Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

KİLLİ ZEMİNLERDE KİMYASAL KATKI İLE GEÇİRGENLİĞİN AZALTILMASI

REDUCTION of PERMEABILITY in CLAYEY SOILS USING CHEMİCAL ADDITIVES

Selen YAZICI[1], Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN[2]

ÖZET

Killi zeminlerin karmaşık mineralojik yapısı, su ile etkileşimlerinde meydana gelen hacimsel değişimleri ve düşük taşıma kapasitesi gibi sorunlu doğası gereği mühendislik özelliklerinin çoğu zaman iyileştirilmesi gerekmektedir. Düşük geçirgenliğe sahip kil zeminler, katı atık depolama alanları, baraj çekirdekleri ve tehlikeli atık depolama sahaları gibi kritik mühendislik yapılarında standart geçirimsizlik gereksinimlerini karşılamada yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada da doğal killerde bulunan mikro çatlakların tıkanmasını, agresif sızıntı sularının zamanla oluşturabilecek tercihli akış yollarına bariyer sistemi görevi görmesini, sızdırmazlığı bir üst düzeye çıkarmasını sağlamak amacıyla son yıllarda kullanımı yaygın geleneksel katkıların yanı sıra sürdürebilir ve düşük karbon ayak izi sebebiyle daha çevreci bir alternatif olan MgO katkısı kullanılmıştır. Düşük plastisiteli kile farklı oranlarda toz MgO eklenerek, çeşitli su içerikleri için standart proktor kalıplarında numuneler hazırlanmış ve MgO-kil-su etkileşimi amacıyla kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Kürleme işlemi sonunda laboratuvarda kurduğumuz sabit seviyeli permeabilite deney düzeneği ile numunelere belirli basınç altında kesintisiz su verilmiştir. Numunelerden geçen su miktarı düzenli aralıklarla not edilmiştir Deney verilerinden permeabilite katsayıları hesaplanarak, her katkı oranı ve su içeriği için zamana bağlı permeabilite değişim grafikleri oluşturulmuştur. Yüksek katkı oranlarının yetersiz hidrasyona ve partiküller arası boşluklara yol açtığı belirlenmiştir; optimum su içeriği ile katkı oranı dengesinin sağlanamaması durumunda katkı maddesinin etkinliği sınırlı kalmıştır.
Anahtar Kelimeler: *permeabilite, düşük plastisiteli kil, magnezyum oksit*

ABSTRACT

Clayey soils are problematic due to their complex mineralogical structure, volume changes upon water interaction, and low bearing capacity, often requiring improvements to their engineering properties. Although they have low permeability, their sealing performance often fails to satisfy standards for critical structures like municipal solid waste landfills, dam cores, and hazardous waste sites. This study used magnesium oxide—a sustainable, eco-friendly alternative to traditional additives owing to its low carbon footprint—to seal micro-cracks in clays, block preferential flow paths from aggressive leachates, and enhance sealing. Samples were prepared by adding powdered MgO at various ratios to a low-plasticity clay; these were then compacted in standard proctor molds at different water contents and subjected to a curing process to facilitate the MgO-clay-water interaction. After curing, constant-head permeability tests applied continuous water under controlled pressure, with outflow recorded at regular intervals. Permeability coefficients were calculated via the constant-head formula, and time-dependent graphs were plotted for each MgO ratio and water content. It was determined that excessively high additive ratios led to insufficient hydration and the formation of inter-particle voids. The

[1]İnşaat Mühendisi- Y. Lisans Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, selen.yazici@std.yildiz.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2]Doç.Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, ozcoban@yildiz.edu.tr

effectiveness of the additive remained limited when the balance between optimum water content and the MgO ratio could not be established.
Keywords: *Permeability, low-plasticity clay, magnesium oxide*

1. GİRİŞ

İnce taneli killi zeminler, düşük hidrolik iletkenlikleri ve yüksek kirletici tutma kapasiteleri nedeniyle düzenli depolama sahaları, atık depolama tesisleri ve diğer çevresel bariyer sistemlerinde doğal geçirimsizlik malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Levhamsı kil minerallerinden oluşan mikroyapıları ve difüz çift tabaka (Diffuse Double Layer, DDL) yapısı, bu zeminlere doğal olarak yüksek sızdırmazlık özelliği kazandırmaktadır. Bu nedenle sıkıştırılmış kil tabakaları, elli yılı aşkın süredir mühendislik bariyeri olarak başarıyla uygulanmaktadır. Bununla birlikte, laboratuvar koşullarında belirlenen düşük hidrolik iletkenlik değerleri, saha koşullarındaki gerçek performansı her zaman yansıtmamaktadır. Bunun temel nedeni, laboratuvar ortamında ölçülen kütlesel hidrolik iletkenliğin; uygulama sırasında oluşan sıkıştırma farklılıklarını, yapım kaynaklı heterojenlikleri, kuruma–büzülme sonucu gelişen çatlak ağlarını ve bariyer malzemesinin sızıntı suyu ile uzun süreli fizikokimyasal etkileşimlerini tam olarak temsil edememesidir (Özçoban ve ark., 2022). Bu nedenle uluslararası düzenlemelerde, sıkıştırılmış mineral esaslı bariyerler için doygun hidrolik iletkenliğin genellikle 1×10^{-9} m/s veya daha düşük olması şart koşulmaktadır. Buna karşın, tasarım aşamasında öngörülen hidrolik bariyer performansı ile saha koşullarında gözlenen gerçek davranış arasında önemli farklılıklar oluşabilmektedir. Bu durum, sıkıştırılmış kil bariyerlerin uzun dönem geçirimsizlik performansını artıracak ve saha koşullarındaki hidrolik davranışını iyileştirecek alternatif stabilizasyon yöntemlerinin geliştirilmesini geoteknik mühendisliğinin güncel araştırma konularından biri hâline getirmiştir.

Killi zeminlerde özellikle kimyasal katkılar kullanılarak gerçekleştirilen stabilizasyon uygulamaları, zeminin mineralojik yapısını ve gözenek dağılımını değiştirerek hem dayanım hem de hidrolik davranış üzerinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Literatürde bu amaçla bentonit, uçucu kül, kireç, çimento ve biyopolimer gibi farklı katkı malzemeleri yaygın olarak araştırılmıştır.

Bu doğrultuda Nath ve ark. (2023), bentonit katkısının hidrolik iletkenliği $2{,}4\times10^{-9}$ m/s'den $0{,}09\times10^{-9}$ m/s'ye düşürdüğünü ve %10 bentonit içeren karışımın düzenli depolama sahası geçirimsiz tabaka kriterlerini sağladığını bildirmiştir. Bunun yanı sıra bentonit kaynaklarının bulunmadığı bölgelerde yüksek malzeme ve taşıma maliyetlerine neden olması, kuruma sonrasında çatlak oluşumuna yatkınlığı ve agresif sızıntı suyu koşullarında çok değerlikli katyonlarla gerçekleşen katyon değişimi nedeniyle şişme kapasitesi ile hidrolik performansının zamanla azalabilmesi bentonite alternatif veya bentonitin dezavantajlarını giderebilecek işlevsel katkı malzemelerinin geliştirilmesine yönelik araştırmaları teşvik etmektedir. Benzer şekilde Islam ve ark. (2021), hem kireç hem de uçucu kül katkılarının geçirgenliği azalttığını, ancak uçucu külün daha yüksek iyileştirme performansı sergilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, her iki katkının da çevresel etkileri ve uzun reaksiyon süreleri gibi bazı dezavantajlara sahip olduğu belirtilmiştir. Bir başka çalışmada Quang ve Chai (2015), kireç ve çimento katkılarının kil zeminlerin hidrolik iletkenliği üzerindeki etkilerinin büyük ölçüde katkı oranına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. %4'ün altındaki kireç katkılarının hidrolik iletkenlik üzerinde belirgin bir iyileşme sağlamadığı, çimento katkısında ise %8'e kadar önemli bir geçirgenlik azalması gözlenmezken, %16 katkı oranında agrega arası (inter-aggregate) gözeneklerin dolmasıyla hidrolik iletkenlikte belirgin bir azalma meydana geldiği rapor edilmiştir. Her iki stabilizatör de temelde puzolanik

aktivite mekanizmasıyla etkinlik göstermektedir. Kireç hidrasyonuyla (1) serbest kalan $Ca(OH)_2$'nin yüksek pH ortamında kil minerallerindeki reaktif silika ve alümina ile tepkimeye girmesi, zemin matrisini birbirine bağlayan ve boşlukları tıkayan kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) (2) ile kalsiyum-alüminat-hidrat (C-A-H) (3) jellerinin oluşumunu tetikler.

$$CaO+H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (1)$$

Boşlukları tıkayan temel puzolanik reaksiyonlar;

$$Ca(OH)_2+SiO_2+H_2O \rightarrow C–S-H \quad (2)$$

$$Ca(OH)_2+Al_2O_3+H_2O \rightarrow C–A-H \quad (3)$$

Bununla birlikte, yüksek dozajlı çimento kullanımının geçirgenliği azaltmada etkili olmasına rağmen, yüksek CO_2 emisyonu ve çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından önemli sınırlılıklar taşıdığı vurgulanmıştır.

Mousavi ve Wong (2016) ise yüksek plastisiteli kil zeminler üzerinde farklı oranlarda çimento, turba külü ve silis kumu karışımlarında optimum katkı oranının hidrolik iletkenlik üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, geçirimsizliğin iyileştirilmesinde katkı türünün yanı sıra katkı oranı ve zemin–katkı etkileşiminin de kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Alternatif katkılar arasında biyopolimerler ve endüstriyel yan ürünler de dikkat çekmektedir. Cabalar ve ark. (2018), düşük plastisiteli kil zemine eklenen %1 oranında xanthan gum biyopolimer katkısının hidrolik iletkenliği $6,5\times10^{-9}$ m/s'den $1,2\times10^{-9}$ m/s'ye düşürdüğünü ve tek eksenli basınç dayanımını (UCS) 383 kPa'dan 852 kPa'ya yükselttiğini deneysel bir çalışma ile göstermiştir. Ayrıca, biyopolimer katkısıyla kohezyonun arttığı, sıkışabilirlik davranışında değişimler meydana geldiği ve xanthan gumun zemin taneleri arasında jel benzeri bir bağlayıcı yapı oluşturarak mikro yapıyı güçlendirdiği belirtilmiştir. Çevre dostu bir alternatif olarak görünse de organik kökenli biyopolimerlerde uzun vadede mikrobiyal bozunma meydana gelebilir. MgO katkısındaki gibi karbonatlaşma sırasında atmosferdeki CO_2 yi bağlama gibi bir özelliği de yoktur.

Kimyasal katkıların yanı sıra kompaksiyon koşullarının da geçirgenlik üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Benson ve Trast (1995), katı atık depolama sahalarında kullanılan sıkıştırılmış kil zeminlerin hidrolik iletkenliğini farklı kompaksiyon enerjileri ve su muhtevalarında incelemiştir. Çalışma sonuçları, hidrolik iletkenliğin ince dane oranı, likit limit ve plastisite indeksinin artmasıyla azalma eğilimi gösterdiğini; ancak bu parametrelerden hiçbirinin tek başına geçirgenliği açıklamak için yeterli olmadığını ortaya koymuştur. Araştırmacılar, düşük hidrolik iletkenlik değerlerine ulaşılmasında zemin kompozisyonu ile kompaksiyon koşullarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Başka bir çalışmada Cuisinier ve ark. (2011), hidrolik iletkenliğin yalnızca uygulanan stabilizasyon yöntemine bağlı olmadığını; büyük gözenek hacmi, kompaksiyon yöntemi ve kompaksiyon su muhtevası gibi parametrelerden de önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuştur. Araştırmada, özellikle yoğurma tipi (kneading) kompaksiyon yöntemiyle optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerde hidrolik iletkenlik değerlerinin 10^{-10} m/s mertebesine kadar düştüğü belirlenmiştir. Bu bulgular, düşük hidrolik iletkenlik değerlerine ulaşılabilmesi için kimyasal katkıların yanı sıra uygun kompaksiyon koşullarının da kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Son yıllarda magnezyum oksit (MgO), düşük karbon ayak izi, yüksek reaktivitesi ve hidratasyon–karbonatlaşma reaksiyonları sayesinde zemin iyileştirmede sürdürülebilir bir bağlayıcı olarak öne çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar, MgO katkısının yalnızca mekanik özellikleri geliştirmekle kalmayıp aynı zamanda zemin mikro yapısını yoğunlaştırarak geçirgenlik ve dayanıklılık üzerinde de önemli iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Giderek artan sayıdaki geoteknik çalışmalar, MgO' nun çok yönlülüğünü doğrulamaktadır.

Bu kapsamda Bağrıaçık ve ark. (2025), nano-MgO ve sentetik fiberlerin birlikte kullanımının düşük plastisiteli kil zeminlerde taşıma gücü ve oturma davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini, özellikle %1 nano-MgO ve %1,5 oranında 90 mm fiber kullanımında taşıma gücünün 3,07 kat arttığını bildirmiştir. Benzer şekilde Al-Khazzaz ve ark. (2024), nano-MgO katkısının hidratasyon reaksiyonları sonucunda şişme davranışını önemli ölçüde azalttığını ve 28 günlük kür sonunda sıkışma indeksini yaklaşık %50 düşürdüğünü rapor etmiştir. Her iki çalışma da MgO hidratasyon ürünlerinin zemin mikro yapısını yoğunlaştırarak mühendislik performansını geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

Öz (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, donma–çözülme çevrimlerinin CL sınıfı kaolin zeminlerde neden olduğu mukavemet kaybı deneysel olarak ortaya konmuş,bu kaybın magnezyum oksit (MgO) ve fosforik asit (H_3PO_4) katkılarıyla önemli ölçüde iyileştirilebildiği gösterilmiştir. Araştırmada 0–10 çevrim aralığında yapılan UC ve UU deneyleri, çevrim sayısındaki artışın zemin mukavemetini belirgin şekilde düşürdüğünü; optimum katkı oranları olan %5 MgO ve %3 H_3PO_4 ile mukavemetin %68–%3973 arasında arttığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, donma–çözülme etkisinin yoğun olduğu bölgelerde kimyasal katkı kullanımının zemin stabilizasyonu açısından etkili bir yöntem olduğunu desteklemektedir. Ayrıca reaksiyonların daha sık gerçekleşmesine ortam sağlamak için optimum su muhtevasından daha yüksek su muhtevalarında katkının ilavesinin etkili sonuçlar göstereceği öngörülmüştür.

MgO'nun mikro yapıda oluşturduğu bu iyileşmelerin hidrolik davranış üzerindeki etkisi de son yıllarda ayrıntılı olarak araştırılmaktadır. Dung ve Unluer (2021), MgO'nun puzolanik aktivite mekanizması kapsamında boşluk suyu varlığında hidrate olarak öncelikle magnezyum hidroksit (brusit, $Mg(OH)_2$) oluşturduğunu belirtmiştir. Araştırmacılar, reaksiyona girmemiş MgO taneciklerinin yüzeyinde gelişen brusit tabakasının hidratasyon sürecini kontrol ettiğini, uygun kür ve karbonatlaşma koşullarında ise magnezyum silikat hidrat (M-S-H) ve çeşitli magnezyum karbonat fazlarının oluştuğunu ifade etmiştir. Oluşan bu hidrat ve karbonat ürünlerinin gözenekleri doldurarak ve taneler arası boşluk bağlantılarını azaltarak zemin matrisini daha yoğun ve kompakt bir yapıya dönüştürdüğünü ortaya koymuştur. Cai ve ark. (2020), karbonatlaştırılmış reaktif MgO ile stabilize edilen siltlerde su/MgO oranının hidrolik iletkenlik üzerinde belirleyici olduğunu, karbonatlaşma süresinin 6 saate ulaşmasıyla geçirgenliğin minimum seviyeye indiğini ve MgO karbonatlaşma ürünlerinin orta büyüklükteki gözenekleri doldurarak akışı sınırlandırdığını göstermiştir. Benzer şekilde Mohammed ve ark. (2024), MgO katkısını petrol cürufu ile kirletilmiş siltli kile kuru ağırlıkça %3-7 oranlarında uygulamış ve serbest basınç dayanımında kür süresine bağlı olarak belirgin bir artış (7 günlük kürde %120-150'ye varan iyileşme) elde etmiştir. MgO katkısının M-S-H jeli oluşturarak gözenekleri doldurduğunu ve kirlenmiş ince taneli zeminlerde hem dayanımı hem de çevresel performansı artırdığını bildirmiştir. Ayrıca Al-Soudany ve ark. (2025), MgO katkısının bentonit esaslı bariyerlerde kuruma çatlaklarını ve hacimsel büzülmeyi önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, MgO'nun geçirgenliği azaltmasının temel mekanizmasının gözeneklerin reaksiyon ürünleriyle doldurulması ve mikro çatlak oluşumunun sınırlandırılması olduğu görülmektedir. Ayrıca, MgO ile stabilize edilen

numunelerin hidrolik iletkenlik değerlerinin Portland çimentosu ile stabilize edilen numunelerle benzer düzeyde olduğu belirlenmiş ve MgO'nun daha düşük karbon ayak izi sayesinde sürdürülebilir bir zemin iyileştirme malzemesi olarak önemli bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır. MgO'nun mühendislik performansının yanında çevresel avantajları da literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır Hou ve ark. (2025), geri dönüştürülmüş agrega ile kullanılan MgO'nun hem mekanik özellikleri geliştirdiğini hem de CO_2 tutma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Bu bulgular, MgO'nun sürdürülebilir zemin iyileştirme uygulamaları açısından önemli bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürdeki araştırmaların geneli MgO'nun mukavemet kazanımı, şişme özellikleri ve kirletici hapsi gibi konulara yoğunlaşırken; katkı miktarı ve kompaksiyon su içeriğinin, uzun vadeli ve zamana bağlı hidrolik iletkenlik üzerindeki ortak etkisi yeterince araştırılmamıştır.

2. MALZEME VE METOT

2.1 Malzeme

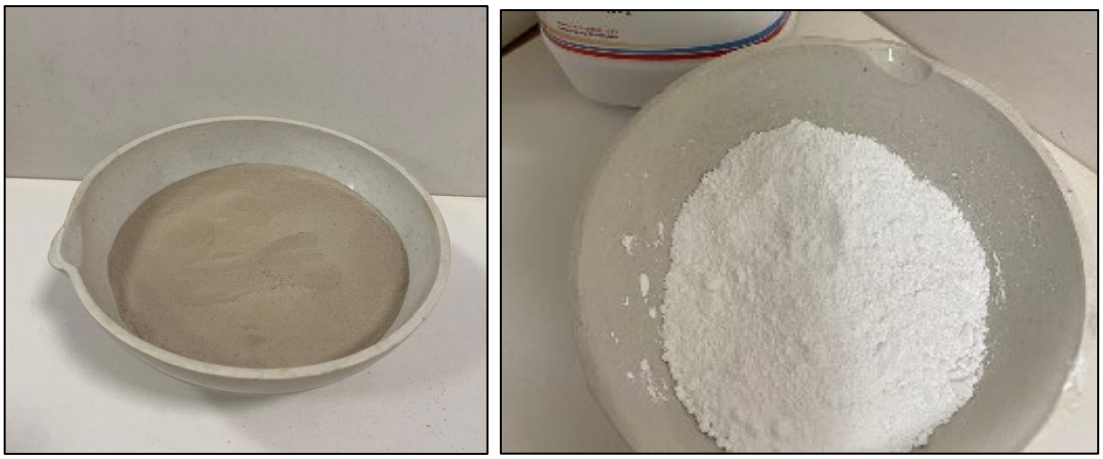
Bu çalışmada kullanılan zemin malzemesi, Eczacıbaşı Esan A.Ş.'den temin edilen ticari adıyla Esanplast kil olarak bilinen düşük plastisiteli bir kildir. Kilin indeks özelliklerini (likit limit, plastik limit, plastisite indeksi, özgül ağırlık ve tane boyutu dağılımı) belirlemek için ASTM standartlarına uygun laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiş ve kilin başlıca özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Tüm deney süreci Yıldız teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Prof. Dr. Kutay Özaydın Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

Tablo 1. Esanplast Kilinin Geoteknik İndeks ve Sıkışma Özellikleri

Özellik	Sembol	Değer	Deney Standardı
Likit Limit (%)	LL	46	ASTM D4318
Plastik Limit (%)	PL	27	ASTM D4318
Plastisite İndisi (%)	PI	19	ASTM D4318
USCS Sınıflandırma	-	CL	ASTM D2487
Özgül Ağırlık	Gs	2,67	ASTM D854
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı(t/m^3)	γk, max	1,67	ASTM D698
Optimum Su Muhtevası (%)	w_{opt}	22	ASTM D698
Kil Yüzdesi (<2 μm, %)	C	59,41	ASTM D7928
Silt Yüzdesi (%)	M	40,59	ASTM D7928

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS, ASTM D2487) göre, Esanplast kili CL sınıfına girer; %46'lık likit limit ve %19 'luk plastisite indeksi ile karakterize edilen bu kil, Casagrande plastisite tablosunun düşük plastisite aralığında yer alır.

Çalışmada katkı malzemesi olarak Şekil 1(b)'de gösterilen beyaz renkli, toz haldeki magnezyum oksit (MgO), Kimyalab (İstanbul, Türkiye) firmasından temin edilmiştir (CAS No: 1309-48-4, saflık %99,50). Çalışmada kullanılan düşük plastisiteli kil (Şekil 1(a)), plaka yüzeylerindeki iyon değişimi yoluyla gerçekleşecek doğal çimentolaşma için sınırlı bir kapasiteye sahiptir. Bu durum, zemin matrisinde geçirgenliği azaltabilmek için MgO ilavesiyle tetiklenen puzolanik ve karbonatlaşma reaksiyonlarını temel bir yöntem haline getirmektedir.



(a) (b)

Şekil 1. Kullanılan Malzemeler; (a) Esanplast Kil (b) Toz haldeki MgO katkısı

2.2 Yöntem ve Ekipman

Numunelerin Hazırlanması

Düşük plastisiteli kil numuneler katkısız ve ağırlıkça %2, %4, %6 MgO katkısı eklenerek farklı su muhtevalarında (% w_{opt}, w_{opt-2}, w_{opt+2}) ASTM D698 standartına uygun olarak Standart Proktor kalıplarında sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Sıkıştırma işleminin ardından katkılı numuneler streç film ile sarılarak 15 gün kürlemeye tabii tutulmuştur. MgO esaslı bağlayıcıların kürlenme süresi, özellikle hidratasyon ürünlerinin gelişimi ve matris içi boşlukların doldurulması açısından kritik bir parametredir.

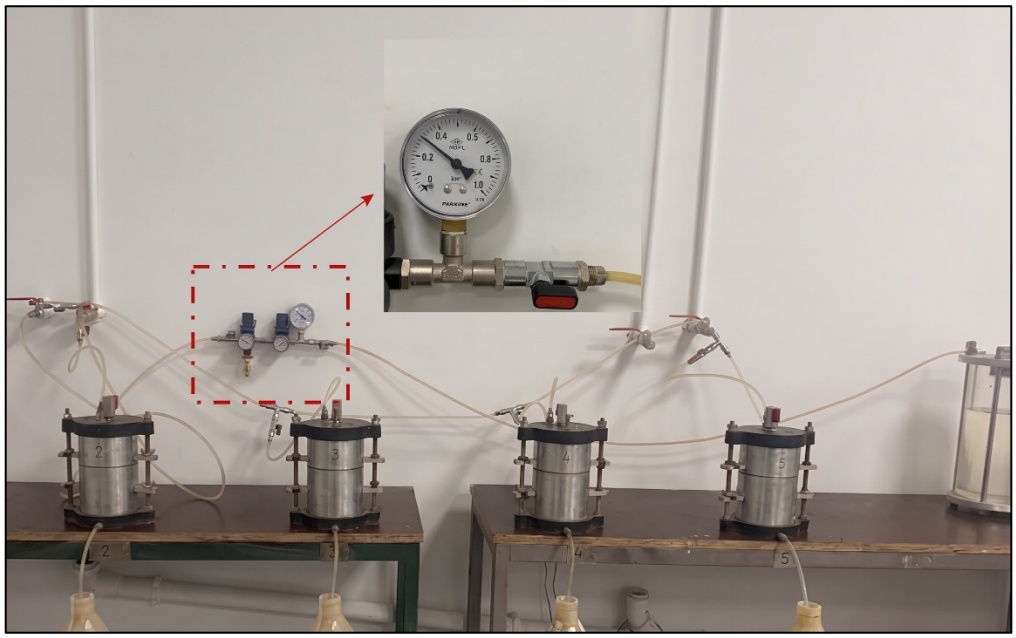


Şekil 2. Numunelerin Hazırlandığı Kalıplar

Deney Düzeneği ve Permeabilite Deneyi

Kürleme süresi tamamlanan numuneler, düşük geçirgenlikli killi zeminlerde deney süresinin çok uzun olması dezavantajını aşmak amacıyla laboratuvar ortamında özel olarak kurulan Şekil 3'te görülen basınçlı sabit seviyeli (constant head) permeabilite deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Düzenek; numune hücresi, sabit basınç sağlayan su besleme sistemi ve çıkış tarafında toplanan su hacminin ölçülmesine imkân veren kalibreli bir kap sisteminden

oluşmaktadır. Killi numunelerden makul sürede ölçülebilir bir akış elde edebilmek için, deney süresince numunelere 0.3 bar sabit hidrolik basınç altında kesintisiz su beslemesi sağlanmış ve numuneden geçen su hacmi düzenli aralıklarla kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3. Sabit Basınç Sağlayan Su Besleme Sistemi

Uygulanan bu basınçlı sistem, düşük geçirgenlikli zeminlerin hidrolik iletkenliğinin ölçülmesi için ASTM D5084 standardında tanımlanan "Sabit Hidrolik Yük (Constant Head)" yöntemine dayanmaktadır. Deneysel veriler üzerinden, doygun zeminlerde laminer akım koşulları için geçerliliği kabul edilen Darcy yasasından hareketle (Bear, 1972) her ölçüm periyodu için hidrolik geçirgenlik katsayısı (k) hesaplanmıştır. (4)

$$k = \frac{Q*L}{A*\Delta H*t} \tag{4}$$

Burada; k hidrolik iletkenlik katsayısını (m/s), Q belirli bir zaman aralığında numuneden geçen su hacmini (m^3/s), A numune kesit alanını (m^2), L numune yüksekliğini (m), Δh hidrolik yük farkını (m), t geçen zamanı (s) ifade etmektedir.

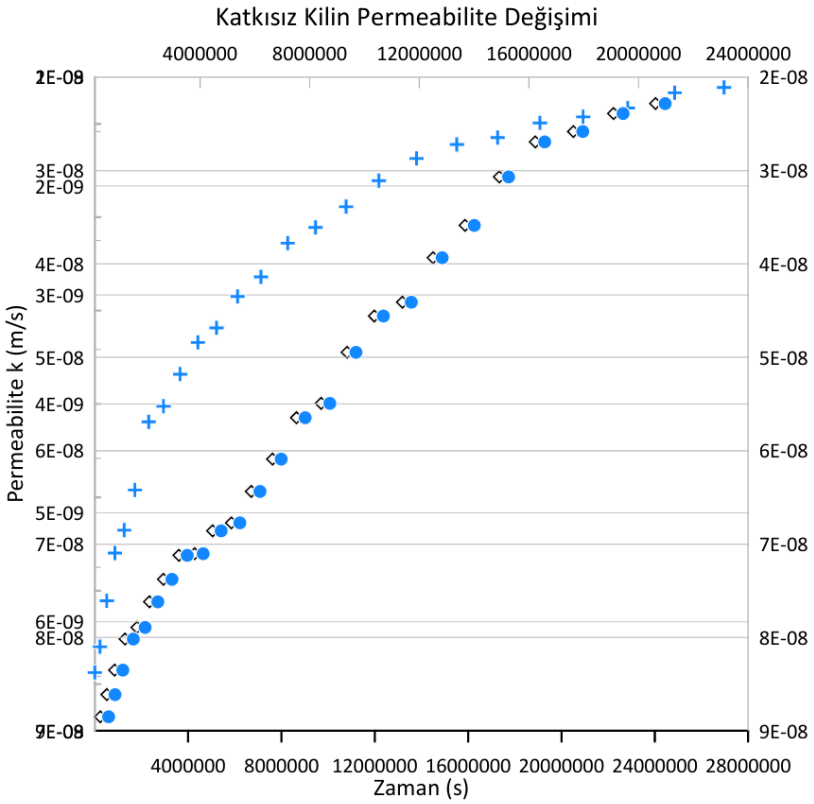
Farklı katkı oranları ve su içerikleri kombinasyonları için hesaplanan geçirgenlik katsayıları (k), deneysel süreç boyunca zamana bağlı olarak grafik hâline getirilmiş olup katkı oranı–su içeriği–geçirgenlik ilişkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR

Bu çalışmada, magnezyum oksit (MgO) katkısının düşük plastisiteli killi zeminlerin geçirimlilik davranışı üzerindeki etkisi, sabit seviyeli permeabilite deneyleri ile deneysel olarak incelenmiştir. Farklı katkı oranları ve su muhtevalarında hazırlanan numunelere ait zamana bağlı hidrolik iletkenlik ölçüm sonuçları aşağıda sunulmuştur.

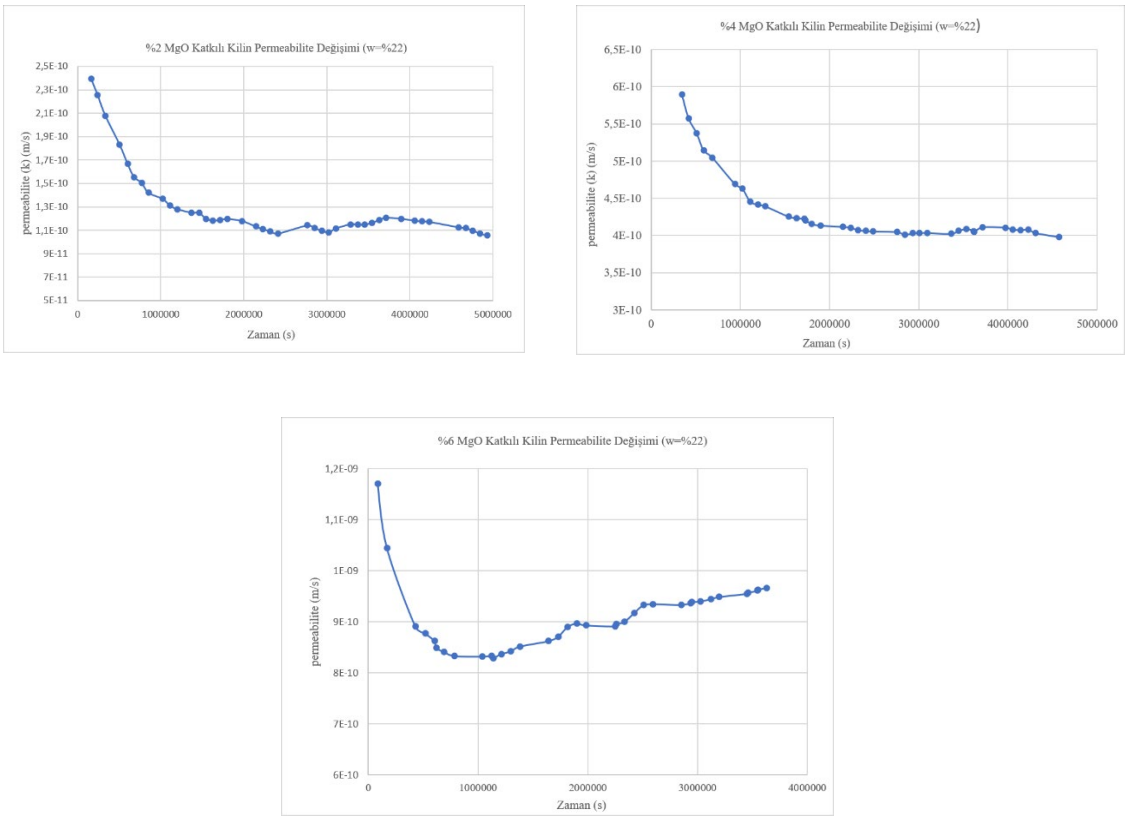
Katkısız numunelerin zamana bağlı permeabilite eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Tüm su muhtevalarında sürekli bir azalma eğilimi gözlenmiş, ancak permeabilite katsayısı deney

süresi boyunca 10^{-8}–10^{-9} m/s mertebesinin altına inmemiştir. En düşük nihai permeabilite değerine, optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede ulaşılmıştır.



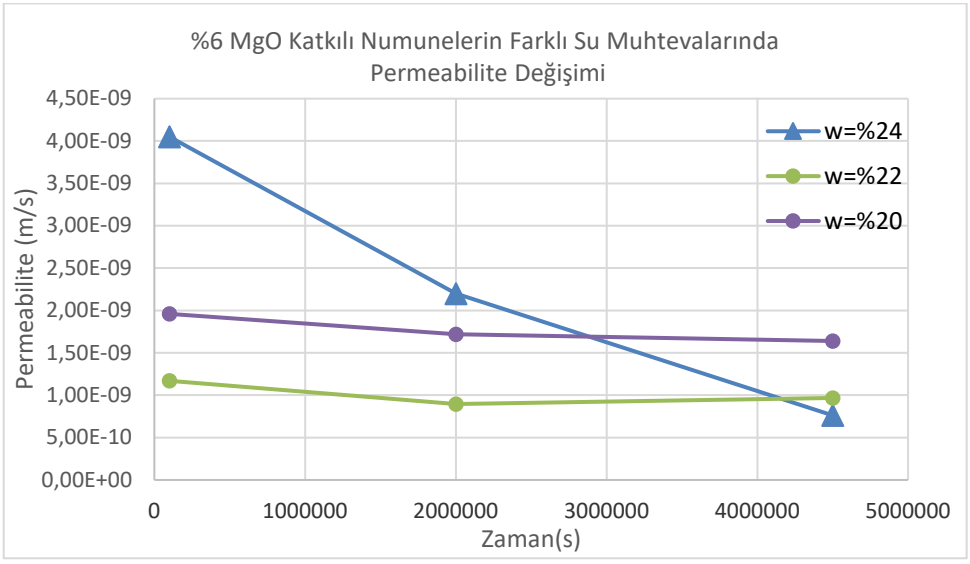
Şekil 4. Katkısız Numunelerin Farklı Su Muhtevalarında Permeabilite Değişim Grafiği

%2, %4 ve %6 MgO katkılı numunelerin optimum su muhtevasındaki (w_{opt}=%22) zamana bağlı permeabilite değişim grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Her üç katkı oranı için de permeabilite değerleri 10^{-10} m/s mertebesine gerilemiştir. %2 MgO katkılı numunede permeabilite değeri (k) $2{,}40\times10^{-10}$ m/s seviyesinden $1{,}06\times10^{-10}$ m/s seviyesine düşerek yaklaşık 2,26 kat azalmıştır. %4 ve %6 katkılı numunelerde bu azalma sırasıyla yaklaşık 1,48 ve 1,76 kat olarak ölçülmüştür. %6 katkılı numunede permeabilite değerinin deneyin belirli bir aşamasından sonra artışa geçtiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Katkılı Zeminlerin Optimum Su Muhtevasındaki Permeabilite Değişim Grafikleri

%6 MgO katkılı ve üç farklı su muhtevasında (w=%20, %22, %24) hazırlanan numunelerin zamana bağlı permeabilite değişim grafikleri Şekil 6'da sunulmuştur. w=%20 numunesinde permeabilite değeri deney süresince sınırlı bir değişim göstermiş, $1{,}95\times10^{-9}$ m/s'den $1{,}6\times10^{-9}$ m/s'ye gerilemiştir. w=%22 numunesinde permeabilite ilk aşamada azalma eğilimi göstermiş, ancak deneyin son ölçüm noktalarında hafif bir artış sergilemiştir. w=%24 numunesinde ise permeabilite değeri $4{,}05\times10^{-9}$ m/s seviyesinden $7{,}62\times10^{-10}$ m/s seviyesine düşerek yaklaşık 5,3 kat azalma göstermiştir.



Şekil 6. %6 MgO Katkılı Numunelerin Farklı Su Muhtevalarında Permeabilite Değişim Grafiği

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elde edilen bulgular, düşük plastisiteli killi zeminlerde sürdürülebilir ve çevre dostu bir bağlayıcı olan MgO katkısının permeabilite azaltıcı etkisinin hem katkı oranına hem de su muhtevasına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

Katkısız numunelerin optimum su muhtevasında en düşük permeabilite değerine ulaşması, katkı maddesinden bağımsız olarak, optimum su muhtevasında sıkıştırmanın zemin gözenek yapısını en etkin biçimde küçülttüğünü ve klasik kompaksiyon teorisiyle uyumlu bir davranış sergilediğini doğrulamaktadır.

MgO katkılı numunelerde permeabilite değerlerinin 10^{-10} m/s mertebesine kadar gerilemesi, MgO'nun hidratasyon/karbonatlaşma ürünleri yoluyla mikro çatlak ve boşlukları tıkama mekanizmasının ölçülebilir bir katkı sunduğunu göstermektedir. Ancak katkı miktarının artmasıyla permeabilite azalma oranının da artması beklenirken, optimum su muhtevasında en iyi performansın %2 MgO katkılı numunede elde edilmesi dikkat çekmektedir. Özellikle %6 katkılı ve %22 su muhtevasında hazırlanan numunede permeabilitenin belli bir zamandan sonra artışa geçmesi, MgO'nun optimum su içeriğinin altında hidratasyon reaksiyonunun tamamlanabilmesi için gerekli su miktarının yetersiz kaldığını ve katkı fazlalığının su geçişini hızlandırarak katkı maddesinin sızdırmazlık etkisini sınırlandırdığını düşündürmektedir.

Optimum su muhtevasının (wopt=%22) ıslak tarafında hazırlanan numunelerde mevcut serbest su miktarının, MgO reaksiyonlarının daha etkin gerçekleşmesini sağladığı değerlendirilmektedir. Düşük su muhtevasında (w=%20) serbest su miktarının yetersiz kalması nedeniyle MgO reaksiyonlarının sınırlı düzeyde gerçekleştiği, dolayısıyla gözenek yapısının zamanla anlamlı bir değişim göstermediği söylenebilir. Buna karşın %6 katkılı, w=%24 numunesinde gözlenen yaklaşık 5,3 katlık azalışın, reaksiyon sonucu meydana gelen brüsit ve M–S–H jel fazlarının gözenek hacmini azaltarak boşluk sürekliliğini bozması ve böylece hidrolik iletkenliği daha düşük değerlere ulaştırmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Genel olarak, çalışma bulguları MgO katkısının killi zeminlerde geçirimliliği azaltıcı yönde etkili bir yöntem olduğunu, ancak bu etkinin optimum düzeyde bir su muhtevası aralığında ve dengeli bir katkı oranıyla elde edilebileceğini göstermektedir.

İleriki çalışmalar kapsamında, mekanik ve hidrolik iyileşmede hidrasyon ve karbonatlaşma mekanizmalarının etkilerini netleştirmek amacıyla kontrollü CO_2 ortamında uzun dönemli (7, 28 ve 90 gün) kür araştırmalarının yürütülmesi önerilmektedir. Buna ek olarak, özellikle %6 MgO katkılı numunelerde gözlenen permeabilite dalgalanmalarının nihai kararlılık durumunu teyit edebilmek için daha uzun süreli ölçümlerin gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Geçirgenlikteki azalışa neden olan brüsit ve M-S-H fazlarının varlığını doğrulamak ve yüksek katkı oranlarında karşılaşılan geçirgenlik artışının mineralojik nedenlerini açıklığa kavuşturmak üzere, bu süreçlerin Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

ve X-Işını Kırınımı (XRD) analizleriyle desteklenerek makro ve mikro mekanizmalar arasındaki ilişkinin bütüncül bir yaklaşımla aydınlatılması da büyük önem taşımaktadır.

Mevcut çalışmada MgO katkısının permeabilite üzerindeki etkisi yalnızca saf su koşullarında incelenmiştir. Malzemenin katı atık depolama ve endüstriyel atık sahalarında çevre dostu bir sızdırmazlık bariyeri olarak değerlendirilebilmesi için; ileriki çalışmalarda sızıntı suyu ve ağır metal çözeltileri (Pb, Cr, Mn, Fe vb.) kullanılarak permeabilite testlerinin yapılması önerilmektedir. Böylelikle, MgO' nun agresif kimyasal ortamlardaki uzun dönem sızdırmazlık performansı ve kirletici tutma (adsorpsiyon) kapasitesi belirlenerek gerçek saha koşullarındaki güvenilirliği ortaya konabilecektir.

KAYNAKLAR

Özçoban, M. Ş., Acarer, S., & Tüfekci, N. (2022). Effect of solid waste landfill leachate contaminants on hydraulic conductivity of landfill liners. Water Science and Technology, 85(5), 1581-1599.

Nath, H., Kabir, M. H., Kafy, A. A., Rahaman, Z. A., & Rahman, M. T. (2023). Geotechnical properties and applicability of bentonite-modified local soil as landfill and environmental sustainability liners. Environmental and Sustainability Indicators, 18100241.

Islam, M. S., Islam, T., & Khatun, N. (2021). Permeability alteration of low plastic clay and poorly graded sand using lime and fly ash. Indian Geotechnical Journal, 51(5), 967-978.

Quang, N. D., & Chai, J. C. (2015). Permeability of lime-and cement-treated clayey soils. Canadian Geotechnical Journal, 52(9), 1221-1227.

Mousavi, S. E., & Wong, L. S. (2016). Permeability characteristics of compacted and stabilized clay with cement, peat ash and silica sand.

Cabalar, A. F., Awraheem, M. H., & Khalaf, M. M. (2018). Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer. Journal of materials in civil engineering, 30(8), 04018170.

Benson, C. H., & Trast, J. M. (1995). Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. Clays and clay minerals, 43(6), 669-681.

Cuisinier, O., Auriol, J. C., Le Borgne, T., & Deneele, D. (2011). Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. Engineering geology, 123(3), 187-193.

Dung, N. T., & Unluer, C. (2021). Advances in the hydration of reactive MgO cement blends incorporating different magnesium carbonates. Construction and Building Materials, 294, 123573.

Bağrıaçık, B., Mahmutluoğlu, B., & Topoliński, S. (2025). Improvements to load-bearing capacity and settlement of clay soil after adding Nano-MgO and fibers. Polymers, 17(14), 1895.

Al-Khazzaz, Z., Aldaood, A., Awad, M., & Faris, M. K. (2024). Behavior of clayey soil treated with nano magnesium oxide material. Soils and Rocks, 47(1), e2024014822.

Cai, G. H., Liu, S. Y., Du, G. Y., Wang, L., Li, J. S., & Liu, L. (2020). Hydraulic conductivity characteristics of carbonated reactive magnesia-treated silt: G.-H. Cai et al. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79(6), 3033-3047.

Mohammed, Z. B., Fattah, M. Y., & Namee, A. M. (2024). Utilization of magnesium oxide to enhance geotechnical–environmental properties for clay soil contaminated with heavy metals. Progress in Engineering Science, 1(4), 100029.

Al-Soudany, K. Y., Fattah, M. Y., & Rahil, F. H. (2025). Lysimeter experiments of landfill liner enhanced with magnesium oxide. Results in Engineering, 25, 104305.

Hou, Y., Onyekwena, C. C., & Li, Q. (2025). Experimental investigation of marine soil stabilization with recycled aggregates and MgO: implications for CO2 sequestration. Canadian Geotechnical Journal, 62, 1-17.

ÖZ, N. E. (2024). Killi zeminde donma-çözülmenin neden olduğu mukavemet kaybının magnezyum oksit ve fosforik asit katkısıyla iyileştirilmesi (Tez No. 878264) [Yüksek lisans tezi, YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ]. Ulusal Tez Merkezi.

Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: American Elsevier Publishing Company.

SEMBOL LİSTESİ

sembol	açıklama
k	hidrolik iletkenlik katsayısı
Q	geçen su hacmi
A	numunenin kesit alanı
L	numune yüksekliği
Δh	hidrolik yük farkı
w_{opt}	optimum su muhtevası
$\gamma k, max$	max kuru birim hacim ağırlık
Gs	dane özgül ağırlığı
CL	Düşük plastiseli kil
LL	likit limit
PL	plastik limit
PI	plastisite indisi
UU	drenajsız üç eksenli basınç deneyi
UC	serbest basınç dayanımı
H_3PO_4	Fosforik asit
MgO	Magnezyum Oksit
M-S-H	Magnezyum Silikat Hidrat
CAS-No	Kimyasal madde kayıt numarası