Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

# MgO AÇISINDAN ZENGİN SERPANTİNİT ATIĞININ YÜKSEK PLASTİSİTELİ SİLTLİ ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANIM POTANSİYELİ

# UTILIZATION POTENTIAL OF MgO-RICH SERPENTINITE WASTE IN THE STABILIZATION OF HIGHLY PLASTIC SILTY SOILS

**Ahmet Baran DEMİRKOL[1], Hazal Berrak GENÇDAL[2], Murat GÜLEN[3], Senem BİLİCİ[4]**

## ÖZET

Günümüzde artan nüfus ve sanayileşme, oluşan atık miktarında önemli bir artışa yol açmaktadır. Özellikle madencilik faaliyetleri sonunda ortaya çıkan pasa malzemesi, flotasyon atıkları, cüruf ve mineral işleme kalıntıları gibi maden atıkları büyük depolama alanları gerektirmekte ve uygun şekilde yönetilmediklerinde çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Söz konusu atıkların farklı mühendislik uygulamalarında yeniden kullanılması hem çevresel etkilerin azaltılması hem de doğal kaynakların korunması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, bir mineral atığı olan serpantinitin MH sınıfı ince daneli siltli bir zeminin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkileri farklı kür süreleri altında incelenmiştir. MgO içeriği (%33,50) bakımından zengin olan serpantinit %4 oranında MH zemine ilave edilerek optimum su muhtevası ($w_{opt}$) ve bu değerin ($w_{opt}$ +%3) ıslak tarafında standart kompaksiyon enerjisi ile kompakte edilmiştir. 3.5cmx7cm ebatlarında hazırlanan katkılı ve katkısız deney numuneleri 1, 7 ve 28 günlük küre tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler, numunelerin hazırlandığı su muhtevasının artmasıyla birlikte mukavemet değerlerinin arttığını, kür süresinin uzaması ile de mukavemetin belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Özellikle, serpantinit içerisindeki MgO'nun nispeten düşük reaksiyon hızına sahip olması, bu katkı malzemesinin zaman içerisinde mukavemet iyileşmesi sağlayarak zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

***Anahtar Kelimeler:*** *Zemin stabilizasyonu, serpantinit, kür süresi, serbest basınç mukavemeti, yüksek plastisiteli killi silt, atık.*

[1] İnş. Müh., İstanbul Kültür Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ahmetbarandemirkoll@gmail.com
[2] Dr., İstanbul Kültür Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, h.gencdal@iku.edu.tr (Sorumlu yazar)
[3] Dr.Öğ.Üyesi Siirt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, murat.gulen@siirt.edu.tr
[4] Dr. İnş. Müh., Akçansa, Ürün Geliştirme ve Merkez Laboratuvar Şefi, senem.bilici@akcansa.com.tr

# ABSTRACT

Nowadays, the increasing population and industrialization have led to a significant rise in the amount of waste generated. In particular, mining activities produce large quantities of waste materials such as tailings, flotation residues, slags, and mineral processing by-products, which require extensive storage areas and, if not properly managed, can have adverse effects on the environment and human health. The reuse of these wastes in various engineering applications offers important advantages in terms of reducing environmental impacts and conserving natural resources. For this purpose, the effects of serpentinite on the unconfined compressive strength of MH soil class were investigated under different curing times. Serpentinite, rich in MgO (33.50%), was added to the MH soil at 4% ratio and compacted at optimum water content ($w_{opt}$) and on the wet side of this value ($w_{opt}$+%3) by standard compaction energy. Specimens (3.5cmx7cm), prepared with and without additives, were subjected to curing for 1, 7, and 28 days. The data obtained show that the strength values increase with increasing water content in the preparation of the specimens, and the strength also increases significantly with longer curing times. In particular, the relatively low reaction rate of MgO in serpentinite indicates that this additive can be used in soil improvement applications by providing strength improvement over time.

***Keywords:*** *Soil stabilization, serpentinite, curing time, unconfined compressive strength, high-plasticity clay silt, waste.*

# 1. GİRİŞ

Amaca uygun olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi ve iklimsel değişkenlere bağlı olarak zeminlerde meydana gelen mukavemet kayıplarını minimize edilmesi amacıyla farklı kimyasal katkılarla zemin iyileştirmeleri yapılmaktadır (Wang vd., 2017; Ardakani ve Rajabi, 2021; Gençdal ve Kılıç, 2023; Rangaswamy ve Mohan, 2025). Bu katkılardan biri olan MgO'nun aktivitesi ve su/MgO oranı, zeminde oluşan mikro yapıyı etkileyerek performansı belirgin şekilde değiştirmektedir. MgO'nun aktivitesi, su ile tepkimeye girme hızını ifade eder ve oluşan bağlayıcı ürün miktarını kontrol eder. Bu ürünler zemin daneleri arasındaki boşlukları doldurarak yapının daha sıkı hale gelmesini sağlar. Su/MgO oranı ise bu reaksiyonların verimliliğini belirler. Uygun oranda suyun varlığı daha düzenli ve kompakt bir mikro yapı oluşurken, dengesiz oranlar boşluklu ve daha zayıf bir yapı ortaya çıkarabilir (Liu vd., 2017; Hwang vd., 2018; Ribeiro vd., 2023; Shao vd., 2025). Buna ek olarak, $CO_2$ ile karbonatlaşma koşullarında MgO ağırlıklı karışımlar önemli dayanım artışları gösterir. Bu süreçte MgO'nun reaksiyonu ile oluşan karbonat mineralleri, zemin içindeki boşlukları doldurarak daha yoğun ve bütünleşmiş bir mikro yapı oluşturur. Bu durum, dayanımında artışa neden olurken, deformasyonların azalmasına ve daha rijit bir davranışa yol açar (He vd., 2017; Wang vd., 2019; Hou vd., 2025).

Nano boyuttaki MgO ile yapılan iyileştirmelerde, zeminlerin Kaliforniya taşıma oranında (CBR), serbest basınç dayanımında ($q_u$) ve drenajsız kayma mukavemetinde ($c_u$) önemli artışlar meydana gelmekte, buna karşılık zeminlerin kabarma ve oturma özellikleri azalmaktadır (Salem vd., 2020; Ahmadi vd., 2020; Sadiq vd., 2023; Bağrıaçık vd., 2025).

Mosa vd. (2022), MgO katkısının yol dolgusu olarak kullanılan kil zemine etkisini inceledikleri çalışmada, %0,1–%1,5 oranlarında MgO eklemiş ve 28 gün kür sonrası zeminin mekanik özelliklerinde belirgin iyileşmeler gözlemlemiştir. Yaklaşık %0,7 MgO oranında, başlangıç CBR değeri, 10 katın üzerine çıkarken, daha yüksek MgO oranlarında dayanım azalmıştır. Optimum katkı oranı ile zemin dayanımı artırılmış ve dolgu kalınlığının yaklaşık %60 azaltılabileceği belirlenmiştir. Sadiq vd. (2023), nano-MgO katkısının kil zeminin serbest basınç dayanımına etkisini %0,4–%0,8 katkı oranları için incelemiştir. Düşük oranlardaki nano-MgO katkısının $q_u$ değerini 2 kattan fazla artırdığı belirtmiştir. Gao vd. (2017), farklı nano-MgO katkı oranlarının zeminin kohezyonu üzerindeki etkisini incelemiş ve %6 MgO katkı oranının zeminin kohezyonunda %237 artış meydana geldiğini belirtmişlerdir.

MgO'nun farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip türleri bulunması nedeniyle su ile tepkime hızı ve hidratasyon süresi önemli ölçüde değişmektedir. Bu durum, MgO'nun zemin içerisinde oluşturduğu bağlayıcı fazların gelişimini doğrudan etkileyerek iyileştirme seviyesini belirlemektedir (Amaral vd., 2007; Ruan vd., 2020; Wu vd., 2021; Mi vd., 2023). Zeminlerin dayanımı artırmak amacıyla kullanılan CaO ve MgO, zemin bünyesindeki su ile hidratasyon reaksiyonlarına girerek bağlayıcı ürünlerin oluşmasını sağlamaktadır. CaO'nun su ile hızlı ve ekzotermik reaksiyona girerek erken yaşta yüksek dayanım artışı sağlarken, MgO daha düşük reaktivitesi nedeniyle su ile daha yavaş ve kontrollü bir hidratasyon süreci geçirerek $Mg(OH)_2$ oluşumunu zamana yaymaktadır (Wang vd., 2019; Salimi ve Ghorbani, 2020; Adeleke vd., 2022). Bu durum, MgO katkılı sistemlerde erken yaş dayanım artışının sınırlı olmasına karşın, kür süresi ilerledikçe hidratasyon ve karbonatlaşma reaksiyonlarının gelişmesiyle daha kararlı bağlayıcı fazların oluşmasına, boşluk oranının azalmasına ve mikro yapının daha yoğun hale gelmesine olanak tanımaktadır (Wu et al., 2021; Mármol ve García-Lodeiro, 2025). Özellikle uzun kür sürelerinde dane–dane bağlarının güçlenmesi ve gözenek yapısının süreksizleşmesi, zeminin uzun vadeli dayanımını ve yapısal stabilitesini artırmaktadır (Al-Mukhtar vd., 2010; Zhu vd., 2020; Al-Khazzaz vd., 2024). Farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, MgO katkılı zeminlerin geç yaş dayanımı açısından avantaj sağladığını ve çevresel yüklemelere karşı daha dengeli bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır (Wang vd., 2019; Estabragh vd., 2022; Mosa vd., 2022).

Bu çalışmada, MgO açısından zengin mineral atık serpantinit katkısının MH sınıfındaki yüksek plastisiteli killi silt bir zeminin stabilizasyonu üzerindeki etkilerinin farklı su muhtevaları ve kür süreleri altında incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ilk adımda, çalışmada kullanılan MH zeminin indeks özellikleri ve kompaksiyon parametreleri yapılan laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Fiziksel özellikleri belirlenen zemine, kuru ağırlığının %4'ü oranında serpantinit atığı ilave edilmiş, elde edilen zemin+atık kuru karışımına optimum su muhtevası ve optimum su muhtevasının +%3 ıslak tarafında su ilave edilerek homojen bir karışım elde edilmiştir. Referans deneyleri temsil eden katkısız numuneler direkt deneye tabi tutulurken, serpantinit katkılı numuneler ise 0, 1, 7 ve 28 gün sürelerle kontrollü koşullarda desikatörde bekletilmiştir. Kür süresine bağlı olarak gerilme–şekil değiştirme ve mukavemet davranışı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışma ile, maden mühendisliği faaliyetleri sonucu yan ürün olarak ortaya çıkan serpantin atığının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin belirlenmesi ve MgO içeriğinin kür süresine bağlı olarak zemin davranışı üzerindeki etkisinin bilimsel olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

# 2. MALZEME VE YÖNTEM

## 2.1. Malzemeler

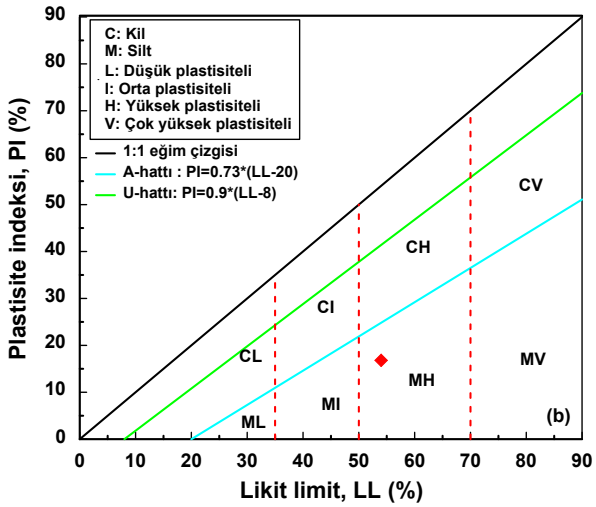
*Zemin*

Bu çalışma kapsamında kullanılan yüksek plastisiteli killi silt, ticari bir firmadan temin edilmiş ve zemine ait fiziksel ve indeks özellikleri ilgili standartlar dikkate alınarak laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Likit limit (LL) ve plastik limiti (PL) değerleri sırasıyla %54,00 ve %37,20 olan zeminin fiziksel ve indeks özellikleri Tablo 1'de, Birleştirilmiş

Birleşik Krallık Zemin Sınıflandırma Sistemi (BSCS - British Soil Classification System)'ne göre plastisite kartındaki konumu Şekil 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan zeminin fiziksel ve indeks özellikleri

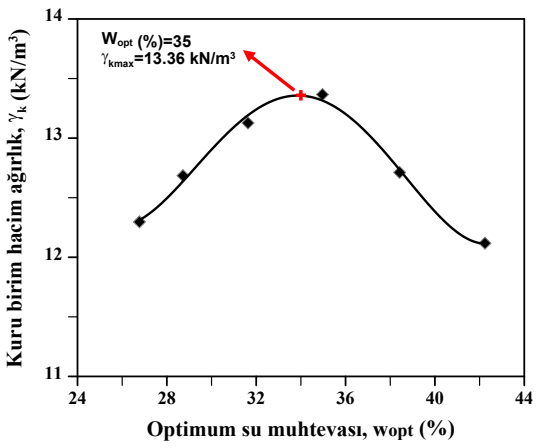
| Özgül ağırlık | Kıvam limitleri (ASTM D4318) | | | Dane çapı dağılımı (ASTM D6913, ASTM D7928) | | | Zemin sınıfı (BSCS) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gs | LL (%) | PL (%) | PI (%) | Kil (%) | Silt (%) | Kum+Çakıl (%) | |
| 2,65 | 54,00 | 37,20 | 16,20 | 35,00 | 65,00 | - | MH |




Şekil 1. Çalışmada kullanılan zeminin plastisite kartındaki konumu

Tablo 1 ve Şekil 1'de sunulan veriler incelendiğinde, kıvam limitlerine göre belirlenen zemin sınıfı ile hidrometre deney sonucundan belirlenen dane çapı dağılımının uyumlu olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, zemin üzerinde gerçekleştirilen XRD ve XRF analizleri sonucunda, zemin mineralojisinde %89 oranında kaolinit mineralinin olduğu ve zeminin kimyasal yapısının $Al_2O_3$ ve $SiO_2$ oksitlerinden oluştuğu (%98) tespit edilmiştir.

Deneysel çalışma programındaki tüm deney numuneleri standart kompaksiyon enerjisi kullanılarak hazırlanmıştır. Bu doğrultuda ASTM D698/D698M'ye uygun olarak gerçekleştirilen standart kompaksiyon deneyinden elde edilen su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık ilişkisinden belirlenen optimum su muhtevası ($w_{opt}$) ve kuru birim hacim ağırlık ($\gamma_{kmax}$) değerleri Şekil 2'de sunulmuştur.




Şekil 2. MH zeminin standart kompaksiyon eğrisi

*Katkı Malzemesi*

Çalışmada kullanılan katkı malzemesi, Elazığ Etikrom Maden İşletmesi'nden temin edilen ve serpantin mineralinin işlenmesi sonucu oluşan mineral yan ürünü (atık) olan serpantinittir. İlgili işletmeden temin edilen ürün, deneysel çalışmalarda kullanılmaya uygun hale getirilmesi amacıyla nano dane boyutuna kadar öğütülmüştür (Şekil 3). Dane boyutunun küçültülmesiyle spesifik yüzey alanının artırılması ve böylece malzemenin su ile daha etkin etkileşime girerek reaksiyon kabiliyetinin yükseltilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, kimyasal analizi Tablo 2'de sunulan serpantinitin %34,70 gibi önemli bir miktarda MgO ve CaO içermesi, malzemenin bağlayıcı bir potansiyeli olduğunu göstermekte ve zemin stabilizasyonunda etkili olabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 3. Serpantinit

Tablo 2. Serpanitin katkısının oksit bileşenleri

| Bileşen | $SiO_2$ | MgO | $Fe_2O_3$ | $AI_2O_3$ | CaO | Diğerleri |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Değer (%) | 51,50 | 33,50 | 5,70 | 1,40 | 1,20 | 7,70 |

## 2.2. Yöntem

Deney programının temel değişkenleri su muhtevası ve kür süresidir. Deney numunelerinin hazırlandığı su muhtevasının belirlenmesinde Şekil 2'de sunulan kompaksiyon eğrisi referans alınmış ve deney numuneleri 2 farklı su muhtevasında ($w_{opt}$=%35 ve $w_{opt+\%3}$=%38) hazırlanmıştır. Katkı oranı ise her iki su muhtevası için kuru zemin ağırlığının %4'ü olarak seçilmiştir. Kür süresi olarak da 1, 7, 28 gün uygulanmıştır. Tüm deney numuneleri aynı prosedür izlenerek hazırlanmıştır. Katkısız deney numuneleri, ilgili su muhtevalarında standart kompaksiyon enerjisi uygulanarak doğrudan hazırlanmış ve serbest basınç deneylerine hazır hale getirilmiştir. Katkılı deney numunelerinin hazırlanmasında ise öncelikle katkı malzemesinin kuru zemin ile homojen şekilde karışması sağlanmış (Şekil 4a), ardından belirlenen su miktarı karışıma kademeli olarak ilave edilmiştir. Elde edilen zemin–katkı malzemesi–su karışımına standart kompaksiyon enerjisi uygulanarak serbest basınç deneyinde kullanılacak silindirik numuneler hazırlanmıştır (Şekil 4b). Serbest basınç deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan silindirik numunelerde boy/çap oranının 2 olmasına dikkat edilmiştir. Her iki su muhtevasında hazırlanan katkısız deney numuneleri, numune hazırlama işleminin ardından bekletilmeksizin deneye tabi tutulmuştur. Buna karşılık, %4 serpantinit katkılı numuneler streç filmle sarılarak 1, 7 ve 28 gün süreyle desikatörde bekletilmiş ve kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 4c). Belirlenen kür sürelerinin

tamamlanmasının ardından deney numuneleri üzerinde serbest basınç deneyleri ASTM D2166/D2166M-24'e uygun olarak gerçekleştirilmiş ve mekanik davranışları değerlendirilmiştir (Şekil 4d).




Şekil 4. Deney numunesi hazırlanma prosedürü a) homojen karışımın sağlanması; b) serbest basınç deney numunelerinin hazırlanması; c) kür koşulları; d) serbest basınç deneyi

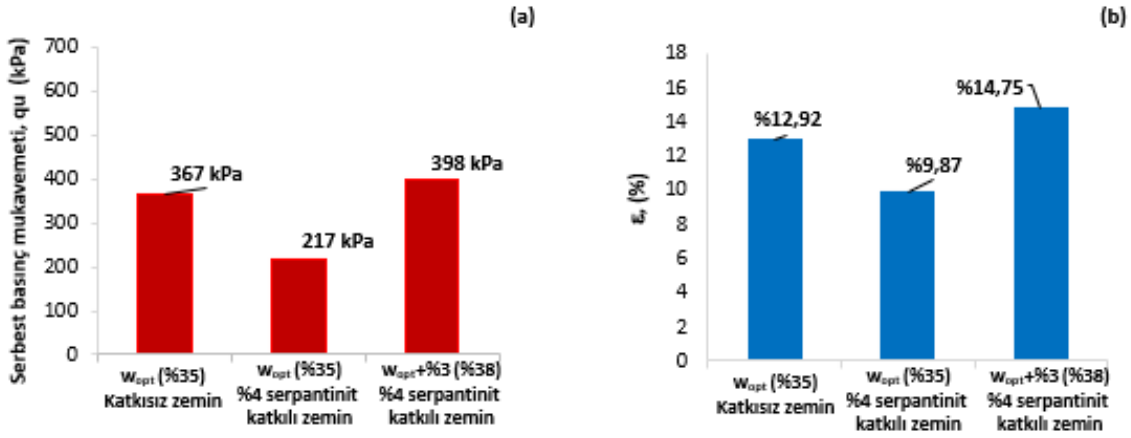
# 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada katkı oranı sabit tutulduğundan, deneysel değerlendirmelerde temel değişkenler kür süresi ve su muhtevası olarak ele alınmıştır. Kür süresi, katkı malzemesinin su ile gerçekleşen hidratasyon sürecinin ilerlemesini ve oluşan bağlayıcı faz miktarını belirleyen başlıca parametredir. Buna karşılık, ortamda yeterli suyun bulunması reaksiyonların sürekliliği ve etkinliği açısından kritik rol oynamaktadır. Bu iki değişkenin birlikte değerlendirilmesi, Eşitlik (1)'de verilen MgO'nun hidratasyon reaksiyonu çerçevesinde zemin içerisinde gelişen bağlayıcı yapıların oluşumunu ve buna bağlı mukavemet kazanımını açıklamak açısından temel bir yaklaşım sunmaktadır.

$$MgO + H_20 = Mg(OH)_2 \quad (1)$$

## 3.1. Su Muhtevasının Mukavemet ve Şekil Değiştirme Üzerindeki Etkisi

Bu çalışma kapsamında iki farklı su muhtevası (%35 ve %38) ve %4 sabit katkı oranı için deneyler gerçekleştirilerek su muhtevasının mukavemet davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney programında baz alınan su muhtevası değerleri için katkı/su oranı sırasıyla %11,42 ve %10,53 olarak belirlenmiştir. Yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen serbest basınç mukavemeti ve şekil değiştirme davranışı Şekil 5a ve Şekil 5b'de ayrı ayrı sunulmuştur.



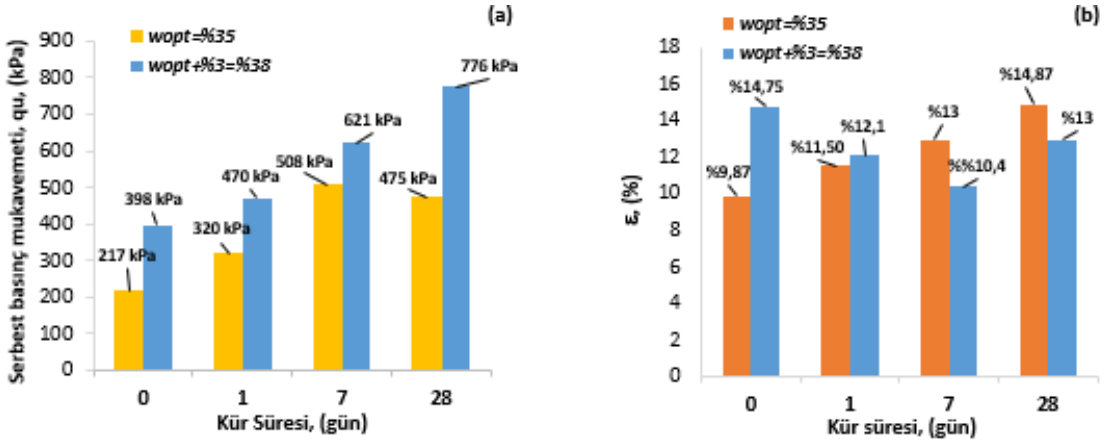

Şekil 5. Serbest basınç deney sonuçları a) serbest basınç mukavemeti-su muhtevası ilişkisi; b) şekil değiştirme-su muhtevası ilişkisi

Şekil 5a'da katkısız zemin ile iki farklı su muhtevasında hazırlanan %4 serpantinit katkılı zeminin serbest basınç mukavemeti ($q_u$) sonuçları verilmiştir. Katkısız zeminin optimum su muhtevasındaki (%35) serbest basınç mukavemetinin, aynı su muhtevasında %4 serpantinit katkısının ilave edilmesi ile %40,9 oranında azaldığı görülmektedir. Buna karşılık, serpantinit katkılı zeminin su muhtevasının %35'ten %38'e çıkarılmasıyla serbest basınç mukavemetinin 217 kPa'dan 398 kPa'a yükseldiği görülmektedir. Böylece aynı katkı oranında su muhtevasındaki %3'lük artış, dayanımda yaklaşık %83,4 oranında bir iyileşme sağlamıştır. Ayrıca elde edilen 398 kPa'lık dayanım değeri katkısız zeminin dayanımından da yaklaşık %8,4 daha yüksektir. Dayanım üzerindeki bu sonuçlar, serpantinit katkısının tek başına optimum su muhtevasında dayanımı artırmadığını, hatta belirli koşullarda dayanım kaybına neden olabileceğini göstermektedir. Ancak su muhtevasının artmasıyla serpantinit-zemin etkileşiminin daha etkin hale geldiği ve bunun sonucunda dayanımın belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, serpantinit katkısının performansının yalnızca katkı oranına değil, aynı zamanda karışımın su içeriğine de önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 5b'de ise katkısız ve katkılı zeminin maksimum gerilme değerine karşılık gelen eksenel şekil değiştirme (ε) değerleri verilmiştir. Katkısız zeminin optimum su muhtevasındaki (%35) şekil değiştirmesinin, aynı su muhtevasında %4 serpantinit katkısının ilave edilmesi ile %23,6 oranında azaldığı görülmektedir. Eksenel deformasyondaki bu azalma, serpantinit katkısının optimum su muhtevasında zeminin deformasyon kapasitesini sınırlandırdığını ve daha düşük şekil değiştirme seviyelerinde kırılmaya neden olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, katkı ilavesi bu koşullarda zeminin sünek davranışını azaltmıştır. Su muhtevasının %35'ten %38'e yükseltilmesiyle ise eksenel deformasyon değeri %14,75'e çıkmıştır. Bu değer, %35 su muhtevasındaki serpantinit katkılı numuneye göre yaklaşık %49,4 daha yüksektir. Ayrıca katkısız zemine kıyasla da yaklaşık %14,2 oranında daha büyük deformasyon kapasitesi göstermektedir. Bu sonuçlar, su muhtevasındaki artışın serpantinit katkılı zeminin yalnızca dayanımını artırmakla kalmadığını, aynı zamanda deformasyon kapasitesini de geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Artan su içeriğinin karışım içerisindeki partikül yeniden düzenlenmesini kolaylaştırdığı, daha homojen bir yapı oluşumuna katkı sağladığı ve kırılma öncesinde daha fazla şekil değiştirmeye izin verdiği düşünülmektedir.

### 3.2. Kür Süresinin Mukavemet ve Şekil Değiştirme Üzerindeki Etkisi

MgO'nun zemin ile reaktivitesine bağlı olarak su ile etkileşimi sonucu bağlayıcı faz oluşumu büyük ölçüde zamana bağlıdır. Bu nedenle, başlangıç su muhtevasının çevresel etkilerle buharlaşmasını önlemek amacıyla numuneler kontrollü koşullarda kürlenmiş ve 0, 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerine karşılık gelen dayanım değerleri değerlendirilmiştir. Söz konusu kür süreleri, MgO ile gerçekleştirilen zemin iyileştirme çalışmalarında literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir (Wang vd., 2019; Salimi ve Ghorbani, 2020; Chen vd., 2023). Bu kapsamda, optimum ve optimum su muhtevasının ıslak tarafında %4 katkı ile hazırlanan ve 0, 1, 7, 28 gün süre ile küre tabi tutulan deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneylerinde elde edilen serbest basınç mukavemeti ve şekil değiştirme davranışı Şekil 6a ve Şekil 6b'de ayrı ayrı sunulmuştur.




Şekil 6. Farklı su muhtevalarında kür süresinin serbest basınç deney sonuçları üzerindeki etkisi a) serbest basınç mukavemeti-kür süresi ilişkisi; b) şekil değiştirme-kür süresi ilişkisi

Şekil 6a'da %4 serpantinit katkılı numunelerin farklı kür sürelerinde elde edilen serbest basınç mukavemeti sonuçları verilmiştir. Sonuçlar, hem kür süresinin uzamasının hem de su muhtevasındaki artışın dayanım üzerinde belirgin bir iyileştirici etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Optimum su muhtevasında (%35) hazırlanan numunelerde serbest basınç mukavemeti kür süresinin artmasıyla birlikte genel olarak artış göstermiştir. Kürsüz durumda (0 gün) 217 kPa olarak ölçülen mukavemet, 1 günlük kür sonunda %47,5 artarak 320 kPa'a ulaşmıştır. Kür süresinin 7 güne çıkarılmasıyla mukavemet 508 kPa'a yükselerek başlangıç değerine göre yaklaşık %134'lük bir artış meydana gelmiştir. Ancak 28 günlük kür sonunda dayanımın 475 kPa'a gerilediği görülmektedir. Buna rağmen bu değer, kürsüz numuneye kıyasla yaklaşık %119 daha fazladır. Su muhtevasının %38'e yükselmesi ile tüm numunelerde tüm kür süreleri için daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Kürsüz durumda (0 gün) 398 kPa olan mukavemet değeri aynı kür süresindeki %35 su muhtevasına sahip numuneden yaklaşık %83 daha yüksektir. 1 günlük kür sonunda dayanım 470 kPa'a ulaşırken, 7 günlük ve 28 günlük kür sonunda mukavemet değerleri sırasıyla 621 kPa ve 776 kPa olarak belirlenmiştir. Kürsüz numuneye göre yaklaşık %18, %56 ve %95 oranında artışlar meydana gelmiştir. İki farklı su muhtevasında hazırlanan deney numuneleri karşılaştırıldığında, %38 su muhtevasının tüm kür sürelerinde daha yüksek dayanım sağladığı görülmektedir. Dayanım artışları sırasıyla 0, 1, 7 ve 28 günlük kürlerde yaklaşık %83, %47, %22 ve %63 olarak hesaplanmıştır. Özellikle 28 günlük kür sonunda elde edilen 776 kPa'lık dayanım değeri, çalışma kapsamındaki en yüksek serbest basınç dayanımını

temsil etmektedir. Bu durum, serpantinit katkısının etkinliğinin yeterli su varlığı ve uzun süreli kür koşullarında daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

Şekil 6b'de %4 serpantinit katkılı numunelerin farklı kür sürelerinde elde edilen eksenel birim şekil değiştirme (ε) sonuçları verilmiştir. Sonuçlar, dayanım gelişiminin deformasyon davranışıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Optimum su muhtevasında (%35) hazırlanan numunelerde eksenel birim şekil değiştirme değeri kürsüz durumda (0 gün) %9,87 olarak belirlenmiştir. Kür süresinin 1 güne çıkarılmasıyla deformasyon %11,50'ye yükselmiş, 7 günlük kür sonunda %13 seviyesine ulaşmıştır. En yüksek deformasyon değeri ise 28 günlük kür sonunda %14,87 olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler, artan kür süresinin, zeminin kırılma öncesinde daha fazla şekil değiştirebilmesine olanak sağladığını göstermektedir. %38 su muhtevasına sahip numunelerde ise farklı bir eğilim gözlenmiştir. Kürsüz durumda (0 gün) eksenel birim şekil değiştirme %14,75 ile oldukça yüksek bir seviyede gerçekleşmiştir. Bir günlük kür sonunda değer %12,10'a gerilemiş, 7 günlük kür sonunda %10,40 ile en düşük seviyesine ulaşmıştır. Ancak 28 günlük kür sonunda deformasyon yeniden artarak %13 seviyesine yükselmiştir. İki farklı su muhtevasında hazırlanan deney numuneleri karşılaştırıldığında, erken kür dönemlerinde (0 ve 1 gün) daha yüksek su içeriğinin deformasyon kapasitesini artırdığı görülmektedir. Buna karşın 7 ve 28 günlük kürlerde optimum su muhtevasındaki numuneler daha yüksek deformasyon değerleri sergilemiştir. Bu durum, yüksek su içeriğinin başlangıçta daha sünek bir davranış oluşturduğunu, ancak kür sürecinin ilerlemesiyle birlikte yapısal düzenlenme ve dayanım kazanımının deformasyon kapasitesini sınırlandırdığını göstermektedir.

Elde edilen bulgular, katkı ilavesinin özellikle mukavemet üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir. %38 su muhtevasında hazırlanan numunelerde elde edilen mukavemet değerlerinin, %35 su muhtevasına sahip numunelere kıyasla yaklaşık 1.83 kat fazla olması, başlangıç su içeriğinin dayanım üzerindeki belirleyici etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Ayrıca, artan su muhtevasındaki numunelerde elde edilen mukavemet değerlerinin %35 su muhtevasına sahip katkılı ve katkısız numunelere göre fazla olması, MgO içeren katkının yüksek su varlığında dahi kısa sürede etkin reaksiyonlar geliştirebildiğini göstermektedir. Kür süresinin 7 ve 28 güne çıkarılmasıyla mukavemetlerin daha da artması hidratasyon ve devam eden bağlayıcı faz oluşumunun zamanla sürdüğünü, ancak artış hızının erken yaşta daha yüksek, ilerleyen günlerde ise daha sınırlı hale geldiğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, ilk günlerde reaksiyon hızı daha yüksek iken, kür süresi uzadıkça sistemin giderek daha kararlı bir yapıya yaklaştığı ve mukavemet artış hızının azaldığı anlaşılmaktadır. Eksenel şekil değiştirme davranışı incelendiğinde ise tüm numunelerin maksimum mukavemet değerine %10 eksenel şekil değiştirme sonrasında ulaştığı belirlenmiş, ancak kür süresi ile pik mukavemete ulaşılan şekil değiştirme düzeyi arasında belirgin bir ilişki saptanmamıştır. Bu bulgu, kür süresinin dayanım büyüklüğünü önemli ölçüde etkilemesine karşın, deformasyon karakteristiği üzerinde aynı ölçüde düzenli bir eğilim oluşturmadığını göstermektedir.

## 4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, MgO açısından zengin serpantin kökenli bir maden atığının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Sabit katkı oranı altında,

su muhtevası ve kür süresinin zemin mukavemeti üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve özellikle su/katkı oranı ile zamana bağlı reaksiyonların dayanım gelişimi üzerindeki belirleyici rolü ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, MgO açısından zengin serpantinit atığının incelenen deney koşulları altında zemin stabilizasyonunda alternatif bir katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Çalışmanın başlıca sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- %38 ($w_{opt}$+%3) su muhtevasındaki %4 katkılı deney numunelerinin 28 günlük mukavemet değerlerinin başlangıç mukavemet değerinin ~2 katına sahip olması, belirli oranlarda bağlayıcı özellik gösteren bileşenler (MgO, CaO) içeren mineral ve maden kökenli atıkların zemin stabilizasyonunda etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

- Su ile reaksiyona girerek bağlayıcı faz oluşturan katkılarla gerçekleştirilen zemin iyileştirmelerinde, katkı malzemesinin hidratasyon hızı belirleyici bir parametre olup, özellikle MgO içeren katkılarda uygun kür koşullarının sağlanması mukavemet gelişimi üzerinde önemli etkiler oluşturmuştur.

- %4 sabit katkı oranı için, kür süresinin artmasıyla mukavemet belirgin şekilde yükselmekte, ancak 7–28 gün aralığında artış hızının azalması, hidratasyon reaksiyonlarının büyük ölçüde tamamlanma aşamasına yaklaştığını göstermiştir.

- Reaksiyonların etkin şekilde gerçekleşebilmesi için ortamda yeterli suyun bulunması kritik öneme sahip olup, optimum su/katkı oranının belirlenmesi hidratasyon ve bağlayıcı faz oluşumunun verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında, klasik zemin davranışının aksine, optimum su muhtevasının üzerinde hazırlanan katkılı numunelerde daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmesi, su/katkı oranının zemin iyileştirmelerinde belirleyici bir tasarım parametresi olduğunu göstermiştir.

## ÇALIŞMANIN SINIRLILIKLARI

Bu çalışmada, MgO açısından zengin serpantinit atığının yüksek plastisiteli siltli bir zeminin mukavemet davranışı üzerindeki etkileri yalnızca %4 katkı oranı, iki farklı su muhtevası ve 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri için değerlendirilmiştir. Bu nedenle, farklı katkı oranlarının zemin davranışı üzerindeki etkileri incelenmemiş olup, optimum katkı oranı belirlenmemiştir. Ayrıca çalışma kapsamında yalnızca serbest basınç dayanımı ve şekil değiştirme davranışı değerlendirilmiş, katkının diğer geoteknik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmamıştır. Bunun yanında, dayanım gelişimiyle ilişkilendirilen hidratasyon ve bağlayıcı faz oluşumları mikroyapısal analizlerle doğrulanmamıştır. Dolayısıyla elde edilen bulgular, çalışmada kullanılan zemin türü, katkı oranı ve deney koşulları ile sınırlıdır.

## TEŞEKKÜR

*Yazarlar, bu çalışmaya sağladıkları katkılardan dolayı Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye, Elazığ ETİKROM A.Ş.'ye ve deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği İstanbul Kültür Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na teşekkür eder.*

# KAYNAKLAR

Wang, D., Wang, H., & Wang, X. (2017). Compressibility and strength behavior of marine soils solidified with MgO—A green and low carbon binder. Marine Georesources & Geotechnology, 35(6), 878–886. https://doi.org/10.1080/1064119X.2016.1258095

Ardakani, S. B., & Rajabi, A. M. (2021). Laboratory investigation of clayey soils improvement using sepiolite as an additive: Engineering performances and micro-scale analysis. Engineering Geology, 293, 106328. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106328

Gençdal, H. B., & Kılıç, H. (2023). Effects of Microencapsulated Phase Change Material on the Behavior of Silty Soil Subjected to Freeze–Thaw Cycles. Sustainability, 15(15), 12005. https://doi.org/10.3390/su151512005

Rangaswamy, K., & Mohan, R. P. (2025). Strengthening the subgrade clay soil using nano chemical stabilisation. Soils and Foundations, 65(4), 101638. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.101638

Liu, S.-Y., Cai, G.-H., Du, Y.-J., Zhu, H., & Wang, P. (2017). Engineering properties of carbonated reactive magnesia-stabilized silt under different activity index. Procedia Engineering, 189, 158–165. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.026

Hwang, C.-L., Vo, D.-H., Tran, V.-A., & Yehualaw, M. D. (2018). Effect of high MgO content on the performance of alkali-activated fine slag under water and air curing conditions. Construction and Building Materials, 186, 503–513. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.129

Ribeiro, D. V., Paula, G. R., & Morelli, M. R. (2023). Effects of additivation during MgO calcination on properties of MgO powders and magnesium phosphate cements. Materials Research, 26, e20230136. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0136

Shao, L., Yu, W., You, Q., Wang, S., Du, X., He, B., Tao, S., Ding, H., & Bao, C. (2025). Effects of Carbon–Magnesium Reactions on the Physical and Mechanical Properties of Lightweight Carbonated Stabilized Soil. Buildings, 15(19), 3571. https://doi.org/10.3390/buildings15193571

He, Z., Li, Z., & Shao, Y. (2017). Effect of carbonation mixing on $CO_2$ uptake and strength gain in concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(10), 04017176. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002031

Wang, D., Zhu, J., & He, F. (2019). $CO_2$ carbonation-induced improvement in strength and microstructure of reactive MgO-CaO-fly ash-solidified soils. Construction and Building Materials, 229, 116914. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116914

Hou, Y., Onyekwena, C. C., & Li, Q. (2025). Experimental investigation of marine soil stabilization with recycled aggregates and MgO: Implications for $CO_2$ sequestration. Canadian Geotechnical Journal, 62, 1–17. https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0371

Sadiq, A. S., Fattah, M. Y., & Aswad, M. F. (2023). Enhancement of clay compressibility and strength using nano magnesium oxide. E3S Web of Conferences, 427, 01013. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342701013

Salem, L. A., Taher, A. H., Mosa, A. M., & Banyhussan, Q. S. (2020). Chemical influence of nano-magnesium-oxide on properties of soft subgrade soil. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 8(1), 533–541. https://doi.org/10.21533/pen.v8.i1.1070

Ahmadi, H., Janati, S., & Jamshidi Chenari, R. (2020). Strength parameters of stabilized clay using polypropylene fibers and nano-MgO: An experimental study. Geotechnical and Geological Engineering, 38, 2845–2858. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01191-y

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. https://doi.org/10.3390/polym17141895

Mosa, A. M., Salem, L. A., & Banyhussan, Q. S. (2022). Chemical influence of magnesium oxide on the engineering properties of clayey soils used as road subgrade. Journal of Engineering Science and Technology, 17(4), 2615–2630.

Gao, L., Ren, K.-y., Ren, Z., & Yu, X.-j. (2017). Study on the shear property of nano-MgO-modified soil. Marine Georesources & Geotechnology, 36(4), 465–470. https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1335813

Amaral, L. F., Salomão, R., Frollini, E., & Pandolfelli, V. C. (2007). Mechanisms of magnesium oxide hydration. Cerâmica, 53, 368–372.

Mi, T., Yang, E.-H., & Unluer, C. (2023). Investigation of the properties of reactive MgO-based cements and their effect on performance. Cement and Concrete Composites, 138, 104984. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104984

Ruan, S., Liang, S., Kastiukas, G., Zhu, W., & Zhou, X. (2020). Solidification of waste excavation clay using reactive magnesia, quicklime, sodium carbonate and early-age oven curing. Construction and Building Materials, 258, 120333. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120333

Wu, H.-L., Jin, F., Zhou, A.-N., & Du, Y.-J. (2021). The engineering properties and reaction mechanism of MgO-activated slag cement–clayey sand–bentonite (MSB) cutoff wall backfills. Construction and Building Materials, 271, 121890. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121890

Salimi, M., & Ghorbani, A. (2020). Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers. Applied Clay Science, 184, 105390. https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105390

Chen, S., Ni, P., Sun, Z., & Yuan, K. (2023). Geotechnical Properties and Stabilization Mechanism of Nano-MgO Stabilized Loess. Sustainability, 15(5), 4344. https://doi.org/10.3390/su15054344

Adeleke, B. O., Kinuthia, J. M., & Oti, J. E. (2022). Impacts of MgO waste: GGBS formulations on the performance of a stabilised natural high sulphate bearing soil. Construction and Building Materials, 315, 125745.

Mármol, G., & García-Lodeiro, I. (2025). $CO_2$ reactor-curing for early-strength MgO-based cementitious systems. Case Studies in Construction Materials, 22, e04504. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04504

Estabragh, A. R., Jahani, A., Javadi, A. A., & Babalar, M. (2022). Assessment of different agents for stabilisation of a clay soil. International Journal of Pavement Engineering, 23(2), 160–170. https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1736293

Zhu, J.-F., Xu, R.-Q., Zhao, H.-Y., Luo, Z.-Y., Pan, B.-J., & Rao, C.-Y. (2020). Fundamental mechanical behavior of CMMOSC-S-C composite stabilized marine soft clay. Applied Clay Science, 192, 105635. https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105635

Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J. F. (2010). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C. Applied Clay Science, 50(2), 191–198. https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.07.023

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). https://doi.org/10.28927/SR.2024.014822

ASTM D6913. (2004). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. ASTM Int. West Conshohocken, PA, 04, 1–35.

ASTM D7928-17. (2017). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. ASTM Int. 1–25.

ASTM D4318-00. (2000), "Standards,for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils This c of Soils" ASTM Int. 04, 1–14.

ASTM D698/D698M. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D2166/D2166M-24. (2024). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA.

# SEMBOL LİSTESİ

| Sembol | Açıklama | Sembol | Açıklama |
|---|---|---|---|
| $\gamma$ | Birim hacim ağırlık | $\varepsilon$ | Eksenel şekil değiştirme |
| $q_u$ | Serbest basınç mukavemeti | $w_{opt}$ | Optimum su muhtevası |
| $\gamma_{kmax}$ | Maksimum kuru birim hacim ağırlık | | |