

Donma-Çözülme Döngülerinin İstanbul İli ve Çevresinde Yer Alan Kireçtaşının CBR (%) Değerlerine Etkisi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 25.12.2024

Kabul/Accepted: 16.03.2025

Yayımlandı/Published: 01.10.2025

The Effect of Freeze-Thaw Cycles on CBR (%) of Limestone in and around Istanbul

Murat GÜLEN^{1*} , Murat Ergenekon SELÇUK²  Mehtap KOÇAN² ¹ Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye² Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Kullanım amacına göre geoteknik yapılarının inşasında farklı dolgu malzemeleri tercih edilmektedir. Dolgu malzemelerinin temini ve uygulama sahasına iletimi büyük nüfuslu yerleşim yerlerinde çevre kirliliğine, zaman, iş gücü ve ekonomik kayıplara neden olur. Bu olumsuzlukları minimize etmek için yapının inşa edildiği bölgeden çıkan uygun nitelikli kazı malzemesinin kullanımı amaçlanır. İnşa edilecek yapının performansı ve stabilitesi dolgu malzemesine ait tasarım parametrelerinin ve bu parametrelerin hizmet ömrü boyunca değişiminin doğru bir şekilde tahmin edilmesine bağlıdır. Özellikle donma-çözülme döngülerinin zemin iç yapısında meydana getirdiği değişimler zeminlerin mukavemetinde önemli değişimlere neden olur. İklim değişikliğiyle birlikte hava durumundaki düzensizlik, yerel zeminlerin içinde veya üzerinde inşa edilen yapılar için dikkate alınması gereken bir durumdur. Bu çalışma, İstanbul il sınırları içerisindeki altı farklı bölgede yol altyapısı dolgusu ve donatılı istinat duvarlarında dolgu malzemesi olarak kullanılan, içerisinde farklı oranlarda ve farklı özelliklerde ince dane içeren kireçtaşının donma-çözülme döngüleri sonucunda mukavemetindeki değişimleri incelemektedir. Özellikle mukavemetteki bu değişim ile kireçtaşının ortalama dane çapı ve likit limit değerleri arasındaki ilişki açıklanmıştır. Numunelerin mukavemetinde meydana gelen bu değişim California Bearing Ratio (CBR %) değerlerindeki azalma ile ifade edilmiştir. Sonuçlar, CBR(%) değerlerinde, -20 °C'de 24 saat donma ve +20 °C'de 24 saat çözülme uygulanan numunelerde 10. döngü sonunda %37'ye kadar bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu azalma miktarı, numunelerin likit limitinin artmasıyla artarken, ortalama dane çapının artmasıyla azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: CBR (%); Kireçtaşı; Donma-çözülme; Dane çapı dağılımı; Don kabarması

Abstract

Different backfill materials are chosen for geotechnical structures based on their intended use. However, transporting these materials to construction sites can cause environmental pollution, as well as time, labor, and economic losses. To minimize these issues, it is beneficial to use locally sourced excavation materials. The performance and stability of the structure to be built depend on the accurate prediction of the design parameters of the backfill materials and their variation over the service life. In particular, changes in the internal structure of soils caused by freeze-thaw cycles cause significant changes in the strength of soils. The irregularity in the weather with climate change is a situation that needs to be considered for structures built in or on local soils. This study investigates changes in the strength of limestone containing properties of fine grains as a result of freeze-thaw cycles. The limestone is used as backfill in road infrastructure and reinforced retaining walls in different regions within the Istanbul boundaries. In particular, the relationship between changes in strength and the mean grain size and liquid limit of the limestone was examined. The variation in strength was expressed as a reduction in California Bearing Ratio (CBR %) values. The results show that CBR(%) values decreased by up to 37% after the 10th cycle for samples subjected to freezing at -20°C for 24 hours and thawing at +20°C for 24 hours. This reduction is more pronounced as the liquid limit of the samples increases and decreases as the mean grain size increases.

Keywords: CBR(%); Limestone; Freeze-thaw; Grain size distribution; Frost heave

1. Giriş

Binalar, köprü, otoyollar, tüneller, gömülü boru sistemleri, barajlar, vb. inşaat mühendisliği uygulamaları üzerinde inşa edildikleri zemin özelliklerinden etkilenir (Roy ve Bhalla 2017, Laskar ve Pal 2012). Doğal bir yapısı malzemesi olan zeminlerin özellikleri, ulaşılabilirliği ve maliyeti dikkate alındığında toprak yapıları, baraj kil çekirdekleri, katı katık depolama sahaları ve donatılı duvarlar gibi geoteknik uygulamalarında kullanılmaktadır.

Bu yapıların stabiliteleri sağlamak ve hizmet süresi boyunca meydana gelecek yapısal hasarları minimize etmek için zemin özelliklerinin ve bu özelliklerin hizmet süresi boyunca değişiminin değerlendirilmesi gerekir (Bui vd. 2016, Youdeowei vd. 2013, Oghenero vd. 2014, Beju ve Mandal 2018, Al-Abri ve Mohamedzein 2010). Uygun özelliklere sahip zeminlerin fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özellikleri dikkate alınır (Dereli 2024, Croudace ve Rothwell 2015, Gratchev 2020, Baradan

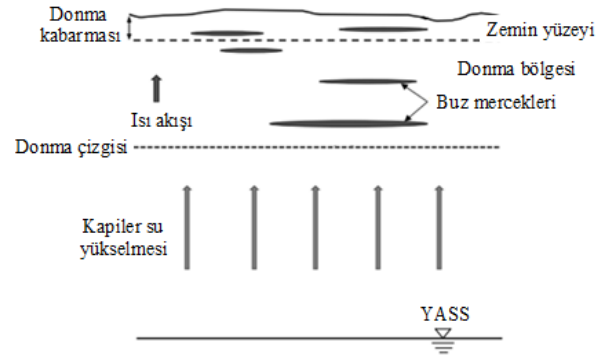
2020, Vallejo ve Ferrer 2014, Gere ve Goodno 2012). Bu özelliklere göre tercih edilen zeminler, yapının güvenliği için zeminlerin oturmasını, hacimsel değişimini, taşıma gücü kayıplarını ve stabilite sorunlarını minimize eder (Holtz vd. 2023).

Yer kabuğunun hacimce %95'i magmatik/metamorfik kayalar ve %5'i tortul kayalardan oluşurken, alan olarak ise %75'i tortul kayalar ve %25'i de magmatik/metamorfik kayalardan oluşur (Lutgens vd. 2012). Türkiye genelindeki agrega işletmelerinde kullanılan sediment kökenli karbonatlı kayalar (kireçtaşı, dolomit ve kalsit), detritik kayalar (kumtaşı vb.) ve volkanik kökenli kayaların (bazalt ve andezit) üretim dağılımı dikkate alındığında %96 karbonat kökenli kayalardan, %3 volkanik kökenli kayalardan ve %1 detritik kayalardan meydana gelir (Öztürk 2007). Bu oranlar dikkate alındığında geoteknik uygulamalar için yapılan kazı işlerinde karşımıza sediment kökenli kayalar sıklıkla çıkmaktadır. Bu malzemelerin fiziksel ve mühendislik özellikleri dikkate alındığında yapı malzemesi, drenaj, yol alt yapısı vb. uygulamalarda dolgu malzemesi olarak kullanımı farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Yılmaz 2012, Yağız 2010, Poernomo 2021, Brooks 2011, Cravotta ve Trahan 1999).

Dayanma yapıları içerisinde yer alan donatılı duvarlar, sismik açıdan riskli bölgelerde geleneksel istinat yapılarına alternatif olarak sıkça tercih edilmektedir. Bu tür yapılar sismik etkilere maruz kaldığında çekme gerilmesine çalışan donatılar sayesinde küçük deformasyonlar meydana getirirken, rijit istinat duvarında büyük yatay ötelenme yaparak hasar görür (Balaban, 2020). Kullanımı her geçen artan donatılı duvarların inşası için tercih edilen donatı türü, aralığı ve sıklığının yanı sıra dolgunun dane çapı dağılımı ve ince dane oranı da donatılı duvarın stabilitesini etkiler (Durgunluoğlu vd. 2018, Balaban vd. 2020, Riccio vd. 2014, Yang vd. 2012).

Farklı yüksekliklerde inşa edilen donatılı duvarlar mevsimsel iklimsel koşullara bağlı olarak meydana gelen donma-çözülme döngülerinden etkiler. Zemin boşluklarında yer alan suyun donması sonucu hacmi %9 oranında artar ve buz mercikleri daneleri birbirinden uzaklaştırarak zemin yapısını ve dane dizilimini bozar (Mitchell ve Soga 2005). Aynı döngü sıcaklıkların artmasıyla tersine döner. Fakat zemindeki kalıcı deformasyonlar drenajsız kayma mukavemetini, kıvam limitlerini, içsel sürtünme açısını, permeabilitesini, CBR(%) değerini vb. özelliklerinin kalıcı olarak değiştirir (Zhang vd. 2015, Alkire vd. 1982, Chamberlain vd. 1990, Culley 1971, Leroueil vd. 1991, Eigenbrod 1996). Şekil 1'de donma-çözülme döngülerine maruz kalan bir zemin yapısı ve

meydana gelen hacimsel değişim sunulmuştur.



Şekil 1. Don kabarmasının oluşumu (Mitchell ve Soga 2005)

Genel olarak donma-çözülme döngülerine maruz kalan hassas zeminler için belirli bir döngü sayısından sonra hacimsel değişim veya boy değişimi ihmal edilebilir seviye kadar düşer (Viklander 1998). Bu durum zeminlerin belirli bir döngü sayısından sonra iç yapısında değişimin olmadığını ve mukavemet kaybının maksimum olduğu döngüleri ifade eder (Wang vd. 2015, Zhou vd. 2018, Xie vd. 2015, Tang vd. 2018, Yu vd. 2022). Yapılan çalışmalarda farklı oranlarda dona karşı hassas zemin içeren numuneler için mukavemet kaybının değişkenlik gösterdiği rapor edilmiştir (Liu vd. 2021, Liu vd. 2016, Zhang vd. 2015, Wang vd. 2013, Ma vd. 2012). Buna ek olarak donma çözülmenin CBR(%) değerlerine etkisi farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Gülen vd. 2024, Kawabata vd. 2016, Işık vd. 2014). Işık vd. (2014), donma-çözülme döngülerinin CBR(%) değerlerinde %21 ila %86 arasında değişen bir azalmaya neden olduğunu ve bu azalmanın zeminlerin likit limit değerlerinin artışına paralellik gösterdiğini belirtmişlerdir. Gülen vd. (2024) farklı dane çapı dağılımlarına ve farklı oranlarda ince dane içeren 12 zemin için donma-çözülmenin CBR(%) değerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmalarda CBR(%) değerlerinin %40 ile %70 aralığında azaldığını ve mukavemetteki bu değişimin zeminlerin ortalama dane çapının (D_{50}) artışına bağlı olarak azaldığını ifade edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, İstanbul İli ve çevresinde yaygın olarak bulunan, karayolu altyapısı ve donatılı istinat duvarlarında dolgu malzemesi olarak sıkça tercih edilen kireçtaşı'nın donma-çözülme döngülerinin, ortalama dane çapı ve likit limit değerlerinin CBR(%) değerlerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

Farklı bölgelerden temin edilen kireçtaşı numunelerinin laboratuvar ortamında belirlenen fiziksel özellikleri ve gerçekleştirilen deneysel çalışmalar alt başlıklar halinde açıklanacaktır.

2.1 Kireçtaşı numunelerinin fiziksel özellikleri

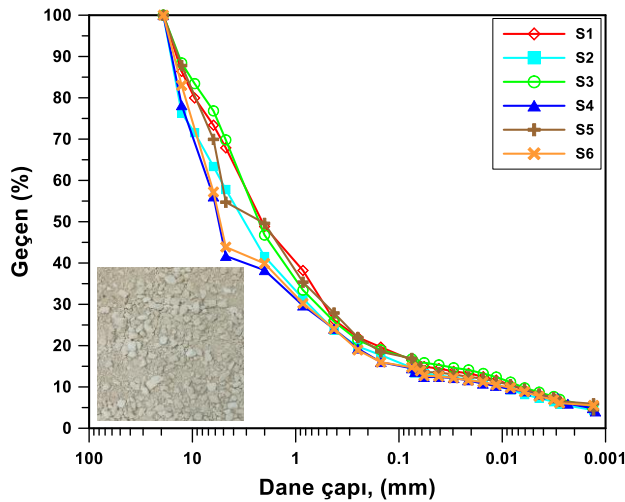
Bu çalışma kapsamında İstanbul İl sınırları içerisindeki altı farklı bölgeden alınan örselenmiş toplam altı kireçtaşı numunesi 105 °C’de kurutulduktan sonra kullanılmıştır. Modifiye kompaksiyon ve CBR deneyleri için sıkıştırma aşamaları ASTM D698 uygun olarak 19.1 mm çapından daha büyük olan daneler (tüm malzemenin yaklaşık %30-

%40) çıkarıldıktan sonra 19.1 mm ‘den geçen daneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu numuneler için Yıldız Teknik Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında zeminlerin fiziksel özelliklerini belirlemek için likit limit, plastik limit, su emme, özgül ağırlık, hidrometre, elek analizi ve Los Angeles aşınma deneyleri yapılarak sonuçları Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Kireçtaşı numunelerinin fiziksel özellikleri

Özellikler	Kireçtaşı numuneleri					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Özgül ağırlık, Gs	2.68	2.69	2.68	2.67	2.69	2.70
Ortalama dane çapı, D ₅₀ (mm)	2.05	3.00	2.30	5.40	3.50	5.30
Çakıl oranı (%)	32.00	42.20	30.20	58.30	45.20	56.10
Kum oranı (%)	51.50	43.20	53.00	27.20	37.80	29.20
Silt oranı (%)	11.00	9.60	10.80	10.00	9.00	9.00
Kil oranı (%)	5.50	5.00	6.00	4.50	6.00	5.70
Likit limit, LL (%)	22.70	23.20	22.60	38.50	39.0	37.50
Plastik limit, PL (%)	14.90	14.60	14.40	23.80	22.70	23.00
Plastisite indisi, PI (%)	7.80	8.60	8.20	14.70	16.30	14.50
Zemin sınıfı (USCS)	SC	SC	SC	GC	GC	GC
Zemin sınıfı (AASHTO)	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-6	A-2-6	A-2-6
Los Angeles aşınma oranı (%)	40.10	41.00	37.40	44.50	42.70	43.40
Su emme oranı, Sr (%)	2.84	2.80	2.75	3.20	3.40	3.10

Her numune için 3 kg etüv kuru malzemenin iri ve ince malzeme oranları ıslak analiz ile belirlenmiştir. No:200 elekten geçen zeminler, ASTM D422-63’e uygun olarak hidrometre deneyine; No:200 elek üstünde kalan zeminler ise ASTM D1140-19’a göre elek analizine tabi tutulmuştur. Aynı etüv kuru malzemeler kullanılarak, No:40 elekten geçen zeminler üzerinde ASTM D854-14 ve ASTM D4318-17 dikkate alınarak sırasıyla özgül ağırlık, likit limit ve plastik limit deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zeminlerin hidrometre, elek analizi ve özgül ağırlık deney sonuçlarına belirlenen dane çapı dağılımları Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Kireçtaşı numuneleri için dane çapı dağılımları

Çizelge 1’deki kil + silt ve kum + çakıl oranları benzerlik göstermektedir. Özellikle, ince dane oranının %14.6- %16.8 gibi dar bir aralıkta değişmesine ek olarak, bu oran içindeki kil ve silt miktarları da birbirine paraleldir. Ancak, granüler zemin bileşimindeki kum ve çakıl oranları farklılık göstermektedir. Bu durum, farklı dane çapı dağılımlarının ve dolayısıyla farklı D₅₀ değerlerinin CBR(%) değerleri ile bu değerlerin değişimi üzerindeki etkisinin açıklanmasında önemli rol oynamıştır.

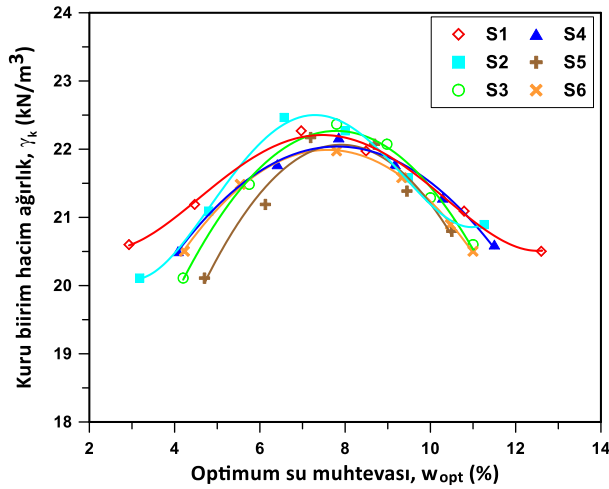
Kireçtaşı numunelerinin su emme oranı, ASTM C97 standardına göre belirlenmiştir. Yıkanan numuneler etüvde 110±5 °C’de kurutulmuş ve sabit kütleye ulaştıklarında kuru kütleleri ölçülmüştür. Akabinde, numuneler 24 saat suda bekletildikten sonra yüzeylerindeki su alınarak tekrar tartılmış ve su emme oranları hesaplanmıştır (Şekil 3a).

Buna ek olarak, her numune ASTM C131/C131M-20’ye göre Los Angeles aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Deney öncesinde numuneler yıkanarak 110±5 °C’de etüvde kurutulmuş ve ilgili standartta belirtilen ‘B’ ve ‘D’ gradasyonlarına uygun şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler çelik bilyeler ile birlikte Los Angeles aşınma cihazında 30 devir/dakikada toplam 500 devir döndürülerek aşındırılmıştır (Şekil 3b). Deney sonrası, numune 1.7 mm çaplı elekten elenmiş, elek üstü malzeme yıkanarak tekrar kurutulmuş ve kütle kaybı belirlenerek Los Angeles aşınma yüzdesi hesaplanmıştır.



Şekil 3. Laboratuvar deneyleri a) su emme deneyi b) Los Angeles aşınma deneyi

Her numune için 19.1 mm'den geçen daneler kullanılarak altı farklı su muhtevasında yapılan modifiye kompaksiyon deneylerinden elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Kireçtaşı numuneleri için kompaksiyon eğrileri

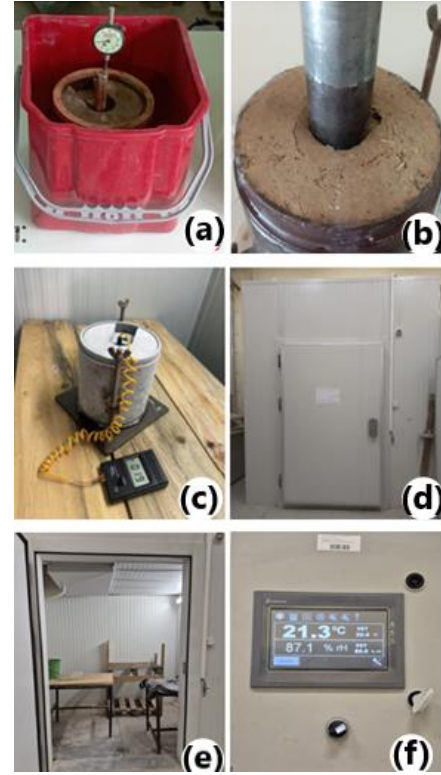
Bu eğriler dikkate alınarak belirlenen optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim ağırlık değerleri (γ_{kmax}) Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2: Kompaksiyon parametreleri

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
w_{opt} (%)	7.6	7.3	7.8	7.9	7.9	7.6
γ_{kmax} (kN/m ³)	22.2	22.5	22.4	22.1	22.4	22.0

2.2 Deneyel metot

CBR deneyleri için Şekil 4'te sunulan her bir numune için belirlenen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri dikkate alınarak numuneler hazırlanmıştır. Deneyel çalışmalara ait detaylar Şekil 5'te sunulmuştur. ASTM D1883-21'e göre CBR kalıbında sıkıştırılan numuneler 4.5 kg'lık bir yük altında 96 saat boyunca su içerisinde bekletilmiştir (Şekil 5a). Numunelerde bu süre boyunca meydana gelen şişme miktarları ölçülmüştür. Kontrol numuneleri olarak adlandırılan bu numunelerin CBR(%) değerlerini belirlemek için numuneler 96 saat sonunda aksel olarak yüklenmiştir (Şekil 5b).



Şekil 5. Deneylere ait detaylar a) suda 96 saat bekleme b) yükleme c) sıcaklık kontrolü d-f) donma-çözülme kabini

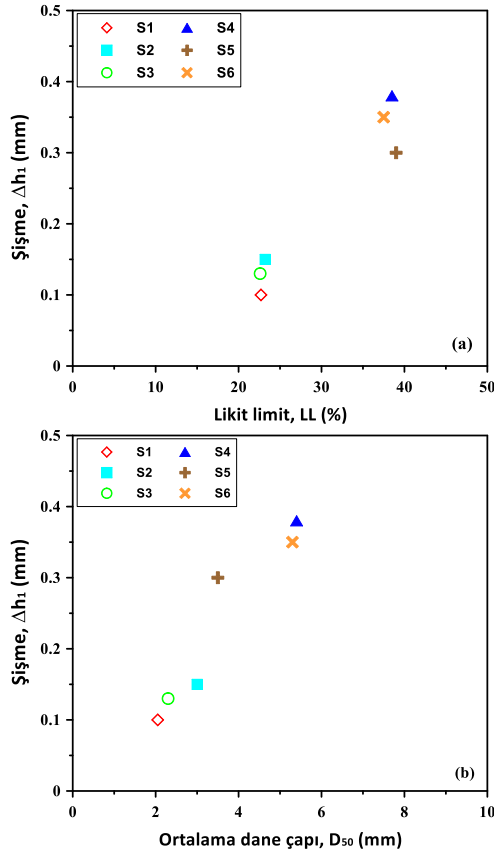
Donma-çözülme döngülerinin CBR(%) değerlerine etkisini belirlemek için aynı deney prosedüründe hazırlanan ve 96 saat suda bekletilen numuneler ASTM5918 göre kapalı sistem olarak adlandırılan ve sistem içinde su muhtevasının değişmediğini kabul edilen deney koşullarında otomatik kontrol panelinden 24 saat -20 °C'de ve %0 nemde donmaya; 24 saat +20 °C ve %80 nemde çözülmeye maruz bırakılmıştır (Şekil 5d-f). Bir donma ve bir çözülmenin bir döngüye karşılık geldiği bu süre sonunda numuneler CBR deneylerine tabi tutulmuş ve yük-batma miktarı ilişkisi belirlenmiştir. Aynı deneysel prosedüründe tekrardan hazırlanan ve 10 döngüye maruz kalan numunelerin de CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin donma-çözülme döngülerinde numunelerin donup donmadığını test etmek için ekstra numuneler hazırlanmış ve sıcaklık kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri donma için -19 °C ve çözülme için 21°C ölçülmüştür (Şekil 5c).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Dane çapı dağılımının ve LL (%)'nin şişmeye ve kabarmaya etkisi

Zeminlerin ince dane oranı, spesifik yüzey alanı ve mineraloji özellikleri donma-çözülme süreçlerine karşı hassas olan zeminlerde don kabarmasını etkileyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Özellikle bünyelerinde su tutma kapasitesi yüksek olan kil mineralleri, donma sırasında buz lenslerinin oluşumuna katkıda bulunarak hacim değişimlerini daha belirgin hale

getirir. Bu durum, özellikle siltli ve killi zeminlerde don kabarmasının şiddetini artırırken, iri taneli malzemeler içeren zeminlerde bu etkinin daha sınırlıdır [Hendry vd. 201, Bilodeau vd. 2008, Konrad vd. 2005]. Suda bekletilerek suya doygun hale getirilen numunelerin bu süre sonundaki şişme miktarları kaydedilmiştir. İlk 24 saat diliminde toplam oturmaların %50'sinden fazlasını tamamlamıştır. Akabinde şişme hızı zamana bağlı olarak azalmıştır. Özellikle 96 saat suda bekletilen numunelerdeki şişme miktarlarının LL(%) ve D_{50} 'ye göre değişimi Şekil 6'da sunulmuştur.

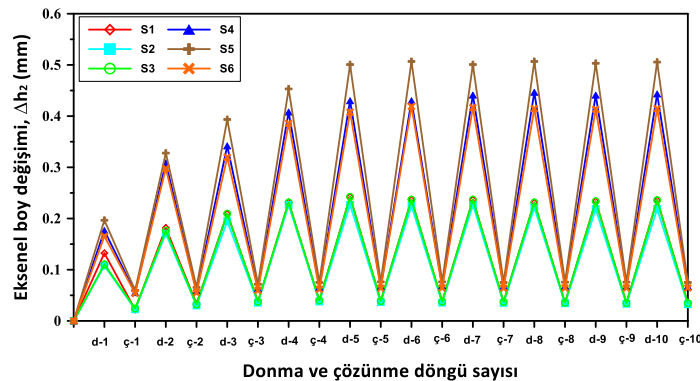


Şekil 6. Şişmenin D_{50} ve LL(%)'ye bağlı değişimi a) Δh_1 ve D_{50} b) Δh_1 ve LL(%)

Birbirine yakın lokasyonlardan alınan, benzer renk ve kıvam özelliklerine sahip olan S1, S2 ve S3 ile S4, S5 ve S6 numunelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi D_{50} etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Tüm numunelerde ince dane

oranının %14-%16 gibi dar bir aralıkta değiştiği numunelerde benzer LL(%) değerlerine sahip S1, S2 ve S3 numuneler için şişmeler (Δh_1) 0.10 mm-0.15 mm; S4, S5 ve S6 için bu değerler 0.30 mm-0.38 mm aralığında değişmektedir. Sonuçlar incelendiğinde zeminlerin LL(%) değerleri ile şişme miktarlarının ilişkili olduğu görülmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde zeminlerin şişme potansiyellerinin LL(%) ve plastisite indeksine (PI) bağlı olarak rapor edilmiştir (Holtz vd. 1956, Seed vd. 1962, Peck vd. 1974). Dolayısıyla zeminlerin mineralojik özellikleri ile LL(%) ve PL(%) değerleri doğrudan ilişkili olduğu için S1, S2 ve S3'teki ince danelerin mineralojik yapısı ile S4, S5 ve S6'nın mineralojik yapısı da farklılık gösterecektir.

Kapalı sistem olarak adlandırılan ve görseli Şekil 4d'de sunulan donma-çözülme kabiniinde 1 ve 10 döngüye tabi tutulmuştur. Her donma (d) ve çözülme (ç) döngüsünde numunelerde meydana gelen don kabarmaları (Δh_2) ölçülmüştür (Şekil 7). Bu kabarmalar numunelerin tam merkezleri referans alınarak ölçülmüştür. Meydana gelen kabarmalar zemin-kalıp sürtünmesinden dolayı kenarlarda nispeten daha azdır. Bu durumu minimize etmek için CBR kalıpları sıkıştırma öncesinde özel gress yağı ile yağlanmıştır. Donma-çözülme maruz kalan zeminlerdeki hacim değişimi, döngü sayısına bağlı olarak değişkenlik gösterir ve kritik bir döngü sayısından sonra zemin yapısı donma-çözülme döngülerinden etkilenmez. Şekil 7 incelendiğinde yaklaşık 6. döngüden sonra boy değişimleri maksimum değere ulaşır ve bu döngüden sonra boy değişimleri ihmal edilebilir düzeydedir. Farklı deney koşulları ve zemin türleri için yapılan donma-çözülme deneylerinde kritik döngünün 4-7 döngüleri arasında değiştiği rapor edilmiştir (Xie vd. 2015, Gülen vd. 2024, Qi vd. 2008, Aldaoud vd. 2014). Özellikle Lambe vd. (1969) tarafından yapılan çalışmalar kil partikül mineralojisinin önemini vurgulamış ve kil minerallerinin don kabarmasını artırabildiğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla zeminlerin don kabarması ince malzeme oranının yanı sıra ince malzemenin mineralojik yapısı ile doğrudan ilgilidir.

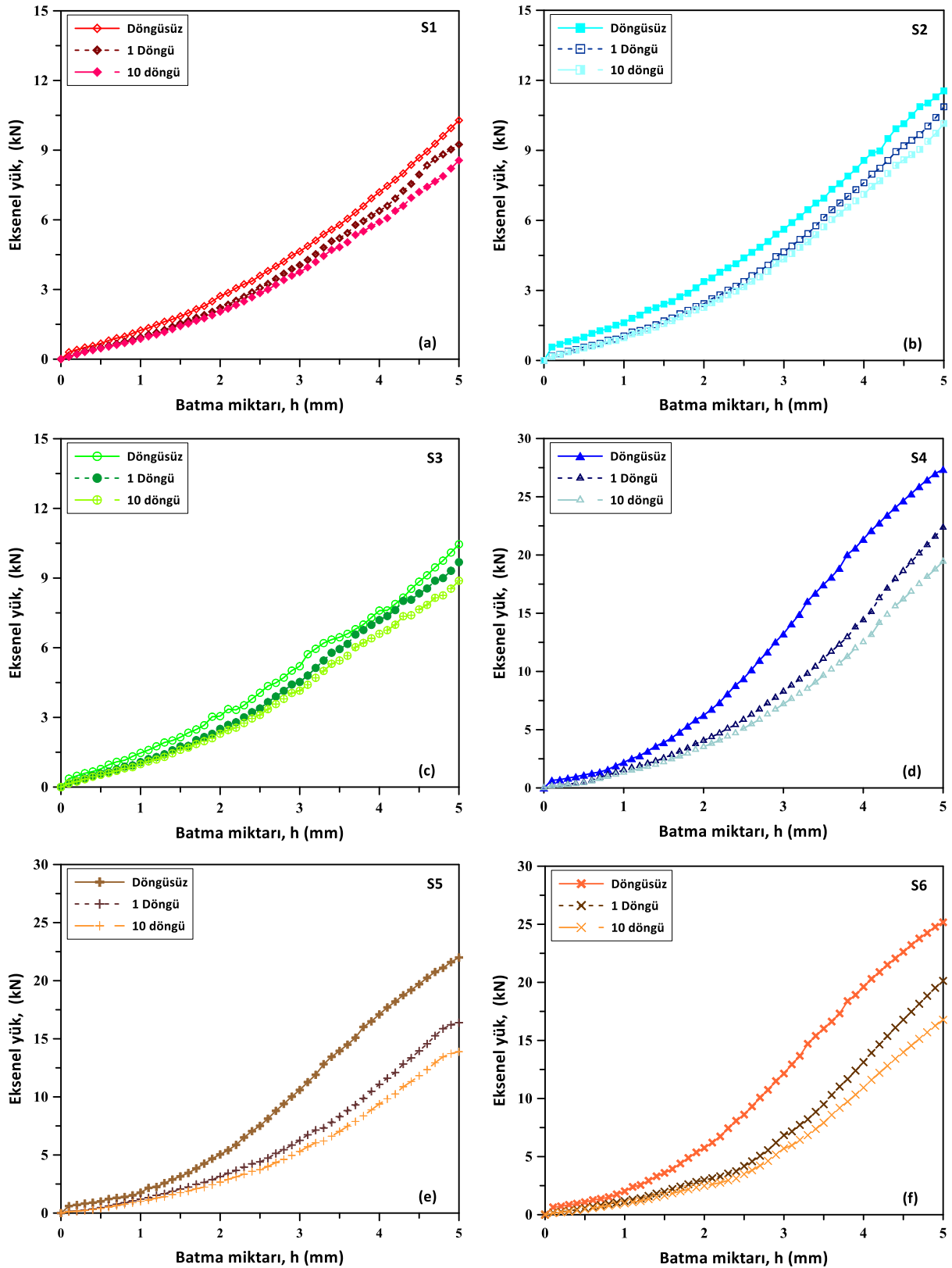


Şekil 7. Donma-çözülme döngülerine bağlı olarak meydana gelen don kabarmaları

3.2 Donma-Çözülmenin CBR (%) Değerlerine Etkisi

Tüm numunelerin donma-çözülme öncesi, 1 ve 10 döngü sonundaki CBR(%) değerlerini belirlemek için yük-batma miktarı ilişkisi Şekil 8’de sunulmuştur. Her numunenin üst

ve alt bölgesi için gerçekleştirilen deneylerden iki yük değeri belirlenmiştir. Bu yükler arasında %12 ile %18 arasında değişen farklar elde edilmiştir. Bundan dolayı alt ve üst bölgeleri için ölçülen yük değerlerin ortalaması alınarak değerler tek bir eğri ile gösterilmiştir.



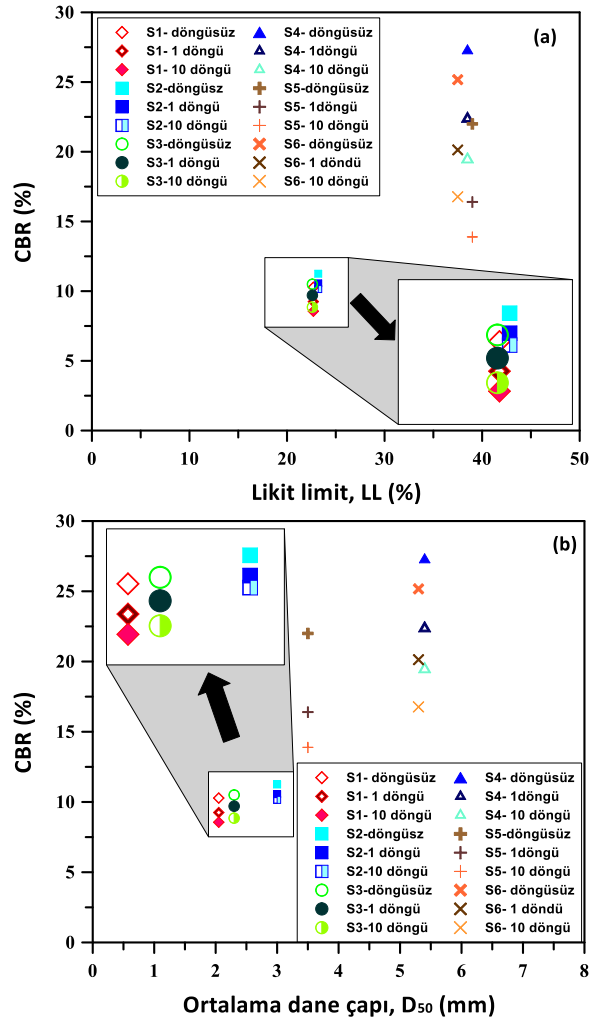
Şekil 8. Donma- çözülme öncesi ve sonrası için yük- batma ilişkisi a) S1 b) S2 c) S3 d) S4 e) S5 f) S6

Şekil 8'deki eğriler dikkate alınarak ASTM D1883-21 göre belirlenen CBR(%) değerleri Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3: CBR (%) değerinin değişimi

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Döngüsüz	10.3	11.3	10.5	27.4	22.0	25.2
1 Döngü	9.3	10.6	9.7	22.4	16.4	20.1
10 Döngü	8.6	10.2	8.9	19.5	13.9	16.8

Hesaplanan CBR(%) değerlerinin LL(%) ve D_{50} 'ye bağlı değişimi Şekil 9'da sunulmuştur. Zeminlerin CBR(%) değerleri, yol üstyapısı uygulamaları için önemli bir parametredir. Donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR(%) değerlerinin ve CBR(%) değerlerindeki değişimin bilinmesi gerekir. Özellikle bu azalmaya neden olan davranış mekanizmanın bilinmesi tasarımlarda karşılaşılabilecek sorunların minimize edilmesini sağlar.

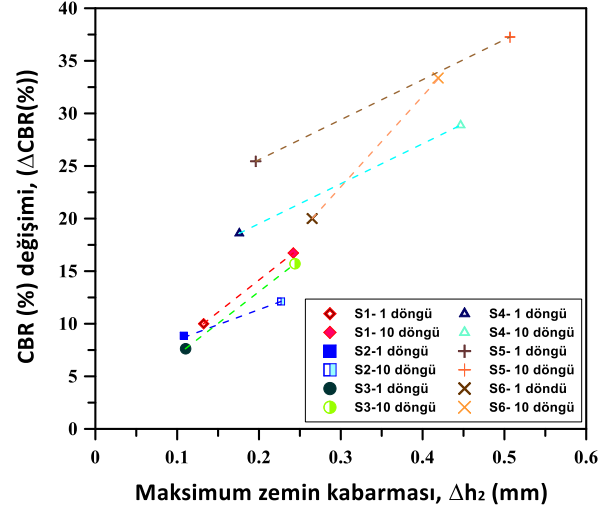


Şekil 9. Donma- çözülme öncesi ve sonrası için CBR(%) değişimi
a) CBR(%) ve LL(%) b) CBR(%) ve D_{50}

Donma-çözülme döngülerine maruz kalan numunelerde donan suyu hacminin %9 artmasından dolayı meydana gelen don kabarmaları zemin iskelet yapısını ve dane dizilimini bozarak CBR(%) değerlerini azaltır. Döngüsüz

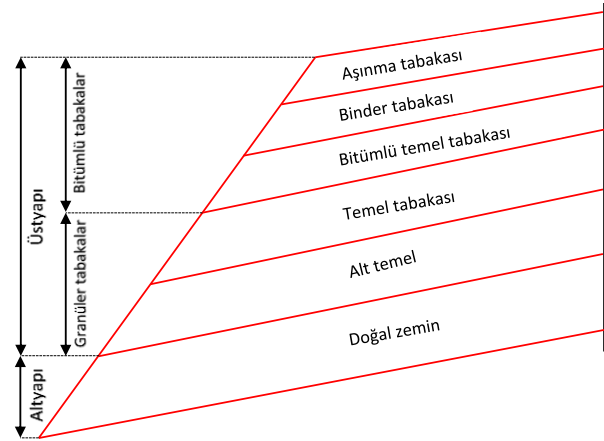
numunelere ait CBR(%) değerleri referans alınarak CBR(%) değerlerindeki azalmaların (Δ (CBR%)) don kabarmalarına bağlı değişimi Şekil 10'da sunulmuştur.

Literatür çalışmaları incelendiğinde donma-çözülme döngülerine maruz kalan farklı dane çapı dağılımları ve kıvam özelliklerine sahip zeminler için mukavemetteki kaybın %86'ya kadar ulaşabileceği ifade edilmiştir (Işık vd. 2014, Gençdal ve Kılıç 2023, Gülen vd. 2024).



Şekil 10. Donma- çözülme döngülerine maruz kalan zeminlerdeki taşıma gücü kayıpları

Detayları Şekil 11'de sunulan karayolu uygulamalarındaki zeminlerin temel (base) ve taban zemini (subgrade) dolgu malzemesi olarak uygunluğunun değerlendirilmesinde CBR(%) değerleri önemli bir göstergedir.



Şekil 11. Esnek bir yol yapısının en kesiti

Karayolu uygulamalarında kullanılacak olan zeminlerin CBR (%) değerlerine göre sınıflandırılması Çizelge 4'te özetlenmiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre SC; Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği'ne (AASHTO) göre A-2-4 zemin sınıfında yer alan S1, S2 ve S3 numunelerinin donma-çözülme öncesinde CBR(%) değerleri sırasıyla 10.28, 11.55 ve 10.50 olmaktadır. Çizelge 4 dikkate alındığında S1, S2 ve S3 numuneleri orta seviyede dayanıma sahip temel ve taban

zemini tabakalarında kullanılabilir niteliktedir. Buna ek olarak Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (2020) de CBR(%) <8 olan zeminlerin temel ve alt temel olarak kullanılamayacağını rapor edilmektedir.

Donma-çözülme döngüleri sonunda 10 döngüye maruz kalan bu zeminlerin CBR(%) değerleri sırasıyla 8.56, 10.15 ve 8.85 olmaktadır. CBR(%) değerlerindeki %12-%17 arasındaki azalmalar bu zeminlerin orta seviye dayanıma sahip zemin olarak kullanılabilir olduğunu gösterir.

SCS'ye göre GP ve AASHTO'ya göre A-2-6 zemin sınıfında yer alan ve donma-çözülme döngüleri öncesinde CBR(%) değerleri 27.35, 22.00 ve 25.17 olan S4, S5 ve S6 numuneleri dolgu malzemesi olarak iyi derece dayanıma sahip zemin sınıfında yer almaktadır. Donma-çözülme döngüleri sonucunda 10 döngüye maruz kalan bu numunelerdeki CBR(%) değerleri sırasıyla 19.45, 13.89 ve

16.77 olmaktadır. CBR(%) değerlerindeki %29-%37 arasında değişen azalmalar, iyi derecede dolgu malzemesi sınıfından orta derece kullanılabilir dolgu malzemesi sınıfına düşürür (Bowles 1992, Hazirbaba ve Güllü 2010, Mina vd. 2019). Jessberger ve Carbee (1970), donma-çözülme döngülerine maruz kalan zeminlerin CBR(%) değerindeki azalmayı deneysel olarak incelemiş ve CBR(%) değerlerindeki değişimin killi zemin özelliklerine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Dolayısıyla, ılıman veya yarı kurak bölgelerde iklim değişikliği nedeniyle ortaya çıkabilecek stabilite sorunlarını minimize etmek için donma-çözülme etkisinin mukavemetteki değişime etkisinin öngörülmesi gerekir. Özellikle bu çalışmadaki bulgular, ülkemizde mevsimsel sıcaklık farklarına bağlı olarak meydana gelen donma-çözülme döngüleri ve zeminlerin mukavemetindeki azalmanın tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4. Yollar için farklı CBR(%) değerlerine karşılık gelen zemin sınıflandırması (Hazirbaba ve Güllü, 2010)

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

4. Sonuçlar

Mevsimsel sıcaklık farkları ve iklim değişikliği ile birlikte ekstremler iklim koşulları, farklı özelliklere sahip dolgu malzemelerini donma-çözülme döngülerine maruz kalmasına neden olur. Bu durum zeminlerin fiziksel ve mukavemet özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Yapılacak tasarımlarda bu durumun yol açabileceği olası sorunların öngörülmesi önemlidir. Bu çalışma kapsamında İstanbul ili ve çevresinde yaygın yer alan, yol alt yapısı ve donatılı duvarlarda dolgu malzemesi olarak kullanılan kireçtaşı numuneleri için donma-çözülme döngülerinin CBR(%) değerlerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmadaki zemin özellikleri ve deney koşulları dikkate alınarak elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Donan zeminlerde, zemin boşluklarındaki suyun hacmi %9 artar. Suyun hacmindeki bu artış, zemin iskelet yapısını bozarak danelerin hareket etmesine ve dane diziliminin değişmesine neden olur. Çözülme sırasında bu hareket kısmen tersine dönse de zeminde kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan 6 numune için eşik döngü sayısına 5.-6. döngüde ulaşıldığı ve bu eşik döngüden sonra zeminde kalıcı deformasyonların değişmediği gözlemlenmiştir. S5 numunesinde meydana gelen yaklaşık ≈ 1 mm kalıcı deformasyon 10. döngü sonunda CBR(%) değerini %37 azaltmıştır.

2. İnce dane oranı %14-%16 arasında dar bir aralıkta değişen numunelerdeki don kabarmaları, LL(%) değerleri birbirine yakın olan S1, S2 ve S3 numunelerinde 0.23 mm – 0.24 mm; S4, S5 ve S6 numunelerinde 0.42 mm – 0.51 mm aralığında değişkenlik göstermiştir. Özellikle zeminlerin su tutma kapasitesi ile LL(%) değerleri paralellik gösterir. Dolayısıyla içerisinde daha fazla su bulunan S4, S5 ve S6 zeminleri için donma aşamasında donan su miktarı ve buna bağlı olarak don kabarması daha fazladır. Bu durum meydana gelen don kabarmalarının zeminlerin LL(%) değerleri ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

3. Eşik döngü sayısından sonra zeminde kalıcı deformasyonların tamamlanması, 10 döngüye maruz kalan numunelerdeki maksimum CBR(%) kaybının oluştuğunu ve bu kaybın S1, S2 ve S3 numunelerinde %12-%17; S4, S5 ve S6 numunelerinde ise %29-%37 arasında değiştiğini göstermektedir.

4. Mevsimsel sıcaklık farkları ve iklimsel koşulların değişmesi ile meydana gelen ekstrem hava koşulları zeminlerin fiziksel ve mukavemet özelliklerini etkilemektedir. Özellikle don derinliğinin üstünde inşa edilecek toprak yapılarının donma-çözülme döngüleri sonrasında meydana gelecek mukavemet kayıplarının tasarım aşamasında dikkate alınması yapının stabilitesi ve performansı için önemlidir.

Kısaltma ve Semboller

CBR(%): California bearing ratio
USCS: Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi
AASHTO: Amerikan Karayolları zemin sınıflandırma sistemi
XRD: X-Ray diffraction
Sr(%): Su emme oranı
 Δh_1 : Şişme (mm)
 Δh_2 : Don kabarması (mm)
 D_{50} : Ortalama dane çapı (mm)
LL(%): Likit limit
PL(%): Plastik limit
PI(%): Plastisite indisi
ML: Düşük plastisiteli silt
CL: Düşük plastisiteli kil
OL: Düşük plastisiteli organik
SC: Killi kum
SM: Siltli kum
SP: Kötü derecelenmiş kum
SW: İyi derecelenmiş çakıl
GC: Killi çakıl
GM: Siltli çakıl
GP: Kötü derecelenmiş çakıl
GW: İyi derecelenmiş çakıl
MH: Yüksek plastisiteli silt
CH: Yüksek plastisiteli kil
OH: Yüksek plastisiteli organik
XRD: X-Ray diffraction
w(%): Su muhtevası
 γ_k : Kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)
 w_{opt} (%): Optimum su muhtevası
 $\gamma(\%)$: Eksenel şekil değiştirme

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar ¹: Fikir Sahibi, Metodoloji, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme, Doğrulama

Yazar ²: Araştırma, Doğrulama, Metodoloji

Yazar ³: Araştırma, Görselleştirme, Deney

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.

Teşekkür

Deneysel çalışmalarda verdikleri destekler için Yıldız Teknik Üniversitesi laboratuvar çalışanları Ali Yüksel ve Tevrat Al'a sağladıkları katkılardan dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Al-Abri, D. S., & Mohamedzein, Y. E. A. (2010). Performance of plastic pipes installed in dune sand. Pipelines 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability—Renew, Rehab, and Reinvest, 410–419.
[https://doi.org/10.1061/41138\(386\)40](https://doi.org/10.1061/41138(386)40)
Aldaoood, A., Bouasker, M., & Al-Mukhtar, M. (2014). Impact of freeze-thaw cycles on mechanical

behaviour of lime stabilized gypseous soils. Cold Regions Science and Technology, 99, 38–45.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.12.003>

Alkire, B., & Morrison, J. (1982). Change in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading. Transportation Research Record 918.

ASTM D854-14. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International.

ASTM International. (2014). ASTM D854-14: Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer.

ASTM International. (2015). ASTM C97/C97M-15: Standard test methods for absorption and bulk specific gravity of dimension stone.

ASTM International. (2016). ASTM D422-63: Standard test method for particle-size analysis of soils.

ASTM International. (2017). ASTM D4318-17: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.

ASTM International. (2020). ASTM C131/C131M – 20: Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine.

ASTM International. (2021). ASTM D1883-21: Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils.

ASTM International. (2023). ASTM D698-23: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).

Balaban, E., Şmejda, A., & Onur, M. İ. (2020). Performance analysis of geosynthetic reinforced earth walls with different backfills by finite element method. Resilience, 4(1), 117–128.
<https://doi.org/10.32569/resilience.632301>

Baradan, B. (2020). İnşaat mühendisleri için malzeme bilgisi. DEÜ Yayınları.

Beju, Y. Z., & Mandal, J. N. (2018). Experimental investigation of shear strength behaviors of stone dust–EPS geofom interface. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 22(4), 04018033.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000426)

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/10.1080/10298430802279819>

Brooks, R., Udoeyo, F. F., & Takkalapelli, K. V. (2011). Geotechnical properties of problem soils stabilized with fly ash and limestone dust in Philadelphia. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(5), 711–716.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000214)

- 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.2016.04.145>
- Chamberlain, E., 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*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, USA.
- Cravotta, C. A. III, & Trahan, M. K. (1999). Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage. *Applied Geochemistry*, 14(5), 581–606. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00066-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00066-3)
- Croudace, I. W., & Rothwell, R. G. (2015). *Micro-XRF studies of sediment cores*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5>
- Culley, R. W. (1971). Effect of freeze-thaw cycling on stress-strain characteristics and volume change of a till subjected to repetitive loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 8(3), 359–371. <https://doi.org/10.1139/t71-038>
- Dereli, B. (2024). Konsol istinat duvarlarında geri dolgu malzemesi olarak Bitlis pomza agregalı köpük betonların kullanılabilirliğinin araştırılması, Ph.D. thesis, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Durgunluoğlu, H. T., Yıldız, T., Seyedtehrani, E., & Özbatır, M. (2018). Toprakarme istinat yapılarına yeni bir yaklaşım: Zemin çivili toprakarme duvar. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı*, İstanbul.
- 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>
- 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), 11832. <https://doi.org/10.3390/su151512005>
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2012). *Mechanics of materials* (8th ed.). Cengage Learning.
- Gratchev, I. (2020). *Rock mechanics through project-based learning*. CRC Press/Balkema.
- 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). <https://doi.org/10.18400/tjce.1349440>
- Hazirbaba, K., & Gullu, 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.2015.11.016>
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2023). *An introduction to geotechnical engineering* (3rd ed.). Pearson Education.
- Holtz, W. G., & Gibbs, H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transactions Paper*, 2814, 121, 641–677. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007325>
- Işık, A., Çevikbilen, G., & İyisan, R. (2014). Freezing and thawing behaviour of compacted soils. 11th International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul.
- Jessberger, H. L., & Carbee, D. L. (1970). Influence of frost action on the bearing capacity of soils. *Highway Research Record*, 304, 14–26.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2020). *Karayolu teknik şartnamesi (Yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üst yapı ve çeşitli işler)*. Karayolları Genel Müdürlüğü.
- 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.2016.06.134>
- Konrad, J. M., & Lemieux, N. (2005). Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 515–527. <https://doi.org/10.1139/t04-115>
- Lambe, T. W., Kaplar, C. W., & Lambie, T. J. (1969). Effect of mineralogical composition of fines on frost susceptibility of soils. *CRREL REPORT*.
- Laskar, A., & Pal, S. K. (2012). Geotechnical characteristics of two different soils and their mixture and relationships between parameters. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2821–2832.
- Leroueil, S., Tardif, J., Roy, M., Rochelle, P. L., & Konrad, J. M. (1991). Effects of frost on the mechanical behaviour of Champlain Sea clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(5), 690–697. <https://doi.org/10.1139/t91-083>
- Li, G., Ma, W., Zhao, S., Mao, Y., & Mu, Y. (2012). Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of compacted fine-grained soil. In *Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment*, pp. 297–308.

- <https://doi.org/10.1061/9780784412473.008>
- Liu, J., Chang, D., & Yu, Q. (2016). Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand. *Engineering Geology*, 210, 23–32.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.05.019>
- 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*. 1173603.
<https://doi.org/10.1155/2021/1173603>
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., & Tasa, D. (2012). *Essentials of geology* (11th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Mina, E., Kusuma, R., & Ulfah, N. (2019). Utilization of steel slag and fly ash in soil stabilization and their effect on California bearing ratio (CBR) value: Case study: Kp. Kadusentar road Medong village Mekarjaya subdistrict Pandeglang district. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 673, 012034.
<http://www.doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012034>
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behaviour* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- 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.
- Öztürk, Ö., Çelikel, M., & Erkan, M. (2007). Türkiye agrega sektör raporu. *Hazır Beton*, 84, 52–56.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). *Foundation engineering*. John Wiley & Sons.
- Poernomo, Y. C. S., Winarto, S., Mahardana, Z. B., Karisma, D. A., & Ajiono, R. (2021). The limestone as a materials combination of base course on the road pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1125(1), 012019.
<https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/1125/1/012019>
- 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.2007.05.010>
- Riccio, M., Ehrlich, M., & Dias, D. (2014). Field monitoring and analyses of the response of a block-faced geogrid wall using fine-grained tropical soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(2), 127–138.
<https://www.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.01.006>
- Roy, S., & Bhalla, S. K. (2017). Role of geotechnical properties of soil on civil engineering structures. *Resources and Environment*, 7(4), 103–109.
<https://www.doi.org/10.5923/j.re.20170704.03>
- Seed, H. B., Woodward, R. J., & Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *ASCE Soil Mechanics and Foundations Division*, 88, 53–87.
<https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000431>
- 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.2017.10.004>
- Vallejo, G., & Ferrer, M. (2014). *Mühendislik jeolojisi* (K. Kayabalı, Trans.). Ankara Üniversitesi Yayınları.
- 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/t98-015>
- 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, 43–47.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.43>
- Wang, T. L., Liu, Y. J., Yan, H., & Xu, L. (2015). An experimental study on the mechanical properties of silty soils under repeated freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 112, 51–65.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.01.004>
- 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, 999–1099.
<https://doi.org/10.1007/s11629-014-3384-7>
- Yağız, S. (2010). Geomechanical properties of construction stones quarried in Southwestern Turkey. *Scientific Research and Essays*, 5(7), 750–757.
- Yang, G., Liu, H., Lv, P., & Zhang, B. (2012). Geogrid-reinforced lime-treated cohesive soil retaining wall: Case study and implications. *Geotextiles and Geomembranes*, 35, 112–118.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.09.001>
- Yılmaz, A., Saltan, M., & Akıllı, A. (2012). Göller yöresinde işletilen kireçtaşı agregalarının yol inşaatı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 199–207.
- Youdeowei, P. O., & Nwankwoala, H. O. (2013). Suitability of soils as bearing media at a freshwater swamp terrain in the Niger Delta. *Journal of Geology and Mining Research*, 5(3), 58–64.
<https://doi.org/10.5897/JGMR11.046>
- Yu, Z., Fang, J., Xu, A., & Zhou, W. (2022). The study of influence of freeze-thaw cycles on silty sand in seasonally frozen soil regions. *Geofluids*. 6886108.
<https://doi.org/10.1155/2022/6886108>

- 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. 200–212. <https://doi.org/10.1061/9780784479278.019>
- Zhou, Z., Ma, W., Zhang, S., Mu, Y., & Li, G. (2018). Effect of freeze-thaw cycles in mechanical behaviors of frozen loess. *Cold Regions Science and Technology*, 146, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.011>