzel, F., Xie, F., Ziegler, M.O., Zoback, M.-L., and Zoback, M.D. (2018) The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales, *Tectonophysics*, 744, pp484-498, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>.

Hoek, E. (2007) In situ and induced stresses, (Chapter 10, in *Practical Rock Engineering*, Webpage, *Rocscience.com*, <https://static.rocscience.cloud/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Chapter-10-In-Situ-and-Induced-Stresses-Remediated.pdf>

Hoek, E. & Brown, E.T. (1980) Underground excavations in rock, *Institution of Mining and & Met.*, London, p527.

Iannacchione, A., Miller, T., Esterhuizen, G., Slaker, B., Murphy, M., Cope, N. & Thayer, S. (2020) Evaluation of stress-control layout at the Subtropolis Mine, Petersburg, Ohio, *International Journal of Mining Sci.&Tech.*, 30, pp77-83.

Irmak, T.S. (2016) Present-day stress field in the Bala–Ankara (Turkey) region from inversion of focal mechanisms, *Eastern Anatolian Journal of Science*, 2, 1, pp37-48.

Isaacson, E. de St.Q. (1957) Research into the rock burst problem on the Khor gold field, *Mine and Quarry Engineering*, Dec., pp520-526.

Itasca, (2000) UDEC Universal Distinct Element Code, *User Guide*, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, MN, US.

Jpb, (2020) Lithospheric strength profiles, *Tectonics*, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID: 53419892>.

Kang, H.P., Zhang, X., Si, L.P., Wu, Y., & Gao, F. (2010) In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China, *Eng. Geo.*, 116, 3-4, pp333-345.

Karadeniz, K.E. (2019) In-situ stress magnitude and orientation determination of Ankara Kazan district from FMI log, *MSc Thesis*, Middle East Tech. Univ., The Graduate Sch. of Nat. & App. Sci., Mining Eng. Dept., Ankara, Turkey, p138.

Kovari, K. (1977) *Field Measurements in Rock Mechanics*. Balkema, Rotterdam.

Kropotkin, P.N. (1972) The state of stress in the Earth's crust as based on measurements in mines and on geophysical data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 6, 4, pp214-218.

Kurlenya, M.V. & Kulakov, G.I. (1998) Stress-State of Rock Upper Layers of Earth's Crust, *J. of Min. Sci.*, 34, 3, pp191-195.

Lauffer, H. (1958) Gebirgsklassiferung fuer den Stollenbau, *Geologie und Bauwesen*, 24, pp46-51.

Lajtai, E.Z. (1991) Time-dependent behaviour of the rock mass, *Geotechnical and Geological Engineering*, 9, pp109-124.

Lajtai, E.Z. & Bielus, L.P. (1986) Stress corrosion cracking of Lac du Bonnet granite in tension and compression. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 19, pp71-87.

Lajtai, E.Z. & Schmidtke, R.H. (1986) Delayed failure in rock loaded in uniaxial compression. *Rock Mec.&Rock En.*, 19, pp11-25.

Leeman, E.R. (1964) The measurement of stress in rock, Parts I–III. *J. S.Afr. Inst. Mining & Met. Part I*, Sep.1964, pp45-81; *Part II*, Sep.1964, pp82-114; *Part III*, Nov.1964, pp 254-284; Feb.1965, pp408-423, July 1965 pp656-664; Oct.1965, pp109-119.

Leeman, E.R. (1969) The measurement of stress in rock: A review of recent developments (and a bibliography). *Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses*, Lisbon, Portugal, paper 6.

Lo, K.Y. & Lukajic, B. (1984) Predicted and measured stresses and displacements around the Darlington intake tunnel, *Canadian Geotechnical Journal*, 21, pp147-165.

Lo, K.Y., Devata, M. & Yuen, C.M.K. (1979) Performance of a shallow tunnel in a shaly rock with high horizontal stresses, The 2nd Int. Symp. on Tunnelling. (Ed. Jones, M.J.), Tunnelling'79: Inst. of Min.& Met., London, UK, pp1–12.

Mark, C. (1991) Horizontal stress and its effects on longwall ground control, *Mining Engineering*, pp1356-1360.

Mark, C. & Gadde, M. (2010) Global trends in coal mine horizontal stress measurements, *Metallurgy*, pp21, 39.

Mark, C. & Mucho, T.P. (1994) Longwall mine design for control of horizontal stresses, *New Technology for Longwall Ground Control: Proc. of the USBM Tech. Transfer Seminar*, USBM SP 94-0, pp53-76.

Mark, C., Mucho, T.P. & Dolinar, D. (1998) Horizontal stress and longwall headgate ground control, *Mining Eng.*, pp61-68.

Mark, C., Mucho, T.P. & Dolinar, D. (2006) Horizontal stress and longwall headgate ground control. *CDC Stacks*, Public Health Publications, US Centers for Disease Control and Prevention, <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/8899>

Parker, J. (1966) Mining in a lateral stress field at White Pine, Canadian Int. of Mining and Met. Trans., 69, pp375-383.

Reiter, K. (2021) Stress rotation–impact and interaction of rock stiffness and faults, *Solid Earth*, 12, 6, pp1287-1307.

Sbar, M.L. & Sykes, L.R. (1973) Contemporary compressive stress and seismicity in Eastern North America: An example of intra-plate Tectonics, *Geological Soc. of Amer. Bull.*, 84, 6, pp1861-1882.

Theory, P.R. (1994) A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 31, 1, pp23-34.

Stacey, F.D. (1963) The theory of creep in rocks and the problem of convection in the Earth's mantle, *Icarus*, 1, pp304-313.

Steiner, W. (1993) Swelling rock in tunnels: rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures. *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstracts*, 30, 4, pp361-380.

Stephansson, O. (1986) *Rock Stress and Rock Stress Measurements*. Centek, Lulea, Sweden.

Stephansson, O., & Zang, A. (2014) ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 5: establishing a model for the in situ stress at a given site. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, pp187-201, Cham: Springer International Publishing.

Su, D. & Hasenfus, G. (1995) Regional horizontal stress and its effect on longwall mining in the northern Appalachian coal field, *Proceedings of the 14th Int. Conf. on Ground Control in Mining*, Morgantown, WV, US. pp39-45.

Terzaghi, K. (1962) Measurements of stresses in rock, *Geotechnique*, 12, 2, pp105-124.

Terzaghi, K & Richart, Jr. F.E. (1952) Stresses in rock about cavities, *geotechnique*, 3, pp57-90.

USGS, (2002) *This dynamic Earth: The story of plate tectonics*, U.S. Geological Survey, USGS Information Services, Online edition, Webpages: [https://nehsearch.nist.gov/static/files/USGS/PB20041018 93. pdf](https://nehsearch.nist.gov/static/files/USGS/PB20041018%2093.pdf), Retrieved in Feb. 2025.

Vasil'ev, L.M. & Vasil'ev, D.L. (2013) Theoretical ground for origination of normal horizontal stresses in rock masses, *Journal of Mining Science*, 49, 2, pp240-247. (*Russian Text in; Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*, 2013, N2, pp81-90).

Warpinski, N.R. & Teufel, L.W., (1989) In-situ stresses in low permeability, nonmarine rocks. *J. Pet. Technology*, 41, 4, (SPE-16402-PA). pp405-414.

Wegener, A. (1924) *The Origin of continents and oceans*, (Translation from 3th Edition in German, by J.G.A. Skerl), E.P. Dutton and Company Inc., New York.

Wikipedia, (2025a) *Polflucht*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Polflucht>, Retrieved in Jan. 2025.

Wikipedia, (2025b) *Charles-Augustin de Coulomb*, https://en.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin_de_Coulomb, Retrieved in Apr. 2025.

Yilmaz, O. (2006) Effect of anisotropic insitu stress field on the stability of parallel coal mine galleries and pillars, *MSc Thesis*, Graduate Sch. of Natural Applied Sci., Dept. of Min. Eng., Zonguldak Karaelmas Univ. Turkey, p210.

Zang, A., & Stephansson, O. (2009) *Stress field of the Earth's crust*. Springer Sci.& Business, ISBN978-1-4020-8443-0, p318.

Zhang, Y. & Zhang, J. (2017) Lithology-dependent minimum horizontal stress and in-situ stress estimate, *Tectonophys*, 703-704, pp1-8.

Zhang, P., Gearhart, D., Van Dyke, M., Su, D., Esterhuizen, E., & Tulu, B. (2019) Ground response to high horizontal stresses during longwall retreat and its implications for longwall headgate support, *Int. J. of Min. Sci. & Tech.*, 29,1, pp27-33.

Zhang, Y., Yin, S., & Zhang, J. (2021) In situ stress prediction in subsurface rocks: An overview and a new method, *Geofluids*, 1, 6639793.

Ziaie, M., Fazelizadeh, M., Tanha, A.A. & Sharifzadegan, A. (2023) Estimation of the horizontal in-situ stress magnitude and azimuth using previous drilling data, *Petroleum*, 9, pp352-363.

MADEN VE GEOTEKNİK BİLİMİNDE DİSİPLİNLERARASI YAKLAŞIMLAR

