



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 10.07.2025  
Kabul Tarihi : 10.02.2026

Received Date : 10.07.2025  
Accepted Date : 10.02.2026

## BAKIR İLE KİRLENMİŞ ZEMİNLERİN BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

### INVESTIGATION OF GEOTECHNICAL AND STRENGTH PROPERTIES OF COPPER-CONTAMINATED SOILS

Çağla KÜÇÜK<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0005-8629-9123)  
Hasan Uğur MARTİN<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0006-2794-2702)  
İnci DEVELİOĞLU<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-6594-8095)

<sup>1</sup> İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İnci DEVELİOĞLU, inci.ertam@ikcu.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmada, farklı konsantrasyonlarda (1000, 2000 ve 5000 ppm) bakır sülfat ( $\text{CuSO}_4$ ) ile kirlenmiş kumlu zeminlerin geoteknik ve dayanım özellikleri laboratuvar deneyleri ile incelenmiştir. Temiz ve kirlenmiş numuneler üzerinde dane boyu dağılımı, özgül ağırlık, likit limit, kompaksiyon ve direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bakır kirliliğinin zeminin mikro yapısını ve mühendislik davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Kirlenme sonucu özgül ağırlıkta hafif bir artış, likit limitte azalma, optimum su içeriğinde azalma ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta artma gözlemlenmiştir. En dikkat çekici değişiklik, içsel sürtünme açısındaki önemli düşüş olup, bu durumun bakır iyonlarının daneler arası sürtünmeyi azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen bulgular, ağır metal kirliliğine maruz kalan sahalarda mühendislik uygulamaları planlanırken dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Bakır kirliliği, dayanım parametreleri, geoteknik özellikler, zemin kirliliği

#### ABSTRACT

In this study, the geotechnical and strength properties of sandy soils contaminated with copper sulfate ( $\text{CuSO}_4$ ) at varying concentrations (1000, 2000, and 5000 ppm) were experimentally investigated. Laboratory tests including grain size distribution, specific gravity, liquid limit, compaction, and direct shear were performed on both clean and contaminated samples. Results indicate that copper contamination significantly influences the microstructure and engineering behavior of the soil. A slight increase in specific gravity, a decrease in liquid limit, a decrease in optimum moisture content, and an increase in maximum dry unit weight were observed. The most notable change was a considerable decrease in internal friction angle, which is attributed to the lubricating effect of copper ions reducing interparticle friction. These findings emphasize the need for caution when designing engineering structures in copper-contaminated areas.

**Keywords:** Copper contamination, geotechnical properties, soil contamination, strength parameters

#### GİRİŞ

Sanayileşme ve teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte, küresel ölçekte çevresel sorunların sayısı ve şiddeti önemli ölçüde artış göstermiştir. Özellikle sanayileşme ve kentleşme sürecinde kentsel alanlara olan talebin artması, insanların daha iyi yaşam koşulları arayışıyla birlikte göç oranlarında ciddi yükselişe neden olmuştur. Bu süreçler sonucunda ortaya çıkan çevresel kirlilik, yalnızca ekosistemleri değil, aynı zamanda insan sağlığını ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerini de tehdit etmektedir. Ancak bu hızlı gelişim süreci, planlamadan yoksun kentleşme, bilinçsiz arazi kullanımı, artan trafik sorunları ve tarımda yoğun kimyasal gübre kullanımı gibi faktörlerle birleşerek çevre kirliliğini ciddi boyutlara taşımıştır (Çoruh, 2013; Xie vd., 2010).

Çevrenin ve dolayısıyla tüm canlıların yaşam kalitesini doğrudan etkileyen ağır metaller, hava, su ve zemin ortamlarında birikerek biyobirikime neden olmakta ve bu süreç ciddi toksik etkiler ortaya çıkarmaktadır. Hava, su ve zeminde biriken ağır metaller, besin zincirinin her aşamasında bulunan canlıları olumsuz etkileyerek insan sağlığına kadar uzanan geniş bir etki alanı yaratmaktadır (Alloway, 2013; Wuana & Okieimen, 2010). Ekosistemin temel kaynakları olan su ve zemin, bilinçsiz kullanım ve ağır metal kirliliği nedeniyle döngüsel olarak birbirini etkileyerek çevresel sorunların katlanmasına neden olmaktadır. Bu kirlenici ağır metallerin zemine geçişi genellikle endüstriyel atıklar, madencilik faaliyetleri ve tarımsal gübreleme gibi insan kaynaklı faaliyetler aracılığıyla gerçekleşmektedir (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007).

Ağır metallerin zemin sistemine dahil olması yalnızca çevresel sorunlar oluşturmaz, aynı zamanda fiziksel açıdan da önemli sorunlara yol açmaktadır. Endüstriyel atıklar, gübreler, otomobil emisyonları ve madencilik faaliyetleri gibi çeşitli insan kaynaklı etkinlikler, zeminin yapısında bulunan iz elementlerin miktarını artırmakta ve çevresel risklerin yanında mühendislik zorluklarını da beraberinde getirmektedir. Özellikle bakır kirliliği, taşıma gücü, sıkışabilirlik, plastisite ve kayma dayanımı gibi temel parametrelerde belirsizliklere neden olabilmekte ve yapı güvenliğini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu değerlendirmeler göz önüne alındığında, özellikle inorganik kirliliğe maruz kalmış zeminlerin mühendislik davranışlarının laboratuvar ortamında detaylı bir şekilde incelenmesi, çevresel risklerin yönetimi ve mühendislik tasarımlarının güvenliği açısından büyük bir önem arz etmektedir (Li vd., 2019; Tripathy & Reza, 2019). Ağır metaller ile kirlenmiş zeminlerin geoteknik indeks ve dayanım özellikleri üzerine yapılmış çalışmalar oldukça sınırlıdır bu nedenle genel bir kanı oluşturulmasında oldukça eksiklikler bulunmaktadır. Moghal vd. (2020) çalışmalarında kaolin ve montmorillonit kilini çeşitli ağır metaller (As, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) ile kirlenmiş ve ardından pH, elektriksel iletkenlik, tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve 1-D konsolidasyon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda ne pH ve elektriksel iletkenlik değerlerinde ne de UCS ve konsolidasyon parametrelerinde kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Karakush ve Ali (2020)'ye ait bir çalışmada yüksek plastisiteli kil zemin iki farklı konsantrasyonda (%10 ve 25) ve dört farklı kirlenici (kerosen, amonyum hidroksit, bakır sülfat, kurşun nitrat) ile kirlenmiştir. Kirlenme işlemi kirleniciye suya eklenmesi, ardından zeminin yüzeyini 3 cm geçecek şekilde numunenin üzerine eklenmesi ve 30 gün bekletilmesi ile yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, amonyum hidroksitin diğer kirlenicilere göre etkisinin daha az olduğu belirlenmiştir. Kerosen ve amonyum hidroksit kirlenmesi ile ince dane oranında artış meydana gelirken, bakır sülfat ve kurşun nitratta tam tersi bir durum söz konusudur. Ayrıca tüm kirleniciler için, kirlenici içeriği arttıkça kayma mukavemeti parametrelerinde kayda değer bir azalma meydana gelmiştir. Zhao vd. (2023), endüstriyel, tarımsal ve evsel kaynaklı kirlenicilerin farklı zemin türlerinin geoteknik özellikleri üzerindeki etkilerini derleme çalışması kapsamında incelemiştir. Çalışmada kum, silt ve kil ağırlıklı zeminlerin; ağır metaller (Cu, Pb, Cd, Zn, Cr), petrol türevleri, asidik ve alkalik sızıntı suları ile kirlenmesi durumunda meydana gelen değişimler ele alınmıştır. Literatürde raporlanan deneysel çalışmalar kapsamında dane boyu dağılımı, permeabilite, kompaksiyon, kayma dayanımı ve konsolidasyon deneylerinin yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Sonuçlar, ağır metal türüne ve zemin mineralojisine bağlı olarak geçirgenliğin artabildiğini veya azalabildiğini, kompaksiyon parametrelerinde optimum su içeriğinin genellikle azaldığını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığın arttığını göstermiştir. Ayrıca özellikle ağır metal kirliliğinin, daneler arası yüzey özelliklerini değiştirerek içsel sürtünme açısından ve genel kayma dayanımında azalmaya neden olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada, kısa vadede sınırlı görülen bu etkilerin uzun vadede mikroyapısal değişimler nedeniyle daha belirgin hale geldiği ifade edilmiştir. Namadi vd. (2023), %80 kum ve %20 bentonitten oluşan kum-bentonit karışımının kurşun ( $Pb^{2+}$ ) ile kirlenmesi ve karbonat ile modifiye edilmesi durumunda geoteknik özelliklerde meydana gelen değişimleri deneysel olarak incelemiştir. Numuneler, 5, 10 ve 20 cmol/kg seviyelerinde kurşun nitrat çözeltileri ile kirlenmiş, kirlenme sonrası bazı numunelere kuru zemin ağırlığının %10'u oranında sodyum karbonat ilave edilmiştir. Kirlenme işlemi, çözelti-zemin karışımının hazırlanması ve iyon değişiminin tamamlanması amacıyla numunelerin belirli süre bekletilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında standart Proctor kompaksiyon deneyi, tek eksenli basınç dayanımı, bir boyutlu konsolidasyon, permeabilite ve SEM analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ağır metal ilavesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlığın arttığını ve optimum su içeriğinin azaldığını, buna karşılık permeabilite ve tek eksenli basınç dayanımının olumsuz etkilendiğini göstermiştir. SEM görüntüleri, ağır metal kirliliğinin flokülasyon oluşturarak daha yoğun ancak mekanik olarak daha zayıf bir yapı meydana getirdiğini ortaya koymuştur. Rehman vd. (2023), ağır metal ile kirlenmiş zeminlerin çevresel ve geoteknik açıdan iyileştirilmesine yönelik yöntemleri kapsamlı bir derleme çalışması ile değerlendirmiştir. Çalışmada Cu, Pb, Cd, Zn, Ni ve Cr gibi ağır metaller ile kirlenmiş kumlu, siltli ve kil zeminler üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve saha çalışmaları incelenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar kapsamında dane boyu dağılımı, kompaksiyon, kayma dayanımı, permeabilite ve konsolidasyon deneylerinin yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir. İncelenen sonuçlar, ağır metal kirliliğinin çoğu durumda zeminlerin kayma dayanımı ve deformasyon özelliklerini olumsuz etkilediğini, bazı iyileştirme yöntemlerinin ise çevresel açıdan etkili olmasına rağmen

geoteknik hizmet verebilirliği düşürebildiğini göstermiştir. Yazarlar, ağır metal kirliliğine maruz kalmış zeminlerin mühendislik yapıları açısından yeniden kullanımı planlanırken yalnızca çevresel iyileştirmenin değil, geoteknik performansın da birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bu çalışma kapsamında yalnızca bakır sülfat kullanılması, gözlenen değişimlerin doğrudan bakır iyonları ve sülfat türlerine atfedilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, çoklu kirletici sistemlerin incelendiği daha karmaşık çalışmalar için temel ve referans niteliğinde bir veri tabanı sunmaktadır.

Bu çalışmada ise farklı konsantrasyonlarda (1000, 2000 ve 5000 ppm) bakır sülfat ( $\text{CuSO}_4$ ) ile kirlenmiş kumlu zeminin geoteknik indeks ve dayanım özellikleri deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Çalışmada kirletici olarak bakır tercih edilmesinin nedeni hem bakır ile yapılmış çalışmaların çok kısıtlı olması hem de egzoz dumanlarından ve madencilik faaliyetlerinden ötürü zeminde en çok bulunan ağır metallere birisi olmasıdır (Khalid vd., 2016). Çalışma kapsamında, öncelikle doğal kumlu zemin numuneleri hazırlanmış ve belirlenen oranlarda bakır çözeltisi ile kirlenmiştir. Daha sonra, numuneler üzerinde dane boyu dağılımını belirlemeye yönelik elek analizleri, özgül ağırlık belirlemek amacıyla piknometre deneyi ve kıvam limitlerini belirlemek amacıyla likit limit testleri uygulanmıştır. Kompaksiyon parametrelerini elde etmek amacıyla Standart Proctor deneyleri hem temiz hem de kirlenmiş numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında kayma dayanımı parametrelerini belirlemek amacıyla direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Direk kesme deneylerinde numune kutuya yerleştirilirken kompaksiyon parametreleri (optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık) kullanılmıştır. Elde edilen deneysel veriler, ağır metal kirliliğinin kumlu zeminin geoteknik indeks ve dayanım parametreleri özelliklerine etkisini ortaya koymak üzere değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı,  $\text{Cu}^{2+}$  iyonlarının kumlu zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemek ve bu değişimleri literatürle birlikte bilimsel bir çerçevede değerlendirmektir.

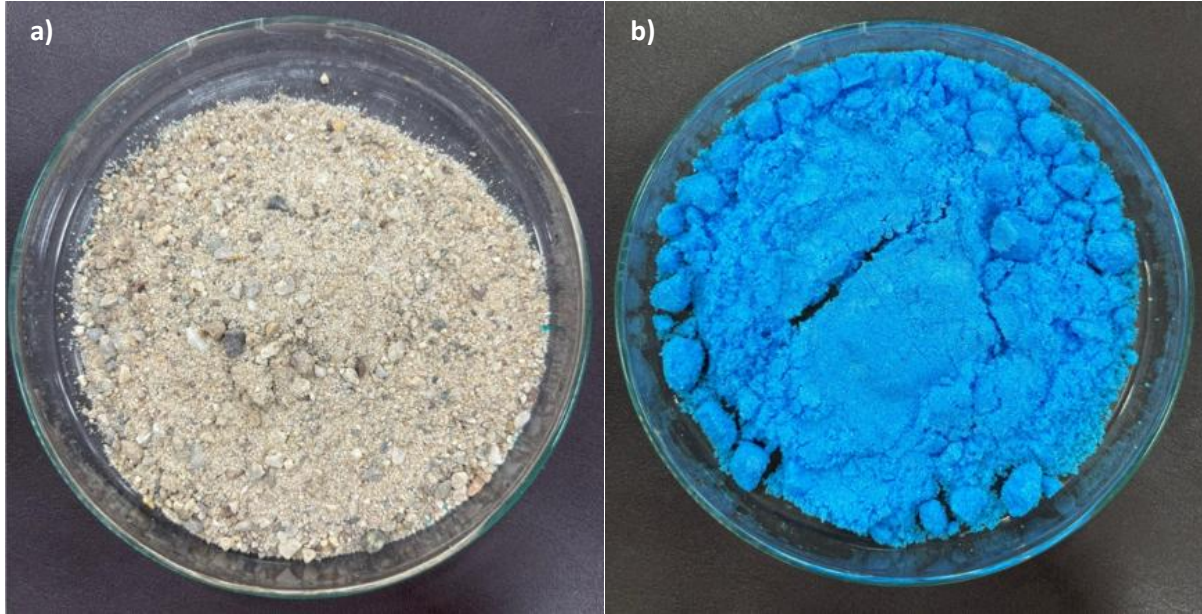
## MALZEMELER VE YÖNTEMLER

### Malzemeler

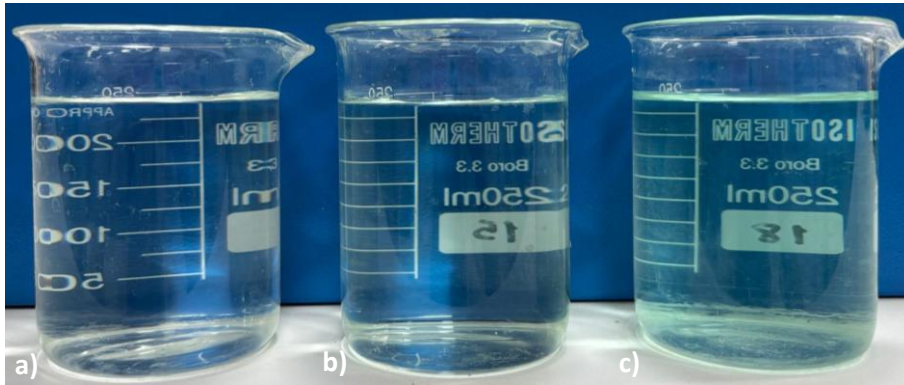
Zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan kumlu zeminler, doğal süreçlerle oluşmuş ya da ticari olarak üretilmiş malzemelerdir. Bu çalışmada kullanılan kumlu zemin numuneleri, İzmir ili Çiğli ilçesinin Mavişehir bölgesinden temin edilmiştir. Bölge, Ege Denizi kıyısında yer almakta olup, yapılaşmanın çok yoğun olduğu bir alan niteliğindedir. Numuneler, bölgenin doğal kumlu zemin özelliklerini temsil edecek şekilde yüzeysel seviyelerden alınmış, taşınma ve saklama sürecinde özgün özelliklerini koruyacak biçimde (hava almayan kilitli kaplarda) paketlenerek laboratuvara ulaştırılmıştır (Şekil 1a). Araştırma kapsamında dört farklı numune seti hazırlanmıştır: temiz (kirlenmemiş) kumlu zemin, 1000, 2000 ve 5000 ppm bakır sülfat içeren kirlenmiş kumlu zeminler. Kirlenme işlemi, laboratuvar ortamında hazırlanmış bakır sülfat ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) çözeltisi ile yapay olarak gerçekleştirilmiştir. Bakır sülfat malzemesinin oda sıcaklığında katı halde olan fiziksel görüntüsü Şekil 1b'de gösterilmiştir.

### Yöntemler

Çalışmada, farklı konsantrasyonlarda bakır sülfat ile kirlenmiş kumlu zeminlerin geoteknik ve dayanım özelliklerini incelemek amacıyla çeşitli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kirlenme işlemi için 1000 ppm için 1 litre suya 1 g bakır sülfat, 2000 ppm için 1 litre suya 2 g bakır sülfat ve 5000 ppm için 1 litre suya 5 g bakır sülfat eklenmiştir (Şekil 2). Oluşturulan bu çözeltiler  $105^\circ\text{C}$ 'de 24 saat etüvde kurutulmuş kumlu zeminlerin üzerine 3 cm geçecek şekilde kaplara koyulmuştur. Kapların kapakları kapatılarak kumlu zeminler 5 ay boyunca bu çözeltilerde bekletilmiştir. Kirlenme süresi 5 ay olarak seçilmiştir; çünkü ağır metal iyonlarının danelere adsorpsiyonu, iyon değişimi ve yüzey yükü nötralizasyonu gibi süreçlerin tamamlanması zaman gerektirmektedir. Moghal vd. (2020) ve Karkush & Ali (2019), ağır metal-zemin etkileşimlerinde 3-6 aylık bekleme sürelerinin iyonik oturma ve kimyasal denge açısından uygun olduğunu bildirmiştir. 5 ayın sonunda numuneler tekrar  $105^\circ\text{C}$ 'de 24 saat etüvde kurutulmuş ve ardından laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan deneyler; dane boyu dağılımı analizi, özgül ağırlık deneyi, düşen koni likit limit deneyi, pH metre ile pH ölçümü, standart Proctor kompaksiyon deneyi ve direk kesme deneylerdir. Deneylerde kullanılan numunelerin adlandırılmaları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. a) Kumlu Zeminin Fiziksel Görünüşü, b) Bakır Sülfat Fiziksel Görünüşü



Şekil 2. Bakır Sülfat Çözeltileri a) 1000 ppm, b) 2000 ppm, c) 5000 ppm

Tablo 1. Numune Adlandırmaları

Numune adı	Bakır Sülfat içeriği (ppm)
K_Temiz	0
K1000Cu	1000
K2000Cu	2000
K5000Cu	5000

Numunelerin dane boyu dağılım eğrilerinin belirlenmesi amacıyla elek analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle etüvde kurutulmuş numune No.200 (0,075 mm) elekten yıkanarak elenmiş ve elek üstünde kalan numune etüvde 105° C' de 24 saat bekletilmiştir. Ardından ASTM D6913 standardına uygun olarak etüvde kurutulmuş numune, sırasıyla No. 4 (4,75 mm), No. 10 (2 mm), No. 40 (0,425 mm) ve No. 200 (0,075 mm) elek açıklıklarına sahip eleklerden elenmiştir. Temiz ve kirlenmiş kumlu zemin numuneleri ayrı ayrı çeyreleme yöntemiyle homojenize edildikten sonra tartılmış ve elek setine yerleştirilmiştir. Sallama işlemi sonunda her elek üzerinde kalan numune miktarı tartılmış, kümülatif dağılım eğrileri çizilmiştir.

Numunelerin özgül ağırlık değerlerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D7928 standardına göre piknometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. 250 ml kapasiteye sahip piknometreye önce içinde yalnızca distile su varken 15 dk vakum uygulanmış ardından etüvde kurutulmuş 0,425 mm elek altına geçmiş numune ve distile su ile dolu piknometreye 15 dk daha vakum uygulanmıştır. Elde edilen değerler özgül ağırlık hesaplanmasından kullanılmıştır.

Numunelerin plastisite özelliklerini belirlemek üzere BS 1377 standardına uygun olarak düşen koni deneyi uygulanmıştır. Deneyde, 0,425 mm elek altında kalan etüvde kurutulmuş numunenin üzerine belirli oranlarda distile su eklenerek homojen bir macun elde edilmiştir. Hazırlanan karışım pirinç kaplara yerleştirilmiş ve yüzeyi düzgün hale getirilmiştir. Düşen koni cihazı yardımıyla koninin penetrasyon derinliği ölçülmüş, bu veriler plastisite özelliklerinin yorumlanmasında kullanılmıştır. Her deneme sonrası numunelerden alınan örneklerle su içeriği belirlenmiştir. Zemin numunesi kum sınıfında olduğundan plastik limit değerleri belirlenememiştir ve PI değeri tanımsızdır. Zemin plastik olmayan (non-plastic [NP]) bir zemindir. Bu nedenle plastisite değerlendirmesi LL üzerinden yapılmıştır.

Numunelerin kirlenmeden kimyasal olarak ne şekilde etkilendiğinin belirlenmesi amacıyla, her bir numunenin pH ölçümleri ASTM D4972 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 10 g kuru numune ile 100 ml distile su karışım hazırlanmış, cam beherlerde 24 saat boyunca bekletilmiştir. Dengeye ulaşan çözeltide pH ölçümleri hassas dijital pH metre ile yapılmıştır. Bu yöntem, özellikle ağır metal içeren kumlu zeminlerde metal çözünürlüğü ve zemin-su etkileşiminin analizinde kritik öneme sahiptir.

Numunelerin optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D698 standardına uygun olarak standart Proctor kompaksiyon deneyi uygulanmıştır. Her bir numune, üç katman halinde kalıba yerleştirilmiş ve her katmana 2,5 kg ağırlığında tokmak ile 25 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır. Sıkışmış numunelerin ağırlıkları tartılarak birim hacim ağırlığı hesaplanmış, farklı su içeriklerinde deneyler tekrarlanarak kompaksiyon eğrileri elde edilmiştir. Bu deney ile, ağır metal kontaminasyonunun kumlu zeminin mühendislik davranışlarına (özellikle sıkışabilirlik ve yoğunluk özelliklerine) etkisi nicel olarak değerlendirilmiştir. Numunelerin içsel sürtünme açılarının belirlenmesi amacıyla ASTM D3080 standardına göre direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler 60 x 60 mm boyutunda direk kesme kutusuna maksimum kuru birim hacim ağırlık sıklığında yerleştirilmiştir. Ardından 49, 98 ve 196 kPa'lık normal gerilmeler altında 0,5 mm/dk kesme hızında direk kesme deneyleri yapılmıştır.

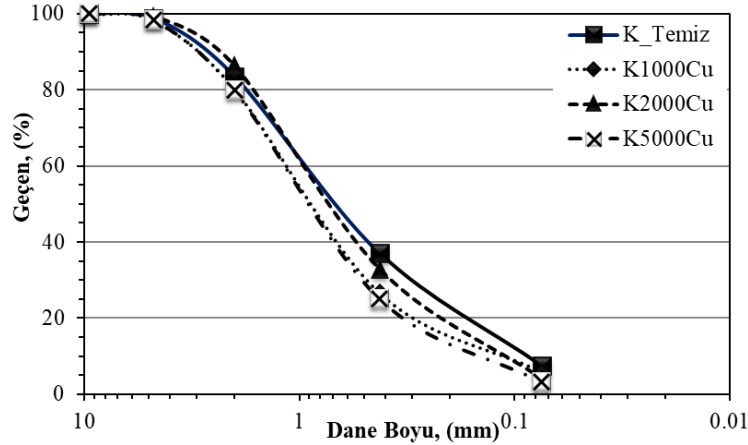
## DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA

Islak ve kuru elek analizleri sonucunda elde edilen temiz ve kirlenmiş numunelerin dane boyu dağılım eğrileri Şekil 3'te verilmiştir. Temiz kum numunesinin eğrilik katsayısı ( $C_c$ ) 1,31, üniformluk katsayısı ( $C_u$ ) ise 8,30 olarak belirlenmiştir. Kirlenmiş numunelerin ise 1000 ppm, 2000 ppm ve 5000 ppm için sırasıyla  $C_c$  değeri 1,65, 1,21, 1,39 ve  $C_u$  değeri 9,69, 6,43, 7,53 olarak tespit edilmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere bakır kirliliği, dane boyu dağılımında küçük değişimlere neden olmuştur. Zemin ağırlıklı olarak kumlu kalmasına rağmen, ince danelerde azalma gözlemlenmiştir. Bu bulgular, ağır metal kirliliğinin kumlu zeminlerin mikro yapısal davranışını kısmen etkilediğini göstermiştir. Bu değişimin nedeni, Cu iyonlarının flokülasyon etkisiyle ince daneleri daha iri danelere dönüştürmesi ve bu durumun ince dane oranını azaltmasıdır (Zheng vd., 2024; Ali ve Karakush, 2019; Akkoca vd., 2024).

Bu durum literatürde ağır metal-zemin etkileşimleri kapsamında sıkça rapor edilen flokülasyon-agregasyon mekanizması ile uyumludur. Özellikle  $Cu^{2+}$  gibi iki değerlikli metal iyonlarının, ince dane yüzeylerindeki negatif yükleri nötralize ederek daneler arası elektrostatik itmeleri azalttığı bilinmektedir. Bu etki, ince danelerin bir araya gelerek daha iri agregalar oluşturmaya ve dane boyu dağılımında ince dane oranının azalmasına yol açmaktadır. Benzer davranışlar, Cu ve Pb ile kirlenmiş kumlu ve ince daneli zeminler üzerinde yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir (Ali & Karakush, 2019; Zhang vd., 2024). Dolayısıyla mevcut çalışmada gözlemlenen dane boyu dağılımındaki değişimlerin, yalnızca mekanik değil, aynı zamanda kimyasal kökenli mikroyapısal yeniden düzenlenmelerden kaynaklandığı söylenebilir.

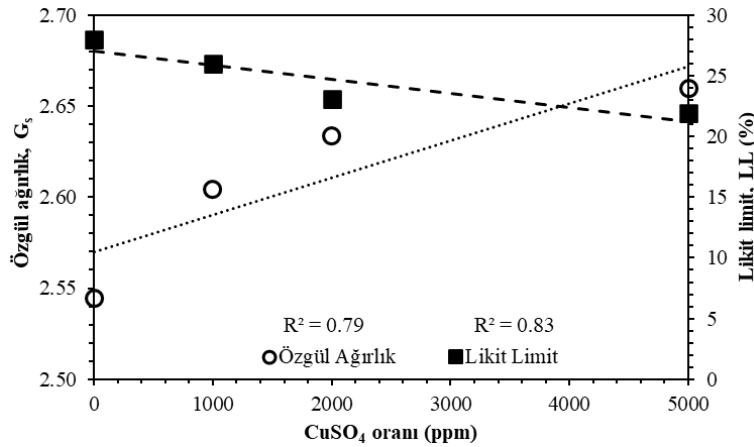
Temiz ve kirlenmiş numunelerin piknometre deneyi sonucunda elde edilen özgül ağırlık değerleri ve düşen koni deneyi sonucunda elde edilen likit limit değerleri Şekil 4'te özetlenmiştir. Şekil 4 incelendiğinde kirlenmiş zeminlerin özgül ağırlığı, temiz numunelere kıyasla hafif bir artış göstermiştir. Bu artışın nedeni,  $Cu^{2+}$  iyonlarının zemin daneleriyle iyonik bağlar oluşturması ve bu bağların, danelerin yüzeyinde daha ağır bir yapı meydana getirmesidir. Özellikle yüksek konsantrasyonlu numunelerde ağır metal iyonlarının danelerin yüzeyinde birikerek agregasyon oluşturduğu ve bu durumun danelerin yoğunluğunu artırdığı düşünülmektedir (Zheng vd., 2024; Ali ve Karakush, 2019; Anyap vd., 2024). Bunun sonucunda, özgül ağırlıktaki artışın, zeminlerin taşıma kapasitesini potansiyel olarak artırabileceği; ancak bu durumun, sıkışma özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Likit limit değerlerinde ise özellikle yüksek  $CuSO_4$  konsantrasyonlarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma,  $Cu^{2+}$  iyonlarının zemin daneleri arasındaki su moleküllerini bağlama kapasitesini sınırlamasıyla açıklanabilir.

İyonik etkileşimler sonucunda daneler arası bağ yapısı güçlenmekte; bu da suyun zemin içerisinde serbest hareketini ve tutulmasını azaltarak plastiklik özelliklerini zayıflatmaktadır (Zheng vd., 2024; Ali ve Karakush, 2019; Akkoca vd., 2024; Anyap vd., 2024). Ayrıca Al-Khafaji ve Andersland (1992), metal iyonlarının zemin-su etkileşimlerini değiştirerek plastisiteyi azaltabileceğini ve bu durumun mühendislik açısından kırılma davranışına yol açabileceğini vurgulamıştır.



Şekil 3. Temiz ve Kirlenmiş Numunelerin Dane Boyu Dağılım Eğrileri

Özgül ağırlıktaki artış ve likit limitteki azalma birlikte değerlendirildiğinde,  $\text{Cu}^{2+}$  iyonlarının zemin-su-hava faz etkileşimlerini önemli ölçüde değiştirdiği görülmektedir. Literatürde ağır metal iyonlarının, zemin danelerinin yüzeyinde adsorbe olarak serbest su miktarını azalttığı ve buna bağlı olarak plastiklik özelliklerini zayıflattığı bildirilmektedir (Al-Khafaji & Andersland, 1992; Akkoca vd., 2024). Mevcut çalışmada elde edilen bulgular da bu yaklaşımı desteklemekte olup, özellikle yüksek bakır konsantrasyonlarında su tutma kapasitesinin azalması, zeminin daha kırılma ve düşük deformasyon kapasitesine sahip bir davranış sergileyebileceğine işaret etmektedir. Bu durum, kirlenmiş zeminlerde oturma ve stabilite analizlerinin klasik varsayımlarla yapılmasının güvenli olmayabileceğini göstermektedir.



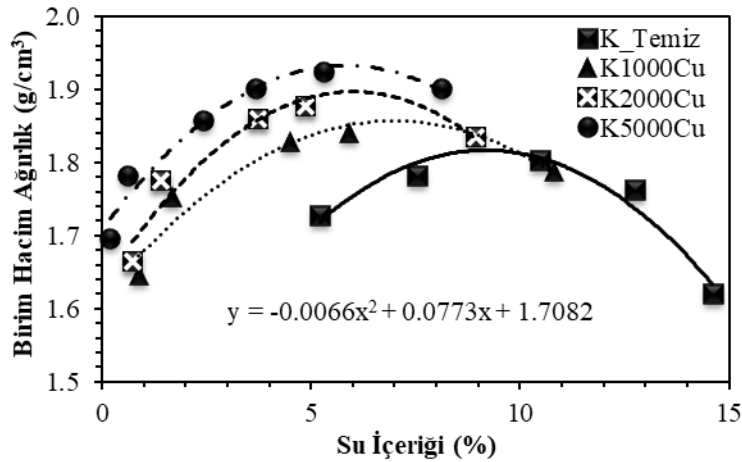
Şekil 4. Temiz ve Kirlenmiş Numunelerin Özgül Ağırlık ve Likit Limit Değerleri

Amro vd. (2019) gerçekleştirdikleri çalışmalarında pH değerinin ağır metallerin zeminle etkileşimini doğrudan etkileyen temel parametrelerden biri olduğunu vurgulamıştır. Kirlenmiş numunelerin için hazırlanan bakır sülfat çözeltilerinin hem hazırlandıkları gün hem de 5 ay sonundan pH ölçümleri yapılmıştır. İlk gün ile 5 ay ölçümleri sonundan kayda değer bir değişim meydana gelmemiştir. 1000 ppm, 2000 ppm ve 5000 ppm çözeltiler için pH değerleri sırası ile 6,65, 6,32 ve 5,96 elde edilmiştir. Bakır sülfat çözeltisi doğası gereği asidiktir;  $\text{CuSO}_4$  çözüldüğünde  $\text{H}^+$  iyonu derişimi artar. Konsantrasyon yükseldikçe ortam daha asidik hale gelir ve dolayısıyla pH düşer.

Temiz ve kirlenmiş numunelerin Standart Proctor deneyi sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrileri ve optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Bakır konsantrasyonu

arttıkça, optimum su içeriği azalırken maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri artmıştır. Optimum su içeriğindeki bu değişim,  $\text{Cu}^{2+}$  iyonlarının zemin daneleriyle olan fizikokimyasal etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır.  $\text{Cu}^{2+}$  iyonlarının yüzey yüklerini nötralize etmesi ve zemin daneleri üzerinde flokülasyon oluşturarak daha kompakt bir yapı meydana getirmesi, zemin-su ilişkisini önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu etki, daneler arası suya duyulan ihtiyacın azalmasına ve daha kuru koşullarda sıkışmanın mümkün olmasına neden olmuştur (Ali ve Karakush, 2019; Anyap vd., 2024; Krishna & Govil, 2007). Benzer bulgular Zhang vd. (2008) tarafından da rapor edilmiş olup, ağır metal iyonlarının kompaksiyon eğrisi üzerinde kayma yarattığı ve optimum su içeriğinin düştüğü belirtilmiştir. Kuru birim hacim ağırlıktaki artışın nedeni ise  $\text{Cu}^{2+}$  iyonlarının zemin daneleriyle kurduğu elektrostatik bağlarla açıklanabilir. Ağır metal iyonlarının adsorpsiyonu sonucu daneler arasında boşluk oranı azalmış, daha sıkı bir yapı meydana gelmiştir. Bu durum, daha fazla katı faz içeren ve daha az boşluk hacmine sahip bir zemin yapısı oluşturmuş, böylece birim hacimde daha yüksek kuru yoğunluk elde edilmiştir. Ayrıca,  $\text{Cu}^{2+}$  iyonlarının neden olduğu flokülasyon ve agregasyon davranışı, mikroskobik boşlukların azalmasına ve zeminin daha yoğun bir yapı kazanmasına katkı sağlamıştır (Ali ve Karakush, 2019; Anyap vd., 2024; Krishna & Govil, 2007; Karakush & Resol, 2015). Bu bulgular, Al-Khafaji ve Andersland (1992) tarafından yürütülen çalışmalarda da gözlemlenmiş olup, metal iyonlarının zemin içinde kompaksiyon kabiliyetini artırdığı bildirilmiştir. Sonuç olarak, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerindeki artış, ağır metal kirliliğinin zemin sıkışabilirliğini doğrudan etkilediğini ve bu tür zeminlerin daha yüksek taşıma kapasitesi ve yoğunlukla davranabileceğini göstermektedir.

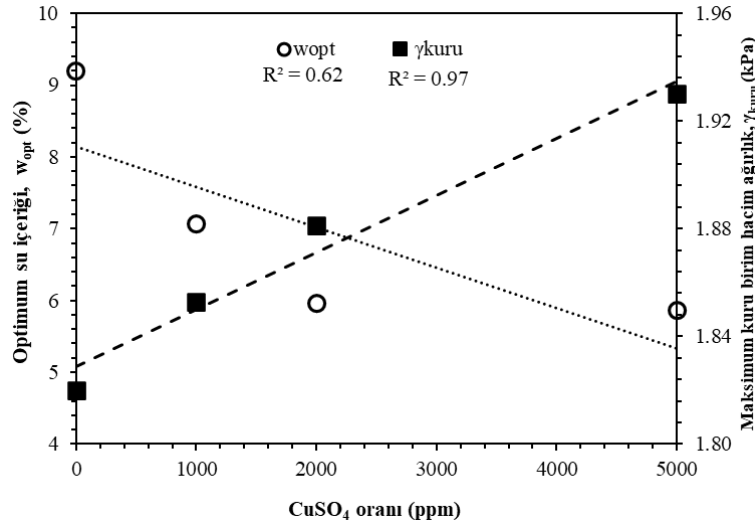
Optimum su içeriğindeki azalma ve maksimum kuru birim hacim ağırlıktaki artış, ağır metal kirliliğinin kumlu zeminlerde daha yoğun fakat daha düşük sürtünmeli bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, Krishna ve Govil (2007) ile Karakush ve Resol (2015) tarafından rapor edilen bulgularla uyumludur. Ancak, bu yoğunluk artışı her zaman olumlu bir mühendislik sonucu olarak değerlendirilmemelidir. Çünkü daha yoğun yapı,  $\text{Cu}^{2+}$  iyonlarının oluşturduğu ince iyonik film tabakası nedeniyle daneler arası sürtünmenin azalmasıyla birlikte değerlendirildiğinde, taşıma gücü ve şev stabilitesi açısından beklenen iyileşmenin gerçekleşmeyebileceği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla kompaksiyon parametrelerindeki iyileşme, dayanım parametreleriyle birlikte ele alınmalıdır.



Şekil 5. Temiz ve Kirlenmiş Numunelerin Kompaksiyon Eğrileri

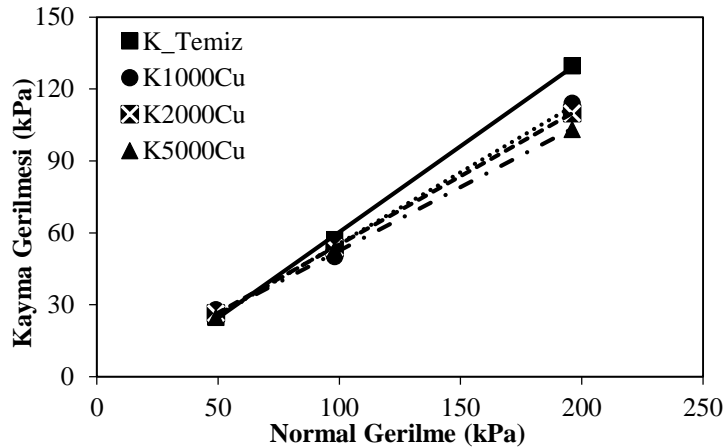
Temiz ve kirlenmiş numunelerin direk kesme deneyleri sonucunda elde edilen Mohr-Coulomb kayma zarfları ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değerleri Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Direk kesme deneylerinden elde edilen kohezyon değerleri tüm numunelerde 0–1 kPa arasında olup ihmal edilebilir düzeyde elde edilmiştir. Dolayısıyla kayma dayanımı parametreleri yalnızca içsel sürtünme açısı üzerinden değerlendirilmiştir. En belirgin değişim, içsel sürtünme açısında gözlemlenmiş ve önemli ölçüde azalmıştır. Bu azalma, daneler arası mekanik kilitlenmenin zayıflamasına ve yüzey pürüzlülüğünün azalmasına bağlanabilir.  $\text{Cu}^{2+}$  iyonları, kırma kum danelerinin yüzeylerine absorbe olarak, zemin daneleri arasındaki doğal elektrostatik etkileşimleri değiştirmekte ve bu da kayma direncinin zayıflamasına neden olmaktadır. Ek olarak,  $\text{Cu}^{2+}$  iyonlarının neden olduğu elektrokimyasal etkileşimler, zemin danelerinin etrafında ince bir iyonik film tabakası oluşturarak sürtünme kuvvetini azaltmakta ve kayma anında danelerin birbirine göre hareket etmesini kolaylaştırmaktadır. Bu gözlemler, literatürdeki birçok çalışmayla da örtüşmektedir., Li vd. (2014) çalışmasında, ağır metal kirliliğinin kohezyonsuz zeminlerde  $\phi$  açısını azalttığı ve bunun tanecik yüzey özelliklerinde meydana gelen değişikliklerle ilişkili olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, Karakush ve Ali (2019), Cu ile kirlenmiş kumlu zeminlerde tepe kayma mukavemetinin azaldığını ve bunun şev

stabilitesi ile temel tasarımı açısından potansiyel riskler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Kayma mukavemetindeki bu düşüş, şev stabilitesi, temel tasarımı ve genel zemin güvenirliliği açısından önemli sonuçlar doğurabilir bu nedenle bakır kirliliği yaşanmış sahalarda bu tür yapılar yapılırken bu durumun göz önünde bulundurulması oldukça önem arz etmektedir.



Şekil 6. Temiz ve Kirlenmiş Numunelerin Optimum Su İçeriği ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık Değerleri

İçsel sürtünme açısındaki bu belirgin azalma, ağır metal kirliliğinin kumlu zeminlerde oluşturduğu en kritik mühendislik risklerinden biridir. Literatürde, metal iyonlarının danelerin yüzey pürüzlülüğünü azaltarak mekanik kilitlenmeyi zayıflattığı ve sürtünme kontrollü zeminlerde ani dayanım kayıplarına yol açabileceği vurgulanmaktadır (Li vd., 2019; Karakush ve Ali, 2019). Mevcut çalışmada gözlemlenen bu davranış, özellikle yüzeysel temeller, dolgu zeminleri ve düşük normal gerilmeler altında çalışan mühendislik yapıları için önemli bir risk faktörü oluşturmaktadır. Bu nedenle, Cu ile kirlenmiş kumlu zeminlerde tasarım yapılırken yalnızca yoğunluk ve kompaksiyon parametrelerine değil, kayma dayanımındaki olası düşümlere de özel önem verilmelidir.

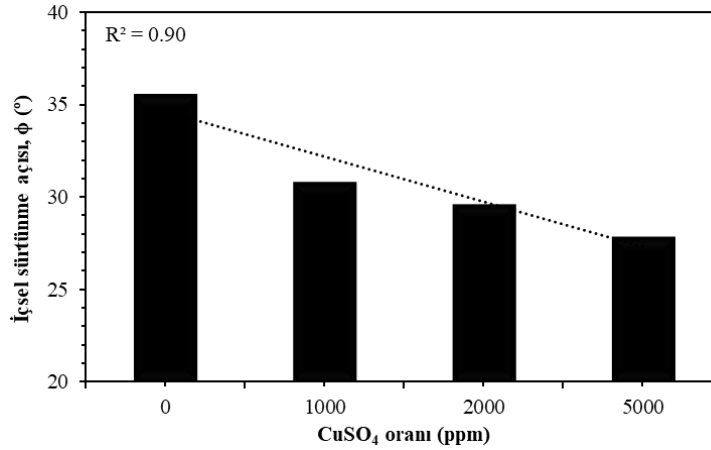


Şekil 7. Temiz ve Kirlenmiş Numunelerin Mohr-Coulomb Kayma Zarfları

### Deney Sonuçlarının Literatür Çalışmaları ile Karşılaştırılması

Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar, tutarlılığın tespiti amacıyla literatürde daha önce ağır metaller ile kirlenmiş zeminlerin geoteknik parametreleri üzerine yapılmış çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve Tablo 2'de özetlenmiştir. Tablo 2'de ince dane oranı (FC), özgül ağırlık ( $G_s$ ), likit limit (LL), optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ), maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kuru}$ ) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değerlerinin ağır metal ilavesi ile azalıp ya da arttığı durumu sunulmuştur. Tablo 2'de yer alan '+' işareti o parametrenin ağır metal ilavesi ile arttığını, '-' işareti o parametrenin ağır metal ilavesi ile azaldığını, hiçbir işaret yok ise çalışmada o parametrenin incelenmediğini göstermektedir. Tablo 2 incelendiğinde literatür çalışmalarından elde edilen sonuçların mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar ile oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. Mevcut çalışma ile farklı sonuç veren çalışmalar (Krishna

& Govil, 2007; Karakush & Resol, 2015) incelendiğinde bu çalışmalarda kullanılan zeminlerin mevcut çalışmadaki zemine göre ince dane oranı ve kohezyonu yüksek zeminler olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. Temiz ve Kirlenmiş Numunelerin İçsel Sürtünme Açısı Değerleri

Tablo 2. Mevcut Çalışmada Elde Edilen Sonuçların Literatür Çalışmaları ile Kıyaslanması

Çalışma	FC	G <sub>s</sub>	LL	γ <sub>kuru</sub>	W <sub>opt</sub>	φ
Mevcut	-	+	-	+	-	-
Krishna ve Govil (2007)	+	-	+	+	-	-
Karakush ve Resol (2015)	+	-	+	-	+	-
Karakush ve Ali (2020)	-	+	-	+	-	-
Ali ve Karakush (2019)		+	-	+	-	-
Negahdar vd. (2020)			-			-
Hanaei vd. (2021)			-	-	-	-
Akkoca vd. (2024)	-	+	-			-
Anyap vd. (2024)	-	+	-	+	-	-

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, İzmir ili Çiğli İlçesi Ataşehir Mahallesinden temin edilen doğal kumlu zemin üzerine, farklı konsantrasyonlarda (1000, 2000 ve 5000 ppm) bakır sülfat (CuSO<sub>4</sub>) çözeltisi ile kirlenme işlemi uygulanmış ve ardından çeşitli geoteknik ve mekanik laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında dane boyu dağılımı, özgül ağırlık, likit limit, kompaksiyon ve direk kesme deneyleri ile hem indeks hem de dayanım özelliklerindeki değişimler analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ağır metal kirliliğinin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda mühendislik açısından da önemli etkiler yaratabileceğini ortaya koymuştur. Özellikle Cu<sup>2+</sup> iyonlarının zemin davranışı üzerindeki etkileri hem mikroyapısal hem de makro mekanik düzeyde dikkat çekici farklılıklara neden olmuştur. Bulgular, ağır metal kirliliğine maruz kalan sahalarda yapı güvenliği ve zemin davranışına yönelik yeni değerlendirme yöntemleri ve mühendislik önlemleri geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

- İnce dane oranındaki artış ve dane boyu dağılımında farklılıklar oluşmuştur. Bu, Cu iyonlarının tetiklediği kimyasal flokülasyondan kaynaklanmakta olup, zeminin geçirgenlik ve drenaj özelliklerinin azalmasına neden olabilir.
- Özellikle yüksek konsantrasyonlarda Cu<sup>2+</sup> iyonları, zeminin plastiklik özelliklerini azaltmış, özgül ağırlığını bir miktar artırmış ve kompaksiyon parametrelerinde olumsuz etkilere yol açmıştır.
- Likit limit değerleri belirgin şekilde düşmüş, bu da zeminin su tutma kapasitesinin azaldığını ve daha az plastik hale geldiğini göstermektedir. Özgül ağırlıktaki artış, kimyasal bağlanma sonucu oluşan daha yoğun bileşiklerle açıklanmaktadır.
- En kritik değişim, içsel sürtünme açısında meydana gelen azalma olup, bu durum zeminlerin kayma dayanımında düşüşe ve dolayısıyla yapı güvenliğinde risk artışına neden olabilmektedir.

- Direk kesme deneyleri, sürtünme açısında önemli oranda düşüş olduğunu göstermiştir. Bu düşüş, Cu iyonlarının parçacıklar arası bağları zayıflatması ve yüzey sürtünmesini azaltmasıyla ilişkilidir.
- Kum zeminlerde ağır metal kirliliği sahada genellikle kimyasal analizler (ICP-MS, AAS), taşınabilir XRF cihazları veya pH-EC değişimleri ile belirlenmektedir. Elde edilen bulgular; madencilik sahaları, metal kaplama tesisleri, endüstriyel atık döküm alanları ve otoyol kenarı birikim bölgelerinde kumlu zeminlerin davranışına ışık tutmaktadır. Bu yönüyle çalışma, çevresel geoteknik açısından saha iyileştirme, risk analizi ve kirlenmiş alan yönetimi çalışmalarına katkı sunmaktadır.

Bu çalışma herhangi bir mühendislik tasarımı için doğrudan bir öneri niteliği taşımamakta olup, yalnızca bakır sülfat ile kirlenmiş kum zeminlerde gözlemlenen eğilimleri ortaya koymaktadır.

### **Teşekkür**

Bu çalışma, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (İKÇÜ, BAP, Proje Numarası: 2024-KDP-MÜMF-0018) tarafından desteklenmiştir.

### **Yapay Zekâ Katkı Beyanı**

Bu makale tamamen herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazarlar tarafından oluşturulduğunu beyan ederim.

### **KAYNAKLAR**

- Akkoca, D. B., Yıldırım, I., & Al-Juboury, A. I. (2024). Parent material, weathering and heavy metal contamination in the surface soils from basin infill sediments in Elazığ Industrial Area, Eastern Turkey. *Journal of African Earth Science*, 212, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105185>
- Al Khafaji, A. N. W., & Andersland, O. B. (1992). *Geotechnical Engineering and Soil Testing*. Oxford University Press, Incorporated.
- Ali, S., & Karakush, M. (2019). Geotechnical Properties of Clayey Soil Contaminated with Copper. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 26(1), 74-80. <https://doi.org/10.33261/jaaru.2019.26.1.010>
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability in Heavy Metals in Soils*. Dordrecht, Germany: Springer.
- Amro A. N., & Abhary, M. K. (2019). Removal of lead and copper ions from water using powdered *Zygophyllum coccineum* biomass. *International Journal of Phytoremediation*, 21(14), 1457-1462. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1633267>
- Anyap, H. J., Osman, M. H., Ismail, B. N., & Albar, A. (2024). Experimental study of copper contamination in mechanical properties of residual soil under different concentration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1369(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1369/1/012021>
- ASTM D3080-04 (2004). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. ASTM, Philadelphia, Pa.
- ASTM D4972-19 (2019). *Standard Test Methods for pH of Soils*. ASTM, Philadelphia, Pa.
- ASTM D6913/D6913M-17 (2021). *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. ASTM, Philadelphia, Pa.
- ASTM D698-12 (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*. ASTM, Philadelphia, Pa.
- ASTM D7928-21e1 (2021). *Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. ASTM, Philadelphia, Pa.
- BS 1377-1 (1990). *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes—Part 1: General Requirements and Sample Preparation*. British Standards Institution.

- Çoruh, S., Elevli, S., Ergun, O. N., & Demir, G. (2013). Assessment of leaching characteristics of heavy metals from industrial leach waste. *International Journal of Mineral Processing*, 123, 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.06.005>
- Hanaei, F., Sarmadi, M. S., Rezaee, M., & Rahmani, A. (2021). Experimental investigation of the effects of gas oil and benzene on the geotechnical properties of sandy soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(61). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00433-5>
- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). Trace Elements from Soil to Human in Earth and Environmental Science. Berlin, Germany: Springer.
- Karakush, M. O., & Ali, S. D. (2020). Impacts of Lead Nitrate Contamination on the Geotechnical Properties of Clayey Soil. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(2), 1032 – 1045.
- Karakush, M. O., & Resol, D. A. (2015). Studying the Effects of Industrial Waste Water on Chemical and Physical Properties of Sandy Soil. *Journal of Babylon University/Engineering Science*, 23(2).
- Karkush, M. O., & Ali, S. D. (2019). Effects of copper sulfate contamination on the geotechnical behavior of clayey soils. *Journal of GeoEngineering*, 14(1), 47-52. [http://dx.doi.org/10.6310/jog.201903\\_14\(1\).6](http://dx.doi.org/10.6310/jog.201903_14(1).6)
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. (2016). Comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182(B), 247-268. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>
- Krishna, A. K., & Govil, P. K. (2007) Soil contamination due to heavy metals from industrial effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 124, 263-275. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9224-7>
- Li J., Zheng Q., Liu J., Pei S., Yang Z., Chen R., Ma L., Niu J., & Tian T. (2024). Bacterial-fungal interactions and response to heavy metal contamination of soil in agricultural areas. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1395154>
- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., & Han, W. (2019). A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 28(4), 380–394. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1592108>
- Moghal, A. A. B., Ashfaq, M., Al-Shamrani, M. A. & Al-Mahbashi, A. (2020). Effect of Heavy Metal Contamination on the Compressibility and Strength Characteristics of Chemically Modified Semiarid Soils. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000527](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000527)
- Namadi, A. H., Motlagh, A. H., Hassanlourad, M. & Hosseinzadeh, M. (2023). Impact of Heavy Metal and Carbonate on Geotechnical Properties of Sand-Bentonite Mixtures. *Indian Geotechnical Journal*, 53(6), 1494-1505. <https://doi.org/10.1007/s40098-023-00743-2>
- Negahdar, A., & Nikghalpour, M. (2020). Geotechnical properties of sandy clayey soil contaminated with lead and zinc. *SN Applied Science*, 2(1331). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3115-3>
- Rehman, Z., Junaid, M. F., Ijaz, N., Khalid, U. & Ijaz, Z. (2023). Remediation methods of heavy metal contaminated soils from environmental and geotechnical standpoints. *Science of the Total Environment*, 867, 1-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161468>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2010). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *International Scholarly Research Notices*, 2011(1), 1-20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Xie, B., Zheng, X., Zhou, Z. et al. Effects of nitrogen fertilizer on CH<sub>4</sub> emission from rice fields: multi-site field observations. *Plant Soil*, 326, 393–401 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0020-3>
- Zhang, G., Liu, T., Li, H., Wang, Z., Huang, X., Yi, X., & Yan, D. (2024). Experimental Study on the Effects of Heavy Metal Pollution on Soil Physical Properties and Microstructure Evolution. *Applied Science*, 14(5), 1-13. <https://doi.org/10.3390/app14052022>
- Zhao, S., Zhang, B., Zhang, W., Su, X. & Sun, B. (2023). Impacts of Contaminants from Different Sources on Geotechnical Properties of Soils. *Sustainability*, 15, 1-19. <https://doi.org/10.3390/su151612586>