

Donma–Çözülme Döngülerinden Kaynaklı Mukavemet Kayıplarının Katkı Maddeleri İle İyileştirilmesi

***Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 10.02.2026

Kabul/Accepted: 03.06.2026

Yaymlandı/Published: : 03.08.2026

Improvement of Strength Losses Induced by Freeze–Thaw Cycles Using Chemical Additives

Murat GÜLEN *Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye*

© 2026 The Authors | Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Farklı mühendislik yapıları, farklı özelliklere sahip zeminlerle etkileşim hâlinde olduğundan, yapı güvenliğinin sağlanabilmesi için zemin parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Zemin koşullarının amaca uygun olmaması durumunda, zeminler çeşitli iyileştirme yöntemleri kullanılarak proje gereksinimlerine uygun hâle getirilmektedir. Ancak iyileştirilmiş zeminlerin mühendislik özellikleri, zaman içerisinde çevresel ve iklimsel etkiler nedeniyle değişime uğrayabilmektedir. Özellikle sıcaklık dalgalanmaları, su muhtevastaki değişimler, donma–çözülme döngüleri, şişme–büzülme davranışı ve don kabarması, zemin mukavemetinde önemli azalmalara neden olabilmektedir. Bu çalışmada, İstanbul ili sınırları içerisinde bir inşaat projesinde dolgu malzemesi olarak kullanılan orta plastisiteli çakıllı-kumlu–killi silt zemin kullanılmıştır. Araziden alınan zemin numunelerinin fiziksel özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Tüm deney numuneleri, laboratuvar koşullarında optimum su muhtevastında hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde Kaliforniya Taşıma Oranı ve direkt kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Donma–çözülme etkisini değerlendirmek amacıyla, aynı koşullarda hazırlanan numuneler 10 donma–çözülme döngüsüne tabi tutulmuş ve bu süreç sonunda zeminin mukavemetindeki değişimler belirlenmiştir. Deneyel sonuçlar, katkısız numunelerde donma–çözülme döngüleri sonrasında mukavemet kayıplarının yaklaşık %40 seviyelerine ulaştığını göstermiştir. Bu olumsuz etkinin azaltılması amacıyla zemin, optimum su muhtevastında kuru zemin ağırlığının %5'i oranında CaO ve MgO ilavesiyle ayrı ayrı iyileştirilmiştir. Her iki katkı maddesinin kullanılması, donma–çözülme uygulanmayan koşullarda zeminin mukavemetini iki kattan fazla artırmıştır. Donma–çözülme döngüleri sonrasında katkılı numunelerde de mukavemet kayıpları gözlenmekle birlikte, bu numunelerin nihai mukavemet değerlerinin katkısız zeminin başlangıç durumundaki mukavemetinden daha yüksek kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, CaO ve MgO ile zemin iyileştirmenin donma–çözülme etkilerine karşı zemin mukavemetinin korunmasında etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Donma–çözülme döngüleri, zemin iyileştirilmesi, iklim değişikliği, CBR(%), kayma mukavemeti parametreleri

Abstract

As engineering structures interact with soils that exhibit a variety of different characteristics, it is essential to accurately determine soil parameters in order to ensure structural safety. If in-situ soil conditions are not suitable for the intended application, various improvement techniques are employed to meet project requirements. However, the engineering properties of improved soils can change over time due to environmental and climatic influences. Temperature fluctuations, variations in water content, freeze–thaw cycles, swelling–shrinkage behavior and frost heave can all lead to significant reductions in soil strength. This study investigated a low-plasticity gravelly–sandy–clayey silt soil that was used as fill material in a construction project within Istanbul's boundaries. Soil samples collected from the field were analyzed in the laboratory to determine their physical properties. All test specimens were prepared at the optimum water content under laboratory compaction conditions. California Bearing Ratio (CBR) and direct shear box tests were then conducted on these samples. To evaluate the effect of freeze–thaw action, specimens prepared under identical conditions were subjected to ten freeze–thaw cycles and the subsequent changes in soil strength were analyzed. The experimental results showed that freeze–thaw cycles caused strength losses of up to approximately 40% in untreated soil specimens. To mitigate this adverse effect, the soil was improved by separately adding 5% CaO and 5% MgO by dry soil weight at the optimum water content. This resulted in a more than twofold increase in soil strength under unfrozen conditions. Although strength losses were also observed in the treated specimens after freeze–thaw cycling, their post-cycle strength values remained higher than that of the untreated soil initially. These results demonstrate that stabilizing soil using CaO and MgO is an effective way to preserve soil strength against freeze–thaw degradation.

Keywords: Freeze–thaw cycles, soil improvement, climate change, CBR (%), shear strength parameters

1. Giriş

Zeminler, doğal bir yapı malzemesi olması, yaygın olarak bulunabilmesi ve ekonomik avantajlarının olmasından

dolayı toprak yapılar, barajların kil çekirdekleri, katı atık depolama sahaları ve donatılı duvarlar gibi geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak bu tür yapıların

güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi ve hizmet süresi boyunca oluşabilecek hasarların sınırlandırılabilmesi için, zemin özelliklerinin hem başlangıç durumunda hem de iklimsel ve çevresel etkilere bağlı olarak zaman içindeki değişiminin değerlendirilmesi gerekmektedir (Oghenero vd., 2014; Bui vd., 2016; Kuba, 2018; Kandalai vd., 2023). Mevsimsel donma-çözülme (D-Ç) döngülerine maruz kalan zeminler, dünya yüzeyinin yaklaşık %24'ünü kaplamakta olup, küresel iklim değişikliğinin etkisiyle bu bölgelerde aktif tabaka kalınlığının ve çözülme derinliğinin arttığı bildirilmektedir (Anisimov vd., 1997; Venäläinen vd., 2001; Sutherland vd., 2023). Artan sıcaklık dalgalanmaları, özellikle mevsimsel donmanın görüldüğü bölgelerde D-Ç döngülerinin sıklığını artırmakta ve bu çevrimler altyapı ile temel zeminlerinin geoteknik davranışını olumsuz yönde etkilemektedir (Chamberlain vd., 1990; Zhang vd., 2015; Gülen vd., 2025). Tekrarlayan D-Ç süreçleri, sıkıştırılmış zeminlerin taşıma gücü ve dayanıklılık özelliklerinde bozulmalara yol açarak mühendislik yapılarında hasar riskini artırabilmektedir (Özgan vd., 2015; Gülen vd., 2024).

Kohezyonlu zeminlerin davranışı; su varlığı, drenaj koşulları, mineralojik yapı ve gerilme geçmişi gibi faktörlerin yanı sıra özellikle D-Ç döngülerinden önemli ölçüde etkilenmektedir (Klöffel vd., 2024; Gülen vd., 2024; Hou vd., 2026). Mevsimsel sıcaklıkların sıfır derecenin altına düşmesiyle zemin boşluk suyunun donması sonucu oluşan buz merccekleri, suyun hacimsel genişlemesine bağlı olarak don kabarmasına ve dane diziliminin bozulmasına neden olmaktadır. Ardışık donma (D) ve çözülme (Ç) süreçleri sırasında boşluk suyunun hapsolması, zemin mukavemetinde azalmaya ve kalıcı hacimsel değişimlere yol açarak zemin-yapı etkileşimini olumsuz etkilemektedir (Mitchell ve Soga, 2005).

Donmaya karşı hassas olan zeminlerde don kabarması en yaygın sorunlardan biri olup, bu davranış başta ince dane oranı olmak üzere özgül yüzey alanı ve mineralojik yapı ile ilişkilidir. İnce dane içeriği %6'nın üzerinde olan zeminlerin don kabarmasına karşı daha duyarlı olduğu genel kabul görmektedir (Bilodeau vd., 2008; Hendry vd., 2016; Liu vd., 2022). Donma etkisi yalnızca dane boyutuna bağlı olmayıp, zemin yapısı, boşluk suyunun özellikleri, çevresel gerilme durumu ve sıcaklık gradyanı gibi faktörlerin ortak etkisiyle gelişmektedir; özellikle dane boyutunun küçülmesiyle donmaya hassasiyetin arttığı birçok çalışmada vurgulanmaktadır (Tester ve Gaskin, 1997; Qi vd., 2008; Zhang vd., 2021).

Donma-çözülme çevrimlerinin zeminlerde hacimsel değişimlere neden olduğu hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminler için rapor edilmiştir (Eigenbrod,

1996; Vikiveer, 1998; Qu vd., 2019; Wei vd., 2023). Eigenbrod (1996), yumuşak killer üzerinde yaptığı çalışmada don kabarmasının belirli bir çevrim sayısından sonra azaldığını ve boy değişiminin durağanlaştığını ortaya koymuş; bu davranışın başlangıç su muhtevası, plastisite ve donma koşulları ile ilişkili olduğunu göstermiştir.

Zeminlerin donma-çözülme davranışının doğru değerlendirilebilmesi için fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özelliklerin birlikte ele alınması gerekmektedir (Croudace ve Rothwell, 2015; Gratchev, 2020; Xiang vd., 2022; Gülen vd., 2024). Bu yaklaşım, oturma ve hacimsel değişimlerin sınırlandırılması ile taşıma gücü ve stabilitenin korunması açısından kritik olup, mühendislik yapılarının uzun vadeli güvenliği üzerinde doğrudan etkilidir (Holtz vd., 2023).

Küresel iklim değişikliği; sıcaklık dalgalanmalarındaki artış, yağış rejimlerindeki düzensizlikler ve aşırı iklim olaylarının daha sık ve şiddetli hâle gelmesiyle birlikte, özellikle zeminle doğrudan etkileşim hâlindeki karayolu altyapılarında önemli dayanım ve deformasyon sorunlarına yol açmaktadır (de Abreu vd., 2022; Pantoja Porro vd., 2025; Pham, 2025). Bu süreçte D-Ç çevrimleri ile şişme-büzülme davranışları, zemin performansını belirleyen kritik çevresel etkenler arasında yer almaktadır. Bu etkiler, zeminlerde hacimsel değişimlere ve mukavemet kayıplarına neden olarak yol üstyapılarında kabarma, oturma ve çatlak oluşumu gibi bozulmalara yol açmaktadır (Yang vd., 2020; Sarker ve Wang, 2022). Türkiye'nin de içinde bulunduğu Akdeniz Havzası, iklim değişikliğine karşı yüksek duyarlılık gösteren bölgelerden biri olarak tanımlanmaktadır (Peñuelas ve Sardans, 2021).

Oturma/hacimsel davranış açısından, çevrimler don kabarması-çözülme sonrası oturma şeklinde tekrarlı deformasyon üretir; bu deformasyonlar çoğu çalışmada ilk birkaç çevrimde daha baskın olup belirli bir çevrim sayısından sonra durağanlaşma eğilimi gösterebilir (Gençdal ve Kılıç, 2023; Gülen vd., 2024). Donma-çözülme çevrimleri genellikle rijitlik ve dayanımda azalmaya neden olur. Bu azalma düşük çevre basınçlarında daha belirgin olup, yüksek çevre basınçlarında çatlakların kısmen kapanması nedeniyle etkiler sınırlandırılır. Özellikle zeminlerde minimum mukavemetin belirli çevrim aralıklarında oluşup ardından kısmi toparlanma ve plato davranışı görülebildiği bildirilmiştir (Wang vd., 2007; Wang vd., 2013; Tang vd., 2018; Liu vd., 2021). Kaliforniya taşıma oranı (CBR, %) açısından ise, çevrimler sonrasında boşluk oranı ve su muhtevasındaki artış ile maksimum kuru birim hacim ağırlıktaki azalma daha düşük CBR (%) değerleriyle ilişkilendirilmiştir. Farklı zeminlerde CBR (%)

kaybının ise %21–%86 aralığına ulaşabildiği gösterilmiştir (Işık vd., 2014). Mineralojik ve gradasyon etkisini inceleyen çalışmalarda CBR düşüşünün %40–%70 düzeyinde gerçekleştiği, ince malzeme oranı ve D50 ile güçlü ilişki bulunduğu görülmüştür. Ayrıca aynı D50’da farklı sonuçlarda likit limitin belirleyici olabildiği ve smektit grubu minerallerin donma-çözölmeye daha hassas davranarak daha yüksek CBR (%) kaybı ürettiği ortaya konmuştur (Gülen vd., 2024).

Donma-çözölme döngüleri sonucu meydana gelen mukavemet kayıplarını minimize etmek ve başlangıç durumuna göre mukavemeti artırmak için zeminler sıklıkla katkı ile iyileştirilir (Wang vd., 2017; Mosa vd., 2022; Gençdal ve Kılıç, 2023). Bu katkılardan olan MgO aktivitesi ve su/MgO oranı mikro-yapıyı değiştirerek zeminlerin performansını belirgin şekilde etkiler (Song-Yu vd., 2017). Ayrıca CO₂ ile karbonatlaşma koşullarında MgO ağırlıklı karışımlar çok yüksek mukavemet artışları gösterebilir (Wang vd., 2019). Nano-MgO uygulamalarında CBR (%) artışı, kabarma azalması ve q_u – c – ϕ iyileşmeleri ile mikro-yapının daha granüler/topaklanmış hale geldiği gösterilmiştir (Salem vd., 2020; Ahmvei vd., 2020). Saha uygulamalarında düşük oranlı MgO ile CBR (%) ve elastisite modülünün optimum değere kadar arttığı, optimum değer aşılmasının zeminlerin performansını olumsuz etkilediği vurgulanmıştır (Mosa vd., 2022).

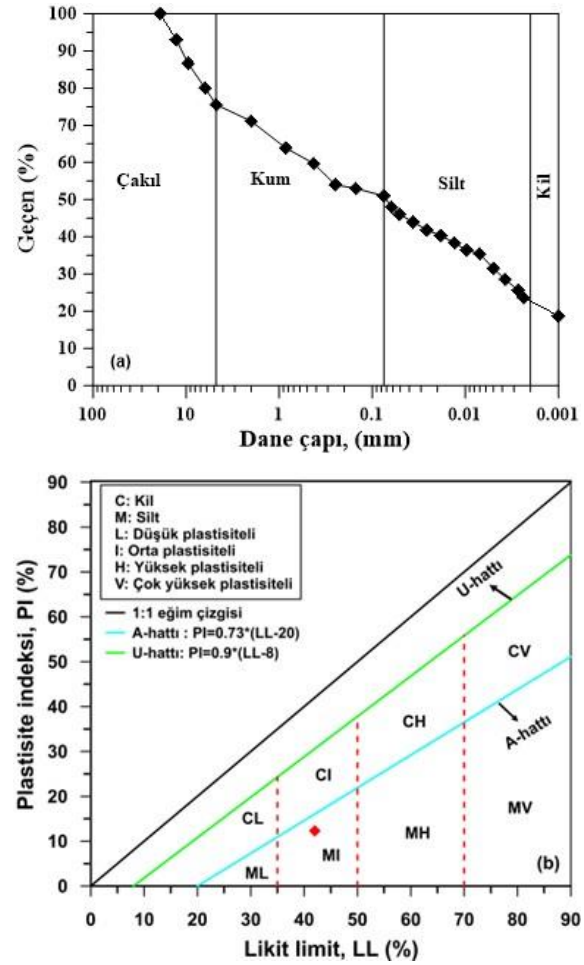
Bu çalışmada, bir mühendislik yapısının inşasında dolgu zemini olarak kullanılan orta plastisiteli çakıllı-kumlu–killi silt zeminin D-Ç döngüleri sonucunda mukavemetinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Donma-çözölmenin zemin davranışı üzerindeki etkileri, CBR (%) ve kayma mukavemeti parametrelerindeki (c , ϕ) değişimler üzerinden değerlendirilmiştir. Donma-çözölme etkisiyle ortaya çıkan mukavemet kaybını minimize etmek amacıyla zemin CaO ve MgO ile iyileştirilerek katkı zeminin D-Ç performansı deneysel olarak ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, CaO ve MgO katkısının donma-çözölmeye maruz kalan zeminlerin mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını artırmadaki etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1 Malzemeler

Bu çalışma, bir mühendislik yapısında temel dolgu malzemesi olarak kullanılan, orta plastisiteli çakıllı-kumlu-

killi bir silt (MI) zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dolgunun dane çapı dağılımı, elek analizi (ASTM D6913), hidrometre analizi (ASTM D7928) ve özgül ağırlık deneyi (ASTM D854) sonuçları birlikte değerlendirilerek belirlenmiş olup elde edilen dağılım Şekil 1a’da sunulmuştur. Kıvam limitleri ise ASTM D4318’e göre hesaplanmış ve Şekil 1b’de gösterildiği gibi İngiliz Zemin Sınıflandırma Sistemi (BSCS) kullanılarak değerlendirilmiştir. İncelenen dolgu zeminin temel fiziksel ve indeks özellikleri Çizelge 1’de özetlenmiştir.



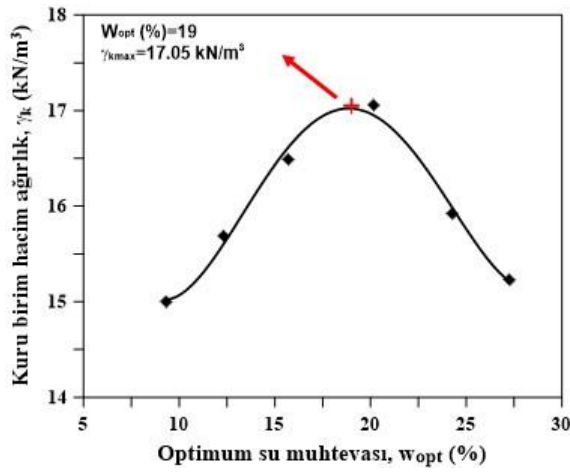
Şekil 1. Zemin özellikleri a) dane çapı dağılımı b) plastisite kartındaki konumu

Dolgu malzemesinin maksimum dane çapının 19,1 mm’den küçük olduğu Şekil 3a’da görülmektedir. Bu nedenle, ASTM D698 standardına uygun olarak standart kompaksiyon deneyi yapılarak laboratuvar optimum sıkıştırma koşulları belirlenmiştir (Şekil 2).

Kompaksiyon eğrisinden belirlenen eğriye göre optimum su muhtevası (w_{opt}) 19% ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) değeri 17.05 kN/m³ olarak belirlenmiştir.

Çizelge 1. Dolgu malzemesine ait indeks ve fiziksel özellikleri

Gs	Dane çapı dağılımı				Kıvam limitleri			Sınıflandırma	
	Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL(%)	PL(%)	PI (%)	BSCS	AASHTO
2.66	24.5	26.2	26.3	23.0	42	29.7	12.3	MI	A-7-6



Şekil 2. Standart kompaksiyon deney sonucu

Donma-çözülme döngülerinin neden olduğu mukavemet kayıplarını azaltmak ve zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla bu çalışmada CaO ve MgO katkıları kullanılmıştır. Her iki katkı malzemesi de su ile tepkimeye girerek zemin bünyesinde kimyasal reaksiyonlar oluşturmakta ve bu reaksiyonlar sonucunda daneler arası bağlanma mekanizmaları güçlenmektedir. Çalışmada kullanılan katkı malzemeleri ticari olarak temin edilmiş olup, deneysel çalışmalarda kullanılmadan önce 0.075 mm elek açıklığına sahip elekten elenerek homojen ve kontrollü bir dane boyutu dağılımı sağlanmıştır.

Başta kompaksiyon deneyleri olmak üzere tüm deneysel çalışmalarda, numuneler kuru zemin ağırlığının farklı oranlarında su ilavesi yapılarak hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan su, İstanbul Büyükşehir Belediyesi şebeke suyu olup, tüm numuneler için aynı kaynaktan temin edilerek deney koşullarında tutarlılık ve tekrarlanabilirlik sağlanmıştır.

2.2 Deneysel prosedür

Deney programında, D-Ç döngülerinin ve kimyasal katkıların zeminin mukavemet özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla deneysel çalışmalar dört ana aşamada gerçekleştirilmiştir.

1. Katkısız ve döngüsüz (referans) zemin numuneleri optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim

ağırlık koşullarında hazırlanmıştır. CBR ve direkt kesme kutusu (DKK) deneyleri için numuneler laboratuvar koşullarında sıkıştırılmıştır. CBR deney numuneleri deney öncesinde ASTM D1883'e uygun olarak 96 saat boyunca suya yatırılmış, bu süre zarfında belirli zaman aralıklarında meydana gelen boy değişimleri kaydedilmiştir (Şekil 3a). Suda bekletme süresi sonunda CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. CBR (%) değerleri numunelerin üst ve alt noktaları için hesaplanan CBR (%) değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. DKK numuneleri de CBR kalıbında sıkıştırıldıktan ve 96 saat suda bekletildikten sonra uygun dikdörtgen numune çıkarıcıları kullanılarak kalıptan alınmıştır. Tüm DKK deneyleri için numuneler bu şekilde elde edilmiştir. Akabinde ASTM MG3080'e göre ve 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa düzey gerilmelerde deneyler yapılmış ve deneylere ait veriler kaydedilmiştir (Şekil 3b).

2. Tekrardan hazırlanan katkısız CBR ve DKK numuneleri 96 saat suda bekletildikten sonra 10 D-Ç döngüsüne tabi tutulmuştur. Numuneler iklimlendirme kabiniinde -20°C sıcaklıkta ve %0 bağıl nemde 24 saat dondurulmuş, ardından $+20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve %80 bağıl nemde 24 saat çözdürülmüştür (Şekil 3c). Döngüler süresince CBR numunelerindeki boy değişimleri her çevrim sonunda ölçülmüş; çevrimler tamamlandıktan sonra numuneler CBR ve DKK deneylerine tabi tutulmuştur.

3. Optimum su muhtevası değerinde ve kuru zemin ağırlığının %5'i oranında CaO ve MgO ayrı ayrı ilave edilerek CBR ve DKK numuneleri hazırlanmıştır. 96 saat suda bekletilen numuneler deneylere tabi tutulmuştur.

4. Katkılı zemin numuneleri üçüncü aşamada izlenen deneysel prosedür takip edilerek hazırlanmış ve 96 saat sonunda donma-çözülme kabiniinde toplam 10 D-Ç döngüsüne tabi tutulmuştur. Çevrimler tamamlandıktan sonra numuneler üzerinde CBR ve DKK deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler sonucunda CBR deneyleri için yük-batma miktarı; DKK deneyleri için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Tüm deneysel prosedürler dikkate alındığında, bu çalışmadaki deneyler Çizelge 2'de özetlenmiştir.



Şekil 3. Deneysel aşamalar a) numunelerin suda bekletilmesi b) kesme kutusu deney aleti c) donma-çözülme kabini

Çizelge 2. Deneyisel çalışmalara ait detaylar

Aşama	Numune	Katkı türü	D-Ç döngüsü	Deney türü	Deney sayısı
1	Referans	-	-	CBR	1
	Referans	-	-	DKK	3
2	Referans (10 DÇ)	-	10	CBR	1
	Referans (10 DÇ)	-	10	DKK	3
3	Katkılı	%5 CaO, %5 MgO	-	CBR	2
	Katkılı	%5 CaO, %5 MgO	-	DKK	6
4	Katkılı (10 DÇ)	%5 CaO, %5 MgO	10	CBR	2
	Katkılı (10 DÇ)	%5 CaO, %5 MgO	10	DKK	6

2.3 İnceleme alanı için iklim verileri

Bu çalışmada, temel dolgu uygulamasının gerçekleştirileceği İstanbul'un Silivri ilçesine ait 2013–2024 yılları arasındaki günlük iklim verileri kullanılarak sıcaklık ve yağış temelli aşırı iklim indisleri hesaplanmış ve bu indislerin geoteknik mühendisliği açısından olası etkileri değerlendirilmiştir. Analiz süreci üç ana aşamada yürütülmüştür.

İlk aşamada günlük sıcaklık ve yağış verileri, İstanbul'un Çatalca ilçesinde yer alan Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) gözlem istasyonundan (Çatalca Radar Station: 41.3409 °N, 28.3568 °E) temin edilmiştir. Analiz öncesinde veri setleri kalite kontrol işlemlerinden geçirilmiş, sürekliliği sağlanmış ve eksik veri içermeyen zaman serileri değerlendirmeye alınmıştır.

İkinci aşamada, Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ile İklim Değişikliğinin Tespiti ve İndisleri Uzman Grubu (ETCCDI) tarafından önerilen sıcaklık ve yağışa dayalı aşırı iklim indisleri kullanılmıştır. Bu indisler ClimPACT v3.3 yazılımı aracılığıyla hesaplanmış; aylık, mevsimlik ve yıllık zaman ölçeklerinde analiz edilmiştir. Hesaplanan indislerdeki eğilimlerin yönü ve büyüklüğü, parametrik olmayan Sen'in eğim yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir (Nairn ve Fawcett, 2013).

Üçüncü aşamada, hesaplanan iklim indislerindeki zamansal değişimlerin yönü ve büyüklüğü eğilim analizi ile değerlendirilmiştir. Bu amaçla, parametrik olmayan Sen (1968) eğim yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, doğrusal bir eğilim varsayımı altında, zaman içerisindeki değişim hızını hesaplamaya olanak sağlamaktadır. Sen (1968)'in eğim yönteminin en önemli avantajı, uç değerlere ve veri düzensizliklerine karşı daha dayanıklı olmasıdır. Eğilim katsayısı, veri setinde yer alan tüm olası veri çiftleri için hesaplanan eğim değerlerinin medyanı alınarak belirlenmiştir. Sen'in eğim katsayısının hesaplanmasında kullanılan matematiksel ifade Eşitlik (1)'de sunulmaktadır.

$$Q_i = \frac{P_j - P_k}{j - k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (j > k) \quad (1)$$

Eşitlikte, P_j ve P_k , sırasıyla j ve k zamanlarına karşılık gelen yağış değerlerini temsil etmektedir. Sen (1968)'in eğim

yöntemi, tüm olası veri çiftleri için hesaplanan Q_i eğim değerlerinin medyanının alınmasıyla elde edilmektedir. Sen (1968)'in eğim tahmincisinin matematiksel ifadesi Eşitlik (2)'de verilmiştir. Q_i değerinin pozitif olması, zaman serisinde artan yönde bir eğilimin bulunduğunu; negatif olması ise, zaman içinde azalan bir eğilimin hâkim olduğunu göstermektedir.

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{\left[\frac{N+1}{2}\right]} & N \text{ tek sayı ise} \\ \frac{Q_{\left[\frac{N}{2}\right]} + Q_{\left[\frac{N+1}{2}\right]}}{2} & N \text{ çift sayı ise} \end{cases} \quad (2)$$

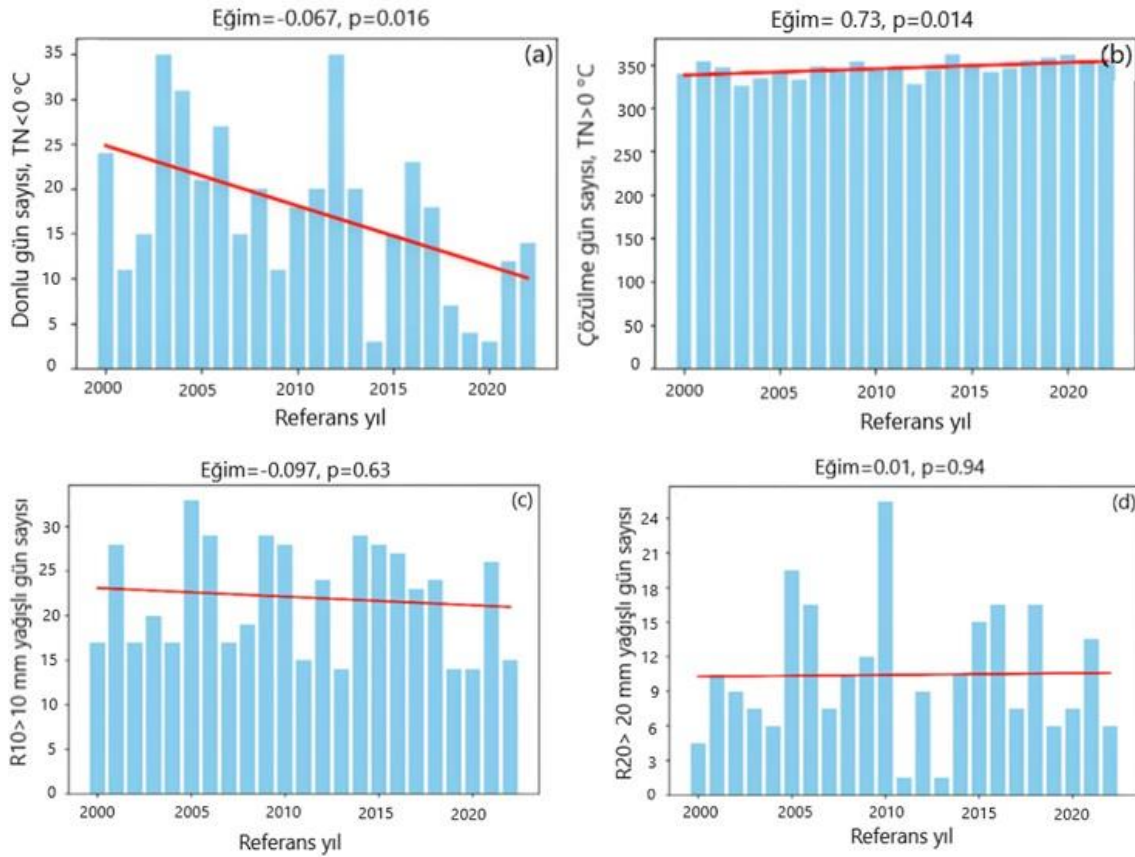
3. Bulgular ve Tartışma

3.1 İklim verilerinin değerlendirilmesi (2005-2022)

Akdeniz Havzası'nda yer alan Türkiye, iklim değişikliğine karşı en hassas bölgelerden biri olarak tanımlanmaktadır (Kum ve Çelik, 2014; Kartal vd., 2024). Son yıllarda artan sıcaklık dalgalanmaları, düzensiz yağış rejimleri ve ekstrem iklim olaylarının sıklık ve şiddetindeki artış, farklı mühendislik yapıları ve altyapı sistemleri üzerinde önemli riskler oluşturmaktadır (Pantoja Porro vd., 2025). Mevsimsel sıcaklık değişimlerine bağlı olarak gelişen donma–çözülme döngüleri, bu bağlamda öne çıkan çevresel etkilerden biri olup, zeminlerin mekanik davranışını, dayanıklılığını ve uzun vadeli performansını doğrudan etkilemektedir. Şekil 4'te İstanbul il sınırları içerisindeki çalışma sahasına en yakın MGM ölçüm istasyonundan elde edilen meteorolojik verilerin Sen eğim (slope) analizleri sonucunda elde edilen bulgular detaylandırılmıştır. Şekil 4'te sunulan Sen eğim analizleri, çalışma alanında sıcaklık ve yağış rejimlerinin frekans–şiddet dengesi açısından belirgin biçimde değiştiğini ortaya koymaktadır. Sıfırın altındaki gün sayısının ($TN < 0$ °C) negatif eğim göstermesi, don olaylarının yıllık frekansının azaldığını ifade etmektedir; ancak bu eğilim, don etkisinin zayıfladığı şeklinde yorumlanmamalıdır. Sen eğim katsayısı (Sen's slope), zaman serisindeki değişimin yönünü ve büyüklüğünü tanımlamakta olup, negatif değerler azalışı, pozitif değerler artışı göstermektedir; eğimin mutlak değerinin büyümesi ise değişimin daha keskin olduğunu ifade etmektedir. Buna paralel olarak, istatistiksel anlamlılığı gösteren p-değeri, gözlenen eğilimin rastlantısal olma olasılığını tanımlamakta ve

düşük p-değerleri eğilimin güvenilirliğini göstermektedir. Bu çerçevede, donlu gün sayısındaki azalmaya rağmen çözülme koşullarının ($TN > 0^{\circ}C$) belirgin biçimde artması, don olaylarının daha kısa süreli, ancak daha ani ve yoğun sıcaklık geçişleriyle gerçekleştiğine işaret etmektedir. Bu durum, donma-çözülme döngülerinin sayısal olarak azalmasından ziyade, mekanik açıdan daha etkili ve yıkıcı hale geldiğini göstermektedir. Yağış indisleri açısından değerlendirildiğinde, Rp10 (günlük yağışın 10 mm'yi aştığı gün sayısı) orta şiddette yağışların frekansını, Rp20 (günlük yağışın 20 mm'yi aştığı gün sayısı) ise daha yoğun yağış olaylarını temsil etmektedir. Bu indislerde uzun dönemli belirgin eğilimler gözlenmemekle birlikte, yıllar

arası keskin dalgalanmalar dikkat çekmektedir. Bu durum, yağış olaylarının daha seyrek gerçekleşmesine karşın, gerçekleştiğinde daha yoğun ve kısa süreli olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, Şekil 4'te sunulan sıcaklık ve yağış bulguları birlikte değerlendirildiğinde, çalışma alanının daha az sıklıkta fakat daha yüksek şiddette gerçekleşen ekstrem iklim olaylarıyla karakterize edilen bir iklim rejimine doğru eğilim gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu tür bir rejim, özellikle donma-çözülme süreçleriyle yapısal bütünlüğü zayıflamış zeminlerde, hidromekanik kararsızlık riskini artıran temel bir çevresel kontrol mekanizması olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 4. Yıllara göre sıcaklık ve yağış verileri a) $TN < 0^{\circ}C$ b) $TN > 0^{\circ}C$ c) $Rp10 > 10$ mm d) $Rp20 > 20$ mm

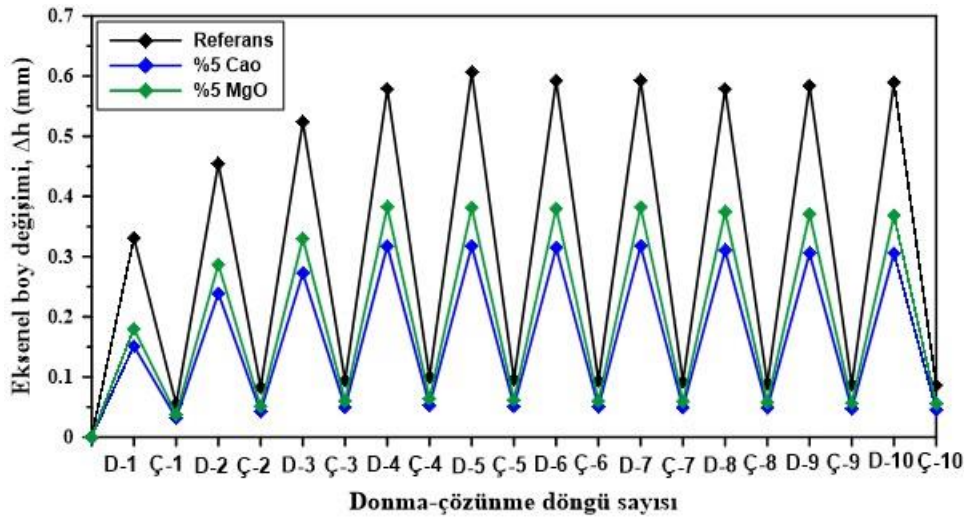
3.2 Zeminlerin şişme-kabarma davranışlarının karşılaştırılması

Referans, %5 CaO ve %5 MgO katkılı numuneler, donma-çözülme kabineye yerleştirilerek toplam 10 D-Ç döngüsüne tabi tutulmuştur. Her bir donma ve çözülme aşaması sonunda numunelerde meydana gelen eksenel boy değişimleri ölçülmüştür (Şekil 5). Referans numunede donma etkisine bağlı kabarma, en belirgin artışı ilk donma döngüsü sonunda göstermiş ve bu aşamada kabarma değeri 0.34 mm olarak ölçülmüştür. Bunu izleyen çözülme aşamasında ise kabarma değeri 0.07 mm seviyesine

gerilemiştir. Donma-çözülme döngülerinin ilk aşamalarında, zemin bünyesindeki suyun donmasıyla birlikte buz mercleklerinin oluşması ve su hacmindeki artışa bağlı olarak dane dizilimi ve boşluk yapısı bozulmakta, bu durum çözülme sonrasında tamamen geri kazanılamayan kalıcı deformasyonlara neden olmaktadır. Bu nedenle, ilk döngülerde gözlenen kabarma değerleri kademeli olarak artış göstermektedir. Kabarmalar, 5. donma döngüsüne kadar kademeli olarak artarak maksimum 0.61 mm'ye ulaşmıştır. Bu aşamadan sonra artan D-Ç döngüleri boyunca numune daha stabil bir davranış sergilemiş ve nihai kabarma değerleri yaklaşık

0.1 mm civarında kalmıştır. Bu durum, zemin iskeletinin yeniden düzenlenmesi ve boşluk yapısının daha kararlı bir duruma ulaşması ile yakından ilişkilidir. Artan döngü sayılarında donma sırasında oluşan kabarmaların çözülme sonrasında büyük ölçüde geri kazanıldığı, dolayısıyla deformasyon davranışının kalıcı olmaktan ziyade geri dönebilen (elastik) bir karakter kazandığını göstermektedir. %5 CaO katkılı numunelerde benzer bir eğilim gözlenmekle birlikte, donma kaynaklı kabarmaların büyüklüğü referans numunenin yaklaşık yarısı düzeyinde gerçekleşmiştir. Bu numunede kabarma değerleri 4. donma döngüsü sonunda stabil hâle gelmiş ve kalıcı

kabarma miktarı yaklaşık 0.03 mm olarak belirlenmiştir. %5 MgO katkılı numunelerde ise donma-çözölmeye bağlı kabarma davranışı CaO katkılı numunelerle benzerlik göstermiş, 4. donma döngüsünden sonra belirgin bir değişim gözlenmemiştir. MgO katkılı numunelerde ölçülen kabarma değerlerinin referans numunenin yaklaşık %65'i seviyesinde kaldığı belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, her üç numune için de eksenel boy değişimlerinin 4-5 D-Ç döngüsünden sonra stabil hâle geldiği ve katkı maddelerinin donma kaynaklı kabarmaları önemli ölçüde sınırlandırdığı görülmüştür.



Şekil 5. Donma-çözölme döngülerine bağlı olarak meydana gelen numune boy değişimleri

3.3 Farklı deney koşullarında CBR (%) değerlerinin karşılaştırılması

Donma çözölme kaynaklı mukavemet kayıplarını minimize etmek ve mukavemet artışı sağlamak amacıyla kullanılan CaO ve MgO, zemin bünyesinde bulunan mevcut su ile hidratasyon reaksiyonlarına girerek bağlayıcı fazların oluşmasını sağlar. CaO su ile temas ettiğinde hızlı ve yüksek derecede ekzotermik bir hidratasyon reaksiyonu geçirerek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşturur. Bu süreçte zemin içerisindeki suyun bir kısmı tüketilir ve yüksek pH ortamı meydana gelir. Erken yaşta daneler arası bağlanmayı güçlendirerek zeminde hızlı bir mukavemet artışı sağlar (Little, 1999; Al-Mukhtar vd., 2010). MgO ise CaO'ya kıyasla daha düşük reaktiviteye sahip olup su ile daha yavaş ve kontrollü bir hidratasyon süreci sergiler. MgO'nun hidratasyonu $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ve karbonatlaşma reaksiyonları zaman içerisinde gelişerek daha kararlı bağlayıcı fazların oluşmasına katkı sunar. Bu durum, zeminin uzun vadeli dayanımını ve yapısal stabilitesini artırmaktadır. 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 (Yi vd., 2018; Wang vd., 2019; Estabragh vd., 2022; Mosa vd., 2022). Bu farklı reaksiyon kinetikleri, katkı maddelerinin donma-çözölme döngüleri altındaki davranışına da yansımaktadır. CaO katkılı numunelerde daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmekle birlikte, hızlı hidratasyon sürecine bağlı olarak daha rijit bir yapı oluşabilmekte ve çevrimler arasında daha belirgin değişimler gözlenebilmektedir. Buna karşılık MgO katkılı numunelerde, daha yavaş ve kontrollü gelişen bağlayıcı fazlar sayesinde mukavemet gelişimi daha kademeli gerçekleşmekte ve donma-çözölme döngüleri boyunca daha sınırlı değişimlerle karakterize edilen bir davranış ortaya çıkmaktadır (Wentao vd., 2024; Liv d., 2024; Shao vd., 2025)

Donma-çözölme döngülerinin zemin mukavemeti üzerindeki etkisi, farklı zemin türleri ve deney koşulları altında çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir (Liu vd., 2009; Li vd., 2016; Yu vd., 2022). Yapılan çalışmalarda, donma-çözölmeye bağlı mukavemet kayıplarının genellikle ilk döngüde daha belirgin olduğu, ancak çevrim sayısı arttıkça bu kayıpların azalarak belirli bir döngü sayısından sonra durağan bir seviyeye ulaştığı rapor edilmiştir (Çizelge 3). Bu eşik döngü sayısının

çoğunlukla 4-7 D-Ç çevrimi arasında değiştiği belirtilmektedir. Bu eşik döngü sayısından sonra zemin iskeletinde meydana gelen yapısal yeniden düzenlenmelerin tamamlandığı ve ilave D-Ç döngülerinin

mukavemet üzerinde sınırlı bir etki oluşturduğu ifade edilmektedir (Wang vd., 2007; Xie vd., 2015; Tang vd., 20018; Zhou vd., 2018; Gülen vd., 2024).

Çizelge 3. Literatürde D-Ç döngülerine ait detaylar

Kaynak	Sıcaklık (°C)		Süre (saat)		Döngü sayısı	Eşik döngü sayısı
	Donma (D)	Çözülme (Ç)	Donma (D)	Çözülme (Ç)		
Liu vd. (2009)	-5, -10, -15	20	12	12	1-12	7
Wang vd. (2007)	-7	14	18	6	1,3,5,7,10,15,21	7
Tang vd. (2018)	-10	10	3	3	1,3,5,9	5
Xie vd. (2015)	-40	20	12	12	0,1,3,6,9,12,15	6
Zhou vd. (2018)	-6, -12	15	12	12	0, 3, 6, 9, 12	4-6
Liu vd. (2021)	-20	20	12	12	0,1,3,6,10,15	3-6
Hou vd. (2025)	-10	10	12	12	0,1,3,5,7,9,11,13	5-9

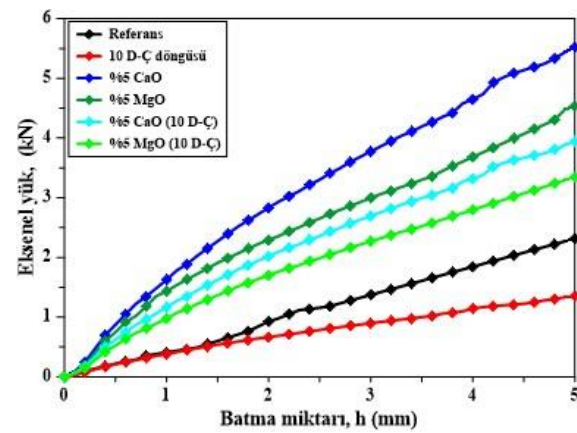
Ancak arazi koşullarında zeminlerin hizmet ömrü boyunca, iklim değişkenliği ve mevsimsel sıcaklık dalgalanmalarına bağlı olarak bu eşik değerin üzerinde çok sayıda D-Ç döngüsüne maruz kalacağı da açıktır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında zeminde oluşabilecek maksimum mukavemet kaybının güvenli tarafta değerlendirilmesi amacıyla, her biri bir donma ve bir çözülme aşamasından oluşan toplam 10 D-Ç döngüsü uygulanmıştır.

Kimyasal katkılarla zemin iyileştirme çalışmalarında katkı türü, katkı oranı, kür süresi ve deneysel koşulların iyileştirme derecesini belirleyen temel parametreler olduğu gösterilmiştir. Wang vd. (2017) MgO katkısını %3, %6 ve %9 oranlarında kullanarak 3–28 gün arasında değişen kür sürelerinde serbest basınç ve konsolidasyon davranışında belirgin iyileşmeler raporlamış; katkı oranı arttıkça mukavemetin yükseldiğini, ancak kür süresinin etkisinin belirli bir noktadan sonra sınırlı kaldığını göstermiştir. Mosa vd. (2022), %0.1–%1.5 MgO katkı oranlarında 28 günlük kür sonrası CBR (%) ve elastisite modülünde önemli artışlar elde etmiş, optimum katkı oranının sınırlı bir aralıkta ortaya çıktığını vurgulamıştır. Nano boyutlu MgO katkılarıyla yürütülen çalışmalarda ise çok daha düşük katkı oranlarında (%0.4–%1.0) dahi mukavemet ve CBR (%) değerlerinde ciddi artışlar sağlandığı, ancak katkı oranı arttıkça gevrek davranışın baskın hâle geldiği rapor edilmiştir (Salem vd., 2020; Ahmadi vd., 2020). Buna ek olarak MgO ve CaO'nun birlikte veya farklı bağlayıcılarla kullanıldığı çalışmalarda, özellikle kür süresi ve reaksiyon ortamının (CO₂ varlığı gibi) nihai dayanımı belirleyici olduğunu göstermiştir (Wang vd., 2019; Estabragh vd., 2022). MgO için yapılan benzer değerlendirme CaO için yapılan deneysel çalışmalarda da rapor edilmiştir (Al-Mukhtar vd., 2010; Noorzad vd., 2018; Sendilvadivelu vd., 2025).

Bu bağlamda, mevcut çalışmada CaO ve MgO katkılarının her biri için %5 oranının seçilmesi, literatürde rapor edilen

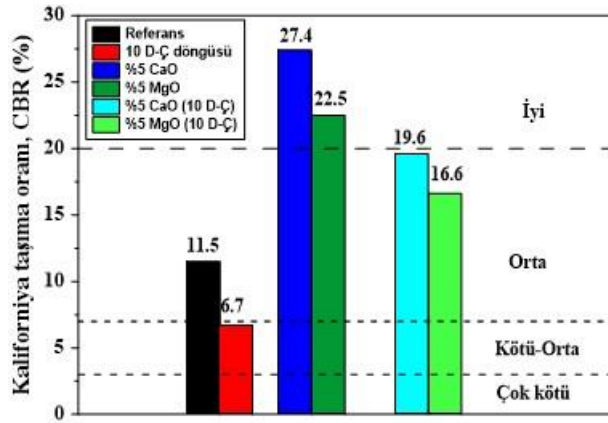
etkin katkı aralıklarını temsil etmesi, aşırı katkıdan kaynaklanabilecek olumsuz etkileri sınırlaması ve D-Ç döngüleri altındaki mukavemet kayıplarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye imkân tanınması nedeniyledir.

MgO ve CaO katkıları, zemin bünyesindeki mevcut suyu kullanarak hidrasyon reaksiyonlarına girdiğinden, katkıli numunelerde şişme potansiyelinin azaldığı gözlenmiştir. Katkısız numunede 96 saatlik bekleme süresi sonunda ölçülen şişme miktarı yaklaşık 1.8 mm iken, bu değer %5 CaO katkıli numunelerde yaklaşık 1.0 mm'ye, %5 MgO katkıli numunelerde ise yaklaşık 1.2 mm'ye düşmüştür. Bu süreç ve D-Ç döngüleri sonrasında CBR deneylerine tabi tutulan numunelere ait yük–batma miktarı eğrileri ve ASTM 1883'e göre belirlenen CBR (%) değerlerindeki değişimler Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'daki yük–batma miktarı ilişkisi için 5 mm'deki yükün standart yüke (19.96 kN) oranlanması ile belirlenen CBR (%) değerleri Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 6. CBR deneyleri için yük-batma miktarı ilişkisi

Referans (katkısız) numunenin CBR (%) değeri 11.5 olarak belirlenmiştir. Bu numunenin 10 D-Ç döngüsü sonrasında CBR (%) değeri yaklaşık %33 azalarak 6.7 seviyesine düşmüştür. Referans numuneye %5 CaO ilavesiyle hazırlanan numunelerde CBR (%) değeri 2.38 kat artarak 27.4'e ulaşmıştır.



Şekil 7. CBR (%) değerlerinin değişimi

Aynı numunenin 10 D-Ç döngüsüne maruz bırakılması sonucunda CBR (%) değeri yaklaşık %28 azalarak 19.6 seviyesine gerilemiştir. Benzer şekilde, %5 MgO katkısı ile hazırlanan numunelerde CBR (%) değeri 22.5 olarak elde

edilirken, D-Ç döngüleri sonrasında bu değer 16.6'ya düşmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde, yalnızca %5 CaO veya %5 MgO katkısı ile CBR (%) değerlerinde iki kattan fazla artış görülmüştür. Donma-çözülme sonrası her iki katkı türünde de CBR değerlerinde %26 ve %28 mertebesinde bir azalma meydana gelmiş olsa da katkıli numunelerin CBR (%) değerleri katkısız ve donma-çözölmeye maruz kalmış referans duruma kıyasla %70'e varan oranlarda daha yüksek kalmıştır.

Çizelge 4 ve Karayolları Teknik Şartnamesi (2020) dikkate alındığında, CBR (%) < 7-8 olan zeminlerin temel ve alt temel tabakalarında kullanımı uygun görülmemektedir. Bu bağlamda, CaO ve MgO katkılarının, D-Ç döngülerine bağlı mukavemet kayıplarını tamamen ortadan kaldırdığı ve incelenen zeminin yol altyapısı uygulamalarında kullanılabilirliğini artırdığı ortaya konulmuştur.

Çizelge 4. Dolgu malzemeleri olarak zeminlerin değerlendirilmesi (Hazırbaba ve Güllü, 2010)

CBR (%)	Değerlendirme	Kullanım Durumu	Sınıflandırma	
			USCS	AASHTO
0-3	Çok kötü	Taban zemini	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Kötü-Orta	Taban zemini	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Orta	Alt temel	OL, ML, CL, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	İyi	Temel, Alt temel	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
>50	Mükemmel	Temel	GW-GM	A1a, A2-4, A3

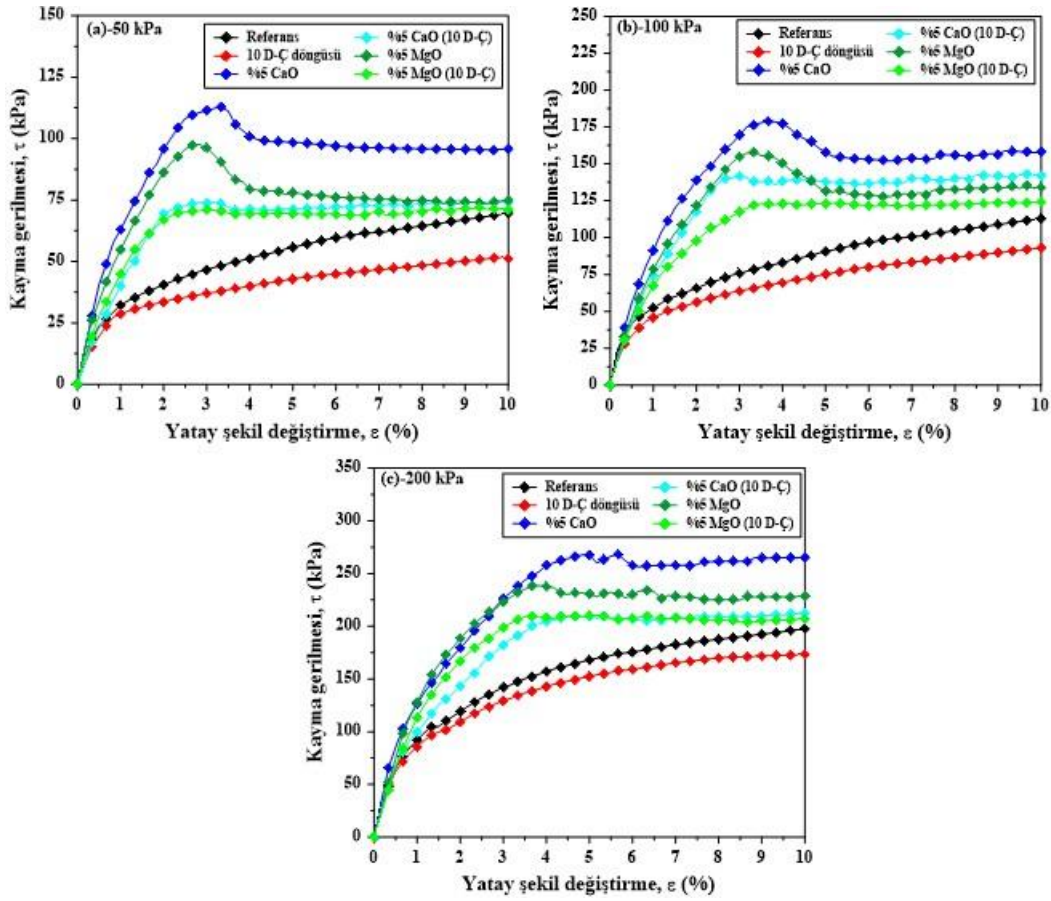
3.3 Farklı deney koşullarında direkt kesme kutusu deney sonuçlarının karşılaştırılması

Direkt kesme kutusu deneyleri kullanılarak katkı maddeleriyle zemin iyileştirmesini inceleyen çalışmalar, katkı ilavesinin zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Nano ve mikro boyutlu kimyasal katkılarla yapılan deneylerde, içsel sürtünme açısı ve kohezyonun katkı oranına bağlı olarak arttığı rapor edilmiştir (Ahmadi vd., 2020; Mirzababaei vd., 2021).

Direkt kesme kutusu deneyleri, Şekil 3b'de gösterilen deney düzeneği kullanılarak CBR deneylerinde uygulanan koşullarla benzer deneysel prosedür izlenerek gerçekleştirilmiştir. Deneyler 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa düşey gerilmeler altında yürütülmüş; bu nedenle her bir deney koşulu için en az üç adet numune hazırlanmıştır. Tüm numuneler standart kompaksiyon sıklığında CBR kalıplarında sıkıştırıldıktan sonra 96 saat suda bekletilmiş ve akabinde uygun numune çıkarıcılar kullanılarak numuneler alınmıştır. Referans numunelerden bir grup bu süre sonunda; bir grupta 10 D-Ç döngüsüne maruz bırakıldıktan sonra direkt kesme kutusu deneylerine tabi tutulmuştur. Benzer deneysel prosedür %5 CaO ve %5 MgO katkılı numunelerde uygulanmıştır. Tüm deneyler 1 mm/dk sabit kesme hızında yürütülmüş ve %10 yatay yer değiştirme değerine ulaşıncaya kadar sürdürülmüştür.

Deneyler sonucunda elde edilen kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme eğrileri değerlendirilmiş; %10 yatay yer değiştirme aralığındaki maksimum kayma gerilmeleri esas alınarak zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir (Şekil 8).

Referans numune ile D-Ç döngülerine maruz bırakılan katkısız numune genel olarak benzer bir davranış sergilemektedir. Eğrilerin genel trendi incelendiğinde, kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme ilişkisinin karakterinin büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, D-Ç etkisi referans numunenin pik kayma gerilmesi değerlerinde belirgin bir azalmaya neden olmuştur. Donma-çözülme sonrası referans numunenin pik kayma gerilmesi değerleri; 50 kPa düşey gerilmeye yaklaşık %28, 100 kPa'da %19 ve 200 kPa'da ise %13 oranında azalmıştır. Bu bulgular, D-Ç döngüleri sonrasında zemin bünyesinde meydana gelen yapısal bozulmalar ve zemin iskeletindeki değişimlerin mukavemet kayıplarına yol açtığını göstermektedir. Ancak, uygulanan düşey gerilmenin artmasıyla birlikte bu kayıpların azaldığı gözlenmiştir. Daha yüksek düşey gerilmeler altında zemin iskeletinin yeniden düzenlenmesi ve daneler arası temasın artması, donma-çözölmenin neden olduğu yapısal zayıflamaların etkisini kısmen azaltmaktadır. Bu durum, zeminin başlangıç koşullarına daha yakın bir mekanik davranış sergilemesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 8. Direkt kesme kutusu deneyleri için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri a) 50 kPa b) 100 kPa c) 200 kPa

%5 CaO ve %5 MgO katkılı numunelere ait kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme ilişkileri incelendiğinde, katkısız referans numunelerden farklı bir davranış sergilendiği görülmektedir. Katkı ilavesiyle numunelerin rijitliğinin artması sonucu, pik kayma gerilmesine daha düşük yatay yer değiştirme değerlerinde ulaşılmıştır. Buna göre, katkılı numuneler 50 kPa düşey gerilmelerde yaklaşık %2, 100 kPa'da %3-4 ve 200 kPa'da ise yaklaşık %4-5 yatay yer değiştirme seviyelerinde pik değere ulaşmaktadır. 50 kPa ve 100 kPa düşey gerilmeler altında pik kayma gerilmesi belirgin bir şekilde gözlenirken, düşey gerilmenin 200 kPa'a yükseltilmesi pik davranışının daha az belirgin hale gelmesine neden olmuştur. Kayma mukavemeti değerleri incelendiğinde, %5 CaO katkılı numunelerde 50, 100 ve 200 kPa düşey gerilmeler altında ölçülen kayma gerilmelerinin referans duruma kıyasla yaklaşık %40-%60 oranında arttığı belirlenmiştir. İyileşme oranının düşük düşey gerilmelerde daha yüksek olduğu, düşey gerilme arttıkça ise bu artışın azaldığı gözlenmiştir. %5 MgO katkılı numunelerde de benzer bir eğilim izlenmiş; ancak kayma mukavemetindeki artış CaO katkısına kıyasla daha sınırlı ve yaklaşık %22-40 aralığında gerçekleşmiştir.

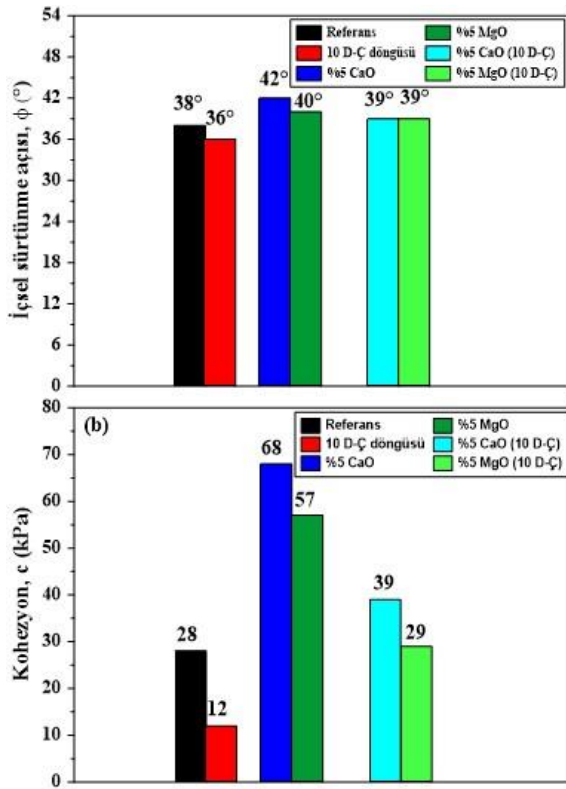
Donma-çözülme döngüleri sonucunda tüm numunelerde mukavemet kayıpları meydana gelmiştir. Katkısız numunelerde bu kayıplar %13 ile %28 arasında

değişmektedir. %5 CaO katkılı numunelerde donma-çözülme sonrası mukavemet kayıpları, uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak %21-33 aralığında gerçekleşmiştir. %5 MgO katkılı numunelerde ise bu oran %12-28 arasında belirlenmiştir. Bununla birlikte, katkılı numunelerin D-Ç döngüleri sonrasında ölçülen kayma gerilmesi değerleri, katkısız referans numunelerinden daha yüksek kalmıştır. Bu bulgular, donma-çözülme kaynaklı mukavemet kayıplarının, bu çalışma kapsamında kullanılan CaO ve MgO katkıları ile önemli ölçüde sınırlandırılabilirdiğini göstermektedir.

%10 yatay şekil değiştirme düzeyinde elde edilen maksimum kayma gerilmeleri esas alınarak belirlenen kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi Şekil 9'da özetlenmiştir. Şekil 9a'daki içsel sürtünme açısı değerleri incelendiğinde, referans numune için bu değer 38° olarak hesaplanmıştır. Numunenin 10 D-Ç döngüsüne maruz bırakılması sonucunda içsel sürtünme açısında yaklaşık 2°'lik bir azalma meydana gelmiştir. %5 CaO ilavesi ile içsel sürtünme açısı yaklaşık 4° artarken, %5 MgO katkısı ile bu artış yaklaşık 2° seviyesinde gerçekleşmiştir.

Donma-çözülme döngüleri sonrasında katkılı numunelerde içsel sürtünme açıları 2-3° civarında azalmalar gözlenmiştir. Bu sonuçlar, deneysel koşullar altında hem katkı ilavesinin hem de D-Ç döngülerinin içsel

sürtünme açısı üzerinde belirgin bir değişime yol açmadığını göstermektedir.



Şekil 9. Kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi a) içsel sürtünme açısı b) kohezyon

Buna karşın, CaO ve MgO'nun su ile girdikleri reaksiyonlar sonucunda bağlayıcı özellik kazanmaları, kohezyon değerlerinde önemli artışlara neden olmuştur. Referans numune için 28 kPa olarak belirlenen kohezyon değeri, 10 D-Ç döngüsü sonrasında 12 kPa seviyesine düşmüştür. %5 CaO katkısı ile kohezyon yaklaşık 2,4 kat artarak 68 kPa değerine, %5 MgO katkısı ile ise yaklaşık 2 kat artarak 57 kPa değerine ulaşmıştır. Donma-çözülme döngüleri sonrasında, zeminde suyun donmasıyla oluşan yaklaşık %9'luk hacim artışına bağlı olarak bu değerler sırasıyla 39 kPa ve 29 kPa seviyelerine gerilemiştir. Ancak bu değerler dahi, katkısız referans numunenin kohezyon değerinin üzerinde olup, katkı maddelerinin donma-çözülme kaynaklı mukavemet kayıplarını önemli ölçüde sınırlandırdığını ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında bir dolgu zemininin donma-çözülme döngülerine bağlı mukavemet değişimleri CBR (%) ve direkt kasma kutusu deneyleri ile değerlendirilmiştir. Donma-çözülme döngülerinden kaynaklı mukavemet kayıplarını minimize etmek ve iyileştirme sağlamak amacıyla %5 CaO ve %5 MgO katkı oranlarının kullanımı araştırılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Donma-çözülme etkisi: Katkısız M1 sınıfı dolgu zemininde 10 donma-çözülme döngüsü sonrasında CBR (%) ve kayma mukavemeti değerlerinde belirgin azalmalar meydana gelmiştir. Bu durum, donma sırasında zemin iskeletinde oluşan yapısal bozulmaların ve çözülme sonrası kalıcı deformasyonların mukavemeti olumsuz etkilediğini göstermektedir.
- Katkıların başlangıç mukavemetine etkisi: %5 CaO ve %5 MgO katkı ilavesi, donma-çözülme uygulanmayan koşullarda zeminin CBR ve kayma mukavemetini iki kattan fazla artırmıştır. Bu artış, katkıların hidratasyon ve bağlayıcı faz oluşumu yoluyla daneler arası bağlanmayı güçlendirmesinden kaynaklanmaktadır.
- Donma-çözülme sonrası performans: Donma-çözülme döngüleri katkılı numunelerde de mukavemet kaybına neden olmuş; ancak bu kayıplar katkısız zemine kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası CBR (%) ve kayma mukavemeti değerleri, katkısız referans zeminden belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur.
- CaO ve MgO'nun karşılaştırılması: CaO katkısı, MgO'ya kıyasla hem CBR (%) hem de kayma mukavemeti açısından daha yüksek iyileştirme sağlamıştır. MgO ise daha sınırlı artışlara rağmen donma-çözülme etkilerine karşı daha dengeli ve kararlı bir davranış sergilemiştir.
- Mühendislik uygulamaları açısından değerlendirme: Bulgular, %5 CaO ve %5 MgO ile yapılan zemin iyileştirmenin donma-çözülme maruz kalan dolgu zeminlerinde mukavemet kayıplarını önemli ölçüde azalttığını ve zeminlerin yol altyapısı ve benzeri mühendislik uygulamalarında güvenle kullanılabilirliğini artırdığını ortaya koymaktadır.

5. Kısıtlılıklar ve Öneriler

Bu çalışmadaki bulgular, belirli deneysel kabuller ve sınırlılıklar çerçevesinde değerlendirilmelidir. Deneysel programda yalnızca tek bir katkı oranı, sabit optimum su muhtevası ve sınırlı bir kür süresi ele alınmıştır. Farklı katkı oranları, değişken su muhtevaları ve daha kısa ya da uzun kür sürelerinin, özellikle donma-çözülme döngüleri altındaki mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerinde farklı etkiler oluşturabileceği açıktır. Ayrıca çalışma, tek bir zemin türü ve kontrollü laboratuvar koşulları ile sınırlandırılmış; arazi ölçeğindeki homojensizlikler ve uzun süreli çevresel etkiler dikkate alınmamıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda katkı oranı ve kür koşullarının sistematik olarak incelenmesi, başlangıç su muhtevası ile farklı donma-çözülme senaryolarının etkilerinin değerlendirilmesi önerilmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Fikir Sahibi, Araştırma, Metodoloji, Deney, Yazma – Orijinal Taslak, Görselleştirme

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler. Veri kümeleri istek üzerine mevcuttur. Bu makalenin sonuçlarını destekleyen ham veriler, yazarlar tarafından herhangi bir çekince olmaksızın sunulacaktır.

6. Kaynaklar

- Ahmadi, H., Janati, S., & Chenari, R. J. (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/s10706-019-01179-7>
- 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>
- Anisimov, O. A., Shiklomanov, N. I., & Nelson, F. E. (1997). Global warming and active-layer thickness: Results from transient general circulation models. *Global and Planetary Change*, 15(3–4), 61–77. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(97\)00009-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(97)00009-X)
- Bilodeau, J.-P., Doré, G., & Pierre, P. (2008). Gradation influence on frost susceptibility of base granular materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(6), 397–411. <https://doi.org/10.1080/10298430701792108>
- Bui, B., Morel, J.-C., Tran, V.-H., Hans, S., & Oggero, M. (2016). How to use in-situ soils as building materials. *Procedia Engineering*, 145, 1119–1126. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.144>
- Chamberlain, E. J., Iskander, I., & Hunsiker, S. (1990). Effect of freeze–thaw on the permeability and macrostructure of soils. In *Proceedings of the International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agriculture, Range, and Forest Lands (Special Report 90-1, pp. 145–155)*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- ClimPACT3.3. (n.d.). Indices for monitoring climate extremes. <https://climimpact-sci.org/indices/>
- Croudace, I. W., & Rothwell, R. G. (2015). *Micro-XRF studies of sediment cores*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5>
- de Abreu, V. H. S., Santos, A. S., & Monteiro, T. G. M. (2022). Climate change impacts on the road transport infrastructure: A systematic review on adaptation measures. *Sustainability*, 14(14), 8864. <https://doi.org/10.3390/su14148864>
- Eigenbrod, K. D. (1996). Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4), 529–537. <https://doi.org/10.1139/t96-079-301>
- Estabragh, 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/10.1080/10298436.2020.1739667>
- 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), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su151512000>
- Gratchev, I. (2020). *Rock mechanics through project-based learning*. CRC Press/Balkema. <https://doi.org/10.1201/9781003047028>
- Gülen, M., Aslan Fidan, A., Köşeli, A. S., & Kılıç, H. (2024). Effect of freeze–thaw on CBR in soils with different gradation and mineralogy. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 35(4), 27–47. <https://doi.org/10.18400/tjce.1349440>
- Gülen, M., Selçuk, M. E., & Koçan, M. (2025). Donma-çözülme döngülerinin İstanbul ili ve çevresinde yer alan kireçtaşının CBR (%) değerlerine etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(5), 1126–1137. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1607298>
- Hazirbaba, K., & Güllü, H. (2010). California bearing ratio improvement and freeze–thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1–2), 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.006>
- Hendry, M. T., Onwude, L. U., & Sego, D. C. (2016). A laboratory investigation of the frost heave susceptibility of fine-grained soil generated from the abrasion of a diorite aggregate. *Cold Regions Science and Technology*, 123, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.12.004>
- Hou, S., Yue, Z., Wang, J., & Wang, B. (2026). Freeze–thaw effects on the mechanical behavior of the ice–soil interface in cultivated black soils of Northeast China. *Water*, 18(3), 378. <https://doi.org/10.3390/w18030378>
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2020). *Karayolu teknik şartnamesi (Yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işler)*. KGM. <https://www.kgm.gov.tr>
- Kartal, V., Yavuz, V. S., Arıman, S., Kaya, K., Alkanjo, S., & Simsek, O. (2024). Climate change trends in the Southeastern Anatolia region of Türkiye: precipitation and drought. *Journal of Water and Climate Change*, 15(12), 5893–5919.
- Kawabata, S., Ishikawa, T., & Kameyama, S. (2016). Effects of freeze–thaw history on bearing capacity of granular base course materials. *Procedia Engineering*, 143, 828–835. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.104>
- Klöffel, T., Larsbo, M., Jarvis, N., & Barron, J. (2024). Freeze–thaw effects on pore space and hydraulic properties of compacted soil and potential consequences with climate change. *Soil and Tillage Research*, 239, 106041. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106041>
- Kuba, M. (2018). *Impact of climate changes on civil engineering structures (Master's thesis)*. Brno University of Technology.

- Kum, G., & Çelik, M. A. (2014). Impacts of global climate change on the Mediterranean Region: Adana as a case study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 120, 600-608.
- Kvealai, S., John, N. J., & Patel, A. (2023). Effects of climate change on geotechnical infrastructures: State of the art. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 16878–16904. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24788-7>
- Li, W., Huang, K., Chen, F., Li, L., Cheng, Y., & Yang, K. (2024). Engineering Properties and Microstructure of Soils Stabilized by Red-Mud-Based Cementitious Material. *Materials*, 17(10), 2340. <https://doi.org/10.3390/ma17102340>
- Li, J., Chang, D., & Yu, Q. (2016). Influence of freeze–thaw cycles on mechanical properties of a silty soil. *Engineering Geology*, 210, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.006>
- Li, S.-Y., Cao, G.-H., Du, Y.-J., Zhang, 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>
- Little, D. N. (1999). Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates. National Lime Association.
- Liu, H., Shan, W., Guo, Y., Yang, L., & Sun, Y. (2009). The effect of freeze–thaw on shear strength of roadbed soil in different states of water content and soil density. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Engineering*.
- Liu, K., Ye, W., & Jing, H. (2021). Shear strength and microstructure of intact loess subjected to freeze–thaw cycling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, Article 1234567. <https://doi.org/10.1155/2021/1234567>
- Liu, X., Cheng, H., Chen, H., Guo, L., Fang, Y., & Wang, X. (2022). Theoretical study on freezing separation pressure of clay particles with surface charge action. *Crystals*, 12, 1304. <https://doi.org/10.3390/cryst12091304>
- Mirzababaei, M., Karimiazar, J., Sharifi Teshnizi, E., Arjmandzadeh, R., & Bahmani, S. H. (2021). Effect of nano-additives on the strength and durability characteristics of marl. *Minerals*, 11(10), 1119. <https://doi.org/10.3390/min11101119>
- 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.
- Nairn, J. R., & Fawcett, R. G. (2013). Defining heatwaves: Heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia (CAWCR Technical Report No. 60). Centre for Australian Weather and Climate Research. https://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR_060.pdf
- Noorzad, R., & Motevalian, S. (2018). Improvement of clayey soil with lime and industrial sludge. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 2957–2966. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0515-x>
- Oghenero, A. E., Akpokodje, E. G., & Tse, A. C. (2014). Geotechnical properties of subsurface soils in Warri, Western Niger Delta, Nigeria. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 4(1), 89–102.
- Özgan, E., Serin, S., Ertürk, S., et al. (2015). Effects of freezing and thawing cycles on the engineering properties of soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 52, 95–99. <https://doi.org/10.1007/s11204-015-9312-1>
- Pantoja Porro, R., Li, Z., & O'Donovan, J. (2025). The impact of climate change on underground transport infrastructure: A review. *Geotechnical Research*, 12(2), 85–101. <https://doi.org/10.1680/jgere.24.00047>
- Peñuelas, J., & Sardans, J. (2021). Global change and forest disturbances in the Mediterranean Basin: Breakthroughs, knowledge gaps, and recommendations. *Forests*, 12(5), 603. <https://doi.org/10.3390/f12050603>
- Pham, T. A. (2025). Climate change impacts on geotechnical infrastructure: Role of unsaturated soil mechanics for adaptation. *Frontiers in Built Environment*, 11, Article 1666334. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1666334>
- Qi, J., Ma, W., & Song, C. (2008). Influence of freeze–thaw on engineering properties of a silty soil. *Cold Regions Science and Technology*, 53, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.05.003>
- Qu, Y. L., Chen, G. L., Niu, F. J., Ni, W. K., Mu, Y. H., & Luo, J. (2019). Effect of freeze–thaw cycles on uniaxial mechanical properties of cohesive coarse-grained soils. *Journal of Mountain Science*, 16(9), 2159–2170. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5561-3>
- Rolim Barbi, P. S., Tavassoti, P., & Tighe, S. L. (2023). Climate change impacts on frost and thaw considerations: Case study of airport pavement design in Canada. *Applied Sciences*, 13(13), 7801. <https://doi.org/10.3390/app13137801>
- 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.v8i1.1124>
- Sarker, D., & Wang, J. X. (2022). Moisture influence on structural responses of pavement on expansive soils. *Transportation Geotechnics*, 35, Article 100773. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100773>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Sendilvadelu, A., Dhveapani, B., Vijayasimhan, S., & Kalaiselvi, S. P. P. (2025). Sustainable stabilization of clay soil using lime and Oryza sativa waste-derived dried solid digestate. *Sustainability*, 17(18), 8447. <https://doi.org/10.3390/su17188447>
- Shao, L., Yu, W., You, Q., Wang, S., Du, X., He, B., ... & Bao, C. (2025). Effects of Carbon–Magnesium Reactions on the Physical and Mechanical Properties of Lightweight Carbonated Stabilized Soil. *Buildings*, 15(19), 3571.

- Tang, L., Cong, S., Geng, L., Ling, X., & Gan, F. (2018). The effect of freeze–thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils. *Cold Regions Science and Technology*, 145, 197–207.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.004>
- Tester, R., & Gaskin, P. (1996). The effect of fines content on the frost susceptibility of a crushed limestone. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4), 678–680.
<https://doi.org/10.1139/t96-079>
- Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Heikinheimo, M., Kellomäki, S., Peltola, H., Strandman, H., & Väisänen, H. (2001). Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Climate Research*, 17(1), 63–72.
<https://doi.org/10.3354/cr017063>
- Viklander, P. (1998). Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze–thaw. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 471–477.
<https://doi.org/10.1139/t98-027>
- Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X., & Wen, Z. (2007). Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai–Tibet clay. *Cold Regions Science and Technology*, 48(1), 34–43.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.002>
- 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.2016.1237582>
- Wang, D., Zhu, J., & He, F. (2019). CO₂ 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>
- Wang, J., Qu, X. L., Wu, C. L., & Xiang, Y. M. (2013). Experimental research on shear strength of subgrade soil and plasticity index under different freeze–thaw cycles. *Applied Mechanics and Materials*, 256–259, 43–47.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.43>
- Wei, Z., Yang, W., Zhai, C., et al. (2023). Freezing characteristics and microstructural damage evolution of granular materials in cold regions under freezing–thawing cycles. *Environmental Earth Sciences*, 82, 191.
<https://doi.org/10.1007/s12665-023-10865-8>
- Xiang, B., Liu, E., & Yang, L. (2022). Influences of freezing–thawing actions on mechanical properties of soils and stress and deformation of soil slope in cold regions. *Scientific Reports*, 12(1), 5387.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-09387-2>
- Xie, S., Qu, J., Lai, Y., Zhou, Z., & Xu, X. (2015). Effects of freeze–thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai–Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, 12, 999–1009.
<https://doi.org/10.1007/s11629-014-3355-8>
- Wentao, L., Junde, Q., & Yaolin, Y. (2024). Strength and leaching behavior of CaO- and MgO-treated Cd-contaminated soils subjected to partial and full carbonation. *Journal of CO₂ Utilization*, 88, 102953.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102953>
- Yang, B., Qin, Z., Zhou, Q., Li, H., Li, L., & Yang, X. (2020). Pavement damage behaviour of urban roads in seasonally frozen saline ground regions. *Cold Regions Science and Technology*, 174, Article 103035.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103035>
- Yi, Y., Gu, L., & Liu, S. (2018). Microstructural and mechanical properties of soft soil stabilized by reactive MgO. *Construction and Building Materials*, 174, 168–177.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.109>
- Yu, Z., Fang, J., Xu, A., & Zhou, W. (2022). The study of influence of freeze–thaw cycles on silty soil in seasonally frozen soil regions. *Geofluids*, 2022, Article 9876543.
<https://doi.org/10.1155/2022/9876543>
- Zhang, F., Jing, R., Feng, D., & Lin, B. (2015). Mechanical properties and an empirical model of compacted silty clay subjected to freeze–thaw cycles. In *Innovative materials and design for sustainable transportation infrastructure* (pp. xx–xx).
- Zhang, J. W., Murton, J., Liu, S. J., Sui, L. L., Zhang, S., Wang, L., et al. (2021). Sensitivity and regression analysis of acoustic parameters for determining physical properties of frozen fine soil with ultrasonic test. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54(1), qjagh2020-021.
<https://doi.org/10.1144/qjagh2020-021>
- Zhou, Z., Ma, W., Zhang, S., Mu, Y., & Li, G. (2018). Effect of freeze–thaw cycles on mechanical behaviors of frozen loess. *Cold Regions Science and Technology*, 146, 9–18.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.009>