

ENDÜSTRİYEL VE KENTSEL YERBİLİMLERİ:

GÖL ORTAMLARI,
MALZEME KARAKTERİZASYONU,
KENTSEL PLANLAMA

Editör: MUZAFFER ÖZBURAN



BİDGE Yayınları

Endüstriyel ve Kentsel Yerbilimleri: Göl Ortamları, Malzeme Karakterizasyonu, Kentsel Planlama

Editör: MUZAFFER ÖZBURAN

ISBN: 978-625-8995-71-8

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-03-25

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

Yerbilimleri, günümüzde sadece yerkürenin geçmişini anlamakla kalmayıp, modern sanayinin hammadde ihtiyacını karşılayan ve geleceğin güvenli yaşam alanlarını tasarlayan çok boyutlu bir disipline dönüşmüştür. Elinizdeki bu kitap, yerbilimlerinin bu geniş yelpazesini üç temel eksenle ele alarak akademik ve endüstriyel dünyaya kapsamlı bir perspektif sunmayı amaçlamaktadır.

Kitabın ilk bölümünde, yeryüzünün "yüksek çözünürlüklü veri arşivleri" olarak nitelendirilen göl ortamları ele alınmaktadır. Göl havzalarının tektonik ve iklimsel değişimlere karşı gösterdiği hassas tepkiler, bu ortamların sadece jeolojik birer kayıt alanı değil, aynı zamanda ekonomik değeri yüksek mineral yataklarının da ana kaynağı olduğunu göstermektedir. Carroll ve Bohacs'ın göl tipi modellerinden yola çıkılarak hazırlanan bu bölüm, antik havzaların yorumlanmasında sedimantolojik ve paleontolojik verilerin nasıl harmanlandığını ortaya koymaktadır.

İkinci bölümde, odak noktası doğal süreçlerden endüstriyel uygulamalara kaymakta ve aşındırıcı materyallerin teknik karakterizasyonu incelenmektedir. Modern üretim teknolojilerinin temel taşlarından biri olan aşındırma ve parlatma süreçleri, jeolojik materyallerin mühendislik disipliniyle nasıl şekillendirildiğinin en somut örneğidir. Doğal zımpara ve korunddan, ileri teknoloji ürünü yapay bor karbür ve kübik bor nitrür sistemlerine kadar uzanan bu teknolojik evrim, malzeme bilimindeki ilerlemenin yerbilimsel temellerini gözler önüne sermektedir.

Son bölümde ise yerbilimi verilerinin toplumsal güvenlik ve sürdürülebilirlik üzerindeki kritik rolü, kentsel planlama ve geoteknik haritalama üzerinden tartışılmaktadır. Küresel iklim değişikliği ve kontrolsüz kentleşmenin getirdiği riskler karşısında, geoteknik verilerin stratejik birer karar destek mekanizmasına dönüştürülmesi artık bir zorunluluktur. Yapay zeka ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile desteklenen bu süreç, afetlere dirençli, akıllı ve sürdürülebilir şehirlerin inşasında temel teşkil etmektedir.

Kitabımızın yerbilimciler, inşaat ve maden mühendisleri, şehir bölge plancıları ve ilgili tüm disiplinler için temel bir başvuru kaynağı olmasını dileriz.

Doç. Dr. Muzaffer ÖZBURAN

İÇİNDEKİLER

Göl Ortamları	1
<i>ASLI KARABAŞOĞLU</i>	
Aşındırıcı Materyallerin Teknik Karakterizasyonu ve Endüstriyel Sınıflandırılması	19
<i>METİN BAĞCI</i>	
Urban Planning and Geotechnical Mapping	43
<i>NECMİ YARBAŞI</i>	
Ağır Metallerin Çevresel Etkileri ve Fitoremediasyon Yaklaşımları	54
<i>ÖZLEM ERDEM</i>	
Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Analitik Hiyerarşi Yöntemi Kullanılarak Isparta İlinde Güneş Enerjisi Yatırımları İçin Mekânsal Uygunluk Analizi	67
<i>KEREM HEPDENİZ</i>	

BÖLÜM 1

GÖL ORTAMLARI

Aslı KARABAŞOĞLU¹

Giriş

Gölsel (lakustrin) ortamlar, yeryüzü alanının toplamda oldukça küçük bir bölümünü oluşturmalarına rağmen, yerbilimleri araştırmalarında, yüksek çözünürlüklü veri niteliği taşımaktadırlar. Denizel sistemlerden farklı olarak, göl havzaları daha hassas ve izole dinamiklere sahiptirler. Dolayısıyla göller, küresel ve yerel iklim değişiklerinin, tektonik hareketlerin ve hidrolojik döngülerin kayıt alanlarıdır. Modern yerbilimlerinde gölsel sedimentoloji, sadece fiziksel çökelim süreçlerini değil, aynı zamanda limnoloji, biyokimya, izotop jeokimyası ve paleontoloji disiplinlerinin kesiştiği çok boyutlu bir çalışma alanıdır. Göller, su kolonundaki fiziksel katmanlaşmadan (stratifikasyon), taban sularındaki kimyasal anoksiye kadar geniş bir süreç yelpazesi sunar. Bu süreçler, göl tabanına çöken her bir taneciğin ve her bir organizma kalıntısının, havzanın o dönemdeki kimyasal ve biyolojik imzasını taşımasını sağlar. Jeolojik zaman çizelgesine bakıldığında, göl çökellerinin varlığı genellikle belirli tektonik rejimlerin (özellikle rift havzaları ve kıta içi çöküntü alanları) bir göstergesidir. Örneğin,

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6980-0194

Batı Anadolu'daki Neojen havzaları, bölgenin genişleme tektoniği ile göl sel süreçlerin nasıl iç içe geçtiğini gösteren kanıtlar taşır. Bu havzalarda biriken istifler, sadece bölgesel jeolojii aydınlatmakla kalmaz, aynı zamanda kömür, hidrokarbon, borat ve trona gibi ekonomik değeri yüksek mineral yataklarına işaret eder. Gölsel ortamların en dikkat çekici yönlerinden biri, iyi korunumlu fosil yatakları oluşturma potansiyelidir. Denizel ortamlardaki yüksek enerji ve biyotürbasyon, fosil kayıtlarında sıklıkla veri kaybına neden olurken; durgun, düşük enerjili ve oksijensiz derin göl ortamları, yumuşak doku korunumu da dahil olmak üzere benzersiz paleontolojik veriler sunar. Mikrofasiyes analizlerinde karşılaşılan ostrakod, alg ve polen kayıtları, sadece yaş tayini için değil, göl suyunun o dönemdeki tuzluluk, sıcaklık ve derinlik parametrelerini mikroskobik ölçekte anlamamıza olanak tanır. Günümüzde aktif olarak izlenen göl sistemlerinden elde edilen veriler, antik göl kayaçlarının yorumlanmasında temel teşkil eder. Ancak, biyolojik evrim ve yer kürenin jeokimyasal evrimi nedeniyle, antik göllerdeki karbonat üretim mekanizmaları veya organik madde birikim koşulları modern örneklerden farklılıklar gösterebilir. Bu durum, gölsel sedimentolojiyi sürekli güncellenen ve keşfedilmeyi bekleyen dinamik bir alan haline getirmektedir.

Göllerin kökeni çok çeşitli olmakla birlikte, büyük göl sistemleri çoğunlukla tektonik kökenlidir. Rift sistemleri gibi uzamsal tektonik rejimler sıklıkla kalın göl çökelleri içerir. Ayrıca bu ortamlar kıtasal havzalardaki petrol aramalarının çoğunun odak noktasıdır. Bir göl için temel koşul topoğrafik bir çöküntü ve yüzey suyunu desteklemek için yeterli olan hidrolojik dengedir. Hidrolojik denge ise; enleme bağı rüzgarlar, irtifa, kıtasallık ve orbital parametrelerden etkilenen hakim iklimin bir fonksiyonudur (Street-Perrott & Harrison 1984; Kutzbach & Street-Perrott 1985). Günümüz dünyasındaki büyük göller genellikle Pleyistosen buzullaşmalarıyla ilişkili ortamların hakimiyetindedir. Göl

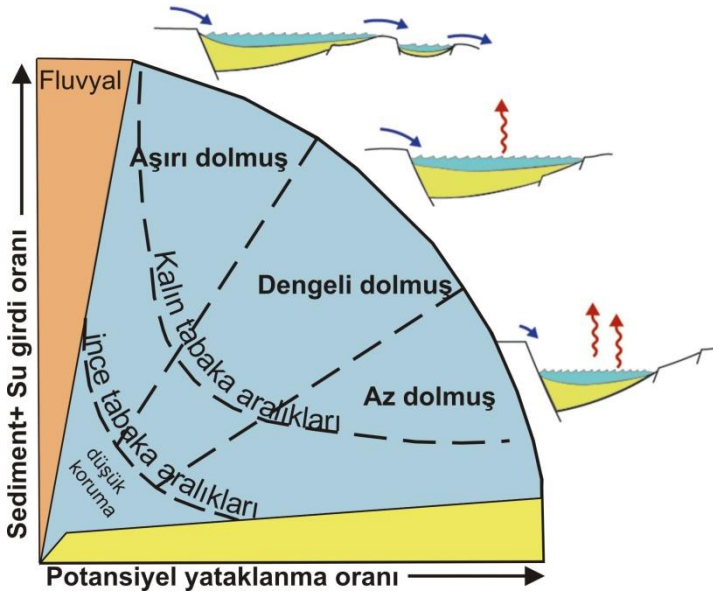
havzalarındaki sedimanter ortamların birçoğu aynı zamanda havza içindeki mikroorganizmaların, bitkilerin ve hayvanların biyo çeşitliliğini (tür sayısı, bolluk) doğrudan etkileyen karmaşık bir dizi kontrol mekanizması tarafından belirlenir. Çökme, yağış/buharlaştırma oranı, havzanın boyutu ve şekli, değişken çökme hızları gibi faktörler aracılığıyla hem ilkim hem tektonik konumla yakından ilişkilidir. Havza dolgusunun stratigrafik paketlenmesi; havzaya giren sediman ve su miktarı ile akomodasyon arasındaki ilişkinin doğrudan bir sonucudur. Akomodasyon, havzayı çevreleyen yapısal veya jeomorfolojik özelliklerden daha düşük rakımlardaki hacimsel boşluğu ifade eder (Bohacs ve diğ., 2003). Bu durum, zaman içinde değişebilen ve suya nispeten doygun (dolu) ya da nispeten boş olabilen göl havzalarının oluşmasıyla sonuçlanır. Tektonik konum havzanın gelişimini kontrol ederken, göl tabanının eğimi, su seviyesindeki değişimlerin ne kadar geniş alanlara etki edeceğini, ana kaya jeolojisi ise kırıntılı ve kimyasal çökmeyi güçlü bir şekilde etkileyebileceği gibi, organizmaların davranışlarını ve dağılımını etkileyen abiyotik faktörleri (pH, iyon konsantrasyonları, tuzluluk ve giriş sularının bulanıklığı gibi) de belirler. (Gierlowski-Kordesch, 2010; Renaut and Gierlowski-Kordesch, 2010).

Carroll ve Bohacs (1999) ile Bohacs ve diğ. (2000) tarafından geliştirilen göl tipi modeli; havzaya giren sediman ve su miktarı ile havzanın potansiyel akomodasyon (konaklama=yataklanma alanı) kapasitesine göre üç tip göl havzası tanımlar: aşırı dolmuş, dengeli dolmuş ve yetersiz dolmuş (Şekil 1).

Aşırı dolmuş göl tipi havzalarda; su ve sediman girişi, potansiyel akomodasyon kapasitesini aşar ve göller komşu bir havzaya taşar (dışa akışlı hale gelir). Dengeli dolmuş göl tipi havzalar; sediman ve su arzı oranlarının potansiyel akomodasyon ile yaklaşık olarak dengede olmasıyla karakterize edilir; bu nedenle dengeli dolmuş göl tipleri periyodik olarak hidrolojik açıdan açık

veya kapalı sistemler arasında geçiş yapar. Yetersiz dolmuş göl tipi havzalarda ise; potansiyel akomodasyon, sediman ve su girişi miktarından daha fazladır. Bu ilişki; baskın çökel fasiyeslerini, parasekansların tabakasal paketlenmesini, baskın organik madde türlerini ve kaynak kaya, rezervuar ve örtü kayaların dağılım ile akış özelliklerini etkiler (Bohacs ve diğ., 2000; Carroll ve Bohacs, 2001).

Şekil 1. Göl havzası tipi modeli (Yatay eksen potansiyel yataklanma alanını, dikey eksen çökel ve su kaynağını temsil etmektedir.)



Kaynak: Carroll ve Bohacs (1999).

Aşırı dolmuş göllerde; Parasekanslar belirsizdir. Biyolojik olarak düşük tuzluluk yüksek besin girdisine sahip ve çeşitlilik gösteren bir fauna vardır. Havza yüksek yeraltı su seviyesinde, bol eski çökeller içeren (turba veya kömür), delta çökellerinin olduğu, bol bitki örtüsü oksijenin bol olduğu, kanal gelişimi fazla olan sublitoralden derin bölgelere doğru geçişli tiptedir (Bohacs ve diğ., 2000). Kara bitkilerinden türetilen bol miktardaki organik kalıntı,

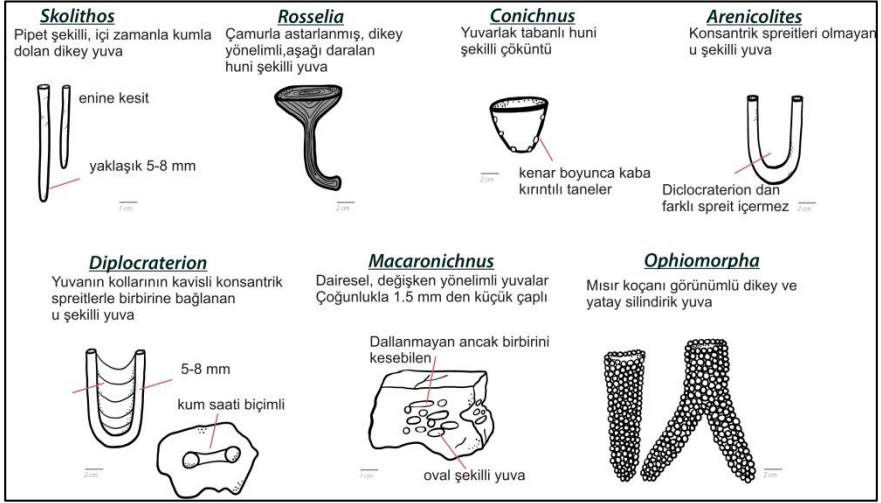
nehir sistemleri tarafından aşırı dolmuş göllere taşınır. Güncel karbonat çökel oluşumu; çökelme ortamlarının su derinliği, coğrafik dağılımları ile ortamın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri gibi etkenler tarafından denetlenir. Karbonat mineralleri, kimyasal ve biyokimyasal tepkimelerin ürünü olarak oluşurlar. Fiziksel etkenler, genellikle hidrolojik koşulları kapsar ve dolaylı olarak karbonat çökelişini etkiler. Ostrakodlu kumtaşı, santimetre kalınlığında tabakalar halinde sığ su altı vake taşından çamurtaşına kadar olan tabakalarda görülür. Bunun yanı sıra sucul fitoplanktonlar ve taşınmış kara bitkilerine ait parçalar bu katmanlar içindedir. Terrijen (karadan türeyen) ve alg biyomarkırları baskındır. (Carroll ve Bohacs, 2001). Organik karbon içeriği genellikle düşük-orta seviyededir. Tatlı su canlıları, omurgasızlar ve balıklarda çeşitlilik orta düzeydedir. (Gierlowski-Kordesch&Park, 2004). Tabaka istiflenmesinde havza içine doğru ilerleme baskındır. Çökeller bölgesel olarak geniş yayılım sunar, kıyıya yakın kesimlerde karasal, göl merkezine yakın kesimlerde ise sucul alg içerikli, organik madde tipi ve içeriğinde belirgin yanıl değişimler dahil olmak üzere net fasiyes değişimleri gözlenir (Bohacs ve diğ., 2000). Aşırı dolmuş göllerin su altı alanlarındaki iz fosil dağılımı üzerindeki en önemli kontrolleri; göl sularındaki nispeten yüksek oksijen içeriği, enerji kararlı gıda arzı, bol besin maddeleri ve genellikle yumuşak taban çökelleridir (Buatois ve Mangano, 2007, 2009). Buzul göllerinde soğuk koşullar da önemli bir kontrol mekanizması olabilir. Aşırı dolmuş göller tuzluluk açısından tabakalaşma göstermeseler de, derin aşırı dolmuş göller yüzey suları ile derin sular arasındaki sıcaklık farkları nedeniyle tabakalaşabilir (Cohen, 2003). Aşırı dolmuş göllere olan akarsu (flüvyal) deşarjı, göl tabanlarını oksijenlendiren ve tabakalaşmış bir su kütlelerinin düşey karışımına katkıda bulunabilen dip akıntılarını tetikleyebilir. Akarsu sistemi tarafından sağlanan malzemenin yeniden çökelişini (örneğin kaymalar), epifaunal ve infaunal toplulukların kurulmasına olanak tanıyan taban oksijenlenmesini de

teşvik edebilir (Buatois ve Mangano, 1998). Kara bitkilerinden türetilen bol miktardaki organik kırıntılı malzeme (detritüs), akarsu sistemleri tarafından aşırı dolmuş göllere taşınır (Bohacs ve diğ., 2000; Carroll ve Bohacs, 2001) ve dip akıntıları ile türbidit akıntıları tarafından derin göl sularına taşınarak, infaunal sedimentle beslenen ve otlayan topluluklar için gıda arzını artırabilir. Yüksek sedimantasyon oranları, su üstünde kalan göl kenarı alanlarındaki yüksek yeraltı su seviyeleri ve kararsız sığ gölsel yüzeylerdeki iz tiplerinin varlığını engelleyerek iz fosil topluluklarının oluşmasını etkileyebilir. (Bohacs ve diğ., 2007b; Buatois ve Mangano, 2004; Scott ve diğ., 2012).

Aşırı dolmuş göllerin düşük enerjili kesimlerinde balık yüzme izleri (Örn; Undichna), eklem bacaklı yürüme izleri (Örn; Planolites, Palaeophycus) ve basit yuva izleri gözlenir (Şekil 3).

Aşırı dolmuş göllerin yüksek enerjili kıyı önü, kıyı çizgisi ve flüvyal-deltaik alanları, yumuşak göl yüzeylerinde üretilen düşük yoğunluklu, belirsiz dikey yuvalar (*Skolithos*) (Şekil 2), kaçış izleri, u şekilli yuvalar (*Arenicolites*) ile karakterize edilir (Bohacs ve diğ., 2007b; Buatois ve Mangano, 2004). Kısa süreli durgunluk dönemlerinde basit yuvalar, gastropod ve bivalvia kavkı yığınları, kıyı bölgelerinin daha sakin sularında ise eklem bacaklı yürüme izleri (Şekil 2) ve bivalvia dinlenme izleri gözlenebilir. Bu topluluk denizel kıyı ortamlarının *Skolithos* iknofasiyesi ile yakından benzerlik gösterir (Şekil 2).

Şekil 2. Skolithos iknofasiyesi



Kaynak: Buatois ve Mangano (2009)

ve https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Page_Quintondan_düzenlenmiştir.

Dengeli dolmuş havzalarda; Birimin çökelim süresi boyunca potansiyel yataklanma alanı, yaklaşık olarak su + çökel dolgusuna eşittir. Su + çökel girişleri, gölü periyodik olarak eşik seviyesine kadar doldurmaya hatta yüzeysel akışla dışarı boşaltmaya yeterlidir. Ancak eşik seviyesinin altında önemli göl seviyesi düşüşleri oluşabilir. Genellikle değişken derin göl fasiyes toplulukları hakimdir. Bunlar ince taneli karbonatlar ve silisiklastik çökeller içeren tabakalı göl çökellerinde (örneğin petrol şisti) korunmuş yüksek seviyelerde organik karbona sahip, düşük enerjili sublitoralden derin göle kadar uzanan alanları temsil eder (Bohacs ve diğ., 2000; Carroll ve Bohacs, 2001). Dengeli dolmuş havzalarda, çökel ve su girdisi yaklaşık olarak yataklanma potansiyeline eşittir. Bu ilişki; iklimsel ve tektonik kontrollere ve yukarı havzalardan gelen drenaj alanı değişimlerine bağlı olarak dalgalanma gösterir (Carroll ve diğ., 2008). Bu tür göller, periyodik olarak komşu bir havzaya taşarlar; göl seviyeleri tipik olarak

havzayı sınırlayan eşiğin yüksekliğinde veya buna yakındır (Bohacs ve diğ., 2003).

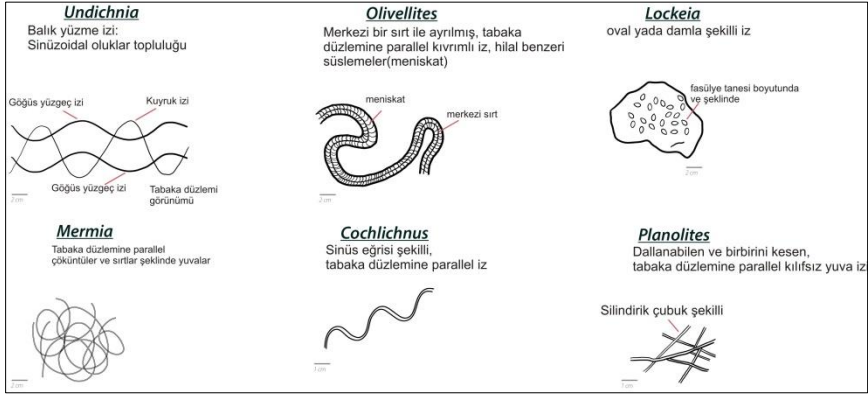
Gölün hidrolojik olarak kapalı olduğu ve göl seviyelerinin eşiğin altında kaldığı dönemlerde; tuzluluk yükselebilir, göl suları tabakalaşabilir ve oksijen bakımından fakirleşebilir; havza merkezinde ise karbonat ve silisiklastik çamurlar dikey yığılımlı paketler halinde birikir. Göl seviyeleri küçük iklimsel varyasyonlar nedeniyle dalgalanabilir ve eğime bağlı olarak geniş alanlar su üstünde kalarak havaya maruz kalabilir; nadiren de olsa, dengeli dolmuş göller neredeyse tamamen kuruyabilir. Gölün hidrolojik olarak açık olduğu dönemlerde ise göl suları tatlılaşır, daha iyi oksijenlenir ve göl seviyelerinin kararlı olduğu havza kenarlarında ilerleyen çökel paketleri birikir. Dengeli dolmuş göllerde ana sınırlayıcı faktörler tuzluluk, taban çökeli ve oksijendir. Tuzluluk, gölün hidrolojik olarak kapalı olduğu dönemlerde temel bir rol oynar. Tuzlu koşullar (~ 20–50 g/L), gölsel faunalar (örneğin bentik omurgasızlar, balıklar) için zararlıdır; ayrıca dip suları ile tatlı su girişi arasında yoğunluk tabakalaşması oluşma olasılığı daha yüksektir, bu da sublitoralden derin göl bölgelere kadar uzanan alanlarda düşük oksijen koşullarına yol açar (Cohen, 2003; Hammer, 1986).

Göl seviyelerinin eşik yüksekliğine yakın ancak altında olduğu dönemlerde, dengeli dolmuş göllerin kıyı çizgileri dalgalanabilir; bu durum kıyı bölgesinin sık sık su altında kalmasına ve açığa çıkmasına, ayrıca düşük enerjili alanlarda *Scoyenia iknofasiyesi*'nin görülmesine yol açar (Şekil 4). Yetersiz dolmuş havzaların aksine, bu ortamlar tipik olarak havza kenarlarına yakındır ve omurgalı ayak izleri korunmuş olabilir. Göl seviyelerinin eşik yüksekliğinin çok altında olduğu dönemlerde, gölsel ve göl kenarı sedimentlerinin kuruması yaygındır ve sert zeminler geniş bir alana yayılır. Bu çökellerde *Scoyenia iknofasiyesi* gözlenir. Özellikle bu iknofasiyesin çizgili iz fosilleri

veya dikey yönelimli yapılar içeren sert zemin topluluğu, su üstü kalma durumunun tanınması yoluyla parasekansların sınırlarının belirlenmesine yardımcı olabilir. Dengeli dolmuş göl tiplerinin yüksek enerjili, dalga etkisindeki karbonat kıyı çizgileri; üzerleri güve sineği yuvaları ile kaplanmış olabilen stromatolitik biyohermleri (resif benzeri yapılar) korunur (Leggitt ve diğ., 2007) ve/veya bu biyohermlerin içinde yaşayan organizmaların yerleşme yapılarını muhafaza eder (Lamond ve Tapanila, 2003). Dalga etkisindeki silisiklastik kıyı bölgelerinde nispeten tatlı su kesimlerinde basit yuva (Planolites: yatay silindirik boru şeklinde yuva) örneklerini korunabilir. Delta ağzı barı çökellerinde Skolithos (dikey silindirik ikamet yuvası) iknofasiyesi gözlenebilir (Bromley ve Asgaard, 1979; Mangano ve diğ., 1994, 2000) (Şekil 2). Dengeli dolmuş göllerdeki türbidit sistemlerinden gelen iknofaunalar (iz fosil toplulukları), eğer varsa bile, aşırı dolmuş göl türbiditlerdekine göre daha az bol ve daha az çeşitlidir (Uchman ve diğ., 2007).

Sublitoral den derin göl bölgelerine kadar uzanan alanların düşük oksijen koşullarını yansıtabilecek şekilde; lamine, ince taneli gölsel çökellerde, Mermia iknofasiyesi'ne ait düşük çeşitlilikte ve düşük bollukta basit otlama izleri veya balık yüzme izleri gözlenir (Şekil 3), (Magyar ve diğ., 2006; Uchman ve diğ., 2007). Bu tabakalı göllerdeki delta önü çökelleri, Mermia iknofasiyesi'nin düşük çeşitlilikteki bir topluluğunu koruyabilir (Melchor, 2004). Bazı durumlarda, çamurtaşları ile ardalanmalı kumlu fırtına çökelleri içinde dikey yuvalar görülebilir; bunlar fırtınalar nedeniyle göl tabanının geçici olarak oksijenlenmesini temsil edebilir (Magyar ve diğ., 2006).

Şekil 3. *Mermia* iknofasiyesi



Kaynak: Buatois ve Mangano (2009)

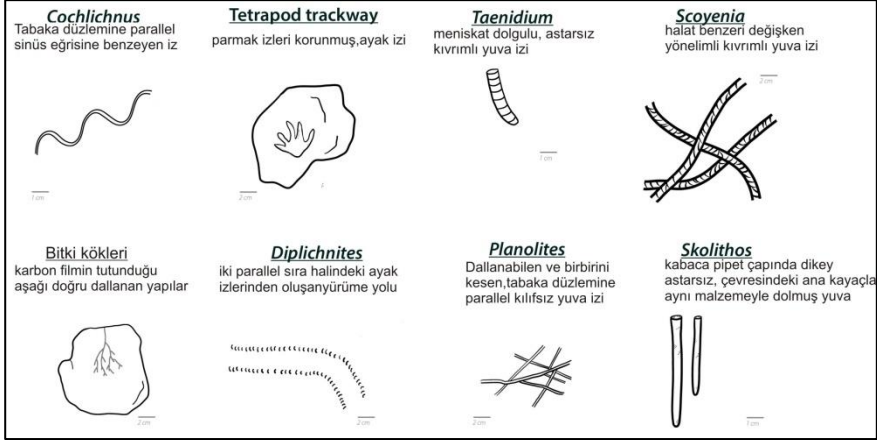
ve [https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Page_Quintondan düzenlenmiştir](https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Page_Quintondan_düzenlenmiştir).

Yetersiz dolmuş göller; çökel ve su girdisi miktarının potansiyel yataklanma alanından daha az olduğu havzalardır. Bu havzalar hidrolojik olarak kapalı, tuzlu ve aşırı tuzlu su kütlelerinde çökelmiş evaporitik litofasiyes toplulukları (örneğin karbonatlar, evaporit mineralleri) ile karakterize edilir (Bohacs ve diğ., 2000). Silisiklastik litofasiyesler havza kenarlarına doğru bol olabilir, ancak havza merkezi istiflerinde bulunmayabilir (Smoot, 1983). Parasekanslar, kıyı çizgisi ilerlemesinden ziyade esas olarak dikey yığılım yoluyla oluşur (Bohacs ve diğ., 2000). Yetersiz dolmuş bir gölün içindeki yataklanma alanı, sığ göl suları nedeniyle genellikle sınırlıdır. Göl seviyeleri iklimsel değişkenliğe ve tektonik aktiviteye tepki olarak sık sık dalgalanır; bu nedenle kıyı çizgisi çökelleri havza genelinde aşırı yer değiştirmeler gösterebilir. Düşük seviye çökeli, maksimum çökmenin olduğu bölgelerde evaporit birikimi ile karakterize edilir; diğer bölgelerde ise bir önceki yüksek seviye sırasında birikmiş olan sedimentler kuruma, toprak oluşumu ve yeniden işlenmeye maruz kalır (Bohacs ve diğ., 2000, 2007a; Smoot, 1983). Bu göller, faunal çeşitliliğin çok düşük

olabildiği, oldukça stresli ekosistemleri temsil eder (Hammer, 1986; Williams, 1998; Williams ve diğ., 1990).

Tuzluluk, yetersiz dolmuş havzalardaki göllerin içinde ve çevresindeki biyolojik çeşitlilik üzerindeki en önemli sınırlayıcı faktördür; bu durum, orta kıyı bölümden sublitoral bölgelere kadar mermia iknofasiyesi'nin ya hiç bulunmamasına ya da çok zayıf örneklerine yol açar (Buatois ve Mangano, 2007). Derin göl çökellerinde iz fosil bulunması beklenmez. Mermia iknofasiyesi toplulukları genellikle çok düşük çeşitliliğe sahiptir, esas olarak otlama izleri (örn; Helminthoidichnites) ile sınırlıdır ve en yaygın olarak düşük enerjili göl kenarı alanlarındaki kısa ömürlü, geçici su kütlelerinde veya sığ litoral-eulitoral göl sularında görülür. Tuzlu ve aşırı tuzlu göllerde hayatta kalabilen tuzluluğa dayanıklı hayvanlar (örneğin kironomid sinek larvaları); litoral den sublitoral bölgelere kadar uzanan alanlarda yüksek yoğunluklu, düşük çeşitlilikte minik dikey yuva toplulukları (örn; Polykladichnus, Arenicolites, Skolithos) ve muhtemelen meniskat-geri dolgulu yuvalar gözlenebilir (Orti ve diğ., 2003; Rodriguez-Aranda ve Calvo, 1998; Uchman ve Alvaro, 2000). Litoral den orta kıyı bölgelere kadar olan çökeller kuş ayak izlerini ve çiğnenmiş zeminleri koruyabilir. Zemin konsolidasyonu yetersiz dolmuş göl tiplerinin göl kenarlarındaki iz fosil morfolojisi üzerinde temel bir kontroldür. Göl su seviyesinin sürekli yer değiştirmesinden kaynaklı Scoyenia iknofasiyesi gözlenir (Şekil 4). Böcek yürüme izleri, yuvalar ve omurgalı ayak izleri tipik bileşenlerdir. (Knaust ve Hauschke, 2005; Lucas ve diğ., 2011; Minter ve diğ., 2007; Zhang ve diğ., 1998).

Şekil 4. *Scoyenia iknofasiyesi*



Kaynak: Buatois ve Mangano (2009)

ve https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Page_Quinton'dan düzenlenmiştir.

Göl seviyesinin yükselmesiyle gelen tatlı su girdisi, kıyı bölgelerinde tuzluluğu düşürerek biyolojik çeşitliliği artırırken gölün derin merkezinde kimyasal tabakalaşmanın sürmesi yaşamın kısıtlı kalmasına neden olur. Özellikle delta ovaları ve tatlı su kaynaklarıyla beslenen yerel bataklıklar, böceklerden memelilere kadar pek çok tür için bir çekim merkezi oluştururken, aşırı tuzlu veya sıcak su alanlarında gelişen mikrobiyal matlar (bakteri tabakaları) belirli böceklerin yuva yapmasını kolaylaştırır. "Mat-zeminler" olarak adlandırılan bu biyolojik tabakalar, hem zemini stabilize edip erken sertleşmesini sağlayarak hem de ayak izi ve yuva gibi biyojenik yapıların bozulmadan fosilleşme şansını artırarak jeolojik kayıtlarda kritik bir rol oynar. Göl kenarında tuzluluğa dayanıklı saz ve otların kök izleri, eklem bacaklı yürüme izleri, meniskat izler, iki loblu izler, sinek ve halkalı solucan barınma ve beslenme izleri ile amfibiler, dinazorlar, kuşlar ve memeliler tarafından oluşturulan omurgalı yürüme izleri barındırır. Havaya maruz kalmış aşırı tuz ortamlarında tuz çiçeklenmesi ve

diğer tafonomik etkiler nedeniyle kötü korunmuş omurgalı ayak izleri, sediment içi yuvalar Scoyenia iknofasiyesinin kanıtı olarak kabul edilir (Cohen vd., 1991; Rodriguez-Aranda ve Calvo, 1998; Scott ve diğ., 2010). Göl seviyesi dalgalanmaları, özellikle yüzeylerin birden fazla transgresyon yada regresyon döngüsünü içermesi durumunda, iz fosil topluluklarının üst üste binmesi gözlenir (Scott ve diğ., 2009).

Kaynakça:

Bohacs, K.M., Carroll, A.R., Neal, J.E., Mankiewicz, P.J. (2000). Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated sequence-stratigraphic–geochemical framework. In: Gierlowski-Kordesch, E.H., Kelts, K.R. (Eds.), Lake Basins through Space and Time. AAPG Studies in Geology, vol. 46, pp. 3–34.

Bohacs, K.M., Carroll, A.R., Neal, J.E. (2003). Lessons from large lake systems: thresholds, nonlinearity, and strange attractors. In: Chan, M.A., Archer, A.W. (Eds.), Extreme Depositional Environments: Mega End Members in Geologic Time. GSA Spec. Pap. 370, pp. 75–90.

Bohacs, K.M., Grabowski Jr., G., Carroll, A.R. (2007a). Lithofacies architecture and variations in expression of sequence stratigraphy within representative intervals of the Green River Formation, Greater Green River Basin, Wyoming and Colorado. Mountain Geol. 44, 39–60.

Bohacs, K.M., Hasiotis, S.T., Demko, T.M. (2007b). Continental ichnofossils of the Green River and Wasatch Formations, Eocene, Wyoming: a preliminary survey, proposed relation to lake-basin type, and application to integrated paleo-environmental interpretation. Mountain Geol. 44, 79–108.

Bohacs, K. M., Carroll, A. R., Neal, J. E., & Mankiewicz, P. J. (2001). Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework. In *Lakes: Their Deposition, Stratigraphy and Chemical Resources* (Eds. M. R. Rosen and A. S. Cohen). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 140, 447–480.

Buatois, L.A., Ma'ngano, M.G. (1998). Trace fossil analysis of lacustrine facies and basins. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 183, 71–86.

Buatois, L.A., Ma'ngano, M.G. (2004). Animal-substrate interactions in freshwater environments: applications of ichnology in facies and sequence stratigraphic analysis of fluvio-lacustrine successions. In: McIlroy, D. (Ed.), *The Application of Ichnology to Palaeoenvironmental and Stratigraphic Analysis*. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, vol. 228, pp. 311–333.

Buatois, L.A., Mangano, M.G. (2007). Invertebrate ichnology of continental freshwater environments. In: Miller III, W. (Ed.), *Trace Fossils. Concepts, Problems, Prospects*. Elsevier, Amsterdam, pp. 285–323.

Buatois, L.A., Mangano, M.G. (2009). Applications of ichnology in lacustrine sequence stratigraphy: potential and limitations. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 272, 127–142.

Bromley, R.G., Asgaard, U. (1979). Triassic freshwater ichnocoenoses from Carlsberg Fjord, East Greenland. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 28, 39–80.

Cohen, A.S. (2003). *Paleolimnology*. Oxford University Press, Oxford, 500 pp.

Cohen, A., Lockley, M., Halfpenny, J., Michel, A.E. (1991). Modern vertebrate track taphonomy at Lake Manyara, Tanzania. *Palaios* 6, 371–389.

Carroll, A.R., Bohacs, K. M. (1999). Stratigraphic classification of ancient lakes: balancing tectonic and climatic control. *Geological Society of America*, 27, 99-102.

Carroll, A.R., Bohacs, K.M. (2001). Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins. *AAPG Bull.* 85, 1033–1053.

Carroll, A.R., Doebbert, A.C., Booth, A.L., Chamberlain, C.P., Rhodes-Carson, M.K., Smith, M.E., Johnson, C.M., Beard, B.L. (2008). Capture of high-altitude precipitation by a low-altitude Eocene lake, western U.S. *Geology* 36, 791–794.

Gierlowski-Kordesch, E. (2010). Lacustrine carbonates. In: Alonso-Zarza, A.M., Tanner, L.H. (Eds.), *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments and Processes*. *Developments in Sedimentology*, vol. 61. Elsevier, Amsterdam, pp. 2–101.

Gierlowski-Kordesch, E., Park, L.E. (2004). Comparing species diversity in the modern and fossil record of lakes. *J. Geol.* 112, 703–717.

Hammer, T.U. (1986). *Saline Lake Ecosystems of the World*. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht, 616 pp.

https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Page_Quinton

Knaust, D., Hauschke, N. (2005). Living conditions in a Lower Triassic playa system of Central Germany: evidence from ichnofauna and body fossils. *Hallesches Jahrb. Geowiss.* B19, 95–108.

Kutzbach, J. E., & Street-Perrott, F. A. (1985). Milankovitch forcing of fluctuations in the level of tropical lakes from 18 to 0 kyr BP. *Nature*, 317(6033), 130-134.

Leggitt, V.L., Biaggi, R.E., Buchheim, H.P. (2007). Palaeoenvironments associated with caddisflydominated microbial-carbonate mounds from the Tipton Shale Member of the Green River Formation: Eocene Lake Gosiute. *Sedimentology* 54, 661–699.

Lamond, R.E., Tapanila, L. (2003). Embedment cavities in lacustrine stromatolites: evidence of animal interactions from Cenozoic carbonates in U.S.A. and Kenya. *Palaios* 18, 445–453.

Lucas, S.G., Voigt, S., Lerner, A.J., Nelson, J.W. (2011). Late Early Permian continental ichnofauna from Lake Kemp, north-central Texas, USA. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 308, 395–404.

Magyar, I., Muller, P.M., Sztano, O., Babinszki, E., Lantos, M. (2006). Oxygen-related facies in Lake Pannon deposits (Upper Miocene) at Budapest-Ko'ba'nya. *Facies* 52, 209–220.

Mangano, M.G., Buatois, L.A., Wu, X., Sun, J., Zhang, G. (1994). Sedimentary facies, depositional processes and climatic controls in a Triassic lake, Tanzuang Formation, western Henan Province, China. *J. Paleolimnol.* 11, 41–65.

Mangano, M.G., Buatois, L.A., Wu, X., Sun, J., Zhang, G. (2000). Triassic lacustrine sedimentation from the Tanzhuang Formation, Jiyuan-Yima Basin, southeastern China. In: Gierlowski-Kordesch, E., Kelts, K. (Eds.), *Global Geological Record of Lake Basins*. AAPG Studies in Geology, vol. 46, pp. 133–140.

Melchor, R.N. (2004). Trace fossil distribution in lacustrine deltas: examples from the Triassic rift lakes of the Ischigualasto–Villa Unio'n basin, Argentina. In: McIlroy, D. (Ed.), *The*

Application of Ichnology to Palaeoenvironmental and Stratigraphic Analysis. Geological Society London, Spec. Publ., vol. 228. pp. 335–354.

Minter, N.J., Krainer, K., Lucas, S.G., Braddy, S.J., Hunt, A.P. (2007). Palaeoecology of an Early Permian playa lake trace fossil assemblage from Castle Peak, Texas, USA. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 246, 390–423.

Ortı, F., Rosell, L., Anado'n, P. (2003). Deep to shallow lacustrine evaporites in the Libros Gypsum (southern Teruel Basin, Miocene, NE Spain): an occurrence of pelletal gypsum rhythmites. *Sedimentology* 50, 361–386.

Renaut, R.W., Gierlowski-Kordesch, E. (2010). Lakes. In: James, N., Dalrymple, R. (Eds.), *Facies Models 4*. Geol. Ass. Can., St. John's, *Geotext* 6, pp. 541–575.

Rodriguez-Aranda, J.P., Calvo, J.P. (1998). Trace fossils and rhizoliths as a tool for sedimentological and palaeoenvironmental analysis of ancient continental evaporite successions. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 140, 383–399.

Scott, J.J., Renaut, R.W., Buatois, L.A., Owen, R.B. (2009). Biogenic structures in exhumed surfaces around saline lakes: an example from Lake Bogoria, Kenya Rift Valley. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 272, 176–198.

Scott, J.J., Renaut, R.W., Owen, R.B. (2010). Taphonomic controls on animal tracks at saline, alkaline Lake Bogoria, Kenya Rift Valley: impact of salt efflorescence and clay mineralogy. *J. Sediment. Res.* 80, 639–665.

Scott, J. J., Buatois, L. A., & Mángano, M. G. (2012). Lacustrine Environments. In K. T. Knaust & R. G. Bromley (Eds.), *Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments (Developments in Sedimentology, Vol. 64, pp. 379-417)*. Elsevier.

Smoot, J.P. (1983). Depositional subenvironments in an arid closed basin: the Wilkins Peak Member of the Green River Formation (Eocene), Wyoming, U.S.A. *Sedimentology* 30, 801–827.

Street-Perrott, F. A., Harrison, S. P. (1984). Temporal variations in lake levels since 30,000 yr BP: An index of the global hydrological cycle. In J. E. Hansen, T. Takahashi (Eds.), *Climate Processes and Climate Sensitivity* (pp. 118-129). American Geophysical Union, Washington, D. C

Uchman, A., Alvaro, J.J. (2000). Non-marine invertebrate trace fossils from the Tertiary Calatayud- Teruel Basin, NE Spain. *Rev. Esp. Paleontol.* 15, 203–218.

Uchman, A., Nemeč, W., Ilgar, A., Messina, C. (2007). Lacustrine trace fossils and environmental conditions in the early Miocene Ermenek Basin, southern Turkey. *Ann. Soc. Geol. Polon.* 77, 123–139.

Williams, W.D. (1998). Salinity as a determinant of the structure of biological communities in salt lakes. *Hydrobiologia* 381, 191–201.

Williams, W.D., Boulton, A.J., Taaffe, R.G. (1990). Salinity as a determinant of salt lake fauna: a question of scale. *Hydrobiologia* 197, 257–266.

Zhang, G., Buatois, L.A., Mañgano, M.G., Acenolaza, F.G. (1998). Sedimentary facies and environmental ichnology of a Permian playa-lake complex in western Argentina. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 138, 221–243.

BÖLÜM 2

AŞINDIRICI MATERYALLERİN TEKNİK KARAKTERİZASYONU VE ENDÜSTRİYEL SINIFLANDIRILMASI

METİN BAĞCI¹

Giriş

Modern üretim teknolojilerinde aşındırma ve parlatma süreçleri, materyal şekillendirme disiplininin temel taşlarından birini oluşturmaktadır. Bu süreçlerde kullanılan aşındırıcılar, kökenlerine göre doğal ve yapay (sentetik) olmak üzere iki ana kategoride değerlendirilmektedir. Literatürde bir malzemenin aşındırıcı olarak nitelendirilebilmesi için temel kriter, temas ettiği diğer bir materyali mekanik etkileşim yoluyla çizibilme veya yüzeyinden mikro ölçekte talaş kaldırabilme kapasitesine sahip olmasıdır. Daha teknik bir perspektifle aşındırıcı; kristal yapısı, sertliği, tokluğu ve kimyasal uyumluluğu gibi ayırt edici parametreleri sayesinde bir iş parçasının aşındırılması, kesilmesi, taşlanması veya parlatılması süreçlerinde kullanılan yüksek mukavemetli maddelerdir. Endüstriyel uygulamalarda "evrensel" bir aşındırıcıdan söz etmek mümkün

¹ Doç. Dr. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği,
Orcid: 0000-0002-1056-2854

değildir. Optimizasyon süreci; işlenecek malzemenin karakteristiğine bağlı olarak, operasyonun en yüksek etkinlikte ve en düşük birim maliyetle gerçekleştirilmesini sağlayacak doğru aşındırıcının seçilmesine dayanmaktadır. Bir aşındırıcının performansını belirleyen fiziksel özelliklerin başında sertlik ve dayanıklılık gelmektedir. Bu iki karakteristik özellik, çoğu zaman birbirine bağımlı bir korelasyon gösterse de (genellikle biri artarken diğeri azalma eğilimindedir), kavramsal olarak tamamen farklı olguları ifade ederler. Dayanıklılık, malzemenin dinamik yükler veya yüksek basınç altında kırılmaya karşı gösterdiği yapısal direnç ve mukavemet kudreti olarak tanımlanır. Bu çalışma, elde edilen deneysel bulgular ışığında, Türkiye'deki mermer üreticileri ve aşındırıcı imalatçıları için bilimsel bir projeksiyon sunmayı ve sektörel gelişime ışık tutmayı amaçlamaktadır.

Aşındırıcıların tanımlanması ve kapsamı

Aşındırıcılar; mineralojik özellikleri, sertlik dereceleri ve fiziksel uyumlulukları temelinde, diğer katı malzemelerin kontrollü bir biçimde aşındırılması, kesilmesi veya parlatılması (cilalanması) amacıyla kullanılan taş, mineral veya mineral benzeri maddeler olarak tanımlanabilir. Endüstriyel imalât yöntemlerinde, nihai ürünün yüzey kalitesine ulaşabilmesi için aşındırma süreçlerinin en az bir safhasına başvurulması neredeyse kaçınılmazdır. Bu durum, çok geniş bir yelpazede yer alan aşındırıcı materyallerin farklı disiplinlerde (jeoloji, malzeme bilimi, madencilik vb.) kullanımını zorunlu kılmıştır. Aşındırıcı materyallerin seçimi, söz konusu malzemenin aşındırma işlevini en efektif ve ekonomik düzeyde yerine getirebilme yeteneğine göre belirlenir. Literatürde bu materyaller genel olarak orijinlerine göre ve aşındırıcılık kapasitelerine göre olmak üzere iki ana ekseninde sınıflandırılmaktadır.

Malzemenin yüzey kaldırma gücünü ifade eden teknik derecelendirme. Teknik olarak aşındırıcılar; öğütme, parlatma, aşındırma, sürtme yoluyla temizleme veya basınçlı kum püskürtme gibi yöntemlerle katı malzemeyi yüzeyden temizleyen maddeleri kapsar. Ancak terminolojik karmaşayı önlemek adına belirtilmelidir ki; tormalama işlemlerinde kullanılan kesici uçlar veya sadece parlatma işlevi gören (talaş kaldırmayan) parlaticı ajanlar, saf aşındırıcı kategorisinde değerlendirilmemektedir (Vogel vd, 1983; Harben, 1978; Hight, 1983).

Aşındırıcı Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi

Aşındırma teknolojisinin kökenleri, antropolojik açıdan insanlık tarihinin en erken evrelerine, yazının icadından binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. İlkel toplumlarda aşındırıcılar; ağaç, kemik ve çakmak taşı gibi materyallerden imal edilen aletlerin keskinleştirilmesinde birincil araç olarak kullanılmıştır. Çömlekçilik öncesi dönemde ise taşların sürterek şekillendirilmesi, tas ve tabak üretimi gibi zanaat dallarında aşındırıcıların etkin rol oynadığı görülmektedir.

Bilimsel anlamda aşındırma biliminin başlangıcı, insanoğlunun sert kayalara form vererek bunları kesici aletler olarak kullanmaya başladığı döneme tarihlenebilir. Bu sürece dair en eski arkeolojik kayıtlar M.Ö. 4000 yıllarında Mısır'da ortaya çıkmıştır; bulgular, kayaçların günümüz kesme makinelerine benzer mekanizmalarla işlendiğini kanıtlamaktadır. Aşındırıcı endüstrisinin asıl endüstriyel ivmelenmesi, M.Ö. 2000 dolaylarında Yakın ve Orta Doğu'da metalürjinin doğuşuyla eş zamanlı gerçekleşmiştir. Bu dönemden itibaren aşındırıcılar, metalürjik talepler doğrultusunda sürekli gelişim göstermiştir. Tarihsel süreçteki dönüm noktaları şunlardır:

Antik Dönem: İlk bilinen aşındırıcı kuvars kumu ve çakmak taşıdır. M.Ö. 500'de Theodorus tarafından tanımlanan zımpara (emery),

Anadolu'nun zengin yatakları sayesinde temel aşındırıcı haline gelmiştir. Elmasın toz formunda kullanımını ise M.Ö. 800'lere kadar uzanmaktadır.

Sentetik Devrim (1901-1904): Dr. Acheson tarafından 1901'de Silisyum Karbür (SiC) sentezlenmiştir. 1904 yılında Higgins fırınının keşfiyle boksitin eritilmesiyle elde edilen Alüminyum Oksit (Al_2O_3) ticari bir başarı kazanmıştır.

Modern Gelişmeler (1934-1960): 1934 yılında R. R. Ridgeway tarafından Bor Karbür (B_4C) üretilmiştir. 1960'ta General Electric bünyesinde sentetik elmasın üretilmesi, aşındırıcı teknolojisinde yeni bir çığır açmıştır.

Endüstriyel Kullanım Alanları

Günümüzde materyal biliminde çok sayıda madde aşındırıcı sınıflamasına dahil edilmektedir. Sert minerallerin yanı sıra, "yumuşak" aşındırıcılar olarak nitelendirilen pomza, diyatomit, talk ve kalsine killeri; temizlik maddeleri, sabunlar ve hassas cilalama süreçlerinde uygulama alanı bulmaktadır. Ancak bu minerallerin aşındırıcı olarak kullanımı, toplam endüstriyel tüketimlerinin (örneğin inşaat sektörü) küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Ayrıca, metalik elyaflar (çelik teli), pirinç, bakır elyafı ve çelik saçmalar gibi sert metalik bileşikler de aşındırma işlemlerinde kritik öneme sahiptir. Literatürde, kesici takımlar ile aşındırıcılar arasındaki sınır bazen belirsizleşse de; çelik ve tungsten karbür gibi malzemelerin daha çok "kesici", doğal ve yapay minerallerin ise "aşındırıcı" olarak tanımlanması genel kabul görmüştür (Industrial Minerals, 1971a).

Aşındırıcıların Sınıflandırılması

Aşındırıcılar, endüstriyel literatürde hammadde kaynağına, üretim yöntemine ve nihai ürün bazındaki formuna göre sınıflandırılmaktadır. Temel sınıflama, Doğal ve Yapay (Sentetik) olmak üzere iki ana grupta toplanır (DPT, 1995; Wellborn, 1991).

Nihai ürün bazında ise aşındırıcılar dört grupta değerlendirilir (Hight, 1983):

- Gevşek Aşındırıcı Taneler
- Yapıştırılmış Aşındırıcılar
- Kaplama Aşındırıcılar
- Taneler ve Tozlar (Sabun ve temizleyiciler için)

Aşındırıcıların fiziksel performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri tane boyutudur. Tablo 1’de endüstride standart olarak kabul edilen tane boyutu sınıflandırması sunulmuştur.

*Tablo 1. Aşındırıcıların Tane Boyutuna Göre Sınıflandırılması
(μm)*

Sınıflandırma	Tane Boyutu Aralığı (μm)
Taneli Aşındırıcılar (Kaba)	8, 10, 12, 14, 16, 20, 24, 30, 36
Taneli Aşındırıcılar (Orta)	46, 54, 60, 70, 80, 90, 100, 120
Taneli Aşındırıcılar (İnce)	150, 180, 220
Toz Aşındırıcılar (Mikro)	240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 700
Hassas Tozlar (Ultra İnce)	800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000

Günümüz pazarında yapay ürünler, yüksek verimlilikleri nedeniyle doğal ürünlerin yerini büyük oranda ikame etmektedir. Başlangıç maliyetleri yüksek olmasına rağmen, sentetik aşındırıcıların sunduğu homojenlik ve dayanıklılık endüstriyel optimizasyon için tercih sebebidir. Bununla birlikte, ahşap ve deri işlemede kullanılan grena gibi bazı doğal aşındırıcıların yerini tam olarak doldurabilecek ekonomik bir yapay alternatif henüz bulunmamaktadır.

Aşındırıcı Ürünlerin Nihai Ürün Bazında Sınıflandırılması

Aşındırıcı materyaller, endüstriyel gereksinimlere göre ya ham tanecik formunda ya da çeşitli bağlayıcı matrisler içerisinde kompozit yapılar halinde kullanılırlar (Tablo 2).

Gevşek Aşındırıcılar

Gevşek aşındırıcılar, hem bağımsız bir nihai ürün olarak hem de diğer aşındırıcı sistemlerin (kaplama veya yapıştırılmış) temel yapı taşı olarak işlev görürler. Bu taneler; aşındırıcı aletler, parlatici pastalar, temizleyiciler ve yapısal bileşiklerin üretiminde "çekirdek materyal" rolünü üstlenirler. Basınçlı aşındırma işlemlerinde (kumlama gibi); eritilmiş alümina, silisyum karbür ve çelik bilyelerin yanı sıra silis kumu, korund, grena, çakmaktaşı ve kuvars gibi doğal mineraller yaygın olarak kullanılmaktadır. Çelik bilyeler haricindeki bu materyallerin büyük çoğunluğu Mohs ölçeğine göre 7 ve üzeri sertliğe sahiptir. Gevşek tanelerin performansını belirleyen fiziksel parametreler şunlardır:

Sertlik ve Dayanıklılık: Tanelerin dinamik yükler altında parçalanmaya karşı gösterdiği yapısal dirençtir.

Morfoloji (Tane Şekli): Bazı uygulamalarda sürtünmeyi optimize eden yuvarlaklaştırılmış taneler tercih edilirken, derin kesme işlemleri için keskin uçlu angular (köşeli) yapılar arzu edilir.

Özgül Ağırlık: Eşit büyüklükteki taneler için yüksek özgül ağırlık, hedef yüzeye daha büyük bir kinetik etkileme kuvveti uygulanması anlamına gelir.

Kullanım alanları, tane boyutuna göre üç kategoriye ayrılır:

Kaba Taneler: Taş kesme, döküm camın kaba parlatılması ve kayaç yüzeylerinin düzlenmesi.

Tablo 2. Aşındırıcıların Tasnifi (DPT, Aşındırıcı Sanayii Hammaddeleri ÖİKR, 1995).

A) Doğal Aşındırıcılar Çok sert aşındırıcılar (H7>)	
Elmas H-10	Demir oksitleri
Korund H-9	Kireçtaşı
Zımpara H-7'den 9'a kadar	Pomza
Gröna H-6.5'dan 7.5'e kadar	Silisli şist
Orta sertlikte Olan (5.5- 7 arası)	Mil
Çakmaktaşı	Talk
Kalsedon	Trablus taşı
Flint	Tebeşir tozu
Novakülit	B) Yapay Aşındırıcılar
Kuvars	Bor karbür
Kuvarsit	Bor nitrid (nitrür)
Kumtaşı	Kalsiyum karbonat
Silis kumu	Kalsiyum fosfat
Diğer kayalar ve mineraller	Seryum oksit
Killi kireçtaşı	Krom oksit
Bazalt	Kil (çok kavrulmuş)
Feldspat	Elmas (yapay)
Granit	Eritilmiş alüminyum oksit
Perlit	Demir oksitleri
Pomza taşı	Kandil isi (kireç)
Konglomeratik kuvars	Periklaz
Düşük sertlikteki aşındırıcılar	Silisyum karbür
Apatit	Tantal karbür
Kalsit – Tripoli	Kalay oksit
Tebeşir	Titanyum karbür
Kil	Tungsten karbür
Diyatomit	Zirkonyum oksit

Orta Taneler: Optik merceklerin parlatılması, inşaat kayaçlarının şekillendirilmesi ve ahşap yüzey estetiği.

İnce Tozlar: Cam, dekoratif kayaç, metal-plastik parlatma ve otomobil kaporta bakım ürünleri.

Yapıştırılmış Aşındırıcılar

Bu sınıftaki ürünler, aşındırıcı tanelerin bir yapıştırıcı matris ile belirli geometrik formlarda (çark, disk, tuğla vb.) bir araya getirilmesiyle oluşur. Sentetik aşındırıcıların (SiC ve Al₂O₃) gelişimi, doğal korund ve zımparanın bu kategorideki kullanımını minimize etmiştir. Yapıştırıcı tipine göre beş temel teknoloji mevcuttur:

- **Camlaştırılmış Bağlar:** Kil-feldspat karışımı ile seramik fırınlarında üretilir. Endüstriyel kullanımın %75'ini oluşturur; su, asit ve yağlara karşı tam direnç gösterir.
- **Reçineli Bağlar:** Sert yapay reçineler kullanılır. Dökümhanelerde ve yüksek hızlı taşlama işlerinde tercih edilen esnekliği düşük, mukavemeti yüksek ürünlerdir.
- **Lastik Bağlar:** Doğal veya yapay lastik matrislidir. Rötüş işlerinde ve çok ince kesme araçlarında kullanılır.
- **Gomalaklı Bağlar:** Kağıt fabrikası merdaneleri gibi hassas parçalarda "ayna yüzey" rötüşü elde etmek için kullanılır.
- **Silikat Bağlar:** Asit silisit tuzu bazlıdır. Isıl birikimin minimumda tutulması gereken hassas ağızlı aletlerin bilenmesinde kullanılır.

Kaplama Aşındırıcılar

Halk arasında "zımpara kağıdı" olarak bilinen bu ürünler, boyutlandırılmış tanelerin kağıt, kumaş veya fiber gibi esnek bir taban üzerine yapıştırılmasıyla üretilir. Günümüzde "cam kağıdı"

gibi terimlerin yerini sentetik alüminyum oksit ve silisyum karbür kaplamalar almıştır. Üretim süreci şu aşamalardan oluşur:

Ezme ve Sınıflandırma: Tozlanmayı önlemek için silindirlerden geçirme.

Tasnif: Yıkama, kurutma ve demir içeren safsızlıkların manyetik ayırıcılarla uzaklaştırılması.

Ebatlandırma: Tanelerin hava veya su içerisinde çökme hızıyla (sedimentasyon) hassas boyutlara ayrılması.

Sabun, Temizleyiciler ve Parlaticılar İçin Taneler

Bu grupta genellikle düşük sertliğe sahip (Mohs 3-5 arası) doğal ancak işlenmiş mineraller kullanılır. Temel faktör düşük maliyet ve yüzey korumadır. Evsel temizleyicilerde kuvars gibi sert minerallerden kaçınılır; çünkü cam veya emaye gibi yüzeyler (Mohs 6) bu maddeler tarafından kalıcı olarak çizilir. Ayrıca, kireçli bileşenlerin sabunlarla reaksiyona girerek çözünmez kalıntılar oluşturması engellenmelidir. Bu amaçla kullanılan ideal materyaller; mikron mertebesinde 100-325 mesh aralığına kadar değişen tane iriliğindeki feldspat, ponza, tripoli ve kalsiyum karbonattır.

Aşındırıcıların Hammadde ve Üretim Yöntemine Bağlı Sınıflandırılması

Aşındırıcı materyaller, doğadan doğrudan elde edilen mineraller veya endüstriyel fırınlarda sentezlenen yapay bileşikler olarak iki ana grupta incelenmektedir.

Doğal Aşındırıcılar

Zımpara (Emery)

Zımpara, korund (Al_2O_3) mineralinin manyetit veya hematit ile oluşturduğu doğal bir karışımdır (Şekil 1b). Jeolojik olarak şistler ve metamorfize olmuş kalkerler içerisinde koyu renkli yumrular

halinde bulunur. Sertlik derecesi Mohs skalasına göre 7-9 arasında değişmekte olup, özgül ağırlığı yaklaşık 4 g/cm³'tür. Tarihsel olarak ilk kez M.Ö. 2000 yıllarında Yunanistan'ın Naxos adasında ve kısa süre sonra Türkiye'de keşfedilmiştir. Sentetik aşındırıcıların (yapay korund) piyasaya sürülmesiyle zımparaya olan talep azalmış olsa da; ekonomik oluşu ve kendine has parlatma karakteristiği nedeniyle günümüzde halen aşındırıcı kağıt/kumaş üretiminde ve metal parlatma süreçlerinde kullanılmaktadır (Coes, 1971).

Korund

Saf alüminyum oksit minerali olan korund, hegzagonal sistemde kristallenir. Şeffaf ve kıymetli türleri yakut (rubi) ve safir olarak adlandırılır. Optik camların hassas traşlanması için yüksek saflıkta korund taneleri tercih edilir. Doğal korund; plaser yataklarda, feldspat zenginleşmelerinde veya mercek şekilli özel yataklarda bulunur. Higgins fırınında boksitten elde edilen yapay korund (eritilmiş alümina), doğal korunda göre daha düşük poroziteye sahip olması nedeniyle döküm çeliği gibi ağır sanayi uygulamalarında doğal muadilinin yerini almıştır.

Diğer Doğal Aşındırıcılar

Elmas: Bilinen en sert doğal malzemedir. Yüksek maliyeti nedeniyle kaplama ürünlerde kullanımı sınırlı olsa da, toz veya bağlı formda ultra sert malzemelerin işlenmesinde alternatifsizdir.

Grena (Gröna): Genellikle almandin türüdür. Isıl işleme sertliği artırılarak ahşap işleme ve basınçlı kum püskürtme (kumlama) işlerinde yoğun olarak kullanılır.

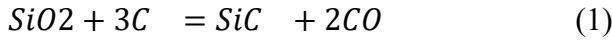
Kuvars: Keskin uçlu yapısına rağmen düşük dayanıklılığı nedeniyle daha çok deri parlatma ve genel bakım işlerinde tercih edilir.

Yapay (Sentetik) Aşındırıcılar

Yapay aşındırıcılar, doğal minerallerin aksine kontrollü koşullarda üretildikleri için sabit kompozisyon ve kristal yapı sunarlar. Modern endüstrinin ihtiyaç duyduğu yüksek performans bu sayede karşılanmaktadır.

Silisyum Karbür (SiC)

1891'de Edward G. Acheson tarafından keşfedilen ilk ticari yapay aşındırıcıdır. Silis kumu ve kok kömürünün 2000 C° üzerindeki reaksiyonu ile üretilir (1).



Yeşil Silisyum Karbür: Çok yüksek saflıktadır; karbür uçlu delicilerin keskinleştirilmesinde kullanılır (Şekil 1a).

Siyah Silisyum Karbür: Genel amaçlı aşındırma işlemlerinde ve elektrikli ev aletleri sanayisinde tercih edilir.

Eritilmiş Alümina (Fused Alumina)

1900 yılında Charles B. Jacobs tarafından boksitin elektrik fırınında ergitilmesiyle keşfedilmiştir. Üretim, 2000C° üzerindeki sıcaklıklarda Higgins fırınlarında gerçekleştirilir. Kok kömürü, reaksiyon sırasında hem elektrik iletkenliğini sağlar hem de demir ve silis safsızlıklarını indirgeyerek cüruf halinde ayrılmasına yardımcı olur (Şekil 1c-d). Genellikle %93-99 oranında alpha-alümina içerir. Titanyum dioksit (TiO₂) içeriğine göre "yüksek titanlı" (%3) ve "düşük titanlı" (%2) olarak ayrılır; bu oran aşındırıcının kırılmasını doğrudan etkiler.

Şekil 1. A) Yeşil renkli Silisyum Karbür, B) Zımpara Tozu C) Pembe renkli eritilmiş alümina (Korund), D) Beyaz renkli eritilmiş alümina (Korund).



Özel Yapay Aşındırıcılar

Bor Karbür (B_4C): Elmas dışındaki en sert malzemelerden biridir (Knoop: 2760). Gevşek toz olarak parlatma işlerinde ve nükleer reaktör kontrol çubukları gibi aşınma direnci gerektiren parçalarda kullanılır.

Kübik Bor Nitrit (CBN): 2000 C° den yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında sentezlenir. Sertliği elmasa yakındır (Knoop: 8000) ve ısıya dayanıklılığı sayesinde sert uzay aracı metallerinin işlenmesinde süper performans sergiler.

Aşındırıcı malzemelerin fiziko-mekanik özellikleri

Aşındırıcı materyallerin karakterizasyonu; sertlik, dayanıklılık, kimyasal uyumluluk ve yapısal bütünlük gibi parametrelerin bir bileşkesidir. Endüstriyel literatürde aşındırıcı; sahip olduğu bu spesifik özellikler marifetiyle diğer materyallerin aşındırılması, kesilmesi, şekillendirilmesi veya parlatılması süreçlerinde aktif rol oynayan kayaç, mineral veya sentetik maddeler olarak tanımlanır (Industrial Minerals, 1971b; Industrial Minerals,1973; Industrial Minerals,1977).). Mevcut tüm endüstriyel gereksinimleri tek başına karşılayabilen "ideal" veya "evrensel" bir aşındırıcı bulunmamaktadır. Bu durum, materyal biliminde farklı uygulama alanları için optimize edilmiş geniş bir aşındırıcı yelpazesinin kullanımını zorunlu kılmaktadır (Tablo 3).

Sertlik Parametresi ve Ölçüm Metodolojileri

Aşındırıcılık kapasitesinin en temel göstergesi olan sertlik, geleneksel ve modern olmak üzere iki ana skalada değerlendirilmektedir.

Mohs Sertlik Skalası ve Sınırları

Geleneksel mineraloji terminolojisinde kullanılan Mohs skalası, 1'den (talk) 10'a (elmas) kadar sıralanan on adet referans mineralden oluşur. Ancak bu skala, günümüz malzeme mühendisliği için iki temel nedenden dolayı yetersiz kalmaktadır:

Doğrusal Olmayan Artış: Skaladaki rakamlar mutlak bir değeri temsil etmez; kademeler arası fiziksel farklar eşit değildir. Özellikle Korund (9) ile Elmas (10) arasındaki gerçek sertlik farkı, skalanın geri kalan tüm kademeleri arasındaki toplam farktan daha büyüktür.

Hassasiyet Eksikliği: Ölçüm yöntemi (çizme testi) subjektiftir ve hassas endüstriyel veriler üretmekte kabadır.

Knoop Sertlik Ölçümü ve Standardizasyon

Mohs skalasının eksikliklerini gidermek amacıyla Ridgway, Ballard ve Bailey (1933) yapay maddeleri de içeren genişletilmiş skalalar önermiş; ancak asıl devrim Knoop, Peters ve Emerson (1939) tarafından geliştirilen Knoop Sertlik Testi ile gerçekleşmiştir. Bu yöntem, numune yüzeyinde piramit uçlu bir elmasın belirli bir yük altında yaptığı mikro-çentikleme derinliğini ölçer. Knoop ölçeği, elmasın sertliğine kadar olan tüm spektrumda sayısal ve yeniden üretilebilir veriler sunması nedeniyle bilimsel literatürde standart kabul edilmektedir.

Dayanıklılık (Tokluk) ve Yapısal Mukavemet

Sertlikten sonra bir aşındırıcı için en kritik özellik dayanıklılıktır. Bu özellik, malzemenin operasyonel baskı ve sürtünme altında parçalanmaya karşı gösterdiği yapısal direnci ifade eder. Dayanıklılık ölçümünde en yaygın laboratuvar yöntemi; malzemenin çelik bir kap içerisinde çelik bilyelerle birlikte öğütülmesi ve tanelerin kırılma derecesinin analiz edilmesidir. Ancak "yüksek dayanıklılık" her zaman arzu edilen bir durum değildir; uygulamaya bağlı olarak malzemenin kırılma biçimi belirleyicidir: Bazı uygulamalarda aşındırıcının parçalanarak sürekli yeni ve keskin uçlar oluşturması istenir. Bazı işlemlerde ise tanelerin parçalanmadan yüzeyde yuvarlanarak parlatma yapması talep edilir.

Silisyum Karbür (SiC) vs. Eritilmiş Alüminyum Oksit (Al₂O₃)

Bu iki temel yapay aşındırıcı arasındaki fark, dayanıklılık ve uygulama arasındaki ilişkiyi mükemmel bir şekilde örnelemektedir.

Silisyum Karbür (SiC): Daha yüksek sertliğe sahiptir ancak dayanıklılığı düşüktür. Hızla parçalanarak keskin uçlar yaratır; bu nedenle kalın katmanların kaldırılması gereken derin kesme işlemlerinde rakipsizdir (Şekil 2a).

Tablo 3. Aşındırıcı Malzemelerin Özellikleri Kaynak: Harben,1978

	Doğal Mineraller	Yapay Mineraller	Kimyasal Bileşim	Mohs Sertliği	Knoop Sertliği
Karbon	Elmas	Elmas	C	10	8.200
Silis	Kuvars		SiO ₂	7	788
	Çakmaktaşı		SiO ₂	7	
	Pomza taşı		%80 SiO ₂	5.5-6.5	560
	Diyatomit		SiO ₂		
	Feldspat		K, Na, Ca, Alüminyum	6	560
	Olivin		(MgFe) ₂ SiO ₄	6.Tem	560-820
	Almandin		Fe ₃ Al (SiO ₄) ₄	7.05.2008	788-1.190
	Cam/Cam		Soda kireç	6.05.2005	483-550
		Silisyum	SiC	9.5-9.6	2.500
Alümina	Korund	Alümina	Al ₂ O ₃	9	1.950-2.200
	Zımpara		SiO ₂ FeOAl ₂ O ₃	7.Eyl	1.800
		Zirkonia	Zr/Al		
Bor		Boron karbür	B ₄ C	9.5	2.800
		boronitrit	CBN	9.7-9.8	4.700
Demir		Granül/Saçma		8.5	1.190-2.200

Şekil 2. A) Silisyum Karbürden aşındırma diski B) Zımpara kağıdı C) Pembe renkli Korund aşındırma diski, D) Beyaz renkli Korund aşındırma diski.



Eritilmiş Alüminyum Oksit (Al₂O₃): Sertliği SiC'den düşük olsa da yapısal olarak çok daha dayanıklıdır. Yavaş parçalanarak yüzeyde düz bir profil oluşturur; bu özelliği onu parlatma, düzgülleştirme ve cilalama süreçleri için ideal kılar (Şekil 2c-d).

Hassas Uygulamalar ve Yumuşak Aşındırıcılar

Hassas yüzeylerin temizlenmesinde (örneğin elektrik devreleri veya oksidasyon tabakalarının kaldırılması) ana malzemeye zarar vermeden sadece yüzey katmanını etkileyen düşük sertlikteki "yumuşak" aşındırıcılar kullanılır. Bu kategoride; cam bilyeler, öğütülmüş ceviz kabukları ve benzeri organik/inorganik bileşenler yer almaktadır.

Aşındırıcı Seçiminde Belirleyici İkincil Parametreler

Aşındırıcı seçiminde sertlik ve dayanıklılık temel kriterler olsa da, operasyonel verimliliği belirleyen diğer kritik faktörler de mevcuttur. Tane Büyüklüğü ve Dağılımı: Uygulama yapılacak yüzeyin kalitesi, aşındırıcı tanelerinin boyut homojenliğine bağlıdır. Tane büyüklüğü dağılımı, yüzey kusurlarının önlenmesinde hayati rol oynar. Büyük tanelerin yüzeyde derin ve istenmeyen çizikler oluşturmasını engellemek; aynı zamanda aşındırma işlemine katkı sağlamayan çok küçük tanelerin verimsizliğini ortadan kaldırmak için materyalin hassas bir şekilde ebatlandırılması zorunludur. Kimyasal Kararlılık ve Kompozisyon: Aşındırıcıların çoğu hem fiziksel hem de kimyasal açıdan yüksek istikrara sahiptir. Ancak metalik aşındırıcılar, özellikle düşük kirlenme toleransı olan spesifik endüstriyel süreçlerde, seramik veya doğal aşındırıcılara göre üstünlük sağlayabilmektedir.

Ekonomik Faktörler: Çeşitli aşındırıcıların maliyeti, sundukları performans ve işe uygunlukları ile dengelenmelidir. Bir malzemenin endüstriyel ölçekte bulunabilirliği tedarik zinciri ve maliyet analizinde (Harben, 1978) belirleyici bir değişkendir.

Aşındırıcı ürünlerin değerlendirilmesi ve test metodolojileri

Üretilen aşındırıcı disklerin, bağlı, kaplama veya gevşek formdaki maddelerin performans ve güvenlik standartlarını karşılaması için sistematik test süreçleri uygulanır. Bu değerlendirmeler, genellikle

ürün yeniliği, mevcut sistemlerin iyileştirilmesi veya emniyet protokollerinin tesisi amacıyla gerçekleştirilir.

Değerlendirme Amaçları ve Kategorizasyon

Coes (1971) tarafından tanımlanan temel test hedefleri şunlardır:

- Yeni geliştirilen aşındırıcı veya bağlayıcı materyallerin performans ölçümü.
- Üretim yöntemindeki modifikasyonların sonuçlarının analizi.
- Standart materyallerin değişen kullanım koşulları altındaki mukavemetinin belirlenmesi.
- Spesifik uygulamalar için standart parçalar arasından optimal konfigürasyonun seçimi.
- Testler genel olarak Kontrol Testleri (hız, emniyet, kalite sınıfı) ve Aşındırma Testleri (performans, operasyonel koşul simülasyonu) olarak ikiye ayrılır. Özellikle temizleme testleri, aşındırıcı ve bağlayıcıların ön hazırlık değerlendirmesinde kritik bir veri kaynağıdır.

Gevşek Aşındırıcıların Karakterizasyonu

Gevşek (toz/tane) formdaki aşındırıcılar üzerinde yapılan testler, imalat kontrolü ve bilimsel araştırma odaklı olarak iki ana eksen de çakışır.

Fiziksel ve Kimyasal Analizler

Kimyasal Analiz: Standart ıslak yöntemlerle yapılan bu analizlerde; eritilmiş boksitte SiO₂ ve TiO₂, Bayer alüminasında Na₂O, silisyum karbürde toplam SiC ve bor karbürde BC oranı gibi kritik değerler spektrometrik yöntemlerle izlenir.

Magnetik Demir Tayini: Özellikle beyaz aşındırıcılarda estetik ve performans açısından kritik olan magnetik demir varlığı, yüksek yoğunluklu magnetik ayırıcılar ile tespit edilir.

Özgül Ağırlık: Materyalin porozite veya sinterleme derecesine bağlı olarak gösterdiği sapmalar "piknometre" yöntemi ile belirlenir. Bu veri, ürün formülasyonunun düzeltilmesinde temel teşkil eder.

Yoğunluk ve Mekanik Mukavemet Testleri

Gevşek Paketli Yoğunluk: Sıkıştırılmamış aşındırıcının birim hacim ağırlığı (lb/ft^3) olarak ölçülür. Bu değer, tanelerin geometrik formunun (şekil mukavemet gücü) bir göstergesidir; yüksek değerler bloklu yapıları, düşük değerler ise daha ince/kaplama tipi şekilleri ifade eder.

Etkiye Karşı Mukavemet Gücü: Tanelerin dinamik çarpma etkilerine karşı direncidir. İki yaygın metot kullanılır:

Radyal Hızlandırma Yöntemi: Döner bir silindirik tüp içerisinde aşındırıcının merkezden çevreye ivmelendirilerek çelik yüzeye çarpması sağlanır.

Vakum Altında Döner Kırıcı Yöntemi: Tanelerin vakum ortamında bir döner kırıcının önüne kontrollü bırakılarak her bir tanenin doğrudan etkiye maruz kalması sağlanır.

Optik ve Petrografik İncelemeler

Mikroskobik analizler; gözenek yapısı, cüruf dağılımı ve safsızlıkların tespiti için zorunludur. Özellikle polarizan mikroskop ve ince kesit hazırlama teknikleri kullanılarak şu detaylar incelenir:

Kristal Yapısı: Sinterlenmiş aşındırıcılarda kristal büyüklüğünün kontrolü.

Safılık Kontrolü: Bayer yöntemi ürünlerinde tahmin edilen alüminyum miktarının petrografik doğrulanması.

Morfoloji ve Keskinlik: Özellikle çok ince tane gerektiren kaplama ürünlerde, tanelerin uç yapısı ve ezilmemiş keskin kenarlarının mikroskobik tayini.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında incelenen veriler ve teknik parametreler ışığında, aşındırıcı teknolojisinin modern imalât süreçlerindeki stratejik önemi ve gelecekteki gelişim yönelimleri şu ana başlıklar altında özetlenebilir.

Sentetik Materyallerin Hakimiyeti: Tarihsel süreçte doğal minerallerle (zımpara, korund) başlayan aşındırma disiplini, günümüzde yerini büyük oranda Silisyum Karbür (SiC) ve Alüminyum Oksit (Al_2O_3) gibi kontrollü koşullarda üretilen yapay materyallere bırakmıştır. Bu değişim, endüstriyel süreçlerde ihtiyaç duyulan yüksek homojenlik, tekrarlanabilir kalite ve özelleştirilebilir kristal yapısı gerekliliklerinin doğal bir sonucudur.

Karakterizasyonda Çok Boyutlu Yaklaşım: Bir aşındırıcının performansı sadece Mohs sertliği ile açıklanamayacak kadar karmaşıktır. Knoop mikro-sertlik değerleri, materyalin moleküler direnci hakkında kesin veriler sunarken; tokluk (dayanıklılık) parametresi, operasyonel verimliliği (kendinden bileme veya profil koruma) belirleyen esas unsurdur. SiC'nin gevrek ama keskin yapısı ile eritilmiş alüminanın yüksek tokluğu arasındaki denge, doğru uygulama için temel seçim kriteridir.

Endüstriyel Optimizasyon ve Maliyet: Türkiye'deki mermer ve doğal taş işleme sektörü için aşındırıcı seçimi, sadece bir sarf malzeme tedariki değil, doğrudan bir maliyet ve yüzey kalitesi mühendisliğidir. Yanlış tane boyutu veya uygun olmayan bağlayıcı (reçineli, seramik vb.) seçimi, enerji tüketimini artırmakta ve işlenen kıymetli taşın piyasa değerini düşüren yüzey kusurlarına yol açmaktadır.

Standartlaşma ve Kalite Kontrol: Gevşek aşındırıcılardan kaplama ürünlere kadar tüm kategorilerde, manyetik demir tayini, özgül ağırlık ölçümü ve radyal hızlandırma gibi test metodolojilerinin uygulanması; üretimin sürekliliği ve güvenliği açısından kritiktir. Özellikle yüksek hızlı taşlama işlemlerinde, bağlayıcı matrisin dinamik yüklere mukavemeti hayati önem taşımaktadır.

Sonuç olarak; aşındırıcı teknolojisi, malzeme bilimindeki gelişmelere paralel olarak daha spesifik ve yüksek performanslı (Bor Karbür, CBN vb.) çözümlere doğru evrilmektedir. Yerel üreticilerin küresel pazarda rekabet edebilirliği, bu teknik karakterizasyon yöntemlerini üretim süreçlerine entegre etmelerine ve işlenecek malzemenin (örneğin kireçtaşları veya sert kayalar) mineralojik yapısına en uygun aşındırıcı kombinasyonunu bilimsel verilerle belirlemelerine bağlıdır.

Kaynaklar

American National Standards Institute (ANSI). (1971). *Specifications for checking the size of diamond abrasive grain* (ANSI B74.16-1971). 13 p.

American National Standards Institute (ANSI). (1976). *Specifications for size of abrasive grains-Grinding Wheel, Polishing, and General industrial uses* (ANSI B74.12-1976). 11 p.

American National Standards Institute (ANSI). (1977). *Specifications for grading of certain abrasive grains on coated abrasive products* (ANSI B74.18-1977). 37 p.

American National Standards Institute (ANSI). (1981). *Specifications for grading of diamond powder in subsieve size* (ANSI B74.20-1981). 18 p.

American National Standards Institute (ANSI). (1990). *Annual book of ASTM standards*, Vol. 04.07, C241-90, 32-33.

Austin, G. T. (1991). Abrasive materials. *Minerals Yearbook*, Vol. 1, Metals and Minerals. United States Bureau of Mines (USBM), 77–96.

Chandler, H. P. (1964). *Industrial Diamond: A Material Survey*. BuMines IC 8200, 150 p.

Coes, L. Jr. (1971). *Abrasive*. Springer-Verlag.

Dickson, T. (1980). Silicon carbide - Through hard times. *Industrial Minerals*, 159, 65–71.

Dickson, T. (1987). Silicon carbide - Potential in maturity. *Industrial Minerals*, 243, 63–71.

DPT. (1995). *Aşındırıcı sanayii hammaddeleri: Zımpara, Korund ve Granatlar*. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, DPT: 2419-ÖİK: 478.

Goepfert, G. J., & Williams, J. L. (1959). The wear of abrasives in grinding. *Mechanical Engineering*, 81, 69 p.

Griffiths, J. B., & Dickson, E. M. (1988). Turkey's industrial minerals: Production, potential, investment and trade. *Industrial Minerals*, Supplement, 246, 5–55.

Hahn, R. S. (1963). *On the nature of the grinding process*. Proc. 3rd. Int. Conf. on Mach. Tool Design, Birmingham, Oxford: Pergamon Press, 129 p.

Harben, P. (1978). Abrasives - Taking the rough with the smooth. *Industrial Minerals*, 134, 49–73.

Harold, A., & Taylor, Jr. (1991). Dimension Stone. *Minerals Yearbook*, Vol. 1, Metals and Minerals. United States Bureau of Mines (USBM), 1009–1017.

Hight, R. P. (1983). Abrasives. In *Industrial Minerals and Rocks (Nonmetallics Other than Fuels)* (5th ed., pp. 11–32). AIME.

Industrial Minerals, (1971a). Abrasives: Uses widening but improved quality moderating demand. *Industrial Minerals*, 46, 9–28.

Industrial Minerals. (1971b). An introduction to abrasives: Natural gives way to synthetic. *Industrial Minerals*, 45, 9–11.

Industrial Minerals. (1973). Silicon carbide: Grades, prices and uses. *Industrial Minerals*, 66, 25–28.

Industrial Minerals. (1977). Impact finishing: Synthetic abrasives erode the natural markets. *Industrial Minerals*, 121, 19–31.

Mc Michael, B. (1990). Abrasive minerals: Taking the rough with the smooth. *Industrial Minerals*, 269, 19–33.

Power, T. (1985). Fused minerals- The high purity high performance oxides. *Industrial Minerals*, 214, 37–57.

Rabinowicz, E. (1965). *Friction and wear of materials*. John Wiley & Sons Inc.

Shadmon, A. (1989). *Stone: An introduction*. Intermed. Tech. Publ., 140 p.

Skillen, A. (1994). Abrasive blast cleaning: Evolution or revolution, *Industrial Minerals*, 317, 25–39.

Tepordei, V. V. (1991). Sand and gravel. *Minerals Yearbook*, Vol. 1, Metals and Minerals. USBM, 889–904.

Vogel, H. H., & Bartos Mines Corp. Staff. (1983). Abrasives. In *Industrial Mineral and Rocks* (5th ed., pp. 21–25). AIME.

Wellborn, W. W. (1991). The expanding role of synthetic minerals in industry. *Industrial Minerals*, 283, 53–61.

BÖLÜM 3

URBAN PLANNING AND GEOTECHNICAL MAPPING

NECMİ YARBAŞI¹

Introduction

Rapid and unplanned urbanization, excessive population growth, and natural disasters triggered by global climate change highlight the need for multidisciplinary working groups and engineering-based data to guide site selection and land use decisions in urban areas. Today, the influx of population into cities leads to the construction of unplanned engineering structures. It is undeniable that a significant portion of the problems arising from environmental and climatic impacts stem from a lack of planning. The solution to this dilemma lies in geotechnical mapping, a multidisciplinary field of study that intersects geology, geophysics, civil engineering, urban design, landscape engineering, and meteorology.

Geotechnical mapping is a strategic information source that directly inputs planning decisions by revealing the spatial distribution of parameters that define the engineering behavior of soil and rock environments. These maps make it possible to identify

¹ Assistant Professor, Atatürk University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering. Orcid ID: 0000-0003-4259-1278

areas suitable for settlement, delimit risky areas, and establish construction conditions on a scientific basis.

The geological, tectonic, and structural characteristics (such as fault lines, alluvial soils, and riverbeds) of areas to be urban planned must be considered as fundamental data. In engineering structures built without considering these fundamental characteristics, natural events (earthquakes, landslides, floods, rockfalls, and avalanches) can turn into natural disasters, resulting in much higher loss of life and damage than expected. It is crucial to pay attention to the information specified in geotechnical zoning maps, both during the planning phase and in the updating of plans, and to make changes according to the criteria specified in these maps. Only in this way will it be possible to construct engineering structures suitable for subsurface conditions, in accordance with technological advancements, and to create habitable areas without causing environmental problems.

Today, geotechnical mapping is a vital source of information containing essential data for selecting suitable areas (industrial zones, residential areas, solid waste disposal sites, pipelines, etc.) to ensure the healthy development and sustainability of cities. It is important and necessary that this information be prepared by a multidisciplinary working group (urban planning architects, civil, geological, geophysical, landscape and meteorological engineers).

The concept and scope of geotechnical mapping

Geotechnical mapping is the process of analyzing engineering geology and geotechnical engineering data using geographic information systems (GIS) and representing their spatial distribution on maps. Unlike classical geological maps, these maps are directly geared towards engineering applications and planning decisions. Therefore, geotechnical maps are application maps that directly serve planning, design, and risk management processes

(Rogers & Luna, 2004:1-2; Celikbilek & Sapmaz, 2016:63-64). The geotechnical mapping process is based on three fundamental components.

Engineering properties of soil and rock characteristics: Soils and rocks should be classified not only according to their geological origin, but also according to geotechnical parameters such as bearing capacity, shear strength, compressibility, permeability, and dynamic properties.

Modeling lithological changes: Soils can exhibit significant variations, even over short distances, at both horizontal and vertical scales, depending on the characteristics of their sedimentation environment. Small-scale maps reveal general trends, while large-scale maps require more detailed field data. Geotechnical mapping makes data usable for local or regional decision-making by using geostatistical and numerical interpolation methods. The geotechnical mapping process represents a balance between the scale of the map, the level of detail it contains, and the reliability of this information.

Decision-oriented assessment: All obtained parameters can be presented as separate maps, or they can be combined into a single map using multivariate assessments (lithology, slope, hydrogeology, seismicity, mechanical and physical properties, etc.), resulting in integrated maps showing suitability for settlement, building restrictions, and risk levels. It should be remembered that geotechnical zoning maps are one of the fundamental tools of risk reduction-focused planning. The static and dynamic parameters used in these maps can generally be divided into three categories. Evaluating these parameters together is guiding not only for safe construction but also for long-term performance.

Physical properties: Properties such as grain size distribution, consistency limits, natural water content, and unit weight provide information about soil classification.

Mechanical properties: Cohesion, internal friction angle, modulus of elasticity, and compressibility parameters are used to determine the stress-strain behavior that will occur under structural loads.

Dynamic and environmental properties: Parameters such as shear wave velocity, soil amplification potential, liquefaction susceptibility, and dynamic and static groundwater levels play a critical role in evaluating performance, especially under seismic effects.

Geotechnical maps can also be prepared with different thematic content depending on their intended use and planning scale. It should be noted that this approach encompasses thematic maps such as descriptive maps revealing soil and rock properties, engineering data-focused maps, hazard maps showing potential risks, and suitability maps supporting land-use decisions.

Since the soil environment is naturally heterogeneous, geotechnical maps require a probability-based interpretation. Data accuracy, density, test quality, and modeling method directly affect the reliability of the map. Therefore, uncertainty analyses, confidence intervals, and data quality classifications are of great importance in such studies. From this perspective, geotechnical mapping is not only a visualization of engineering data but also a decision support system that supports multidisciplinary planning decisions.

Geological and geotechnical data in urban planning

Urban planning is a holistic process that includes not only socio-economic data but also natural environmental conditions. The geological and geotechnical characteristics of soil and rock environments are among the fundamental factors that directly influence the direction and intensity of urban development (Yarbaşı, 2022:537-539).

Geological and geotechnical data contain critical information for the safety of engineering structures, the continuity of infrastructure and superstructure, and the reduction of disaster risks. Dense construction in soils with insufficient bearing capacity or high compressibility can lead to settlements and structural damage over long periods. Similarly, in areas with high groundwater levels, the liquefaction potential increases, and the damage caused by earthquakes also increases (Martínez-Graña et al. 2013:46-47; Yurekli & Karaca, 2020:15).

In this context, the use of reliable geotechnical data is necessary depending on the planning scale. While identifying risks is crucial in higher-level planning, determining soil behavior on a parcel-by-parcel basis becomes important in lower-level planning.

Data collection and analysis methods

The accuracy and reliability of geotechnical mapping are directly related to the scope and quality of the datasets used. Field studies constitute the primary data source for determining the soil profile. The main field testing methods in this context include boreholes, standard penetration tests (SPT), cone penetration tests (CPT), and geophysical methods. In particular, seismic refraction methods, which allow for the determination of shear wave velocities over large areas, and the micro-zonation maps derived from them are widely used today (General Directorate of Disaster Affairs (Türkiye):1-2).

Laboratory experiments enable the determination of the physical and mechanical properties of samples taken from the field. Grain size distribution, consistency limits, shear box, and triaxial unconfined compression tests constitute the basic inputs in modeling soil behavior. Today, it is known and widely practiced that urban or regional planning studies are carried out by a multidisciplinary working group (geology, geophysics, civil engineering, architecture,

landscape engineering, etc.). The effects of global climate change, which is becoming increasingly common, necessitate the inclusion of meteorological engineering in this working group. Such a working group, supported by widely used artificial intelligence technologies and software engineering, will significantly strengthen decision support systems. Geological data are critical in urban or regional planning, settlement safety, sustainability, infrastructure quality, and creating resilient and smart cities against natural disasters. Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, and deep learning analyses will enable accurate and rapid results in risk analysis, land use, and spatial decision-making processes (Rogers & Luna 2004:1; Yarbaşı, 2025:198-200).

Therefore, the use of artificial intelligence technologies in the analysis of the obtained data will offer significant advantages in terms of both speed and accuracy in urban and regional planning. As a result, it will be possible to make appropriate spatial decisions in a shorter time in line with the goals of economy, social integration and environmental sustainability in urban and regional planning. It should never be forgotten that the successful execution of this process depends on the accurate analysis of natural environmental conditions and the accuracy and reliability of geological data (Salata & Uzelli, 2023:1).

The impact of geological data on urban planning

Geological data forms the basis of urban or regional planning decisions. Soil structure, the presence of fault lines, groundwater levels, and other geological features in an area are important parameters in determining suitable sites for construction. Therefore, urban or regional planning without considering geological data can lead to serious risks, such as structures vulnerable to natural disasters and environmental degradation. The use of geological data in the urban planning process includes the following elements:

Soil survey and analysis: Detailed soil surveys and soil classifications should be carried out to determine suitable areas for construction.

Seismic risk assessment: Active fault lines and seismic activity should be mapped, and containment and specific engineering solutions should be developed in these areas.

Hydrogeology: High groundwater levels can affect building foundations. Therefore, drainage systems and proper water management should be planned.

Disaster risk maps: Risk maps for earthquakes, landslides, floods, rockfalls, avalanches, and other natural disasters should be prepared and integrated into urban planning decisions.

The use of geological data in urban or regional planning offers advantages in many respects:

Safe construction: Identifying geological risks in advance ensures that structures are built safely against hazards such as earthquakes, landslides, or liquefaction.

Efficient use of natural resources: Planning that takes into account natural resources and land potential supports the protection of agricultural areas, the sustainability of water resources, and the continuity of natural ecosystems.

Disaster risk management: Planning based on geological analyses reduces loss of life and property from natural disasters by limiting construction in high-risk areas.

Environmental and ecosystem protection: Planning aimed at protecting sensitive ecosystems, watersheds, and natural habitats strengthens environmental sustainability. Long-term economic benefits: Planning based on a solid geological foundation minimizes economic losses by reducing infrastructure damage and post-disaster repair costs (Celikbilek & Sapmaz, 2016:63-64).

Land use in urban planning

In urban planning, land use and geological data form a strategic process aimed at regulating the physical, social, and economic structure of cities. This process aims for the balanced, sustainable, and livable development of urban areas. In urban planning, land use ensures the most efficient use of existing natural and artificial resources, while geological data supports the safe and sustainable use of these resources. Therefore, the integration of land use and geological data is crucial for a healthy urban development process.

Land use is a fundamental element that determines which functions a region will be allocated to and how it will be evaluated. In the urban planning process, land use encompasses the balanced distribution and organization of different functions such as housing, commerce, industry, transportation, green spaces, and public service areas. It is important to remember that topography, geological and hydrogeological characteristics, and climatic conditions are parameters that must be considered when selecting land. Another crucial point is that appropriate changes should be made without disrupting the balance of nature. Such a study can significantly reduce loss of life and property in the event that natural events turn into natural disasters.

The growth of urban areas and rapid population increase necessitate more complex and strategic land-use decisions. Environmental, economic, and social factors should be considered when making these decisions. Furthermore, land-use policies should also include objectives such as reducing traffic congestion, protecting green spaces, increasing social infrastructure areas, and improving urban aesthetics (Yarbaşı, 2024:1355).

Conclusion

In urban planning, the integrated use of land use and geological data provides the necessary information to ensure the sustainable and safe development of cities. The relationship between urban planning and geotechnical mapping demonstrates that this is not merely a technical data transfer, but a multidisciplinary decision support mechanism. Proper land use planning protects the social, economic, and environmental balance of cities, while geological data enhances the safety of structures and minimizes the risks of natural disasters. When these two elements are evaluated with an integrated approach:

Urban security: Identifying geological risks and planning accordingly increases resilience to disasters.

Sustainable development: Conserving natural resources and efficient land use ensures livable cities for future generations.

Planning: Decision-making based on scientific data produces flexible and resilient solutions that meet the long-term needs of cities.

The development of remote sensing and artificial intelligence-based analysis methods will increase the accuracy and updatability of urban zoning maps. In the future, the inclusion of geotechnical maps, created over time, into urban planning processes will play a significant role in managing climate change and disaster risks. Considering the geological characteristics of areas indicated on zoning maps is a fundamental requirement for the sustainable development of cities. Therefore, the combined assessment of geological data and land use will improve the quality of urban life while simultaneously securing the future growth and development potential of cities.

References

Celikbilek, A. & Sapmaz, G. (2016). Risk Management and Microzonation in Urban Planning: An Analysis for Istanbul. *Disaster Science And Engineering*. 2(2), p. 59-66.

General Directorate of Disaster Affairs (Türkiye). (2004). Current Status Report on Seismic Microzonation for Municipalities. https://www.drmonline.net/drmlibrary/pdfs/MERM_Executive_Summary_2004_03_E.pdf

Martínez-Graña, A., Goy, J.L; Zazo, C., Yenes, M. (2013). Engineering Geology Maps for Planning and Management of Natural Parks: Las Batuecas-Sierra de Francia and Quilamas (Central Spanish System, Salamanca, Spain)” *Geosciences*, 3, 46-62; DOI:10.3390/geosciences3010046

Rogers, J.D. & Ronaldo, L. (2004). Impact of Geographical Information Systems on Geotechnical Engineering. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 3. <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/5icchge/session00g/3>

Salata, S. & Uzelli, T. (2023). Are Soil and Geology Characteristics Considered in Urban Planning? An Empirical Study in Izmir (Türkiye), *Urban Science*, Volume 7, Issue 1, DOI:10.3390/urbansci7010005

Yarbaşı, N. (2022). Evaluation of Geological Data in Urban Planning. *International Conference on Sustainable Cities and Urban Landscapes (ICSULA 2022), October 26-27, 2022. Konya, Türkiye (presented paper) Vol. 1, Proceeding Book - ISBN:978-625-8246-85-8, pp. 536-540. https://f0b47925-b258-4468-8ac3-68a0e42cc408.filesusr.com/ugd/614b1f_5a1edce22e6d4a0f926a4eb879f9e896.pdf*

Yarbaşı, N. (2024). Resilient, Sustainable Cities And Geology. *6th International Black Sea Modern Scientific Research Congress, August 23-25, 2024, Trabzon, Türkiye, Vol. 1. Proceeding Book - ISBN:978-625-367-832-6*, pp. 1351-1355.

https://b0699d12-70ad-4313-81f1-0833a431c01a.filesusr.com/ugd/614b1f_484ed20333674aa5b2e634a5f443b278.pdf

Yarbaşı, N. (2025). Analysis Methods of Geological Data Used in City Planning with Artificial Intelligence Technologies, *Selcuk 12th International Conference on Applied sciences May 23 - 25, 2025 - Konya –Türkiye*. Proceeding Book – ISBN:978-625-5962-74-4, pp 198-202.

https://www.selcukkongresi.org/_files/ugd/797a84_3203e64f19984697b67a0dd9f9aa5377.pdf

Yurekli, H., Karaca, O. (2020). Analysis and Mapping of Liquefaction Potential of Alluvial Soil: The Case of Nazilli-Aydın (Western Turkey), *Celal Bayar University Journal of Science*, Vol. 16, No. 1, pp. 15-23.

BÖLÜM.4 AĞIR METALLERİN ÇEVRESEL ETKİLERİ VE FİTOREMEDİASYON YAKLAŞIMLARI

Özlem Erdem¹

Giriş

Toprak, ekosistemlerin sürdürülebilirliği için temel bir bileşen olup, canlı yaşamının devamı ve besin döngülerinin sağlıklı işleyişinde merkezi rol oynar. Ancak, sanayileşme, yoğun tarımsal uygulamalar ve fosil yakıt kullanımı gibi insan kaynaklı etkiler, toprağa ağır metal ve diğer kirleticilerin sürekli olarak salınmasına yol açmaktadır. Bu durum, toprak ekosistemlerini hem biyolojik hem de kimyasal açıdan hassas bir duruma getirmektedir. Ağır metaller toprağa hem doğal yollarla (minerallerin ayrışması, erozyon, volkanik faaliyetler) hem de antropojenik yollarla (madencilik, endüstriyel atıklar, gübre ve pestisit kullanımı) ulaşmaktadır. Toprakta biriken bu metaller biyolojik olarak parçalanamaz ve bitkilerin metabolizmasını, fotosentezini ve büyümesini olumsuz etkileyerek gıda güvenliğini tehdit eder. Ayrıca, toprak mikroorganizmalarının faaliyetlerini sınırlayarak ekosistem dengelerini bozabilir. Toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri (pH, organik madde, kil mineralleri, redoks koşulları) ağır metallerin mobilitesi ve bitkiler tarafından alınabilirliği üzerinde belirleyici rol oynar. Bu nedenle, kirlenmiş alanların iyileştirilmesi için stratejiler geliştirilirken bu özellikler dikkate alınmalıdır. Geleneksel fizikokimyasal iyileştirme yöntemleri (toprağın kazılması, yıkama, stabilizasyon, elektrokinetik uygulamalar) etkili olmakla birlikte maliyetli ve çevresel riskler taşıyan yöntemlerdir. Bu noktada, fitoremediasyon bitkiler aracılığıyla kirleticilerin uzaklaştırılması veya stabilize edilmesi, sürdürülebilir, düşük maliyetli ve çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Özellikle hiperakümülatör bitkiler, organlarında yüksek metal biriktirme kapasiteleri ve kendilerine has hücrel mekanizmaları sayesinde ağır metallerle kirlenmiş sahaların temizlenmesinde kritik rol oynar. Bu bitkiler, kök sistemleri, metal taşıyıcı proteinler, şelatlayıcı bileşikler ve antioksidan savunma sistemleri sayesinde metallerin toksik etkilerinden korunur ve kirleticilerin güvenli bir şekilde ortamdaki uzaklaştırılmasına olanak sağlar. Bu kitap bölümünde, ağır metallerin toprağa giriş mekanizmaları, topraktaki davranışları, bitkiler aracılığıyla gerçekleştirilen iyileştirme yöntemleri ile hiperakümülatör bitkilerin çevresel işlevleri ele alınarak, fitoremediasyon alanında kapsamlı bir perspektif sunulacaktır.

Ağır Metallerin Çevresel Kaynakları ve Bitki Alımı

Ağır metaller çevreye doğal ve antropojenik kaynaklardan girmektedir. En önemli doğal kaynaklar minerallerin ayrışması / bozunması (weathering), erozyon ve volkanik aktivite iken; antropojenik kaynaklar arasında madencilik, izabe (eritme), elektrokaplama, tarımda pestisitlerin ve (fosfatlı) gübrelerin yanı sıra biyokatıların kullanımı, çamur dökümü, endüstriyel deşarj, atmosferik birikim vb. yer almaktadır (Modaihsh ve ark., 2004; Chehregani & Malayeri, 2007; Fulekar ve ark., 2009; Sabiha-Javied ve ark., 2009; Wuana & Okieimen, 2011). Tablo 1, seçilmiş ağır metallerin çevredeki antropojenik kaynaklarını göstermektedir (Ali ve ark., 2013).

Ağır metaller sanayide, tarımda, gıda işlemede ve evlerde çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. İnsanlar tarafından çeşitli ürünlere dönüştürüldükleri için önemli çevresel ve endüstriyel kirleticilerdir (Kirat & Dartay, 2023a).

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Munzur Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Orcid: 0000-0002-9324-3655

Kurşun (Pb), kadmiyum (Cd) ve çinko (Zn), madencilik ve izabe faaliyetlerinin bir sonucu olarak eşzamanlı şekilde yüksek konsantrasyonlarda ortaya çıkabilmektedir [20]. Bitkilerin gelişimi için önemli bir metal olan Zn, yüksek konsantrasyonlarda toksik etki göstermektedir. Çinkonun bitkiler için yararlılık aralığı oldukça dardır (Kupper ve ark., 2000; Clemens, 2006). Kurşun (Pb) ve Kadmiyum (Cd) ise bitkilerin büyümesi için gerekli elementler değildir. Bu elementler bitkilerin fotosentezini ve klorofil sentezini engelleyerek olumsuz etkilere neden olabilmekte ve nihayetinde bitki ölümlerine yol açabilmektedir (Milone ve ark., 2003; Tang ve ark., 2009; Kirat, 2020).

Çevresel koşullar, metallerin bitkiler tarafından alınmasında önemli bir rol oynamaktadır; metallerin topraktan bitkiye transferi, toprağın ağır metal içeriği ve toprağın sorpsiyon (emilim) kapasitesi gibi çeşitli faktörler (doğal ve antropojenik) tarafından yönetilen çok karmaşık bir süreçtir. Bu faktörlerin, topraklardaki metallerin mobilitesi (hareketliliği) ve biyoyararlanımı süreçlerini kontrol ettiği bilinmektedir (Liu ve ark., 2008; Kirat & Aydin, 2015)

Ağır Metaller ve Toprak Sistemi

Ağır metal terimi, genellikle yüksek atom numarası, yüksek atom ağırlığı ve yüksek yoğunluğa sahip kimyasal elementleri tanımlamak için kullanılan bir kavramdır. Cıva (Hg), kadmiyum (Cd), kurşun (Pb), çinko (Zn), arsenik (As), bakır (Cu), krom (Cr) ve nikel (Ni) doğada yaygın olarak bulunan ağır metal örnekleri arasında yer almaktadır. Bu elementler çevreye hem doğal (jeojenik) süreçler hem de insan faaliyetleri (antropojenik) sonucu taşınmaktadır. Petrol ve gaz üretiminden kaynaklanan atık sular, fosfatlı gübre kullanımı, kanalizasyon çamuru uygulamaları, metal madenciliği ve izabe faaliyetleri, pestisit kullanımı, elektrokaplama işlemleri ve fosil yakıtların yanması ağır metallerin başlıca antropojenik kaynakları arasında gösterilmektedir (Muradoglu ve ark., 2015). İnsan, varoluşundan bu yana çevresiyle sürekli etkileşim halindedir ve özellikle son yüzyılda çevredeki kimyasal, fiziksel ve biyolojik değişimlerden doğrudan etkilenmiştir (Güven ve ark., 2009; Kahvecioğlu ve ark., 2009; Sarkar, 2002; Selinus ve ark., 2005; Kirat ve Dartay, 2023b).

Topraktaki ağır metallerin insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkileri olabileceğinden, ağır metal birikimleri ve akümülyasyon çalışmaları önem kazanmıştır (Tlusto ve ark., 2006; Mitchell & Burridge, 1979). Ağır metallerin neden olduğu çevre kirliliği birçok faaliyetten kaynaklanırken, toprak sistemindeki ağır metal kirliliği temel olarak minerallerin ayrışması / bozunması gibi doğal süreçlerin yanı sıra endüstri, tarım, fosil yakıtların yanması, araç emisyonları ve madencilik ile ilgili antropojenik faaliyetlerden kaynaklanmaktadır (Williams & David, 1976; Dickshroon ve ark., 1979; Kirat, 2020).

Topraktaki arsenik, florür ve uranyum kirliliğinin jeojenik kökenli olduğu dünyanın birçok bölgesinde rapor edilmiştir. Atmosferik birikim (kuru ve ıslak birikim) aynı zamanda topraktaki uçucu ağır metallerin önemli bir kaynağıdır (Moaref ve ark., 2014). Kentsel kanalizasyon sularının ve endüstriyel atıksuların sulama amacıyla kullanılması da tarım alanlarında ağır metal kirlenmesine katkıda bulunmaktadır (Shahid ve ark., 2020; Iqbal ve ark., 2021). Tarımda gübre, pestisit ve biyokatıların uygulanması da tarım arazilerinde ağır metal kirliliğine neden olmaktadır (Srivastava ve ark., 2017). Kömür ve diğer madencilik süreçleri, çevredeki topraklarda metal konsantrasyonunu artırmaktadır. Araç emisyonları, yollar ve otoyollar boyunca önemli bir toprak kirliliği kaynağıdır (Khalid ve ark., 2018). Katı ve elektronik atıkların uygunsuz bir şekilde bertaraf edilmesi, toprak ekosisteminde ağır metal kirliliğine yol açmaktadır (Ouabo ve ark., 2019; Karimian ve ark., 2021). Ağır metaller, mikroorganizmalara veya kimyasallara maruz kaldıklarında mikrobiyal veya kimyasal bozulmaya uğramadıkları için kalıcıdır (Emenike ve ark., 2018). Topraktaki ağır metaller; kirlenmiş toprakla doğrudan temas veya alım, besin ağı veya kirlenmiş yeraltı suyunun tüketilmesi yoluyla toprak sağlığına, toprak mikroorganizmalarına, bitkilere, hayvanlara ve

insan sađlıđına zarar vermektedir. Topraktaki ađır metaller ayrıca ekinlerin çimlenme sorunları ve fitotoksisite gibi farklı yollarla gıda kalitesinde dūşūşe neden olmaktadır (Singh & Kalamdhad 2011; Sarwar ve ark., 2017). Topraktaki metaller, toprak mikrobiyal komūnitelerinin biyokūtesini, davranıřlarını ve faaliyetlerini deđiřtirebilmektedir (Abdu ve ark., 2017; Madhav ve ark., 2008).

Ağır metaller biyolojik olarak parçalanamayan elementler oldukları için toprak ortamında uzun sūre kalıcıdır ve bu nedenle çevresel açıdan önemli bir kirletici grubu oluşturmaktadır (Suman ve ark., 2018). Tarımsal uygulamalar kapsamında kullanılan organik ve mineralli gūbreler, çeşitli metallerin tarım topraklarına taşınmasına neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra bitki koruma ūrūnleri de ağır metallerin potansiyel kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri (pH, organik madde içeriği, kil mineralleri, redoks koşulları vb.), ağır metallerin toprak içerisindeki mobilitesini ve bitkiler tarafından alınabilirliğini belirleyen biyoyararlanım ūzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Zwolak ve ark., 2019). Toprakta biriken ağır metal konsantrasyonlarının artması, bitki sağlığı ve gıda gūvenliđi açısından önemli riskler oluşturmakta ve kirlenmiş alanların iyileştirilmesini gerekli kılmaktadır. Ağır metaller, biyolojik sistemlerdeki işlevlerine göre esas (Zn, Cu, Ni gibi) ve esas olmayan (Cd, Pb, Hg gibi) elementler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu nedenle ağır metallerin karasal, atmosferik ve sucul ortamlara girişinin sınırlandırılması ve kirlenmiş alanlarda etkilerinin azaltılmasına yönelik iyileştirme stratejilerinin uygulanması būyūk önem taşımaktadır (Gerhardt ve ark., 2017). Ağır metallerle kirlenmiş toprakların ıslahına yönelik olarak çeşitli remediasyon yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel olarak toprağın kazılarak uzaklaştırılması ve depolanması, yakma işlemleri, toprak yıkama, katılaştırma/stabilizasyon ve elektrokinetik uygulamalar gibi mekanik ve fiziko-kimyasal tekniklere dayanmaktadır (Sheoran ve ark., 2011; Cristaldi ve ark., 2017; Wang ve ark., 2017) (Surukite, 2023).

Ağır metaller biyolojik sistemlerdeki rollerine göre genellikle iki gruba ayrılmaktadır: Bitki gelişimi için eser miktarlarda gerekli olan esas (essential) elementler (rneđin; Zn, Cu ve Ni) ve biyolojik fonksiyonları bulunmayan ya da toksik etkiler gösteren esas olmayan (non-essential) elementler (rneđin; Cd, Pb ve Hg). Bu nedenle ağır metallerin karasal, atmosferik ve sucul ortamlara girişinin sınırlandırılması ve kirlenmiş alanlarda çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik etkili iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi būyūk önem taşımaktadır (Gerhardt ve ark., 2017).

Ağır metallerle kirlenmiş toprakların rehabilitasyonu amacıyla çeşitli remediasyon yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel olarak toprağın kazılarak uzaklaştırılması ve depolanması, yakma işlemleri, toprak yıkama, katılaştırma/stabilizasyon ve elektrokinetik uygulamalar gibi mekanik ve fiziko-kimyasal teknikleri içermektedir (Sheoran ve ark., 2011; Cristaldi ve ark., 2017; Wang ve ark., 2017; Surukite, 2023).

Madencilik faaliyetleri, çevrenin ađır metallerle kirlenmesinde bařlıca kaynaklardan biridir (Navarro ve ark., 2008; Zhuang, 2009). Bunun yanı sıra endūstriyel emisyonlar ile gūbre ve pestisit kullanımı da çevredeki ađır metal yūkūnū artıran önemli etkenler arasında yer almaktadır (Alloway, 1994; Yoon ve ark., 2006). Maden sahaları ve çevresindeki tarım topraklarında ađır metallerin ařırı birikimi, yetiřtirilen tarım ūrūnlerinde bu elementlerin artmasına yol açarak toplum sađlıđı ūzerinde ciddi riskler oluřturabilmektedir (Adriano, 2001; Pruvot ve ark., 2006). Bu nedenle, cevherleřme alanlarındaki ađır metal kirliliđinin azaltılmasında, būnyesinde ađır metal biriktirebilen bitkilerin yetiřtirilmesine dayalı yöntemler kullanılmaktadır (Wong, 2003; Yanqun ve ark., 2005; Kırat, G., 2017a).

Cevherleřme bölgelerinde oluřan topraklar, cevher mineralleri içindeki metaller açısından çok zengindir. Bu tūr topraklarda yetiřen bitkiler, farklı topraklarda yetiřen bitkilere

göre daha fazla etkilenir ve bu bitkiler çevreye uyum sağlarlar veya ölürler (Kırat, & Aydın, 2019).

Hiperakümülatör Bitkiler ve Fitoremediasyon

Son yıllarda gerçekleştirilen biyojeokimyasal araştırmalar sayesinde dünya genelinde çok sayıda maden yatağı belirlenmiştir (Erdman & Kokkola, 1984). Literatürde, bu yaklaşımla yalnızca Au yataklarının aranmasına yönelik değil; aynı zamanda Ag, As, B, Cu, Fe, Pb, Se, Li, Ni ve Zn gibi elementlerin araştırılmasında kullanılabilir belirtgen (indikatör) bitkilerin belirlenmesine odaklanan çalışmalar da bulunmaktadır (Brooks ve ark., 1995; Sağıroğlu & Özdemir, 1997). Biyojeokimyasal yöntemlerin etkili sonuç verebilmesi için, topraktaki element içerikleri ile bitkilerde ölçülen element konsantrasyonları arasında doğrusal bir ilişki bulunması gerekmektedir (Özdemir & Sağıroğlu, 1996; Turan ve ark., 2006; Kırat, 2018).

Baker & Walker (1990) bitkileri üç grupta incelemiştir: metalleri yapılarına doğrudan almayanlar, doğrudan alanlar ve metalleri yapılarına aşırı miktarlarda (akümülatör ve hiperakümülatör) alanlar. Yapılarına metalleri alabilen bitkiler, ağır metal kirliliğini gidermek için bu tür alanlarda yetiştirilmektedir. Bu bitkiler ayrıca metali içeren maden yataklarının (cevherleşmelerin) bulunmasında da kullanılmaktadır (Kırat, 2017b). Hiperakümülatör terimi ilk olarak nikel (1000 µg/g) içeren bitkiler için kullanılmıştır (Brooks ve ark., 1977). Son zamanlarda, eğrelti otunun As (Arsenik) içeriğinden dolayı, bu terim daha sık kullanılmaya başlanmıştır (Ma ve ark., 2001; Kırat & Aydın, 2016). Örneğin, iyi bilinen bir kadmiyum (Cd) ve çinko (Zn) hiperakümülatörü olan *Noccaea caerulea*'de, ksilem özsuyundaki yüksek sitrat konsantrasyonları, çinkonun köklerden gövdelere translokasyonunu kolaylaştırmaktadır. Sürgünlere ulaştığında çinko (Zn) vakuollerde sekestre edilmekte ve burada malat veya diğer organik asitlere bağlanarak bitki için toksik olmayan bir hale getirilmektedir (Gupta ve ark., 2016). Benzer şekilde, bir arsenik (As) hiperakümülatörü olan *Pteris vittata*'da, arsenatın arsenite indirgenmesi ve sonrasında glutatyon gibi tiyol bakımından zengin peptitlerle kompleksleşmesi, arsenik detoksifikasyonunda kritik adımlardır (Abbas ve ark., 2018; Aslan Ergenekon & Koseoglu, 2015)

Hiperakümülatörasyon, çeşitli fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler mekanizmaları içeren karmaşık bir süreçtir (Clemens, 2006; Verbruggen ve ark., 2009; Krämer, 2010; Maestri ve ark., 2010). Hiperakümülatör bitkilerin fitoremediasyondaki uygulamalarını maksimize etmek için bu mekanizmaların anlaşılması esastır (Peer ve ark., 2006; Pollard ve ark., 2014). Organik veya inorganik kirleticilerin topraktan veya sudan bitki gövdelerine (sürgünlerine) hiperakümülatörasyonunda yer alan temel süreçler şunlardır:

-Rizosfer düzeyinde, kökler ile mikroorganizmalar arasındaki etkileşimler sayesinde metallerin mobilitesi artar ve biyoyararlanabilir formları aktive edilir.

-Hücrenel alım aşamasında, plazma zarında yer alan özgül metal taşıyıcı proteinler aracılığıyla metaller bitki dokularına etkin bir şekilde alınır.

-Sitoplazmik detoksifikasyon sürecinde, metaller; fitokelatinler, metalotiyoneinler ve diğer metal bağlayıcı ligandlarla şelatlanarak apoplasta yönlendirilir ve hücre duvarlarına bağlanarak toksisite azaltılır.

-Hücrenel depolama aşamasında ise, tonoplast üzerinde bulunan taşıyıcı sistemler aracılığıyla metaller vakuollerde sekestre edilerek güvenli bir şekilde izole edilir (Yang ve ark., 2005; Zhakypbek ve ark., 2024; Aslan Ergenekon & Koseoglu, 2015).

Hiperakümülatör bitkilerde metaller, çeşitli metabolik süreçlerle detoksifiye edilmekte ve sekestre edilmektedir (Hall, 2002; Yang ve ark., 2005; Verbruggen ve ark., 2013; Sharma ve ark., 2021). Metaller gövdelere (sürgünlere) taşındıktan sonra (translokasyon), genellikle

fitokelatinler veya organik asitler gibi peptitler tarafından şelatlanmakta ve bitki hücreleri içinde membrana bağlı vakuollerde tutulmaktadır (Şekil 1). Bu bölümlendirme (kompartımanlaşma), metallerin temel biyolojik işlevlere müdahale etmesini önlemek için gereklidir (Küpper ve ark., 2000; Sarret ve ark., 2002; Sharma ve ark., 2016; Sharma ve ark., 2022; Aslan Ergenekon & Koseoglu, 2015).

Hiperakümüülasyon Mekanizmaları

Hiperakümülatör türlerin temel özellikleri

Hiperakümülatör bitkiler, dokularında olağanüstü yüksek seviyelerdeki ağır metalleri veya diğer kirleticileri toksik etkiler yaşamadan absorbe edebilen ve konsantre edebilen benzersiz bir tür grubudur. Bu bitkiler, onları akümülatör olmayan türlerden ayıran birkaç farklı fizyolojik ve biyokimyasal özellik sergilemektedir. En önemlisi, hiperakümülatörler, metalleri veya kirleticileri vasküler sistemleri boyunca verimli bir şekilde taşımalarına olanak tanıyan gelişmiş kökten-gövdeye (kökten-sürgüne) translokasyon yeteneklerine sahiptir. Ayrıca, vakuoller veya hücre duvarları içindeki kirleticilerin detoksifiye edilmesine ve kompartımanlaştırılmasına yardımcı olan organik asitler, amino asitler (örn., histidin) ve fitokelatinler gibi metal şelatlayıcı bileşiklerin üretimini artırması gibi özelleşmiş hücresel mekanizmalara sahiptirler (Ma ve ark., 2009). Ayrıca bu türler, yüksek kirletici yüklerinin neden olduğu oksidatif stresi hafifletmek için güçlü antioksidan savunma sistemleri sürdürmektedir. Hiperakümüülasyonu tanımlayan eşik konsantrasyonları metale bağlı olarak değişmektedir; örneğin hiperakümüülasyon olarak nitelendirilebilmesi için yaprak dokularındaki nikel konsantrasyonlarının 1.000 mg/kg kuru ağırlığı aşması gerekirken, çinko ve mangan için eşik değer tipik olarak 10.000 mg/kg'dır. Bu benzersiz adaptasyonlar, hiperakümülatörleri özellikle ağır metallerle kirlenmiş sahalarda itoremediasyon uygulamaları için paha biçilmez araçlar haline getirmektedir (Paripuranam ve ark., 2025).

Fitoremediasyonda kullanılan bitkiler

Çok çeşitli bitki türleri, özellikle spesifik kirleticileri hiperakümüle etme yetenekleri nedeniyle fitoremediasyon kapasiteleri açısından tanımlanmış ve incelenmiştir. *Brassica juncea* (Hint hardalı), kurşun, kadmiyum ve selenyum biriktirme yeteneğiyle yaygın olarak kullanılmaktadır ve orta derecede zorlu koşullarda bile hızla büyümektedir. Yaygın olarak Çin eğrelti otu olarak bilinen *Pteris vittata*, arsenik alımı için en etkili bitkilerden biridir ve arsenikle kirlenmiş sahalarda başarıyla kullanılmıştır. *Thlaspi caerulescens* (şu anda *Noccaea caerulescens* olarak bilinmektedir) gibi *Thlaspi* cinsinin üyeleri, iyi bilinen nikel ve çinko hiperakümülatörleridir. Kavak (*Populus spp.*) ve söğüt (*Salix spp.*) türleri, tam anlamıyla hiperakümülatör olmasalar da, geniş kök sistemleri, hızlı büyümeleri ve yüksek transpirasyon (terleme) oranları nedeniyle fitoekstraksiyon ve fitodegradasyon için mükemmel seçeneklerdir. Sucul ortamlarda, *Eichhornia crassipes* (su sümbülü) ve *Lemna minor* (su mercimeği) gibi bitkiler, kirlenmiş su kütlelerinden metallerin ve besinlerin uzaklaştırılması için kullanılmaktadır. Bitki türünün seçimi yalnızca akümüülasyon kapasitesinden değil, aynı zamanda yerel iklim ve toprak koşullarına uyum sağlamasından da etkilenmektedir (Paripuranam ve ark., 2025).

Fitoremediasyon Süreçleri ve Bitki Rolü

Fitoremediasyonda bitkiler, topraktaki elementel kirleticileri tamamen ortadan kaldırmak veya biyoyararlanımını önemli ölçüde azaltmak amacıyla kullanılmaktadır (Berti & Cunningham, 2000; Padmavathamma & Li, 2007). Düşük miktarlarda dahi olsa topraktaki iyonik maddeler, bitkiler tarafından kök sistemleri aracılığıyla absorbe edilmektedir. Bitkiler, bir rizosfer ekosistemi kurarak bozulmuş toprağı ıslah edebilmekte ve ağır metalleri biriktirip biyoyararlanımlarını düzenleyerek toprak verimliliğini stabilize edebilmektedir (Cristaldi ve

ark., 2017; Wang ve ark., 2017; Jacob ve ark., 2018). Organik ve inorganik materyallerin ilavesi, bitki metal mobilitesini ve asimilasyonunu etkilemektedir. Çeşitli çalışmaların ileri sürdüğü gibi, bitkiler için metal biyoyararlanımı toprağın yaşından da etkilenebilmektedir (Padmavathiamma & Li, 2007; Zaid ve ark., 2020). Metallerin absorpsiyonu, bitki türleri arasında da değişiklik göstermekte olup bu durumda hem toprak koşulları hem de bitki tipi rol oynamaktadır. Ayrıca metal konsantrasyonlarının, ölçüldükleri spesifik bitki dokusuna, ait oldukları bitki türüne ve hatta aynı tür içindeki varyeteye bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği saptanmıştır (Zulfiqar ve ark., 2019; Zwolak ve ark., 2019; Surukite, 2023).

Fitoremediasyon, kirlenmiş ortamları temizlemek için bitkilerin doğal kapasitesinden yararlanan bir dizi biyolojik süreci kapsamaktadır. Bunlar arasında en öne çıkanları fitoekstraksiyon, fitostabilizasyon, fitodegradasyon, rizofiltrasyon ve fitovolatilizasyondur. Fitoekstraksiyon, başta ağır metaller ve bazı metaloidler olmak üzere kirleticilerin topraktan bitkinin kök sistemine alınmasını ve ardından toprak üstü (sürgün) dokularına translokasyonunu içermektedir (Ghosh & Singh, 2005). Bu bitkiler daha sonra hasat edilerek güvenli bir şekilde bertaraf edilmekte, böylece zaman içinde kirleticiler sahadan etkili bir şekilde uzaklaştırılmaktadır. Buna karşılık fitostabilizasyon, kirleticileri kök dokularına absorbe ederek veya kirleticileri hapsedmek için toprak kimyasını değiştirerek topraktaki kirleticilerin mobilitesini ve biyoyararlanımını azaltmaktadır. Bu yöntem, kirleticileri sahadan mutlaka uzaklaştırmadan liç (yıkama) ve erozyonu önlemektedir (Gratao ve ark., 2005). Fitotransformasyon olarak da bilinen fitodegradasyon ise öncelikle organik kirletici maddeler için geçerlidir; pestisitler, herbisitler ve petrol hidrokarbonları gibi toksik bileşiklerin bitki dokuları veya rizosfer içinde enzimatik yolla daha basit ve daha az zararlı maddelere parçalanmasını içermektedir (Paripuram ve ark., 2025)

Cevherleşme zonlarından türeyen topraklar, cevher mineralleri içindeki metaller açısından oldukça zengindir. Bu tür topraklarda yetişen bitkiler, farklı topraklarda yetişen diğer bitkilere göre daha fazla etkilenmekte olup bu bitkiler çevreye ya uyum sağlamak ya da ölmektedir. Buna dayanarak, çalışmalardan sistematik olarak toplanan bitki türlerinin çeşitli organlarının (gövde, kabuk, tane vb.) kimyasal analiz değerleri, belirtgen (indikatör) bitkilerin belirlenmesinde (cevher araştırmaları) ve çevre kirliliğinin saptanmasında (fitoremediasyon) etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Kırat & Aydın, 2019).

Rizofiltrasyon, kirleticileri absorbe veya adsorbe etmek için bitki köklerini kullanarak sucul ortamlardaki kirleticileri hedeflemekte ve genellikle yapay sulak alanlarda veya yüzer sistemlerde uygulanmaktadır (Jadia & Fulekar, 2009). Fitovolatilizasyon ise belirli bitkilerin uçucu veya yarı uçucu kirleticileri almasına, metabolik olarak dönüştürmesine ve gaz formunda atmosfere salmasına izin vererek süreçler dizisini tamamlamaktadır. Bu yöntem kirleticileri yok etmese de, onları genellikle daha az zararlı hale getirmektedir. Bu süreçlerin her birinin uygulanabilirliği ve etkinliği, sahaya özgü koşullara ve ilgili kirleticilerin yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Paripuram ve ark., 2025).

Kirletici gideriminde bitki fizyolojisinin rolleri: Fitoremediasyonda yer alan bitkiler, kirleticileri detoksifiye etmek veya onlara tolerans göstermek için bir dizi fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmaya dayanmaktadır. Kök sistemleri, bitki ve kirlenmiş substrat arasındaki birincil arayüz olarak hizmet etmekte ve kirleticileri su ve besinlerle birlikte aktif olarak absorbe etmektedir (Kamran ve ark., 2014). Kirleticiler kök dokularına girdikten sonra ya yerinde (in situ) tutulmakta, enzimatik aktivite ile dönüştürülmekte ya da vasküler sistemler aracılığıyla sürgün ve yaprak dokularına translokasyona uğramaktadır. Oksidasyon-redüksiyon reaksiyonları, hidroliz ve organik asitlerle konjugasyon gibi metabolik süreçler, toksik maddelerin nötralize edilmesinde veya dönüştürülmesinde kilit roller oynamaktadır. Bazı kirleticiler vakuoller gibi hücresel organellerde sekestre edilmekte veya hücre duvarı bileşenlerine bağlanarak onları kritik metabolik yollardan etkili bir şekilde izole etmektedir. Bu

dahili detoksifikasyon stratejileri, bitkilerin yüksek kirletici seviyelerine sahip ortamlarda hayatta kalmasına izin verirken alanı aşamalı olarak iyileştirmektedir. Dahası, evapotranspirasyon süreci, birincil olarak su düzenlemesinden sorumlu olmakla birlikte, suyu ve bazen de çözünebilir kirleticileri bitki dokularından çekip atmosfere vererek, toprak-su-bitki sürekliliğindeki kirletici dağılımını etkilemek suretiyle fitoremediasyona dolaylı olarak katkıda bulunmaktadır. Bu fizyolojik fonksiyonların verimliliği büyük ölçüde bitki türüne, yaşına, büyüme oranına ve mevcut kirleticilerin türüne ve konsantrasyonuna bağlıdır (Paripuranam ve ark., 2025).

Kaynakça

- Abbas, G., Murtaza, B., Bibi, I., Shahid, M., Niazi, N. K., Khan, M. I., & Amjad, M. (2018). Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: Physiological, biochemical, and molecular aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), 59. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010059>
- Abdu, N., Abdullahi, A. A., & Abdulkadir, A. (2017). Heavy metals and soil microbes. *Environmental Chemistry Letters*, 15(1), 65–84.
- Adriano, D. C. (2001). Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals (2nd ed.). Springer-Verlag.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Alloway, B. J. (1994). Toxic metals in soil-plant systems. John Wiley and Sons.
- Aslan Ergenekon, N., & Köseoğlu, A. Ş. (2015). Bitkilerde ağır metal taşınımı. In M. Yılmaz (Ed.), *Çevre kirliliği ve bitkiler* (ss. 85–102). Nobel Yayınları.
- Berti, W. R., & Cunningham, S. D. (2000). Phytostabilization of metals. In I. Raskin & B. D. Ensley (Eds.), *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment* (pp. 71–88). Wiley.
- Brooks, R. R., Dunn, C. E., & Hall, G. E. M. (Eds.). (1995). *Biological systems in mineral exploration and processing*. Ellis Horwood.
- Brooks, R. R., Lee, J., Reeves, R. D., & Jaffre, T. (1977). Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration*, 7, 49–77.
- Chehregani, A., & Malayeri, B. E. (2007). Removal of heavy metals by native accumulator plants. *International Journal of Agriculture and Biology*, 9, 462–465.
- Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88(11), 1707–1719.
- Cristaldi, A., Conti, G. O., Jho, E. H., Zuccarello, P., Grasso, A., & Copat, C. (2017). Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 309–326.
- Dickshroon, W., Van Broekhoven, L. W., & Lampe, J. E. M. (1979). Phytotoxicity of Zn, Ni, Cd, Cu and Cr in three pasture plant species supplied with graduated amount from the soil. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 27, 241–253.
- Emenike, C. U., Jayanthi, B., Agamuthu, P., & Fauziah, S. H. (2018). Biotransformation and removal of heavy metals: A review of phytoremediation and microbial remediation assessment on contaminated soil. *Environmental Reviews*, 26(2), 156–168.
- Erdman, J. A., & Kokkola, M. (1984). Workshop 2: Biogeochemistry in mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 21, 123–128.
- Fulekar, M., Singh, A., & Bhaduri, A. M. (2009). Genetic engineering strategies for enhancing phytoremediation of heavy metals. *African Journal of Biotechnology*, 8, 529–535.
- Gerhardt, K. E., Gerwing, P. D., & Greenberg, B. M. (2017). Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. *Plant Science*, 256, 170–185.

Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1–18.

Gratao, P. L., Prasad, M. N. V., Cardoso, P. F., Lea, P. J., & Azevedo, R. A. (2005). Phytoremediation: Green technology for the clean-up of toxic metals in the environment. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 53–64.

Güven, A., Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., & Timur, S. (2009). Metallerin çevresel etkileri III. *Metaller*, 138, 64–71. http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi138/d138_6471.pdf

Hall, J. L. (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53(366), 1–11.

Iqbal, Z., Abbas, F., Ibrahim, M., Mahmood, A., Gul, M., & Qureshi, T. I. (2021). Ecological risk assessment of soils under different wastewater irrigation farming system in Punjab Pakistan. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 1925–1936.

Jacob, J. M., Karthik, C., Saratale, R. G., Kumar, S. S., Prabakar, D., Kadirvelu, K., & Pugazhendhi, A. (2018). Biological approaches to tackle heavy metal pollution: A survey of literature. *Journal of Environmental Management*, 217, 56–70.

Jadia, C. D., & Fulekar, M. H. (2009). Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques. *African Journal of Biotechnology*, 8(6), 921–928.

Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A., & Timur, S. (2009). Metallerin çevresel etkileri I. *Metaller*, 136, 47–53. http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi136/d136_4753.pdf

Kamran, M. A., Malik, R. N., & Ahmad, M. (2014). Potential of the aquatic macrophyte *Typha domingensis* for phytoremediation of metals in the River Chenab, Pakistan. *Ecological Engineering*, 69, 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.047>

Karimian, S., Shekoohiyan, S., & Moussavi, G. (2021). Health and ecological risk assessment and simulation of heavy metal-contaminated soil of Tehran landfill. *RSC Advances*, 11(14), 8080–8095.

Khalid, N., Hussain, M., Young, H. S., Boyce, B., Aqeel, M., & Noman, A. (2018). Effects of road proximity on heavy metal concentrations in soils and common roadside plants in Southern California. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(35), 35257–35265.

Kırat, G. (2017a). Görgü (Yeşilyurt) Pb–Zn madeni çevresinde yetişen Pb–Zn–Cd akümülatör bitkiler, Malatya, Türkiye. *MTA Dergisi*, 155, 165–178. <https://doi.org/10.19076/mta.302981>

Kırat, G. (2017b). Pb–Zn–Cd accumulator plants grown around the Görgü Pb–Zn mine, Yeşilyurt-Malatya, Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 155, 161–173.

Kırat, G. (2018). Terzili–Yerköy–Yozgat Cu yatağı ve çevresinde yetişen *Euphorbia cyparissias* bitkisinin biyojeokimyasal olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 538–544.

Kırat, G. (2020). Investigation of the biogeochemical anomalies of *Euphorbia cyparissias* plant in Gümüşhacıköy - Amasya Pb-Zn-Ag deposits, Turkey. *Indian Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 13(1), 120–121. <http://dx.doi.org/10.21088/ijfmp.0974.3383.13120.21>

Kırat, G., & Aydın, N. (2015). Pb–Zn accumulation in plants grown in and around a Pb–Zn mine. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(2), 545–554.

Kırat, G., & Aydın, N. (2016). Phytoremediation with plants for soils polluted by boron at Akdağmadeni Pb–Zn mining district and surroundings, Yozgat, Turkey. *Gazi University Journal of Science*, 29(4), 963–970.

Kırat, G., & Aydın, N. (2019). U and Th transport and uptake in *Triticum sativum* cultivated farmland in the Temrezli (Sorgun, Yozgat, Turkey) U and Th mining area. *Turkish Journal of Science & Technology*, 14(1), 1–7.

Kırat, G., & Dartay, M. (2023a). Bioaccumulation and toxicity of heavy metals in fish. *International Science and Engineering Reviews: Development, Analysis and Research*, 1(1), 20–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10436760>

Kırat, G., & Dartay, M. (2023b). Potansiyel bir çevre sorunu olan cıvanın canlılar üzerine etkileri. In *Doğa ve mühendislik bilimlerinde güncel tartışmalar 8*. BIDGE Yayınevi.

Krämer, U. (2010). Metal hyperaccumulation in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 61(1), 517–534.

Küpper, H., Lombi, E., Zhao, F. J., & McGrath, S. P. (2000). Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Planta*, 212(1), 75–84.

Liu, X., Gao, Y., Khan, S., & Duan, G. (2008). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on contaminated sites and their potential accumulation capacity in Heqing, Yunnan. *Journal of Environmental Sciences*, 20(12), 1469–1474. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62551-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62551-6)

Ma, L. Q., Komar, K. M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y., & Kennelley, E. D. (2001). A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 409, 579.

Ma, Y., Rajkumar, M., & Freitas, H. (2009). Improvement of plant growth and nickel uptake by nickel resistant-plant growth promoting bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2–3), 1154–1161. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.018>

Madhav, S., Mishra, R., Kumari, A., Srivastav, A. L., Ahamad, A., Singh, P., Ahmed, S., Mishra, P. K., & Sillanpää, M. (2023). A review on sources identification of heavy metals in soil and remediation measures by phytoremediation induced methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04950-5>

Maestri, E., Marmioli, M., Visioli, G., & Marmioli, N. (2010). Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment. *Environmental and Experimental Botany*, 68(1), 1–13.

Milone, M. T., Sgherri, C., Clijsters, H., & diğerleri. (2003). Antioxidative responses of wheat treated with realistic concentration of cadmium. *Environmental and Experimental Botany*, 50, 265–276.

Mitchell, R. L., & Burridge, S. C. (1979). Trace element in soils and crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 288, 15–24.

Moaref, S., Sekhvatjou, M. S., & Hosseini Alhashemi, A. (2014). Determination of trace elements concentration in wet and dry atmospheric deposition and surface soil in the largest industrial city, southwest of Iran. *International Journal of Environmental Research*, 8(2), 335–346.

Modaihsh, A., Al-Swailem, M., & Mahjoub, M. (2004). Heavy metal contents of commercial inorganic fertilizer used in the Kingdom of Saudi Arabia. *Agricultural and Marine Sciences*, 9, 21–25.

Muradoglu, F., Gundogdu, M., Ercisli, S., Encu, T., Balta, F., Jaafar, H. Z. E., & Zia-Ul-Haq, M. (2015). Cadmium toxicity affects chlorophyll a and b content, antioxidant enzyme activities and mineral nutrient accumulation in strawberry. *Biological Research*, 48, 1–7. <https://doi.org/10.1186/S40659-015-0001-3>

Navarro, M. C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., Vidal, J., Tovar, P. J., & Bech, J. (2008). Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 96, 183–193.

Ouabo, R. E., Ogundiran, M. B., Sangodoyin, A. Y., & Babalola, B. A. (2019). Ecological risk and human health implications of heavy metals contamination of surface soil in e-waste recycling sites in Douala Cameroun. *Journal of Health and Pollution*, 9(21), 190310.

Özdemir, Z., & Sağıroğlu, A. (1996). Botanik prospeksiyon. Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Derlemeler Dizisi, 4, 93–100.

Padmavathiamma, P. K., & Li, L. Y. (2007). Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184, 105–126.

Paripuram, T. D., Chirumamilla, V., Chahal, K., Khan, T. K. H., Dixit, S., & Rana, B. (2025). Exploring phytoremediation and plants as natural cleaners of polluted environments. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(10s), 177. <https://theaspd.com/index.php>

Peer, W. A., Baxter, I. R., Richards, E. L., Freeman, J. L., & Murphy, A. S. (2006). Phytoremediation and hyperaccumulator plants. In *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification: From Microbes to Man* (pp. 299–340). Springer.

Pollard, A. J., Reeves, R. D., & Baker, A. J. (2014). Facultative hyperaccumulation of heavy metals and metalloids. *Plant Science*, 217, 8–17.

Privot, C., Douay, F., Herve, F., & Waterlot, C. (2006). Heavy metals in soil, crops and grass as a source of human exposure in the former mining areas. *Journal of Soils and Sediments*, 6, 215–220.

Sabiha-Javied, Mehmood, T., Tufail, M., & Irfan, N. (2009). Heavy metal pollution from phosphate rock used for the production of fertilizer in Pakistan. *Microchemical Journal*, 91, 94–99.

Sağıroğlu, A., & Özdemir, Z. (1997). Biyojeokimyasal prospeksiyon. *Jeoloji Mühendisliği*, 51, 1–17.

Sarkar, B. (2002). *Heavy metals in the environment*. Marcel Dekker, Inc.

Sarret, G., Saumitou-Laprade, P., Bert, V., Proux, O., Hazemann, J. L., Traverse, A., Marcus, M. A., & Manceau, A. (2002). Forms of zinc accumulated in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant Physiology*, 130(4), 1815–1826. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1104/pp.011965>

Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710–721.

Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J. A., Finkelman, R. B., Fuge, R., Lindh, U., & Smedley, P. (Eds.). (2005). *Essentials of medical geology: Impacts of natural environment on public health*. Elsevier Academic Press.

Shahid, M., Khalid, S., Murtaza, B., Anwar, H., Shah, A. H., Sardar, A., ... & Niazi, N. K. (2020). A critical analysis of wastewater use in agriculture and associated health risks in Pakistan. *Environmental Geochemistry and Health*, 1–20.

Sharma, A., Kapoor, D., Gautam, S., Landi, M., Kandhol, N., Araniti, F., Ramakrishnan, M., Satish, L., Singh, V. P., Sharma, P., Bhardwaj, R., Tripathi, D. K., & Zheng, B. (2022). Heavy metal induced regulation of plant biology: Recent insights. *Physiologia Plantarum*, 174(3), e13688.

Sharma, P., Ngo, H. H., Khanal, S., Larroche, C., Kim, S. H., & Pandey, A. (2021). Efficiency of transporter genes and proteins in hyperaccumulator plants for metals tolerance in wastewater treatment: Sustainable technique for metal detoxification. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101725.

Sharma, S. S., Dietz, K. J., & Mimura, T. (2016). Vacuolar compartmentalization as indispensable component of heavy metal detoxification in plants. *Plant, Cell & Environment*, 39(5), 1112–1126.

Sheoran, V., Sheoran, A., & Poonia, P. (2011). Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41, 168–214.

Singh, J., & Kalamdhad, A. S. (2011). Effects of heavy metals on soil, plants, human health and aquatic life. *International Journal of Research in Chemistry and Environment*, 1(2), 15–21.

Srivastava, V., Sarkar, A., Singh, S., Singh, P., de Araujo, A. S., & Singh, R. P. (2017). Agroecological responses of heavy metal pollution with special emphasis on soil health and plant performances. *Frontiers in Environmental Science*, 5, 64.

Suman, J., Uhlik, O., Viktorova, J., & Macek, T. (2018). Phytoextraction of heavy metals: A promising tool for cleanup of polluted environment? *Frontiers in Plant Science*, 9(1476), 1–15.

Surukite, O., Mautin, O., Qudus, U., Racheal, O., Sesi, K., & Fatimah, M. (2023). Assessment of the phytoremediation potential of heavy metal contaminated soil using *Vigna unguiculata* L. (Walp). *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 22, 199–209.

Tang, Y. T., Qiu, R. L., Zeng, X. W., & diğerleri. (2009). Lead zinc cadmium hyperaccumulation and growth stimulation in *Arabis paniculata* Franch. *Environmental and Experimental Botany*, 66, 126–134.

Tlustos, P., Száková, J., Hrubý, J., & diğerleri. (2006). Removal of As, Cd, Pb and Zn from contaminated soil by high biomass producing plants. *Plant, Soil and Environment*, 52(9), 413–423.

Turan, H., Özdemir, Z., & Zorlu, S. (2006). Çiftehan (Ulukışla-Niğde) bölgesinin Cu, Zn, Fe, Mn ve Ni için biyojeokimyasal anomalilerin araştırılması. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 19(2), 131–140.

Verbruggen, N., Hermans, C., & Schat, H. (2009). Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist*, 181(4), 759–776.

Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., & Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184, 594–600.

Williams, C. H., & David, D. J. (1976). The accumulation of cadmium from phosphorus fertilisers and their effect on the cadmium content of plants. *Soil Science*, 121, 86–93.

Wong, M. H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50, 775–780.

Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology*, 2011, 1–20.

Yang, X., Feng, Y., He, Z., & Stoffella, P. J. (2005). Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18(4), 339–353.

Yanqun, Z., Yuan, L., Jianjun, C., Li, Q., & Schvartz, C. (2005). Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunan, China. *Environment International*, 31, 755–762.

Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L. Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment*, 368, 456–464.

Zaid, A., Mohammad, F., & Fariduddin, Q. (2020). Plant growth regulators improve growth, photosynthesis, mineral nutrient, and antioxidant system under cadmium stress in menthol mint (*Mentha arvensis* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26, 25–39.

Zhakypbek, Y., Kossalbayev, B. D., Belkozhayev, A. M., Murat, T., Tursbekov, S., Abdalimov, E., Pashkovskiy, P., Kreslavski, V., Kuznetsov, V., & Allakhverdiev, S. I. (2024). Reducing heavy metal contamination in soil and water using phytoremediation. *Plants*, 13(11), 1534.

Zhuang, P., McBride, M. B., Xia, H., Li, N., & Li, Z. (2009). Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. *Science of the Total Environment*, 407(5), 1551–1561.

Zulfiqar, U., Farooq, M., Hussain, S., Maqsood, M., Hussain, M., Ishfaq, M., & Anjum, M. Z. (2019). Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. *Journal of Environmental Management*, 250, 109557.

Zwolak, A., Sarzyńska, M., Szpyrka, E., & Stawarczyk, K. (2019). Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: A review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 230, 1–9.

COĞRAFI BİLGİ SİSTEMLER VE ANALİTİK HİYERARŞİ YÖNTEMİ KULLANILARAK ISPARTA İLİNDE GÜNEŞ ENERJİSİ YATIRIMLARI İÇİN MEKÂNSAL UYGUNLUK ANALİZİ

¹KEREM HEPDENİZ

GİRİŞ

Dünya genelinde nüfus artışı, kentleşme eğilimleri ve sanayi faaliyetlerindeki yoğunlaşma, birincil enerji talebinin sürekli yükselmesine neden olmaktadır (Saraswat et al., 2021). Bu artışa paralel olarak fosil yakıt rezervlerinin hızla azalması ve bu kaynakların çevresel etkilerinin giderek daha görünür hale gelmesi, mevcut enerji üretim modellerinin sürdürülebilirliğini tartışmalı hâle getirmiştir (Alhammad et al., 2022). Fosil yakıtlara dayalı üretim süreçlerinin iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkileri, ülkeleri düşük karbonlu enerji politikalarına yönlendirmekte ve yenilenebilir kaynakların enerji arzındaki payını artırmaya zorlamaktadır (Öztaş & Ervural, 2025).

Yenilenebilir enerji türleri arasında güneş enerjisi; tükenmeyen yapısı, çevre dostu karakteri ve fotovoltaik teknolojilerdeki hızlı ilerlemeler sayesinde stratejik bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Soydan, 2021). Son yıllarda küresel ölçekte güneş enerjisine yapılan yatırımların hız kazanması, bu kaynağın orta ve uzun vadede enerji arz güvenliğinde belirleyici rol oynayacağını göstermektedir (Charabi & Gastli, 2011). Türkiye açısından değerlendirildiğinde, yıllık ortalama 2741 saatlik güneşlenme süresi ve 1527 kWh/m²-yıl düzeyindeki radyasyon değerleri, ülkenin güneş enerjisi bakımından yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Yolcan & Köse, 2020). Türkiye Ulusal Enerji Planı çerçevesinde belirlenen 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda, güneş enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki payının önemli ölçüde artırılması öngörülmektedir (Öztaş & Ervural, 2025).²

Güneş enerjisi santrallerinin (GES) uzun vadeli verimliliği ve ekonomik sürdürülebilirliği büyük ölçüde doğru alan seçimine bağlıdır (Arca & Keskin Çıtıroğlu, 2022). Uygun olmayan sahalarda kurulan santraller, hem yatırım geri dönüş süresini uzatmakta hem de enerji üretim performansını düşürmektedir (Ruiz et al., 2020). Bu nedenle GES yer seçimi;

¹ Doç.Dr., Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü,
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4182-5570>

topoğrafik özellikler, güneşlenme koşulları, altyapıya erişilebilirlik, çevresel hassasiyetler ve sosyo-ekonomik kısıtların birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok boyutlu bir karar süreci olarak tanımlanmaktadır (Saraswat et al., 2021).

Bu tür karmaşık mekânsal karar problemlerinin çözümünde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin birlikte kullanımını etkili sonuçlar üretmektedir (Uyan, 2017). CBS, farklı kaynaklardan elde edilen mekânsal verilerin bütünlük biçimde analiz edilmesine olanak sağlarken, ÇKKV yöntemleri kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi ve alternatiflerin karşılaştırılması süreçlerinde karar vericilere sistematik bir yapı sunmaktadır (Öztaş & Ervural, 2025).

Literatürde güneş enerjisi santrali yer seçimi çalışmalarında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHP)'dir. Konya'nın Çumra ilçesinde gerçekleştirilen çalışmada, CBS ve AHP entegrasyonu ile çalışma alanının belirli bir bölümünün yüksek uygunluk düzeyine sahip olduğu ortaya konulmuştur (Uyan, 2017). Karabük ilinde yürütülen benzer bir araştırmada ise AHP tabanlı analizler sonucunda orta ve düşük uygunluk sınıflarının baskın olduğu tespit edilmiştir (Arca & Keskin Çıtıroğlu, 2022).

İzmir Menemen örneğinde yapılan çalışmada, klasik AHP ve Bulanık AHP yöntemleri karşılaştırılmış ve bulanık yaklaşımın mekânsal belirsizlikleri daha iyi yansıttığı belirlenmiştir (Uzar & Koca, 2020). Uluslararası ölçekte Hindistan genelinde yürütülen araştırmada ise CBS ve AHP tabanlı çok kriterli analizler sonucunda ülke yüzölçümünün %4,13'ünün güneş enerjisi yatırımları açısından yüksek uygunluk gösterdiği rapor edilmiştir (Saraswat et al., 2021).

Suudi Arabistan'ın Al-Qassim bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada, GIS ve AHP entegrasyonu ile en uygun alanların bölgenin güney ve güneybatı kesimlerinde yoğunlaştığı ve bu alanlarda yıllık ortalama 1905 kWh/kWp enerji üretim potansiyeline ulaşıldığı belirlenmiştir (Alhammad et al., 2022). Umman'da yapılan bir başka araştırmada ise bulanık mekânsal çok kriterli karar verme yaklaşımı kullanılarak ülke yüzölçümünün yalnızca %0,5'inin yüksek uygunluk düzeyine sahip olduğu ortaya konulmuştur (Charabi & Gastli, 2011).

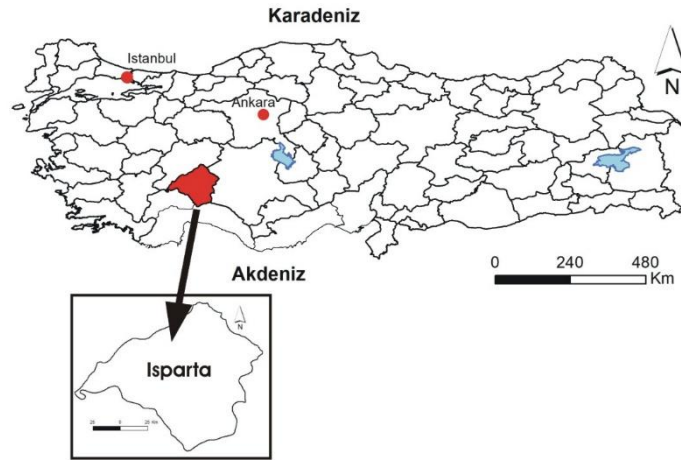
Son yıllarda AHP yöntemine alternatif olarak geliştirilen Bulanık Best–Worst (Fuzzy BWM) yöntemi de literatürde yaygınlaşmaya başlamış olup, Konya İli örneğinde gerçekleştirilen çalışmada modelin kararlılığı duyarlılık analizleri ile doğrulanmıştır (Öztaş & Ervural, 2025). Türkiye'de Niğde İli'nde yapılan bir çalışmada ise AHP yöntemi ile üretilen uygunluk haritaları sonucunda mevcut santrallerin büyük bölümünün yüksek uygunluk sınıfında yer aldığı belirlenmiştir (Soydan, 2021).

Bu bağlamda, farklı bölgelerde başarıyla uygulanan CBS ve ÇKKV tabanlı yöntemlerin Isparta İli özelinde uygulanması, bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin bilimsel temellere

dayalı olarak ortaya konulması açısından önem taşımaktadır. Bu çalışma, Isparta İli için AHP tabanlı çok kriterli karar analizi ve CBS entegrasyonu kullanılarak en uygun güneş enerjisi santrali alanlarının belirlenmesini amaçlamaktadır.

ÇALIŞMA ALANI

Bu çalışma, Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'nde yer alan Isparta İli sınırları içerisinde gerçekleştirilmiştir. İl, kuzeyde Afyonkarahisar, doğuda Konya, güneyde Antalya ve batıda Burdur İlleri ile çevrilidir ve yaklaşık 8.993 km² yüzölçümüne sahiptir. Akdeniz ve İç Anadolu bölgeleri arasında geçiş konumunda bulunması nedeniyle topoğrafik ve iklimik açıdan önemli bir çeşitlilik göstermektedir (Şekil 1).



Şekil 1: Isparta İli yer bulduru haritası

Isparta ilinde yükselti değerleri 250 m ile 2990 m arasında değişmekte olup ortalama yükselti yaklaşık 1050 m'dir. Bu durum güneş enerjisi potansiyelinin mekânsal dağılımını doğrudan etkilemektedir. Bölgenin güney kesimlerinde Akdeniz, kuzey ve doğu kesimlerinde ise karasal iklim özellikleri hâkimdir. Yıllık ortalama sıcaklık yaklaşık 12,5 °C'dir.

Meteoroloji verilerine göre il genelinde yıllık ortalama 2600–2800 saat güneşlenme süresi ve yaklaşık 1500–1650 kWh/m² yıllık küresel radyasyon değeri bulunmaktadır. Bu değerler, Isparta'nın güneş enerjisi yatırımları açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Jeomorfolojik açıdan ilin büyük bölümü dağlık ve engebeli olmakla birlikte, Yalvaç, Şarkikaraağaç ve Eğirdir çevresinde nispeten düz ve hafif eğimli alanlar bulunmaktadır. Bu alanlar, güneş enerjisi santrali kurulumu açısından potansiyel sahalar olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma alanına Isparta İl sınırları içerisindeki tüm ilçeler dâhil edilmiş olup, analizler WGS 84 UTM 36N koordinat sisteminde yürütülmüştür. Bölgenin güneşlenme süresi, topoğrafik yapısı ve altyapı olanakları, Isparta'yı güneş enerjisi santrali yer seçimi açısından uygun bir pilot alan hâline getirmektedir.

MATERYAL METOD

Bu çalışmada, Isparta İli için GES yer seçimi amacıyla CBS ve AHP tabanlı çok kriterli karar verme yaklaşımı kullanılmıştır. Literatürde GES yer seçimi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan kriterler dikkate alınarak toplam 10 parametre belirlenmiştir. Bu parametreler; güneş radyasyonu, eğim, bakı, yollara uzaklık, akarsulara uzaklık, fay hatlarına uzaklık, litoloji, arazi kullanımı, yerleşim alanlarına uzaklık ve trafo merkezlerine uzaklık şeklindedir (Uyan, 2013; Noorollahi et al., 2016; Al Garni & Awasthi, 2017; Tekdamar & Tekdamar, 2024).

Tüm veriler ArcGIS ortamında raster formata dönüştürülmüş, yeniden sınıflandırılmış ve AHP ile ağırlıklandırılarak Ağırlıklı Çakıştırma Analizi (Weighted Overlay) uygulanmıştır.

Güneş Radyasyonu

Güneş radyasyonu, fotovoltaik sistemlerin enerji üretim potansiyelini doğrudan belirleyen en kritik parametre olarak kabul edilmektedir (Charabi & Gastli, 2011; Al Garni & Awasthi, 2017). Literatürde yapılan tüm çalışmalarda güneş ışınımı, en yüksek ağırlığa sahip kriter olarak değerlendirilmektedir (Noorollahi et al., 2016; Asakereh et al., 2017). Bu çalışmada küresel yatay radyasyon (GHI) verileri kullanılarak yüksek radyasyon değerlerine sahip alanlar daha uygun sınıfa atanmıştır (Şekil 2a).

Eğim

Arazi eğimi, GES kurulumu açısından hem mühendislik maliyetlerini hem de panel verimliliğini etkilemektedir. Düşük eğimli alanlar, kurulum maliyetlerini azaltmakta ve panel montajını kolaylaştırmaktadır (Uyan, 2013; Gerçek, 2018). Literatürde genellikle %0–5 eğim aralığı en uygun, %15 üzeri eğimler ise uygunsuz alanlar olarak değerlendirilmektedir (Noorollahi et al., 2016; Tekdamar & Tekdamar, 2024) (Şekil 2 b).

Bakı

Bakı faktörü, güneş ışınlarının panele geliş açısını belirlediği için enerji üretimini doğrudan etkilemektedir. Kuzey yarımkürede güney yönlü bakılar, maksimum radyasyon alımı açısından daha avantajlıdır (Gerçek, 2018; Asakereh et al., 2017). Bu nedenle çalışmada güney, güneydoğu ve güneybatı yönlü alanlar daha yüksek uygunluk sınıfına atanmıştır (Şekil 2 c).

Yollara Uzaklık

Yol ağına yakınlık, santral inşaatı, bakım ve işletme maliyetlerini azaltan önemli bir ekonomik faktördür (Uyan, 2013; Al Garni & Awasthi, 2017). Literatürde ana yollara çok uzak alanlar yatırım açısından dezavantajlı kabul edilmektedir (Noorollahi et al., 2016). Bu çalışmada ana karayollarına yakın alanlar daha uygun olarak değerlendirilmiştir (Şekil 2 d).

Akarsulara Uzaklık

Su kaynaklarına çok yakın alanlar, taşkın riski ve çevresel hassasiyet nedeniyle kısıt alan olarak değerlendirilmektedir (Gerçek, 2018; Noorollahi et al., 2016). Ayrıca sulama alanlarının korunması da önemli bir çevresel kriterdir. Bu nedenle akarsulara yakın bölgeler düşük uygunluk sınıfına atanmıştır (Şekil 2 e).

.Fay Hatlarına Uzaklık

Deprem riski, büyük ölçekli enerji yatırımları açısından kritik bir parametredir. Fay hatlarına yakın alanlar, yapısal hasar riski nedeniyle uygun olmayan bölgeler olarak değerlendirilmektedir (Tekdamar & Tekdamar, 2024; Gerçek, 2018). Literatürde genellikle faylara yakın alanlar dışlanmakta veya düşük uygunluk sınıfına alınmaktadır (Uyan, 2013) (Şekil 2 f).

Litoloji

Zemin özellikleri, panel temellerinin stabilitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Sağlam kaya birimleri GES kurulumu için daha uygun kabul edilirken, alüvyon ve gevşek zeminler mühendislik sorunları yaratabilmektedir (Gerçek, 2018; Yalçın & Yüce, 2020). Bu çalışmada litolojik birimler mühendislik özelliklerine göre sınıflandırılmıştır (Şekil 2 g).

Arazi Kullanımı

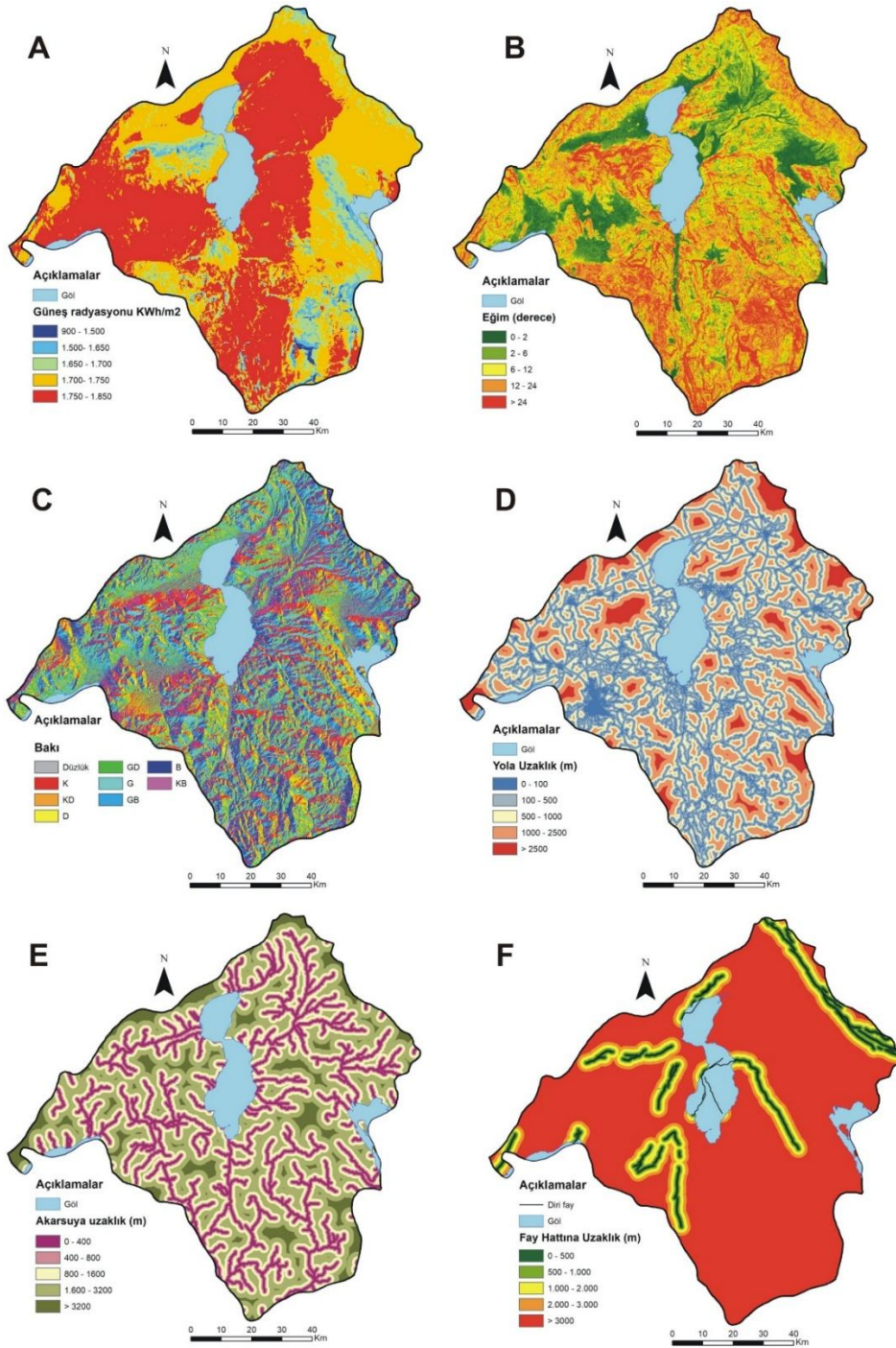
Arazi kullanım türü, çevresel sürdürülebilirlik açısından en önemli kriterlerden biridir. Tarım alanları, ormanlar ve koruma alanları GES kurulumu açısından kısıt alan olarak değerlendirilmektedir (Noorollahi et al., 2016; Al Garni & Awasthi, 2017). Literatürde düşük verimli tarım alanları ve çıplak araziler daha uygun kabul edilmektedir (Yalçın & Yüce, 2020) (Şekil 2 h).

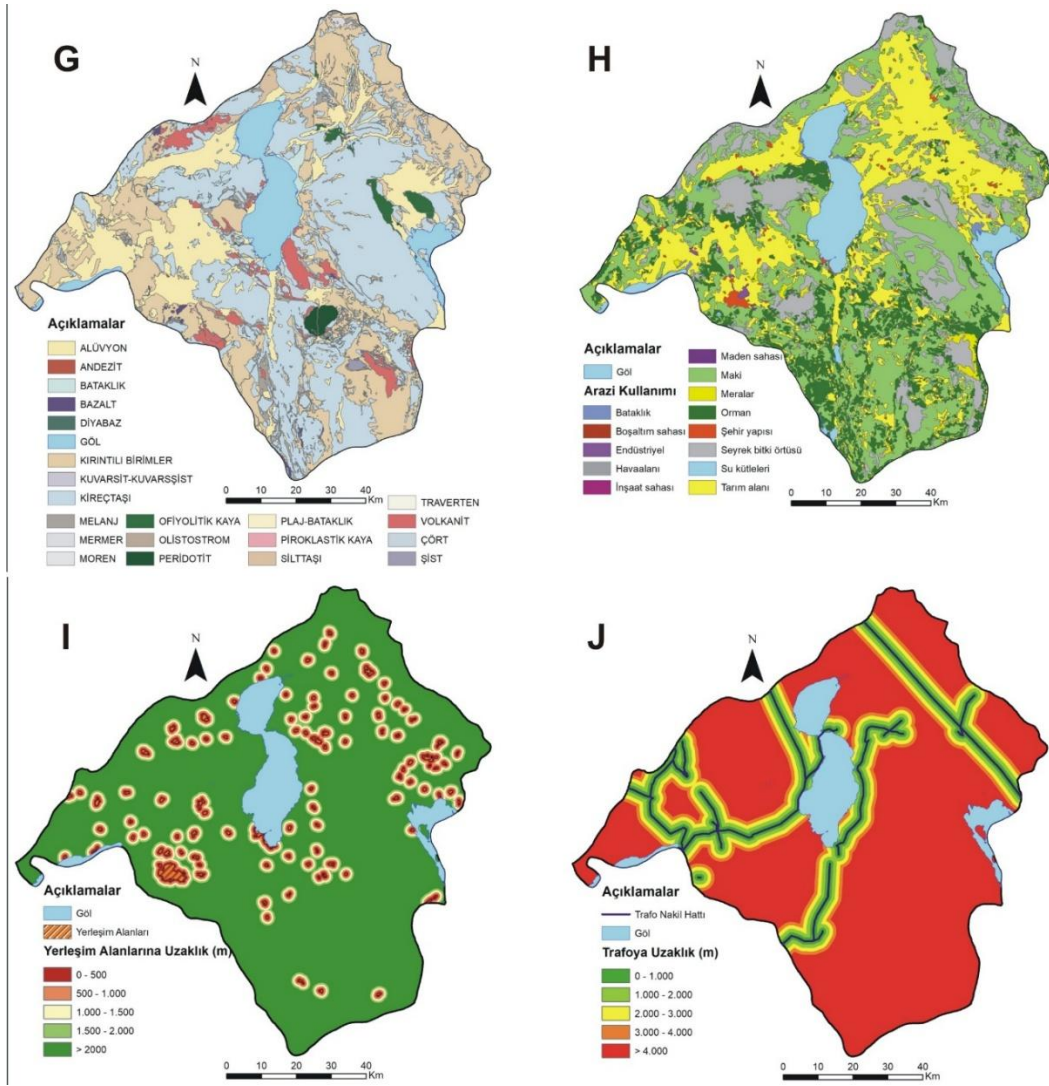
Yerleşim Alanlarına Uzaklık

Yerleşim alanlarına çok yakın santraller, görsel kirlilik ve sosyal kabul açısından sorunlar doğurabilmektedir (Noorollahi et al., 2016). Bu nedenle yerleşim merkezlerinden belirli mesafe uzaklıktaki alanlar daha uygun kabul edilmektedir (Tekdamar & Tekdamar, 2024; Uyan, 2013) (Şekil 2 ı).

Trafo Merkezlerine Uzaklık

Enerji iletim maliyetlerini azaltmak için santrallerin trafo merkezlerine yakın olması ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır (Al Garni & Awasthi, 2017; Gerçek, 2018). Literatürde enerji nakil hatlarına ve trafolarla yakın alanlar yüksek uygunluk sınıfına dahil edilmektedir (Noorollahi et al., 2016) (Şekil 2 j).





Şekil 2: Çalışmada kullanılan parametreler: a güneş radyasyonu, b eğim, c baki, d yola uzaklık, e akarsuya uzaklık, f fay hattına uzaklık, g litoloji, h arazi kullanımı, ı yerleşim alanlarına uzaklık, j trafoya uzaklık

AHP UYGULAMASI

Belirlenen kriterler, uzman görüşleri doğrultusunda ikili karşılaştırma matrisi kullanılarak AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmıştır (Saaty, 1980). Tutarlılık oranı (CR) 0.10'dan küçük olacak şekilde hesaplanmış ve analizlerin güvenilir olduğu belirlenmiştir (Tekdamar & Tekdamar, 2024). Elde edilen ağırlıklar, raster katmanlara atanarak ağırlıklı çakıştırma analizi uygulanmıştır.

YÖNTEM

Bu çalışmada, Isparta İli için GES yer seçimine yönelik CBS tabanlı ÇKKV yaklaşımı uygulanmıştır. Literatürde GES yer seçimi problemleri; çok sayıda çevresel, teknik ve ekonomik faktörün birlikte değerlendirilmesini gerektiren karmaşık mekânsal karar problemleri

olarak tanımlanmaktadır (Charabi & Gastli, 2011; Noorollahi et al., 2016; Al Garni & Awasthi, 2017; Saraswat et al., 2021). Bu tür problemlerin çözümünde CBS ve ÇKKV yöntemlerinin entegrasyonu yaygın olarak tercih edilmektedir (Uyan, 2017; Yalçın & Yüce, 2020; Gerçek, 2018; Tekdamar & Tekdamar, 2024).

Çalışmanın metodolojik akışı şu aşamalardan oluşmaktadır:

1. Kriterlerin belirlenmesi
2. Mekânsal verilerin temini ve ön işlenmesi
3. Kriter haritalarının oluşturulması
4. AHP ile kriter ağırlıklarının hesaplanması
5. Ağırlıklı çakıştırma analizi ile uygunluk haritasının üretilmesi

Bu yaklaşım, daha önce Konya, Malatya, Burdur, Menemen, Karabük, Mardin ve Niğde gibi farklı bölgelerde gerçekleştirilen çalışmalarda başarıyla uygulanmıştır (Uyan, 2017; Gerçek, 2018; Yalçın & Yüce, 2020; Uzar & Koca, 2020; Arca & Keskin Çıtıroğlu, 2022; Tekdamar & Tekdamar, 2024; Soydan, 2021).

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS)

CBS, farklı kaynaklardan elde edilen mekânsal verilerin depolanması, sorgulanması, analiz edilmesi ve görselleştirilmesi amacıyla kullanılan güçlü bir karar destek aracıdır (Gerçek, 2018; Uyan, 2017). Literatürde GES yer seçimi çalışmalarında; eğim, bakı, güneş radyasyonu, arazi kullanımı, ulaşım ağı, yerleşim alanları ve enerji altyapısı gibi parametrelerin mekânsal analizinde CBS' nin etkin şekilde kullanıldığı görülmektedir (Charabi & Gastli, 2011; Al Garni & Awasthi, 2017; Noorollahi et al., 2016; Saraswat et al., 2021).

Bu çalışmada tüm mekânsal veriler ArcGIS yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Vektör veriler raster formata dönüştürülmüş, tüm katmanlar ortak projeksiyon sistemine (WGS 84 UTM 36N) dönüştürülmüş ve hücre boyutları eşitlenmiştir. Bu yaklaşım, literatürde önerilen standart CBS ön işleme adımlarıyla uyumludur (Gerçek, 2018; Yalçın & Yüce, 2020; Tekdamar & Tekdamar, 2024).

ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME (ÇKKV) ANALİZİ

GES yer seçimi problemi, birden fazla kriterin eş zamanlı değerlendirilmesini gerektirdiğinden ÇKKV yöntemleri literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Noorollahi et al., 2016; Al Garni & Awasthi, 2017; Saraswat et al., 2021). ÇKKV yöntemleri, karar vericilere kriterler arasında öncelik belirleme ve alternatif alanları karşılaştırma imkânı sunmaktadır (Asakereh et al., 2017; Öztaş & Ervural, 2025).

Bu çalışmada güneş radyasyonu, eğim, bakı, yollara uzaklık, akarsulara uzaklık, fay hatlarına uzaklık, litoloji, arazi kullanımı, yerleşim alanlarına uzaklık ve trafo merkezlerine

uzaklık olmak üzere toplam 10 kriter değerlendirmeye alınmıştır. Seçilen kriterler, önceki çalışmalarda yaygın olarak kullanılan parametrelerle uyumludur (Uyan, 2017; Gerçek, 2018; Yalçın & Yüce, 2020; Tekdamar & Tekdamar, 2024; Al Garni & Awasthi, 2017).

Her bir kriter için uygunluk sınıfları literatürde önerilen eşik değerlere göre yeniden sınıflandırılmıştır (Noorollahi et al., 2016; Uzar & Koca, 2020; Saraswat et al., 2021).

ANALİTİK HİYERARŞİ YÖNTEMİ (AHP)

Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde AHP kullanılmıştır. AHP, karmaşık karar problemlerini hiyerarşik yapıya dönüştüren ve ikili karşılaştırmalar yoluyla kriterlerin göreceli önemini hesaplayan bir ÇKKV yöntemidir (Saaty, 1980). Literatürde GES yer seçimi çalışmalarında en yaygın kullanılan ağırlıklandırma yönteminin AHP olduğu görülmektedir (Uyan, 2017; Gerçek, 2018; Yalçın & Yüce, 2020; Arca & Keskin Çıtıroğlu, 2022; Tekdamar & Tekdamar, 2024).

Bu çalışmada uzman görüşleri doğrultusunda kriterler arasında ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuş ve özdeğer yöntemi ile kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Tutarlılık Oranı (CR) hesaplanmış ve 0.10'dan küçük değerler kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir (Saaty, 1980; Tekdamar & Tekdamar, 2024). Bu adım, literatürde önerilen standart AHP prosedürü ile uyumludur (Al Garni & Awasthi, 2017; Noorollahi et al., 2016).

AĞIRLIKLIL ÇAKIŞTIRMA (WEIGHTED OVERLAY) ANALİZİ

AHP yöntemiyle elde edilen ağırlıklar, raster kriter haritalarına atanarak Ağırlıklı Çakıştırma Analizi uygulanmıştır. Bu yöntem, her bir kriterin ağırlık katsayısı ile çarpılarak toplam uygunluk skorunun hesaplanmasına dayanmaktadır (Uyan, 2017; Gerçek, 2018; Yalçın & Yüce, 2020).

Ağırlıklı çakıştırma yöntemi, literatürde GES uygunluk haritalarının üretilmesinde en yaygın kullanılan mekânsal analiz tekniklerinden biridir (Charabi & Gastli, 2011; Noorollahi et al., 2016; Saraswat et al., 2021; Tekdamar & Tekdamar, 2024). Bu yöntem sayesinde tüm kriterlerin bütüncül olarak değerlendirilmesi sağlanmış ve Isparta İli için nihai uygunluk haritası elde edilmiştir.

Sonuç haritası, çok uygun, uygun, orta, uygun değil ve hiç uygun değil olmak üzere beş sınıfa ayrılmıştır. Benzer sınıflandırmalar literatürdeki çalışmalarla uyumludur (Uyan, 2017; Arca & Keskin Çıtıroğlu, 2022; Uzar & Koca, 2020).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Isparta İli için CBS ve AHP tabanlı çok kriterli karar verme yaklaşımı kullanılarak GES yer seçimine yönelik nihai uygunluk haritası üretilmiştir. Ağırlıklı çakıştırma

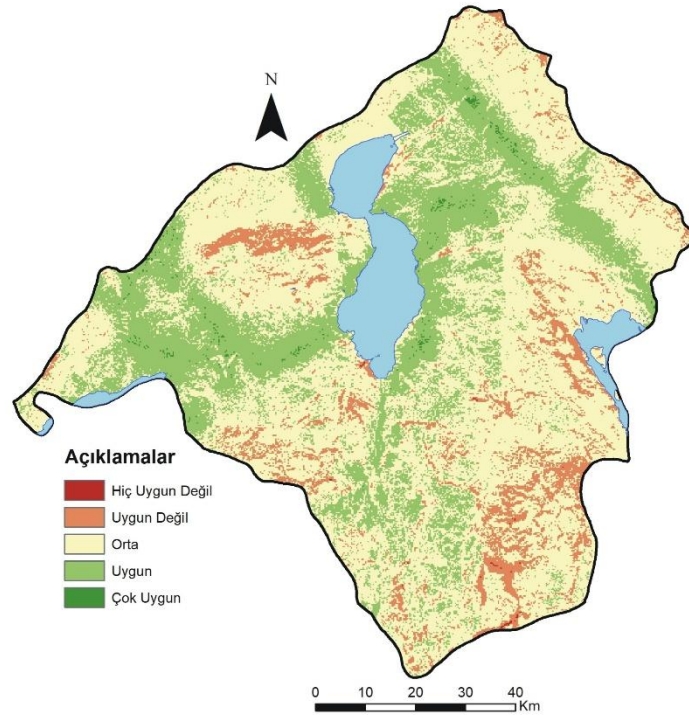
analizi sonucunda elde edilen uygunluk haritası, beş sınıf altında değerlendirilmiştir: hiç uygun değil (1), uygun değil (2), orta uygun (3), uygun (4) ve en uygun (5) (Şekil 3).

Sonuç haritası incelendiğinde, en uygun (5) ve uygun (4) sınıflarının özellikle ilin orta ve kuzey kesimlerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu alanların, düşük eğimli topoğrafya, yüksek güneş radyasyonu değerleri, ana ulaşım ağlarına yakınlık ve yerleşim alanlarından yeterli mesafede bulunma gibi avantajlı koşullara sahip olduğu belirlenmiştir. Benzer mekânsal dağılımlar, Burdur (Yalçın & Yüce, 2020), Konya (Uyan, 2017; Öztaş & Ervural, 2025) ve Mardin (Tekdamar & Tekdamar, 2024) illerinde gerçekleştirilen çalışmalarda da rapor edilmiştir. Bu çalışmalar, özellikle düşük eğimli, güney yönlü ve altyapıya yakın alanların yüksek uygunluk gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Haritada koyu yeşil (5) sınıfla temsil edilen en uygun alanların, çoğunlukla tarımsal üretimin sınırlı olduğu, çıplak veya düşük verimli araziler üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, arazi kullanımı kriterinin literatürde önerildiği şekilde etkin biçimde uygulandığını göstermektedir (Noorollahi et al., 2016; Al Garni & Awasthi, 2017). Benzer şekilde, Niğde (Soydan, 2021) ve Karabük (Arca & Keskin Çıtıroğlu, 2022) örneklerinde de düşük verimli tarım alanları ve bozkır karakterli sahaların yüksek uygunluk sınıfında yer aldığı belirtilmiştir.

Uygun değil (2) ve hiç uygun değil (1) sınıflarının ise ilin güney ve güneydoğu kesimlerinde daha yaygın olduğu belirlenmiştir. Bu alanların büyük ölçüde yüksek eğimli topoğrafya, fay hatlarına yakınlık, yoğun orman alanları ve su kaynaklarına yakın bölgelerden oluştuğu görülmektedir. Bu bulgu, literatürde belirtilen yüksek eğim, jeolojik risk ve çevresel hassasiyetlerin GES yer seçimi açısından kısıtlayıcı faktörler olduğu görüşüyle örtüşmektedir (Gerçek, 2018; Noorollahi et al., 2016; Tekdamar & Tekdamar, 2024).

Haritanın orta uygun (3) sınıfında kalan alanlarının ise geçiş zonlarında yoğunlaştığı, bu alanların bazı kriterler açısından avantajlı olmakla birlikte (örneğin güneşlenme süresi), diğer kriterler bakımından (altyapıya uzaklık veya bakı) sınırlayıcı özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Benzer ara sınıfların varlığı, Hindistan (Saraswat et al., 2021) ve Umman (Charabi & Gastli, 2011) örneklerinde de rapor edilmiş olup, çok kriterli analizlerin mekânsal karar süreçlerinde geçiş sınıflarının oluşmasının doğal olduğu vurgulanmaktadır.



Şekil 3: Isparta İli GES yer seçimi uygunluk haritası

Sonuç haritası genel olarak değerlendirildiğinde, Isparta İli' nin önemli bir bölümünün uygun ve çok uygun sınıflarında yer aldığı görülmektedir. Bu durum, ilin sahip olduğu güneşlenme süresi, radyasyon değerleri ve topoğrafik özellikler açısından güneş enerjisi yatırımları için yüksek potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır. Benzer sonuçlar, Akdeniz Bölgesi'nde yapılan diğer çalışmalarda da belirtilmiştir (Yalçın & Yüce, 2020; Tekdamar & Tekdamar, 2024).

Bu çalışmada kullanılan CBS–AHP tabanlı yaklaşımın, literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerle uyumlu olduğu ve güvenilir sonuçlar ürettiği görülmektedir (Uyan, 2017; Al Garni & Awasthi, 2017; Öztaş & Ervural, 2025). Elde edilen uygunluk haritası, yatırımcılar ve yerel yönetimler için ön fizibilite niteliğinde bilimsel bir karar destek aracı olarak değerlendirilebilir.

Ancak çalışmanın bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Kullanılan kriterlerin ağırlıkları uzman görüşlerine dayandığından, öznel değerlendirme etkisi söz konusu olabilir. Ayrıca ekonomik parametreler (arazi maliyeti, şebeke kapasitesi gibi) çalışmaya dahil edilmemiştir. Gelecek çalışmalarda bu parametrelerin modele entegre edilmesi, sonuçların daha gerçekçi hale gelmesini sağlayacaktır. Benzer öneriler, literatürde de sıklıkla vurgulanmaktadır (Noorollahi et al., 2016; Saraswat et al., 2021).

SONUÇ

Bu çalışmada, Isparta İli için GES yer seçimine yönelik CBS ve AHP tabanlı çok kriterli karar verme yaklaşımı uygulanmıştır. Güneş radyasyonu, eğim, bakı, yollara uzaklık, akarsulara uzaklık, fay hatlarına uzaklık, litoloji, arazi kullanımı, yerleşim alanlarına uzaklık ve trafo merkezlerine uzaklık olmak üzere toplam 10 kriter kullanılarak mekânsal uygunluk analizi gerçekleştirilmiştir. Kriter ağırlıkları AHP ile hesaplanmış ve ağırlıklı çakıştırma analizi kullanılarak nihai uygunluk haritası üretilmiştir.

Sonuçlar, çalışma alanının önemli bir bölümünün uygun (4) ve en uygun (5) sınıflarında yer aldığını göstermektedir. Özellikle ilin orta ve kuzey kesimlerinde yoğunlaşan yüksek uygunluk alanları, bölgenin güneş enerjisi yatırımları açısından güçlü bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, uygun değil (2) ve hiç uygun değil (1) sınıflarının yüksek eğimli, fay hatlarına yakın ve çevresel açıdan hassas bölgelerde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Orta uygun (3) sınıfındaki alanlar ise geçiş zonlarını temsil etmektedir.

Elde edilen bulgular, literatürde farklı bölgeler için rapor edilen CBS–AHP tabanlı çalışmalarla yüksek düzeyde uyum göstermektedir. Üretilen uygunluk haritası, yatırımcılar ve yerel yönetimler için ön fizibilite niteliğinde bilimsel bir karar destek aracı sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda ekonomik ve sosyo-politik kriterlerin modele entegre edilmesi, ayrıca farklı çok kriterli karar verme teknikleriyle karşılaştırmalı analizlerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach: A case study of Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206, 1225–1240. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>

Alhammad, A., Sun, Q., & Tao, Y. (2022). Optimal solar plant site identification using GIS and remote sensing: Framework and case study. *Energies*, 15(1), 312. <https://doi.org/10.3390/en15010312>

Arca, D., & Keskin Çıtıroğlu, H. (2022). Güneş enerjisi santral (GES) yapım yerlerinin CBS dayalı çok kriterli karar analizi ile belirlenmesi: Karabük örneği. *Geomatik Dergisi*, 7(1), 17–25. <https://doi.org/10.29128/geomatik.803200>

Asakereh, A., Soleymani, M., & Sheikhdavoodi, M. J. (2017). A GIS-based fuzzy-AHP method for evaluation of solar farms locations: Khuzestan province, Iran. *Solar Energy*, 155, 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.075>

Charabi, Y., & Gastli, A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 36(9), 2554–2561. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.021>

Gerçek, Y. (2018). Güneş enerji santralleri için CBS ile en uygun yer tayini: Malatya ili örneği (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Noorollahi, E., Fadai, D., Shirazi, M. A., & Ghodsipour, S. H. (2016). Land suitability analysis for solar farms using GIS and fuzzy AHP. *Energies*, 9(8), 643.

Öztaş, Ö., & Ervural, B. (2025). Integrating GIS and fuzzy BWM for solar PV power plant site selection: A case study of Konya, Turkey. *Celal Bayar University Journal of Science*, 21(1), 75–89. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.1589809>

Ruiz, H. S., Sunarso, A., Ibrahim-Bathis, K., Murti, S. A., & Budiarto, I. (2020). GIS-AHP multi criteria decision analysis for the optimal location of solar energy plants at Indonesia. *Energy Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.198>

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.

Saraswat, S. K., Digalwar, A. K., Yadav, S. S., & Kumar, G. (2021). MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India. *Renewable Energy*, 169, 865–884. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.056>

Soydan, O. (2021). Solar power plants site selection for sustainable ecological development in Niğde, Turkey. *SN Applied Sciences*, 3, 41. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04112-z>

Tekdamar, D. A., & Tekdamar, K. (2024). GIS tabanlı AHP yöntemi ile GES yer seçimi: Mardin ili örneği. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 199–212.

Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using AHP: Karapınar örneği. *Renewable Energy*, 52, 1–10.

Uyan, M. (2017). Güneş enerjisi santrali kurulabilecek alanların AHP yöntemi kullanılarak CBS destekli haritalanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 343–351. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.59489>

Uzar, M., & Koca, H. (2020). Güneş enerjisi santrallerinin yer seçimi için uygunluk haritasının oluşturulmasında klasik ve bulanık mantığa dayalı yöntemlerin analizi: Menemen örneği. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 7(1), 11–28. <https://doi.org/10.9733/JGG.2020R0002.T>

Yalçın, C., & Yüce, M. (2020). Burdur’da GES yatırımına uygun alanların CBS tabanlı AHP ile tespiti. *Geomatik Dergisi*, 5(1), 36–46.

Yolcan, O. O., & Köse, R. (2020). Türkiye’nin güneş enerjisi durumu ve güneş enerjisi santrali kurulumunda önemli parametreler. *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 6(2), 196–215. <https://doi.org/10.34186/klujes.793471>

