



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Soğuk İklim Bölgelerinde İnce Taneli Zeminlerin Fiziksel ve Mekanik Davranışının İncelenmesi

Serap ATİLA ŞAHİN^a, Müge Elif FIRAT^{b,*}

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE,

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE,

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: morakoglu@firat.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1057354

ÖZ

Donma-çözülme döngülerinin çeşitli zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi ve ortaya konulması, soğuk iklim bölgelerindeki temel sistemleri, yol yapımı ve toprak işleri uygulamaları bakımından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli ince taneli zeminin yükseklik ve su içeriklerindeki değişimleri farklı sayıda donma-çözülme döngülerinden (0, 2, 5 ve 11) sonra incelenmiş ve konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç testleri altındaki davranışlarına ilişkin deneysel sonuçlar sunulmuştur. Zemin numunelerinin yükseklikleri maksimum donma-çözülme döngüsünden sonra %2,44 oranında artarken, su içerikleri %4,36 oranında azalmıştır. Maksimum donma-çözülme döngüsünden sonra, zeminlerin üç eksenli UU basınç dayanımlarında %19-%40 arası, elastisite modüllerinde %30-%40 arası ve kohezyonunda %50,28 oranında azalma görülürken, içsel sürtünme açısında %4,85 oranında artış görülmüştür. Çalışmanın bulguları ince daneli zeminlerde donma-çözülmenin zayıflatıcı ve yapısında bozucu etkilerini doğrular nitelikte olup, özellikle incelenen soğuk iklim bölgesine ait zeminlerin üzerinde yapılacak altyapıların tasarım değerlendirilmesi ve donma-çözülme kaynaklı problemlere karşı önlemler için bilimsel bir temel sağlayabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek plastisiteli zemin, Donma-çözülme döngüleri, Üç eksenli basınç test

Investigation of the Physical and Mechanical Behaviors of Fine-Grained soils in Cold Regions

ABSTRACT

Investigation and revealing the effect of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of various soils is important in terms of foundation systems, road construction and earthwork applications in cold regions. In this study, the changes in height and water content of high plasticity fine-grained soil were investigated after different number of freeze-thaw cycles (0, 2, 5, and 11) and experimental results on their behavior under unconsolidated-undrained (UU) triaxial compression tests are presented. After the maximum freeze-thaw cycle, while the heights of the soil samples increased by 2.44%, their water content decreased by 4.36%. Moreover, after the maximum freeze-thaw cycle, the triaxial UU compressive strength of the soils decreased by 19%-40%, the elasticity modules decreased by 30%-40%, the cohesion decreased by 50.28%, while the internal friction angle increased by 4.85%. The findings of the study confirm the weakening and deteriorating effects of freeze-thaw cycles in fine-grained soils, and may provide a scientific basis for the design evaluation of infrastructures to be built on soils belonging to the cold regions in this study and to prevent against freeze-thaw problems.

Keywords: High plasticity soil, Freeze-thaw cycles, Triaxial compression test

I. GİRİŞ

Mevsimsel sıcaklık farkları, yıl içinde birkaç kez zeminlerde donma-çözülme de beraberinde getirmektedir. Bu olay zeminde yapısal olarak değişime sebep olduğundan fiziksel özelliklerinin yanında mekanik özelliklerinde de değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimler iklim şartlarına, zemin türüne ve özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Bu bakımdan, altyapı sistemlerinin kurulacağı zeminlerde, zemin özelliklerinin tanımlanmasının yanında çevresel faktörlerin etkilerinin incelenmesi de sonradan doğacak problemlerin öngörülmesi ve alternatif çözümler sunulması açısından önemlidir. Altyapı zeminleri, standart temel tasarım limitlerinden daha düşük sıcaklıklara ya da donma sıcaklığına düştüğünde, üzerine gelen normal yüklerden daha fazla yüklemelerle önemli üretim kayıplarına maruz kalabilmekte; bu da finansal kayıplara ve riskli erken mekanik yenilmelere sebep olmaktadır [1].

Soğuk iklim bölgelerinde tasarımdaki zorluk, altyapı zeminlerinin donma ve çözülme süreçlerini kontrol etmektir. Altyapı zeminlerinde üç önemli olay don etkisiyle ilişkilidir: donma kabarması, zeminin çözünmeden dolayı zayıflaması ve çözünmeden dolayı zeminin oturması [2], [3]. Donma-çözülme süreçlerinde zemin değişime uğrayan çok fazlı bir sistem olduğundan donma olayı kaçınılmazdır. Bu bakımdan, herhangi bir mühendislik yapısı inşa edilmeden önce, zeminlerin mevsimsel donma-çözülme analizleri yapılarak, ilgili dayanım parametrelerinin bu koşullar altında belirlenip, daha sonra yapının inşa edilmesi gerekmektedir. Donmuş zeminin çözülmesi sırasında, zemin ortamındaki buz eriyerek zemin yapısı yeni bir boşluk oranına eşit olur [4], [5]. Ayrıca donma ve çözülme döngüleri altyapı zemininin su içeriği, taşıma kapasitesi ve permeabilitesi gibi mühendislik özelliklerinin olumsuz olarak etkilenmesine de yol açmaktadır [6]- [14].

Donma-çözülme döngüsüne maruz kalan zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları ve kayma mukavemeti genellikle büyük ölçüde değişir. Bu nedenle, zeminler mühendislik altyapısının bir parçası olarak kullanıldığında, uygun bir teknik çözümün belirlenmesi her zaman esastır. Zeminlerin mühendislik özellikleri, hava sıcaklığının 0 °C'nin altına düşerek zemin boşluklarındaki suyun buza dönüşmesi ve donan suyun ısınan hava ile çözülmesi nedeniyle donma-çözülme döngülerinden sonra önemli ölçüde değişecektir. Çünkü donma-çözülme döngülerinden sonra zeminler başlangıç su içeriklerine ulaşamayacaktır [6]-[8].

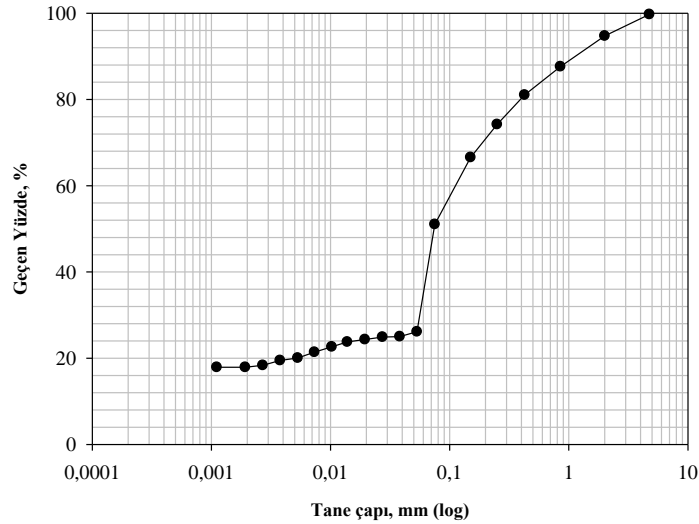
Soğuk iklim bölgelerinde bu güne kadar yapılan çalışmalar hem donma-çözülme sürecinin anlaşılıp değerlendirilmesinin önemini hem de bu süreçte donma-çözülme kaynaklı problemler için alternatif çözümler geliştirilmesi yönünde olmuştur. Önceki çalışmalar, donma-çözülme döngülerinin ince daneli zeminlerin üzerindeki etkilerinin ve yapısal değişimlerinin granüler zeminlerden daha fazla olduğunu göstermiştir [15]-[19]. Bu nedenle, soğuk bölgelerdeki yapıların hizmet ömrü, tasarımı ve inşasında zemin mukavemeti önemli bir sorun teşkil etmektedir.

Donma-çözülme döngülerinin fiziksel özellikler üzerindeki etkilerini araştırmak için yapılan çalışmalar, dane boyutu dağılımı [20], [21], Atterberg limiti [21]-[23] ve boşluk oranı [24] gibi fiziksel parametrelerin bu döngülerden sonra önemli değişikliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Diğer taraftan, yapılan çalışmalar, donma-çözülme çevrimlerinin zeminlerin dayanımlarında önemli bir azalmaya sebep olduğunu göstermiştir [24], [25]. Viran ve Binal [20], yüksek plastisiteli kil (CH) ve killi kumlu (SC) zeminlerin farklı donma-çözülme davranışları altındaki fiziko-mekanik özelliklerini incelemişler ve donma-çözülme döngülerinin zeminlerin plastisite, likit limitleri, konsolidasyon parametreleri ve dayanım özellikleri üzerinde önemli sonuçlar elde etmişlerdir. Donma-çözülme döngüleri, SC zemin numunelerinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini sırasıyla %95,90 ve %25,44 oranında azaltırken, CH zemin numunelerinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini sırasıyla %38,54 ve %36,99 oranında azaltmıştır. Zaimoğlu vd. [26], farklı sayıda donma-çözülme döngüsüne maruz kalmış ince daneli zeminlerin serbest basınç mukavemetleri üzerindeki etkisini incelemek için bir dizi testler yapmışlardır. Donma-çözülme deney sonuçları, belli oranlarda yük uygulanmış ve yük uygulanmamış numuneler için ortaya konulmuştur. Yükleme altında olan zeminlerin donma-çözülme dayanımlarının üzerinde yük olmayan zeminlerden daha az olduğu görülmüştür.

Donma-çözülme döngüleri, soğuk iklim bölgelerinde inşa edilen karayolu, demiryolu ve baraj gibi mühendislik yapılarını etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Soğuk iklim bölgelerinde zeminler yılda en az bir donma-çözülme döngüsüne maruz kalırlar. Ayrıca, zeminler genellikle mühendislik altyapısının bir parçası olarak kullanıldığından, uygun bir teknik çözümün belirlenmesi her zaman önemlidir. Bu amaçla, farklı sayıda donma-çözülme döngülerine maruz kalmış killi zeminlerin yükseklik ve su içeriklerindeki değişimleri, konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç testleri altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışları, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve elastisite modülü değerlerini bu çalışmada incelenmiştir.

II. MATERYAL-METOT

Bu çalışmada, üç eksenli basınç testlerinin davranışını belirlemek için Elazığ ilindeki Ataşehir Mahallesi'nde açılmış olan bir temel çukurundan temin edilen killi bir zemin kullanılmıştır. Bu zemin numunesinin laboratuvar çalışmalarından; likit limit değeri %58,23 ve plastisite indeksi %45,67, maksimum kuru yoğunluk 1,656 gr/cm³ ve optimum su içeriği %21,5 olarak belirlenmiştir. Zemin numunesinin birleştirilmiş sınıflandırma sistemine (USCS) göre sınıfı yüksek plastisiteli bir kil olan CH olarak belirlenmiştir. Şekil 1'de killi zeminin dane boyutu dağılım eğrisini sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan zeminin dane boyutu dağılımları.

A. ZEMİN NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Bu çalışmada incelenecek zeminin fiziksel özellikleri belirlendikten sonra konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç dayanımlarının belirlenmesi amacıyla 38,0 mm çapında ve 76,0 mm yüksekliğinde zemin numuneleri Proktor testi ile belirlenen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Tablo 1 ve Şekil 2'de numunelerin test planı ve hazırlanma süreçleri gösterilmiştir.

Zemin numuneleri hazırlanırken şu adımlar takip edilmiştir; (i) Optimum su muhtevasında numuneler elde etmek ve su kaybını önlemek için zemin numunesi etüvde 105±5 °C'de 12 saat kurutulmuştur. Gerekli kurutmadan sonra tüm malzemeler soğuması için nem kabineye yerleştirilmiştir. (ii) Proktor testi ile belirlenen optimum su içeriğine göre zemin numunesine yavaş adımlarla su eklenmiş ve yoğurulmuştur. (iii) Daha sonra karışımın içindeki su içeriğinin homojen dağılımını sağlamak için zemin-su karışımı plastik torbalara konularak 24 saat tutulmuştur. (iv) Zeminlerin su içerikleri deneylere başlamadan önce tekrar kontrol edilmiştir. (v) Zemin-su karışımları Şekil 2 (a)'da gösterilen üç eksenli deney numunelerini hazırlama aparatı ile 38,0 mm çapında, 76,0 mm yüksekliğinde numune hazırlayıcı

ile üç tabaka halinde Şekil 2 (b)'deki gibi sıkıştırılmıştır. Numunenin ilk tabakası kalıba yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalan iki tabaka ilave edilerek ayrı ayrı yerleştirilerek aynı şekilde sıkıştırılmış ve deney numunesi Şekil 2 (c)'deki gibi hazırlanmıştır. (vi) Numunelerin hazırlanmasından sonra, su içeriğini korumak için hızlı bir şekilde plastik ambalajlar ile kaplanmış ve nem kabinlerine yerleştirilmiştir.

Tablo 1. Fiziksel ve mekanik testlerin planlanması.

Test	Örnek Boyutları		Zemin Özellikleri			D-Ç sayısı				Sıcaklık*		
	Yükseklik (mm)	Çap (mm)	USCS sınıfı	w* (%)	γ_k^* (gr/cm ³)	0	2	5	11	D (°C)	Ç (°C)	T (°C)
Yükseklik değişimi	76,0	38,0	CH	%21,5	1,656	+	+	+	+	-18	20	~20
Su içeriği değişimi	76,0	38,0	CH	%21,5	1,656	+	+	+	+	-18	20	~20
Statik UU üç eksenli basınç testi	76,0	38,0	CH	%21,5	1,656	+	+	+	+	-18	20	~20

* w: Su içeriği; γ_k : Maksimum kuru birim hacim ağırlık; D: Donma; Ç: Çözülme; T: Test sıcaklığıdır.



(a)



(b)



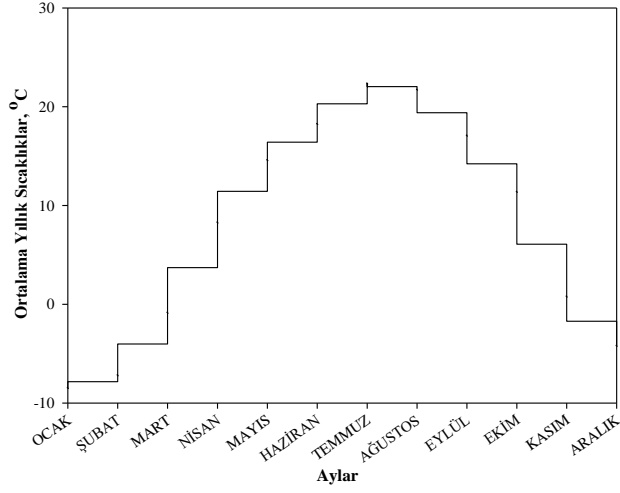
(c)

Şekil 2. (a) Üç eksenli numune hazırlama aparatı; (b) Zemin numunelerinin hazırlanması ve (c) Hazırlanmış numuneler.

B. DONMA-ÇÖZÜLME TESTLERİNİN UYGULANMASI

Türkiye'nin doğusunu etkileyen karasal iklimden dolayı, bölgenin büyük çoğunluğu donma etkilerine maruz kalmaktadır. Ortalama yıllık sıcaklıklar göz önüne alındığında, bölgenin donma periyodlarının Kasım - Mart ayları arasında olduğu söylenebilir. Ayrıca, bölgenin yıllık yağış ortalaması 130,4 mm'dir. Şekil 3'de zemin numunesinin alındığı bölgenin aylara göre yıllık sıcaklık değişimlerini gösterilmiştir [27].

Hazırlanan zemin numuneleri, üç eksenli basınç dayanımlarından önce kapalı sistem dondurma kabineye yerleştirilerek, farklı sayılarda donma-çözülme döngülerine (0, 2, 5 ve 11) maruz bırakılmıştır. Donma sıcaklıkları, zemin numunelerinin alındığı yerin yaklaşık ortalama minimum donma sıcaklığı dikkate alınarak seçilmiştir ($T_{donma} = -18$ °C).



Şekil 3. Bölgenin ortalama yıllık sıcaklık değişimleri (1999-2019 yılları arası) [27].

Şekil 4 (a)'da görüldüğü gibi, zemin örnekleri - 18 °C donma sıcaklığında 12 saat süreyle bir dondurma kabinine yerleştirilmiştir. Dondurma kabini sıcaklığı ayarlanan sıcaklığa ulaştığında, numuneler ve ortam arasındaki sıcaklık dengesini korumak için 12 saat tutulmuştur. Daha sonra zemin örnekleri Şekil 4 (b)' deki gibi nem kabini içine yerleştirilerek 12 saat çözülme sürecine maruz bırakılmıştır. Tüm bu işlemler tek bir donma-çözülme döngüsü olarak kabul edilmiştir. Ayrıca Şekil 5, zemin numunelerinin sıcaklık kontrol süreçleri ile donma-çözülme döngülerinin zamana bağlı olarak değişimlerini göstermektedir.



(a)



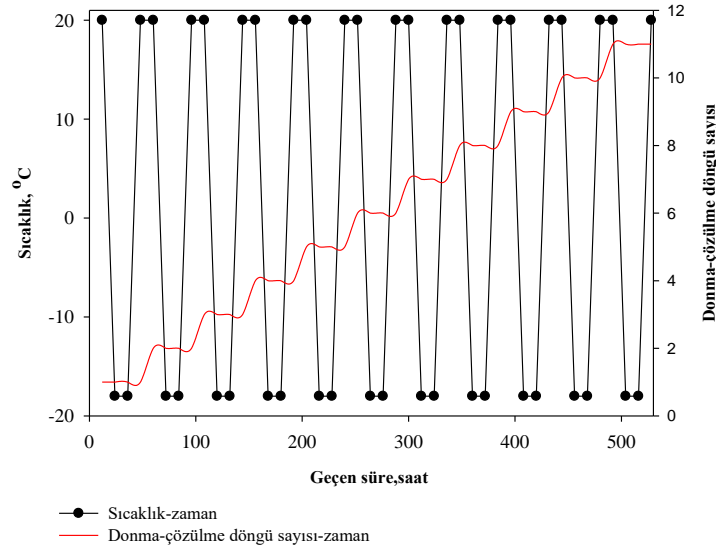
(b)

Şekil 4. Donma-çözülme testleri: (a) Donma kabini ve (b) Çözülme süresince test numuneleri.

Soğuk iklim bölgelerinde, yüzey sıcaklığı donma noktasına yaklaştıkça zemin partiküllerindeki su donmaya başlar. Sonuç olarak, oluşan buz parçacıkları ile zeminin hacmi, yüksekliği ve su içeriği gibi fiziksel parametreler yeniden şekillenir. Donma-çözülme döngülerinin en önemli sonuçlarından birisi donma kabarmasıdır. Numunenin hacimsel değişiklikleri üzerindeki farklı etkiler, zemin donduğunda veya çözülmesinde görülür. Donma sürecinde numunenin yüksekliği artarken, çözülme periyodunda numunenin yüksekliği azalmaktadır. Bununla birlikte, donma ve çözülme periyotlarındaki bu hacim değişiklikleri, numunenin ilk yüksekliğine eşit değildir. Bu amaçla, numunelerin yükseklik değişimleri Eş. 1'de verildiği gibi boyutsuz H parametresi ile hesaplanmıştır;

$$H = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (1)$$

burada ΔH , zeminin ilk yüksekliği ile n sayıda donma-çözülme döngüsüne maruz kaldıktan sonraki son yüksekliği arasındaki fark olup, H_0 ise donma-çözülme döngüsüne maruz kalmamış zeminin ilk yüksekliğidir.



Şekil 5. Sıcaklık kontrol süreçleri.

Öte yandan, bu çalışmada, donma-çözülme döngülerinden sonra zemin numunelerinin su içeriklerindeki değişimlerini gösteren, boyutsuz bir parametre olan W , Eş. 2'deki gibi hesaplanmıştır:

$$W = \frac{\Delta w}{w_0} \quad (2)$$

burada Δw : n sayıda donma-çözülme döngüsüne maruz kalmış zeminin su içeriği miktarıdır, w_0 ise donma-çözülme döngüsüne maruz kalmamış zeminin başlangıçtaki su içeriğidir.

C. KONSOLIDASYONSUZ-DRENAJSIZ (UU) ÜÇ EKSENLİ BASINÇ TESTLERİNİN UYGULANMASI

Bu çalışmada, UU üç eksenli basınç testi ASTM D2850-95 'ye göre yapılmıştır [28]. Bu çalışmada, numunelerin UU dayanımları Fırat Üniversitesi- Teknoloji Fakültesi-İnşaat Mühendisliği Bölümü-Zemin mekaniği laboratuvarında ELE markalı üç eksenli deney aleti ile belirlenmiştir. Donma-çözülme döngülerine tabi tutulan 38,0 mm çapında ve 76,0 mm yüksekliğindeki silindirik zemin numuneleri, dayanım parametrelerini belirlemek için Şekil 6 (a)'daki gibi üç eksenli basınç deney hücresi içine yerleştirilmiş ve hücreye su doldurularak, farklı oranlarda (100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa) yanal hücre basıncı uygulanmıştır. Şekil 6 (b)'de deney sonrası görünümü verilen zemin numunesi, UU yükleme altında kırılma kriterleri %25'lik kesme deformasyonu ile tanımlanmıştır. Gerilme hızı dakikada 0.780 mm'de sabit tutulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 6. (a) Deney öncesi numunenin görünümü ve (b) Deney sonrası numunenin görünümü.

Bu çalışmada, zeminin üç eksenli basınç testleri altındaki deviyör gerilme-deformasyon ($\sigma_{dev}-\epsilon$) ilişkilerinin yanında kesme dayanımı parametreleri olan kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri, p - q grafiklerindeki değişimlerle belirlenmiştir. Bu parametreler Eş. 3 ve Eş. 4 ile hesaplanmıştır:

$$p = \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)_f}{2} \right] \quad (3)$$

$$q = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{2} \right] \quad (4)$$

burada σ_1 ve σ_3 zeminin yenilme anındaki aksenal ve yanal gerilmesidir. Ayrıca, p ve q arasındaki genel ilişki Eş. 5'de verilmiştir:

$$q = b + p \tan \alpha \quad (5)$$

b doğrunun q eksenine kesiştiği yerde, α eğimdir. Tablo 2'de gösterilen b ve α verileri dikkate alınarak, numunelerin kohezyonu (c) ve iç sürtünme açısı (ϕ) Eş. 6 ve Eş. 7 kullanılarak hesaplanabilir [29]:

$$\phi = \sin^{-1} \tan \alpha \quad (6)$$

$$c = \frac{b}{\cos \phi} \quad (7)$$

Tablo 2. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı hesaplama parametrelerinin özeti.

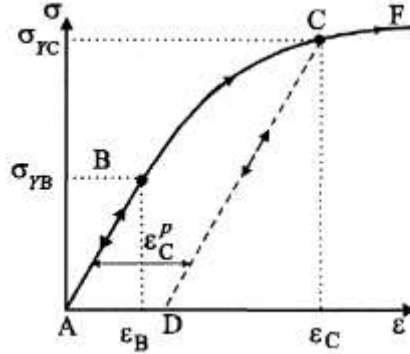
0 D-Ç döngüsü		2 D-Ç döngüsü		5 D-Ç döngüsü		11 D-Ç döngüsü	
b	α	b	α	b	α	b	α
(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
72,354	0,1348	50,332	0,1097	34,11	0,1246	36,007	0,1283

Hetorejen, anizotropik ve süreksiz malzemeler olarak tanımlanan zeminler, herhangi bir yükleme altında elasto-plastik davranış gösterirler [30]. Zeminlerin doğal ortamlarındaki koşullarının modellenmesi açısından bazı temel parametrelerinin (elastisite modülü, poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı vb.) bilinmesi önem arz etmektedir. Hooke yasasına göre, herhangi bir malzemenin, elastik sınırlar

içinde gerilmenin, bu gerilmeye bağlı olarak birim deformasyondaki oranı Elastisite Modülü (E) ya da Young modülü olarak tanımlanır ve Eş. 8 ile hesaplanır:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (8)$$

Şekil 7’de görüleceği gibi zeminlerin elastisite modülü (E), gerilme (σ) - birim deformasyon (ε) eğrisinde B akma sınırına kadar olan lineer kısmın (AB hattının) eğimi olarak tanımlanır. Bu hat üzerinde eğer yükleme kaldırılırsa zemin numunesi herhangi bir deformasyona uğramadan eski haline tekrar dönebilecektir.



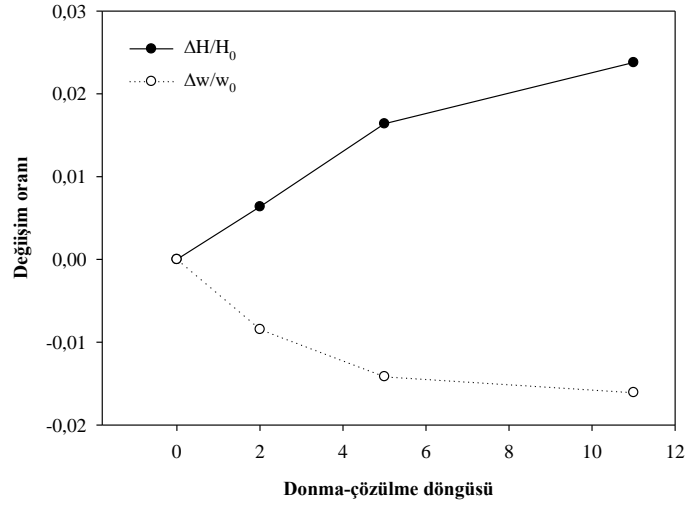
Şekil 7. Gerilme-deformasyon eğrisi üzerinde elastisite modülü [30].

III. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

A. DONMA-ÇÖZÜLME DÖNGÜLERİNİN ZEMİN NUMUNELERİN HACİMSEL ÖZELLİKLERİ VE SU İÇERİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Şekil 8’de, farklı sayıda donma-çözülme döngülerine maruz kalan zemin numunelerinin yükseklik ve su içeriklerindeki değişimler verilmiştir. Başlangıçta, artan donma-çözülme döngüleri ile numunelerin su içeriği sert bir şekilde azalmış, daha sonra bu azalma beşinci döngüden on birinci donma-çözülme döngüsüne giderken yavaş yavaş azalma eğilimi göstermiştir. Ayrıca, donma-çözülme döngülerinin artmasıyla numunelerin yükseklikleri artma eğilimindedir. Maksimum donma-çözülme döngüsü, zemin numunelerinin yüksekliklerini %2,44 oranında arttırırken, su içeriklerini %4,36 oranında azaltmıştır.

Her iki değişken, yani yükseklik ve su içeriği değişimleri dikkate alındığında, zemin 11 donma-çözülme döngüsü sonrasında içyapısında yeni bir dengeye ulaşacaktır. Bu denge konumundan sonra zemin numunesinin donma-çözülme sonrasında yükseklik değişimleri kararlı bir duruma ulaşacak ve su içeriğindeki değişim minimum olacaktır.

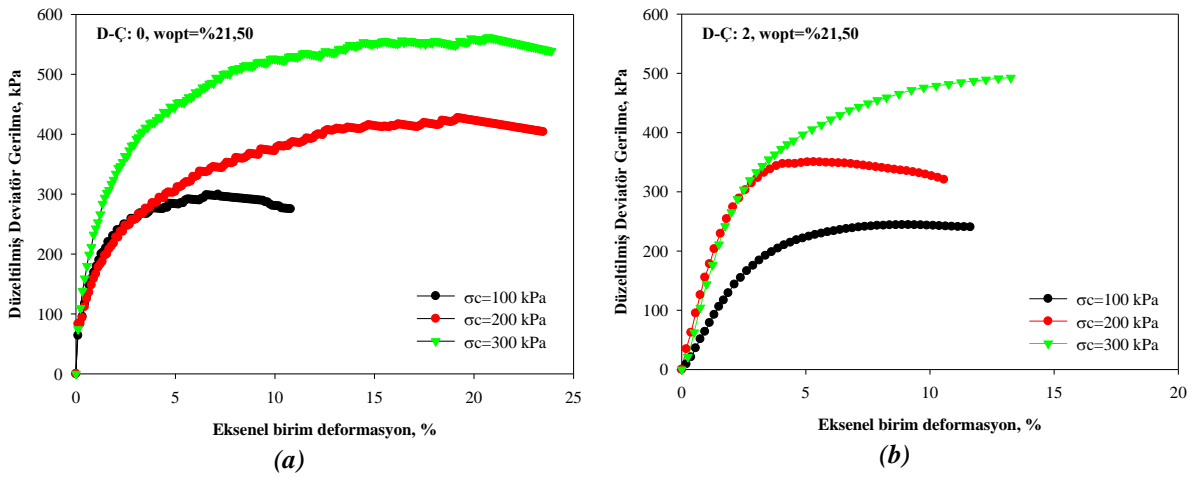


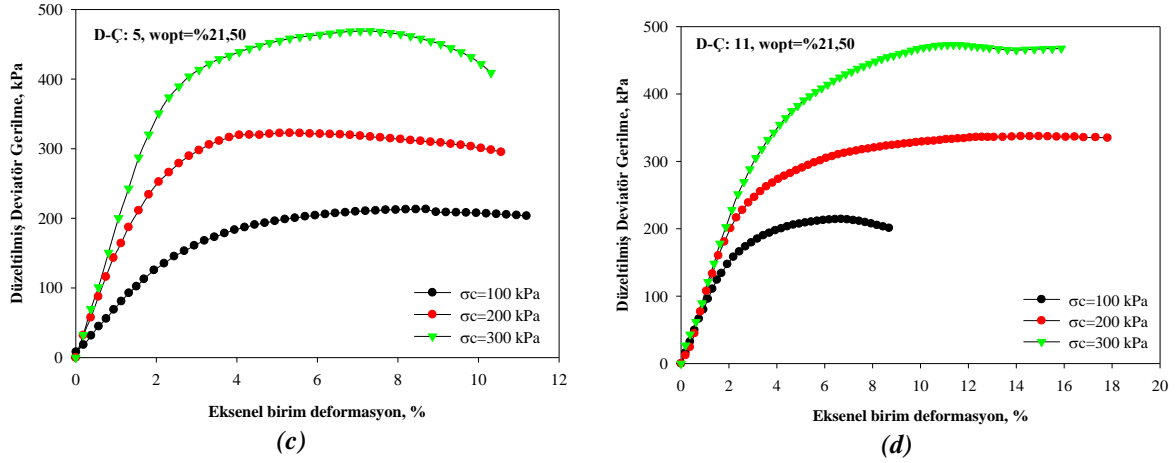
Şekil 8. Donma-çözülme döngülerine maruz kalmış zeminin yükseklik ve su içeriğindeki değişimler.

B. DONMA-ÇÖZÜLME DÖNGÜLERİNİN ZEMİN NUMUNELERİN GERİLME-DEFORMASYON DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Şekil 9 (a), donma-çözülme döngüleri öncesi farklı hücre basınçları altındaki (100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa) CH zeminine ait numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışını göstermektedir.

Öte yandan, Şekil 9 (b) ve (d) arası zemin numunelerinin sırasıyla 2, 5 ve 11 donma-çözülme sonrası farklı hücre basınçları için (100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa) gerilme-şekil değiştirme davranışları sunulmuştur. Zemin donma periyoduna maruz kaldığında içindeki boşluk suyu buza dönüşür. Bu buz kuvveti, zemin parçacıklarının birbirinden ayrılmasına neden olur ve bu da boşluk suyu basıncını artırır. Ancak, çözülme sırasında artan boşluk suyu basıncı önceki durumuna geri dönemez. Bu nedenle donma-çözülme döngüleri genellikle zemin mukavemetini azaltır. Aynı hücre basıncı altında zemin numunesinin artan donma-çözülme döngülerinden sonra dayanımlarında azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca zemin numunelerinin donma-çözülme döngülerinden sonra gösterdikleri davranışlar kırılığandan sünek davranışa doğru olmuştur.

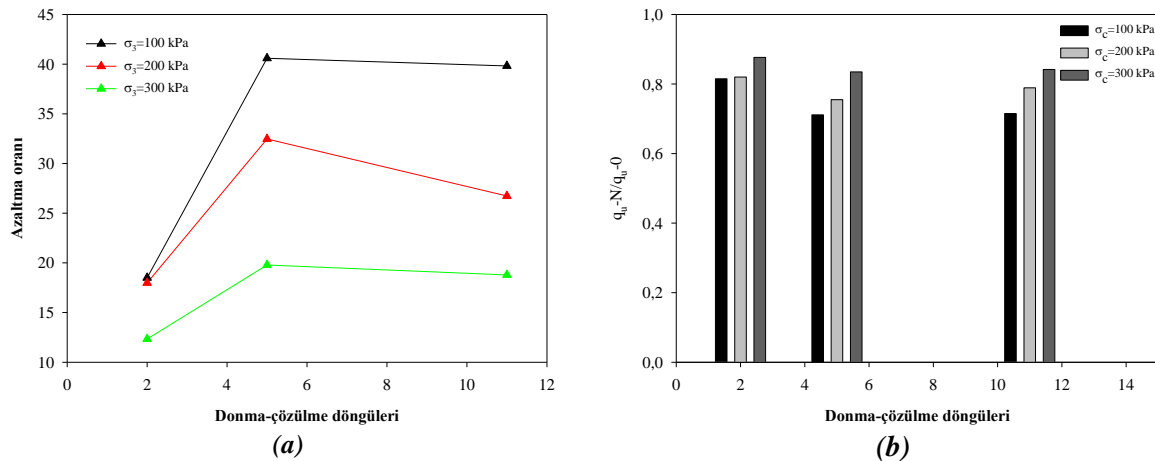




Şekil 9. Donma-çözülme döngülerine (D-Ç) maruz kalmış farklı hücre basınçları altındaki zeminin gerilme-deformasyon davranışı (a) D-Ç:0, (b) D-Ç:2, (c) D-Ç:5, (d) D-Ç:11.

Donma-çözülme döngülerinin zeminin üç eksenli basınç dayanımlarını üzerindeki etkilerini ortaya koyabilmek için, her bir donma-çözülme döngüsü ve hücre basıncı için gerilme azaltma yüzdeleri Şekil 10 (a) ve maksimum gerilme kayıpları Şekil 10 (b)'de gösterilmiştir. Buna göre, donma-çözülme döngüleri, zemin numunelerinin maksimum gerilme değerleri üzerinde azalmaya sebep olmuştur. 11 donma-çözülme döngüsünden sonra, zeminlerin maksimum mukavemetleri %19 ile %40 oranında azalmıştır.

Öte yandan, hücre basıncı, zemin partiküllerinin konsolide olmasına ve hareket etmesine yol açan önemli bir parametredir ve bu nedenle donma-çözülme döngülerinden sonra mukavemet problemlerini tanımlamada önemli bir etkiye sahiptir. 100 kPa hücre basıncı altındaki 299,547 kPa olan maksimum gerilme 11 donma-çözülme döngüsü için %39,83 oranında azalırken, hücre basıncı maksimum değeri olan 300 kPa'a ulaştığında 561,83 kPa'lık maksimum gerilme değeri %18,79 oranında azaldığı gözlenmiştir.



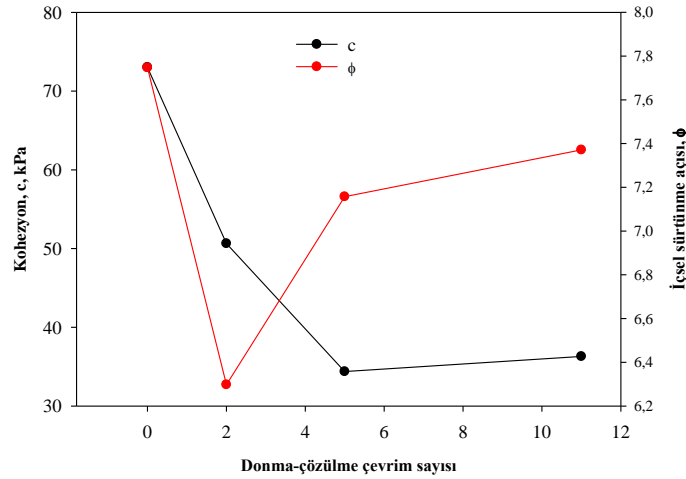
Şekil 10. (a) Donma-çözülme azaltma yüzdeleri ve (b) Donma-çözülme kaynaklı gerilme kayıpları.

Şekil 9 ve 10'da görüldüğü gibi, artan hücre basıncına karşı zemin numunelerinin gösterdiği direnç donma-çözülme döngülerine rağmen artma eğilimindedir. En yüksek hücre basıncında, yüksek plastisiteli zemin numunesi daha sünek bir davranış sergilemiştir. Bunun nedeni, hücre basıncının 100 kPa'dan 300 kPa'a artmasıyla zemine etkiyen asal gerilme arttığında, zeminin sürtünme oranının artmasıdır. Donma-çözülme çevrimleri, etkilediği alanda üstyapının yüzeyinde ve mühendislik yapısının temellerinde büyük hasarlara ve çatlaklara sebep olurken, yüksek çevre basıncından kaynaklanan zemin

danelerinin yeniden düzenlenmesi ile bu çatlaklar birbirine yaklaşarak zemin mukavemetini iyileştirebilir. Bu nedenle, donma-çözülme döngülerinin etkisi büyük olanlardan ziyade daha küçük bir hücre basıncı oranında daha belirgindir. Bu sonuçlar, Roustaei vd. [31]'nin yapmış oldukları çalışmalarında benzer bulgulara sahip olduğunu göstermektedir.

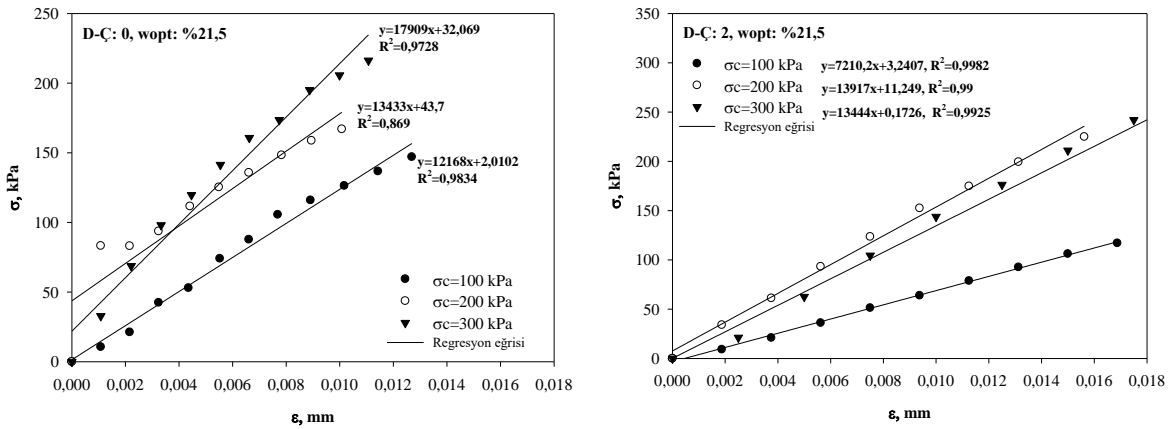
C. DONMA-ÇÖZÜLME DÖNGÜLERİNİN ZEMİN NUMUNELERİN KESME DAYANIMI PARAMETRELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

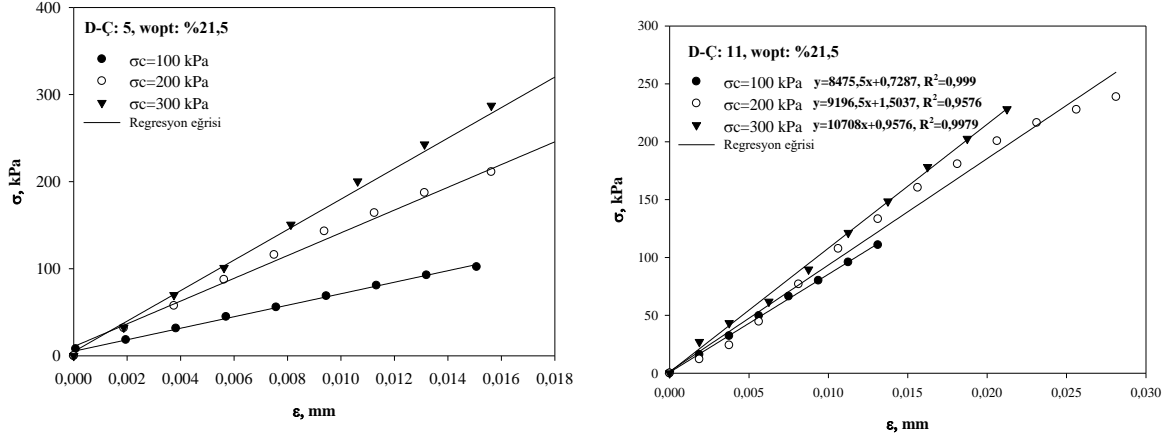
Eş. 5- 7 ve Tablo 2 göz önüne alınarak, donma-çözülme döngüleri öncesi ve sonrasında zemin numunelerinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri hesaplanmış ve Şekil 11'de sunulmuştur. Donma-çözülme döngülerinin artmasıyla zeminin kohezyonunun azaldığı gözlenmiştir [31]-[33]. Bununla birlikte, bazı durumlarda, kil parçacıklarının boşlukları ile ilgili olarak, numunelerin artan hacmi nedeniyle, donma-çözülme döngülerinin sayısının artmasıyla (örneğin 11. donma-çözülme çevriminde) birlikte kohezyonda hafif bir artış olmuştur. Öte yandan, içsel sürtünme açısı, donma-çözülme döngülerinin sayısı arttıkça bir artış göstermiştir.



Şekil 11. Donma-çözülme öncesi ve sonrası zeminin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri.

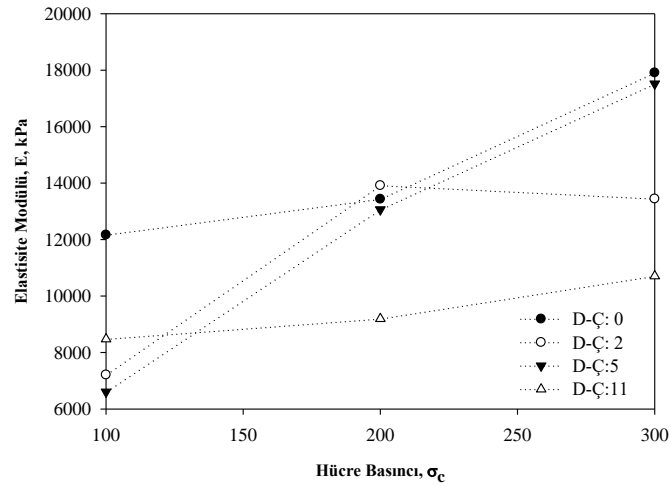
Diğer taraftan, donma-çözülme öncesi ve sonrası zemin numunelerinin elastisite modülleri (E), gerilme (σ)- birim deformasyon (ϵ) eğrisi grafiğinden, $y=ax+b$ biçiminde bir denklemle temsil edilen grafik üzerinde a katsayısı ile kPa cinsinden Şekil 12'deki gibi belirlenmiştir.





Şekil 12. Donma-çözülme öncesi ve sonrası zeminin farklı hücre basınçları altında elastisite modülleri.

Bu zemin numunesi donma-çözülme çevrimlerinden sonra $\sigma_{dev}-\varepsilon$ grafiği üzerinde daha sünek bir davranış sergilediği için elastisite modüllerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 13’de zeminin elastisite modüllerinin donma-çözülme döngüleri altındaki değişimi verilmiştir. Elastisite modülü, artan donma-çözülme döngüleri ile azalma eğilimindedir. 11 donma-çözülme döngüsünden sonra ortalama %30,345 oranında $\sigma_c=100$ kPa için, %31,538 oranında $\sigma_c=200$ kPa için ve %40,209 oranında $\sigma_c=300$ kPa için azalmaktadır.



Şekil 13. Zemin elastisite modüllerinin donma-çözülme (D-Ç) döngüleri altındaki değişimi.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, soğuk iklim bölgelerinde bulunan zeminlerin üç eksenli UU basınç dayanımı altındaki davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, zeminin fiziksel özellikleri belirlenmiş ve farklı sayıda donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılan zemin numunelerinin UU üç eksenli basınç testleri uygulanarak davranışları incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Maksimum donma-çözülme döngüsü, zemin numunelerinin yüksekliklerini %2,44 oranında arttırırken, su içeriklerini %4,36 oranında azaltmıştır. Yükseklik ve su içeriği değişimleri dikkate alındığında, bu zemin numunesinin kararlı denge konumuna 11 donma-çözülme döngüsünden sonra ulaşacağı görülmektedir.

- UU üç eksenli deney sonuçlarına göre hücre basıncı arttıkça zemin numunelerinin dayanımı artan donma-çözülme çevrimlerine rağmen artmıştır. En yüksek hücre basıncında, yüksek plastisiteli zemin numunesi daha sünek bir davranış sergilemiştir. Bunun nedeni, hücre basıncının artmasıyla zemine etkiyen asal gerilme arttığında, zeminin sürtünme oranının artmasıdır.
- Aynı hücre basıncı altında zemin numunesinin artan donma-çözülme döngülerinden sonra dayanımlarında azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca zemin numunelerinin donma-çözülme döngülerinden sonra gösterdikleri davranışlar kırılmandan sünek davranışa doğru olmuştur.
- 11 donma-çözülme döngüsünden sonra zemin numunelerinin 100 kPa hücre gerilmesi altındaki gerilim azalması %40,04 oranında, 200 kPa hücre gerilmesi altındaki gerilim azalması %27,94 oranında ve 300 kPa hücre gerilmesi altındaki gerilim azalması %18,95 oranında belirlenmiştir.
- 11 donma-çözülme döngüsünden sonra zemin numunelerinin elastisite modüllerinde $\sigma_c=100$ kPa için %30,345 oranında, $\sigma_c=200$ kPa için %31,538 oranında ve $\sigma_c=300$ kPa için %40,209 oranında azalma gözlenmiştir.
- Donma-çözülme döngülerinin artmasıyla zemin numunelerinin kohezyonu azalmıştır. Bununla birlikte, kil parçacıklarının boşlukları ile ilgili olarak, numunelerin artan hacmi nedeniyle, 11. donma-çözülme döngüsünden sonra kohezyonda hafif bir artış gözlenmiştir. Ayrıca, içsel sürtünme açısında, donma-çözülme döngülerinin sayısının artmasıyla bir artış gözlenmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] L. Sun, X. Chang, X. Yu, G. Jia, L. Chen, Y. Wang, and Z. Liu, "Effect of freeze-thaw processes on soil water transport of farmland in a semi-arid area," *Agricultural Water Management*, vol. 252, 106876, 2021.
- [2] X. Lu, F. Zhang, W. Qin, H. Zheng, and D. Feng, "Experimental investigation on frost heave characteristics of saturated clay soil under different stress levels and temperature gradients," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 192, 103379, 2021.
- [3] Y. Lai, W. Pei, M. Zhang, and J. Zhou, "Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 78, pp. 805–819, 2014.
- [4] A. Li, F. Niu, C. Xia, C. Bao, and H. Zheng, "Water migration and deformation during freeze-thaw of crushed rock layer in Chinese high-speed railway subgrade: Large scale experiments," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 166, 102841, 2019.
- [5] Z. Lin, F. Niu, X. Li, A. Li, M. Liu, J. Luo, and Z. Shao, "Characteristics and controlling factors of frost heave in high-speed railway subgrade, Northwest China," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 153, pp. 33-44, 2018.
- [6] K. Hazirbaba, "Effects of freeze-thaw on settlement of fine grained soil subjected to cyclic loading," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 160, pp. 222-229, 2019.
- [7] L. Tang, S. Tian, X. Ling, and G. Li, "Effect of freeze-thaw cycles on the strength of base course materials used under China's high-speed railway line," *Journal of Cold Regions Engineering*, vol. 31, no.4, pp. 1-9, 2017.

- [8] Z. Lu, S. Xian, H. Yao, R. Fang, and J. She, "Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 157, pp. 42-52, 2019.
- [9] H. B. Wei, L. L. Han, Q. L. Li, Z. Q. Li, and Y. P. Zhang, "Research on dynamic compressive stress response of new type filler subgrade in freezing and thawing processes," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 164, 102785, 2019.
- [10] J. E. Aubert, and M. Gasc Barbier, "Hardening of clayey soil blocks during freezing and thawing cycles," *Applied Clay Science*, vol. 65-66, pp. 1-5, 2012.
- [11] Y. Zhang, W. Zhao, W. Ma, H. Wang, A. Wen, and P. Li, "Effect of different freezing modes on the water-heat-vapor behavior in unsaturated coarse-grained filling exposed to freezing and thawing," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 174, 103038, 2020.
- [12] B. Tai, J. Liu, T. Wang, Y. Shen, and X. Li, "Numerical modelling of anti-frost heave measures of high-speed railway subgrade in cold regions," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 141, pp. 28-35, 2017.
- [13] B. Tai, Q. Wu, Z. Zhang, and X. Xu, "Cooling performance and deformation behavior of crushed-rock embankments on the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions," *Engineering Geology*, vol. 265, 105453, 2020.
- [14] J. Gao, Y. Lai, M. Zhang, and D. Chang, "The thermal effect of heating two-phase closed thermosyphons on the high-speed railway embankment in seasonally frozen regions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 141, pp. 948-957, 2018.
- [15] S. Ahmadi, H. Ghasemzadeh, and F. Changizi, "Effects of A low-carbon emission additive on mechanical properties of fine-grained soil under freeze-thaw cycles," *Journal of Cleaner Production* vol. 304, 127157, 2021.
- [16] X. Ling, S. Tian, L. Tang, and S. Li, "A damage-softening and dilatancy prediction model of coarse-grained materials considering freeze-thaw effects," *Transportation Geotechnics*, vol. 22, 100307, 2020.
- [17] J. M. Konrad, and M. Samson, "Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, no.4, 857e869, 2000.
- [18] J. Qi, P. A. Vermeer, and G. Cheng, "A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties," *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 17, no. 3, 245e252. 2006.
- [19] A. Aldaood, M. Bouasker, and M. Al-Mukhtar, "Impact of freeze-thaw cycles on mechanical behaviour of lime stabilized gypseous soils," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 99, 38e45, 2014.
- [20] P. A. G. Viran and A. Binal, "Effects of repeated freeze-thaw cycles on physico-mechanical properties of cohesive soils," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 11, no. 250, pp. 1-13, 2018.
- [21] E. Özgan, S. Ertürk ve S. Serin, "Donma ve çözülmenin kohezyonlu zeminlerin fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi," *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 1, s. 1, ss. 7-16, 2012.

- [22] Y. Zheng, W. Ma, and H. Bing, "Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis laboratory testing," *Rock and Soil Mechanics*, vol. 36, no. 5, pp. 1282-1287, 2015.
- [23] S. Leroueil, J. Tardif, M. Roy, P. La Rochelle, and J. M. Konrad, "Effects of frost on the mechanical behaviour of Champlain Sea clays," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 28, no. 5, pp. 690-697, 2011.
- [24] Y. Lu, S. H. Liu, E. Alonso, L. J. Wang, L. Xu, and Z. Li, "Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 157, pp. 206-214, 2019.
- [25] L. Tang, S. Y. Cong, L. Geng, X. Z. Ling, and F. D. Gan, "The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 145, pp. 197-207, 2018.
- [26] A. Ş. Zaimoğlu, F. Hattatoğlu, ve R. K. Akbulut, "Yüke maruz ince daneli zeminlerin donma-çözülme davranışı," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 19, s. 3, ss. 117-120, 2013.
- [27] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2020, 11 Şubat). *Kış mevsimi yağış değerlendirmesi* [Online]. Erişim: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/yagis-raporu.aspx?b=m>.
- [28] Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils ASTM D2850-95, West Conshohocken, PA, 1999.
- [29] D. Wang, W. Ma, Y. H. Niu, X. Chang, Z. Wen, "Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 48, pp. 34-43, 2007.
- [30] D. M. Wood, *Soil behaviour and critical state soil mechanics*, 1st ed., New York, USA: Cambridge University Press, 1990, pp. 43-53.
- [31] M. Roustaei, A. Eslami, and M. Ghazavi, "Effects of freeze-thaw cycles on a fiber reinforced fine grained soil in relation to geotechnical parameters," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 120, pp. 127-137, 2015.
- [32] N. Ogata, T. Kataoka, and A. Komiya, "Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil," In: Kinosita S, Fukuda M (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing*, Japan, 5-7 August 1985, pp. 201-205.
- [33] S. Atila Şahin, "Soğuk iklim bölgelerinde yüksek hızlı demiryolu altyapısının dinamik davranışlarının incelenmesi," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2022.