

GEOTEKSTİL İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ KOHEZYONLU ZEMİNLERİN DONMA ÇÖZÜNME PERFORMANSI

FREEZE THAW PERFORMANCE OF CLAYEY SOILS REINFORCED WITH GEOTEXTILES

Filiz KARAINLI¹, Altuğ SAYGILI²

ÖZET

Soğuk bölgelerde, donma-çözünme döngüleri mühendislik yapıları ve yollar için önemli sorunlara yol açmaktadır. Donma ve çözünme olayı, donma sıcaklıklarının altında buz ve suyun yer değiştirmesi yoluyla zeminlerin mühendislik özelliklerini etkilemektedir. Literatürdeki araştırmalarda, doğal ve sentetik liflerin ve kimyasal katkı maddelerinin ilavesinin zeminlerdeki donma çözünme döngüsü üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, optimum nem içeriğinde ve maksimum birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış düşük plastisiteli kaolin kilinin donma-çözünme performansının iyileştirilmesinde geotekstil katmanların etkisini araştırmaktır. Bu çalışmada bir, iki ve üç katmanlı geotekstil takviyeli kohezyonlu kil numuneleri üzerinde donma-çözünme etkisini araştırmak için kontrol ve döngüye girmiş numuneler üzerinde serbest basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Geotekstil katmanlar, sıkıştırılırken test numunelerinde eşit aralıklarla yerleştirilmiş ve bilgisayar kontrollü bir kabinde sıfır, üç, altı ve dokuz donma çözünme döngüsüne tabi tutulmuştur. Laboratuvar çalışmaları sonucunda, geotekstil donatılı numunelerin donatısız kontrol numunelere göre daha yüksek donma-çözünme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Geotekstil ile güçlendirilmiş numunelerde dokuz donma-çözünme döngüsünden sonra, serbest basınç dayanımındaki kayıp, kontrol numunelerine kıyasla yüzde 25'ten yüzde 14'e inmiştir. Geotekstil takviyesi, artan sayıda geotekstil tabakası ile test edilen numunelerde gerilme-şekil değiştirme davranışını birim deformasyon yumuşamasından gerinim sertleşmesine doğru değiştirmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Geotekstil, Kohezyonlu Zemin, Donma-çözünme, Dayanıklılık, Serbest Basınç Dayanımı*

¹ Doktora öğrencisi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, kayafiliz.4835@gmail.com
(Yük.İnş.Müh.Filiz Karainli)

²Doçent Doktor, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, saygili@mu.edu.tr

ABSTRACT

In cold regions, freeze-thaw cycles are an important phenomenon for engineering structures and roads. Freezing and thawing affects the engineering properties of soils by transposition of water and ice below freezing temperatures. In previous studies, natural and synthetic fiber addition and other chemical additives were investigated by the researchers. The main objective of this study is to investigate the effect of number of geotextile reinforcement on improving the freeze-thaw performance of low plasticity kaolinite clay samples compacted at optimum moisture content and maximum dry density. In this study, unconfined compressive strength tests have been conducted to investigate the freeze-thaw effect on the one, two and three layered geotextile reinforced cohesive soil specimens. Geotextile layers are equally spaced in the test specimens and afterwards subjected to zero, three, six and nine freeze-thaw cycles in a computer-controlled freeze-thaw cabin. As a result of the laboratory work, it was found that reinforced samples had higher freeze-thaw durability as compared to unreinforced control samples. The strength loss after nine freeze-thaw cycles decreased from 25 to 14 per cent by placing nonwoven geotextile layers within the kaolinite specimens. Geotextile reinforcement changed the stress-strain behavior from strain softening to strain hardening type in the tested specimens with increasing number of geotextile layers.

Keywords: *Geotextile, Cohesive Soils, Freeze-thaw, Durability, Unconfined Compressive Strength*

1. Giriş

Soğuk bölgelerde zeminler her yıl bir veya daha fazla donma-çözünme döngüsüne maruz kalır ve bu durum geoteknik mühendisliği uygulamaları için kritik öneme sahiptir. Donma-çözünme döngüleri, donmamış su içeriğinde, hacminde, taşıma kapasitesinde, sıkıştırılabilirliğinde, mikro yapısında ve mukavemetinde değişiklikler yaratarak zeminlerin performansını etkiler. Zeminlerin geoteknik özelliklerindeki değişiklikler, yapılarda, demiryollarında, kaplamalı ve kaplamasız yollarda, boru hatlarında ve zemin üzerine veya içinde inşa edilen yapılarda stabilite ve güvenlik sorunları yaratır. Donma aşamasında suyun buza dönüşümü, zemin matrisinin gözenek hacmini arttırır. Zeminin boşluk hacminin artması boşluk oranını değiştirerek yapısal davranışı mikro ve makro ölçekte değiştirir. Zemin tipi, sıcaklık ve nem içeriği zeminde buz oluşumunu etkiler. Bu nedenle donma-çözünme etkisine maruz kalan zeminlerde farklı zemin tiplerine yönelik stabilizasyon tekniklerinin dikkatli seçilmesi gerekmektedir.

Çimento, uçucu kül, silis dumanı ve kireç gibi katkı maddeleri ile karşılaştırıldığında lifler ve geosentetik kullanımının çevreye daha az negatif etkisi vardır (Tang vd., 2007). Lif ve geosentetik ilavesi zeminin kimyasal bileşimini değiştirmeyen fiziksel bir işlemdir. Doğal liflerin bozulmasının üstesinden gelmek için sentetik lifler ve geosentetikler, yüksek korozyon direnci ve üstün çekme dayanımı nedeniyle zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak zeminlerin donma-çözünme performansının geosentetiklerle iyileştirilmesine yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Li vd., 2017; Lai vd., 2012; Ghazavi ve Roustaei, 2013).

Ghazavi ve Roustaie (2013), dokuz donma-çözünme döngüsüne maruz bırakılan CL tipi kil numunelerde donma-çözünme sayısı artıkça basınç dayanımı değerlerinin azaldığını bulmuştur. Numune orta katmanına yerleştirilmiş tek tabaka geotekstille güçlendirilmiş bu numunelerdeki dayanım kaybının güçlendirme yapılmamış numunelere göre yüzde 43'ten yüzde 14'e düştüğünü görmüşlerdir.

Li ve diğerleri. (2017) kaplamasız yolun 3 kilometrelik bölümü üzerinde 17 test bölgesi kurarak testler gerçekleştirmişlerdir. Test bölgelerinde örgüsüz geotekstil, çift eksenli geogrid ve geokompozit kullanmışlardır. Test düzeneğinde bentonit, tip C uçucu kül ve çimento katkı maddeleri olarak kullanılmıştır. Mevsimsel donma-çözünme döngüsü sonunda, örgüsüz geotekstillerin yüksek ince içerikli zeminlerde yüzey drenajını artırması sebebiyle donma çözünme döngülerinde daha yüksek performans gösterdiğini belirtmiştir.

Lai ve diğerleri. (2012), soğuk bölgelerdeki dolgu seddelerinde donma kaynamasını ve donma kabarmasını kontrol etmek için yürüttükleri saha ve laboratuvarında gerçekleştirilen testlerde geotekstil tabakası içeren dolguların daha iyi su drenaj kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Ding ve diğerleri. (2018) lif ve çimento katkılı kil numuneler üzerinde yaptıkları çalışmalarda 10 donma-çözünme döngüsünden sonra dayanım kaybının yüzde 42 ila yüzde 69 arasında değiştiğini kaydettiler. Tanjant modülü, kontrol numuneleri için lif içeriğinin artmasıyla azalmış, çimento içeriğinin artmasıyla artmış ve ilk donma-çözünme döngüsünden sonra yüzde 43 ila 72 oranında azaldığı belirtilmiştir. Donma-çözünme döngülerine maruz kalan çimentoyla iyileştirilmiş numuneler doğrusal elastik, plastik akma ve gerinim yumuşaması davranışları göstermiştir. Gerilme-şekil değiştirme aşamalarındaki değişimin, donma-çözünme hasarı nedeniyle stabilize edilmiş zeminde meydana gelen yapısal değişikliklerle ilişkili olduğu araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir.

Kravchenko ve diğerleri. (2018), donma-çözünme döngülerine maruz kalan bazalt ve polipropilen lifle iyileştirilmiş killi zeminleri araştırmıştır. Kil numunelerine ağırlıkça yüzde 0, 0,25, 0,5 ve 0,75 oranında lif eklenmiş ve sıkıştırılan numuneler 0, 2, 5, 8, 10 ve 15 donma-çözünme döngülerine maruz bırakılmıştır. Donma-çözünme döngüleri sırasında lif ilavesinin mukavemet kaybını azalttığını ve maksimum mukavemet kaybının 15 döngü sonrasında yüzde 30 ila 35 arasında değiştiğini gözlemlenmiştir.

Boz ve Sezer (2018), kireçle stabilize edilmiş bazalt ve polipropilen lif modifiyeli kil numuneleri üzerinde donma-çözünme testleri gerçekleştirmiştir. Donma-çözünmeye karşı dayanıklılık için polipropilen liflerin bazalt liflere göre daha etkili olduğunu gözlemişlerdir.

Wei ve diğerleri. (2015), donma-çözünme etkisine maruz kalan siltli kil numuneleri güçlendirmek için uçucu kül ve ufalanmış atık lastik parçaları kullanmışlardır. Uçucu kül ve atık lastik kırıntısı ile modifiye edilmiş siltli kilin, donma-çözünme etkisine maruz bırakıldıktan sonra kontrol numuneye karşılaştırıldığında daha iyi performans gösterdiğini gözlemişlerdir.

Saygılı ve Dayan (2019), kireçle stabilize edilmiş kile ağırlıkça yüzde 2,5 ila 10 arasında değişen oranlarda silis dumanı ve yüzde 0,25 ila 1 arasında değişen oranlarda polipropilen lif ilave etmişlerdir. Donma çözünme döngüleri sonrası en yüksek serbest basınç dayanımı değerleri için optimum oranların yüzde 0,25 fiber ve yüzde 10 silis dumanında olduğunu kaydetmişlerdir. Silis dumanı ve fiberle modifiye edilmiş numuneler donma-çözünme

testlerinde daha iyi performans gösterirken, iyileştirilmiş numuneler aynı donma-çözünme döngü sayılarında daha az mukavemet kaybı göstermiştir. Kireçle zenginleştirilmiş lif ve silis dumanı ile iyileştirilmiş kil numunelerinin yük altındaki davranışının sünekten gevrek davranışa doğru değiştiği tespit edilmiştir.

Ghazavi ve Roustaie (2010), liflerle güçlendirilmiş kil numunelerin artan donma-çözünme döngüsü sayısı ile serbest basınç dayanımı değerlerinin yüzde 20 ila 25 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Lif ilavesinin donma kabarmasını azalttığı ve kil numunelerinin mukavemetini arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Liu ve diğerleri (2020), doğal liflerle güçlendirilmiş donmuş-çözülmuş zeminler üzerinde deneyler yapmıştır. Donma-çözünme etkisi altında, güçlendirilmiş numunelerdeki serbest basınç dayanımındaki azalmanın, zemin-lif ara yüzeyindeki azalmadan daha az olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir.

Noorzad ve diğerleri. (2010) farklı sayıda geotekstil tabakalarla güçlendirilmiş killi zeminin davranışını araştırmışlardır. Geotekstil katmanların sayısının artmasıyla gerilme-şekil değiştirme davranışının iyileştirildiği bulunmuştur. Güçlendirilmiş numuneler, güçlendirilmemiş kontrol numunelere göre daha sünek davranış göstermiştir. Çalışmada bu durumun olası nedeni, test edilen numunelerde kayma bandı gelişimini engelleyen geotekstil tabakaları ile açıklanmıştır.

Gerçekleştirilen bu çalışmanın temel amacı, düşük plastisiteli kaolin kilinin donma-çözünme performansının iyileştirilmesinde geotekstil tabaka sayısının etkisinin araştırılmasıdır. Örgüsüz geotekstilli (çok katmanlı) ve geotekstilsiz (kontrol) numuneler için bir dizi serbest basınç testi gerçekleştirilmiştir. Değişen sayıda geotekstil katmana sahip güçlendirilmiş ve kontrol numunelerinin donma-çözünme döngülerine maruz kalmadan ve maruz kaldıktan sonraki mekanik ve fiziksel davranışları incelenmiştir.

2. MALZEMELER

Çalışmada kullanılan kaolin, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Çanakkale ili yakınındaki bir kaynaktan tedarik edilmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılan kaolinin kimyasal bileşimi Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kaolinin kimyasal bileşimi

Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₄	P ₂ O ₅	MnO	LOI
Kaolin%	63.09	25.50	0.38	0.37	0.30	0.01	0.14	0.3 0	0.6 5	-	-	7.3 0

Örgüsüz geotekstil Ankara'da bulunan Geoplas A.Ş.'den temin edilmiştir. Geotekstilin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de görülmektedir.

Tablo 2.2. Geotekstilin mekanik ve fiziksel özellikleri

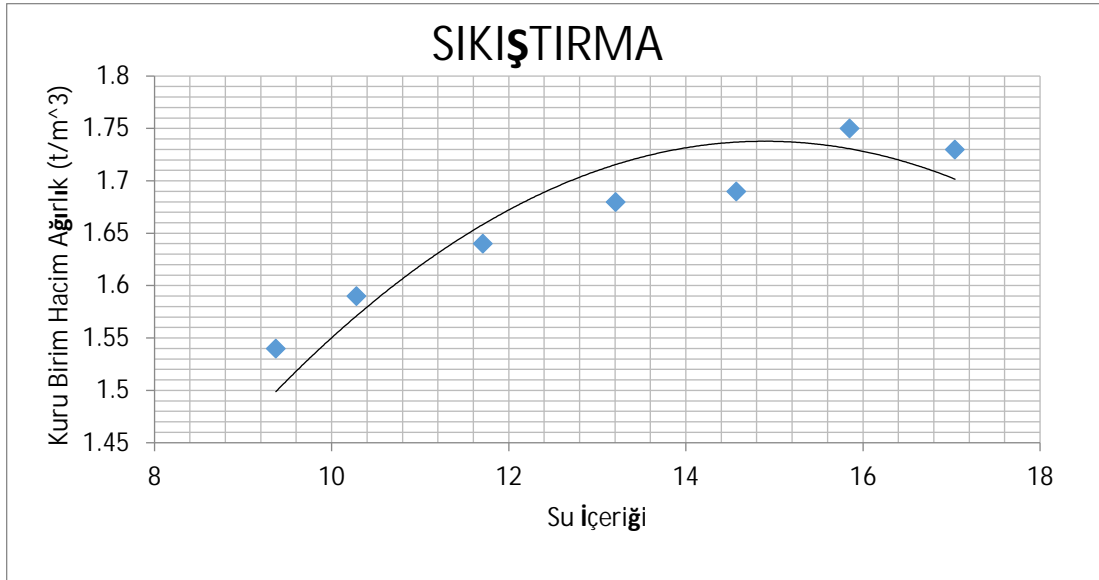
Geotekstil	
Çekme Dayanımı (kN/m)	8
Kopma Uzaması (%)	40
CBR Delinme Direnci (N)	1400
Dinamik Koni Düşüşü (mm)	34.0
Geçirimsizlik (m/s)	0.11
Karakteristik Açıklık Boyutu (μm)	130
2kPA'nın Altındaki Kalınlık (mm)	1.0
Ağırlık (g/m^2)	100

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çok katmanlı geotekstille ve geotekstilsiz hazırlanan toplam 96 numune 0, 3, 6 ve 9 donma çözünme döngülerine maruz bırakılmıştır.

3.1. Numune Hazırlanması

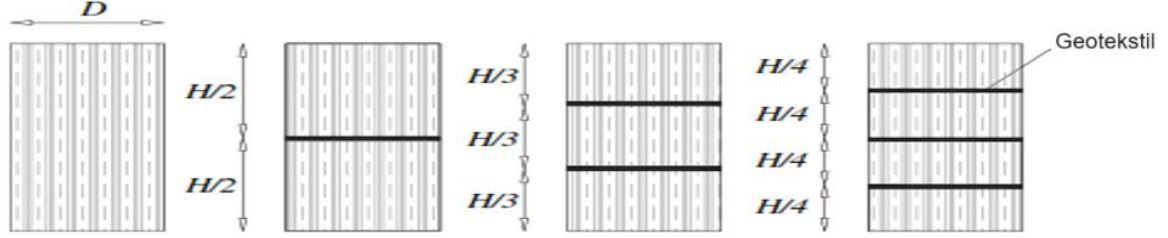
Kaolinin optimum nem içeriğini ve maksimum kuru birim ağırlığını belirlemek için ASTM D698-12e2, 2012'ye göre standart Proktor deneyi yapılmıştır (Şekil 3.1). Numuneler optimum nem içeriğinde streç film ile sarılmış ve numunelerdeki nemin eşit şekilde dağılması için ağzı kapalı plastik torbalarda 24 saat bekletilmiştir.



Şekil 3.1. Kaolinin Proktor sıkıştırma eğrisi

Numuneler Minyatür Harvard Kompaktörü yardımıyla 72 mm yüksekliğinde ve 34 mm çapında 3 katman halinde standart proktor enerji düzeyinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Küçük boyutlu numunelerin hazırlanması numune içindeki ısı transferini kolaylaştırmakta

ve süreksiz donma koşullarını en aza indirmektedir (Konrad ve Samson,2000). Sıkıştırma aşamasında geotekstil tabakası tek katlı numuneler için orta seviyeye, iki katlı numuneler için $1/3H$ ve $2/3H$, üç katlı numuneler için $1/4H$, $2/4H$ ve $3/4H$ olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Sıkıştırma işleminden sonra numuneler, nem kaybını önlemek için streç film ve ardından alüminyum folyo ile sarılmış ve test gününe kadar nem ve sıcaklık kontrollü bir küreleme odasında (21°C ve %90 bağıl nemde) desikatör içerisinde saklanmıştır.



Şekil 3.2. Numunelere geotekstil yerleştirilmesi (Noorzad and Mirmoradi, 2010)

3.2. Donma-Çözünme Döngüleri

Geotekstil ile iyileştirilmiş ve kontrol numuneler ASTM C666M-15, 2015'e uygun olarak donma-çözünme döngülerine maruz bırakılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 3.3'te görüldüğü gibi bilgisayar kontrollü donma-çözünme kabinine yerleştirilmiştir. Donma-çözünme cihazı -23°C 'de 12 saat ve $+23^{\circ}\text{C}$ 'de 12 saat süreyle çalışacak şekilde programlanmıştır. 12 saat sonundaki geçiş rampaları 30'ar dakika olarak ayarlanmıştır. Bu test sıcaklığı daha önce diğer araştırmacılar tarafından tercih edilmiştir (Qi ve diğerleri, 2006). Kontrol ve iyileştirilmiş numunelerde mukavemet değişiminin tespiti için numuneler 0, 3, 6 ve 9 donma-çözünme döngülerine tabi tutulmuştur. Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla döngü sayıları literatürdeki çalışmalara benzer şekilde seçilmiştir (Ghazavi ve Roustaei, 2013).



Şekil 3.3. Bilgisayar kontrollü donma-çözünme cihazı

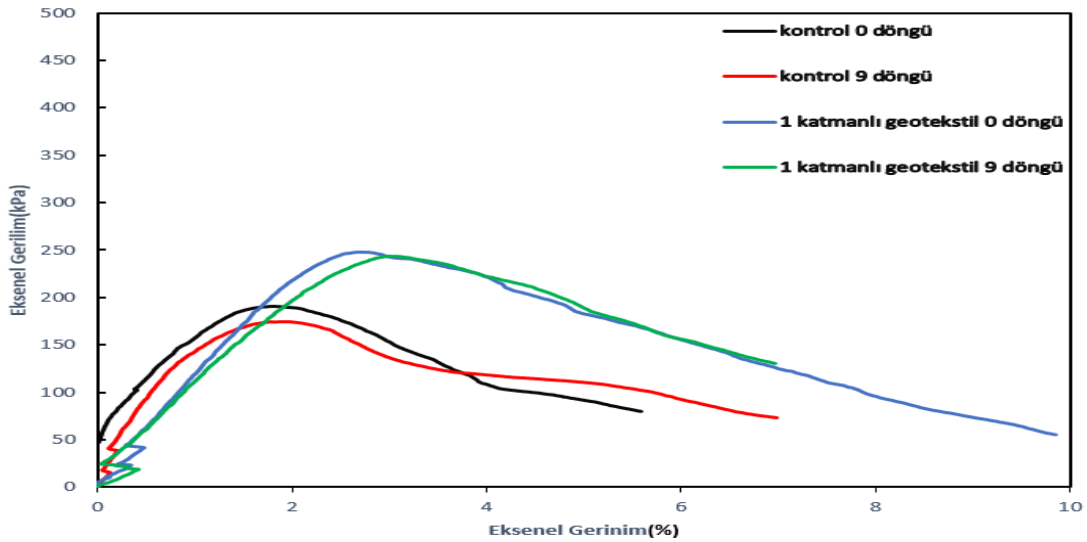
3.1. Serbest Basınç Dayanımı

Numuneler belirlenen sayıda donma-çözünme döngülerine maruz kaldıktan sonra, iyileştirilmiş ve kontrol numuneler, serbest basınç dayanımı test cihazında test edilmiştir. Basınç dayanımı değerleri, ASTM D2166M-16, 2016'ya uygun olarak donma-çözünme döngülerinin etkilerini değerlendirmek amacıyla deformasyon kontrollü aksenal yük uygulamasıyla belirlenmiştir. Deformasyon hızı 1 mm/dakika olarak seçilmiştir ve test süresi boyunca sabit tutulmuştur.

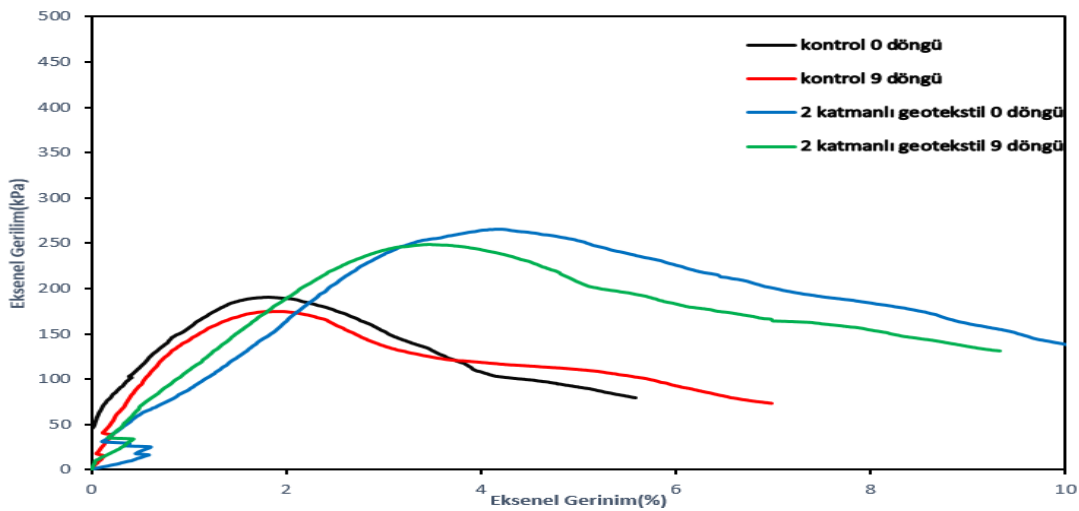
4. SONUÇLAR

4.1. Donma-Çözünme Döngülerinin Deformasyon-Şekil Değişirme Davranışı Üzerindeki Etkileri

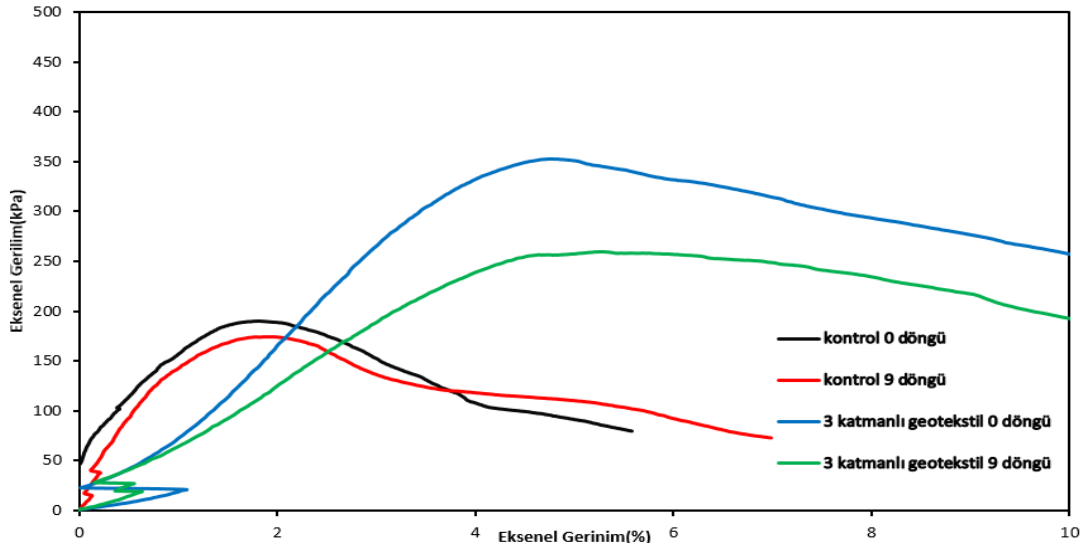
Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3, 0-9 donma-çözünme döngüsüne maruz bırakılan kontrol, 1, 2 ve 3 katmanlı geotekstil ile güçlendirilmiş numunelerin test sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.1. D-Ç döngülerinden sonra kontrol ve 1 katmanlı geotekstilli numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 4.2. D-Ç döngülerinden sonra kontrol ve 2 katmanlı geotekstilli numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri

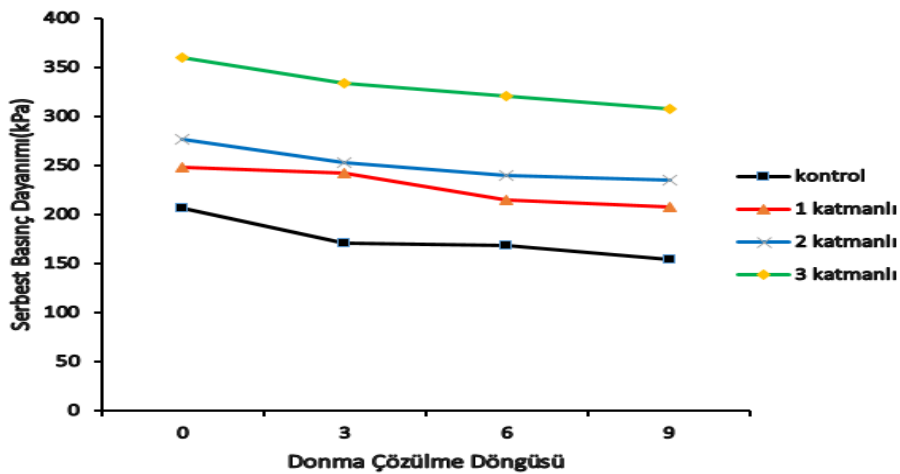


Şekil 4.3. D-Ç döngülerinden sonra kontrol ve 3 katmanlı geotekstilli numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Sonuçlar incelendiğinde donma-çözünme çevrim sayısı arttıkça tüm geotekstil katmanlı ve kontrol numunelerinde dayanımın döngü sayısı arttıkça azaldığı görülmektedir. Ancak kontrol numunelerinde dayanım azalması daha belirgindir. Ayrıca geotekstil katmanlarının sayısı azaldıkça dayanım azalması da daha belirgindir. İyileştirilmiş ve kontrol numunelerde donma-çözünme etkisine bağlı olarak dayanım düşüşü daha önce yapılan çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Ghazavi ve Roustaie, 2013; Saygılı ve Dayan, 2019). Geotekstil ilavesi test edilen numunelerde gerilme-şekil değiştirme davranışını birim deformasyon yumuşamasından gerinim sertleşmesi tipine doğru değiştirmiştir.

4.2. Donma-Çözünme Döngülerinin Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkileri

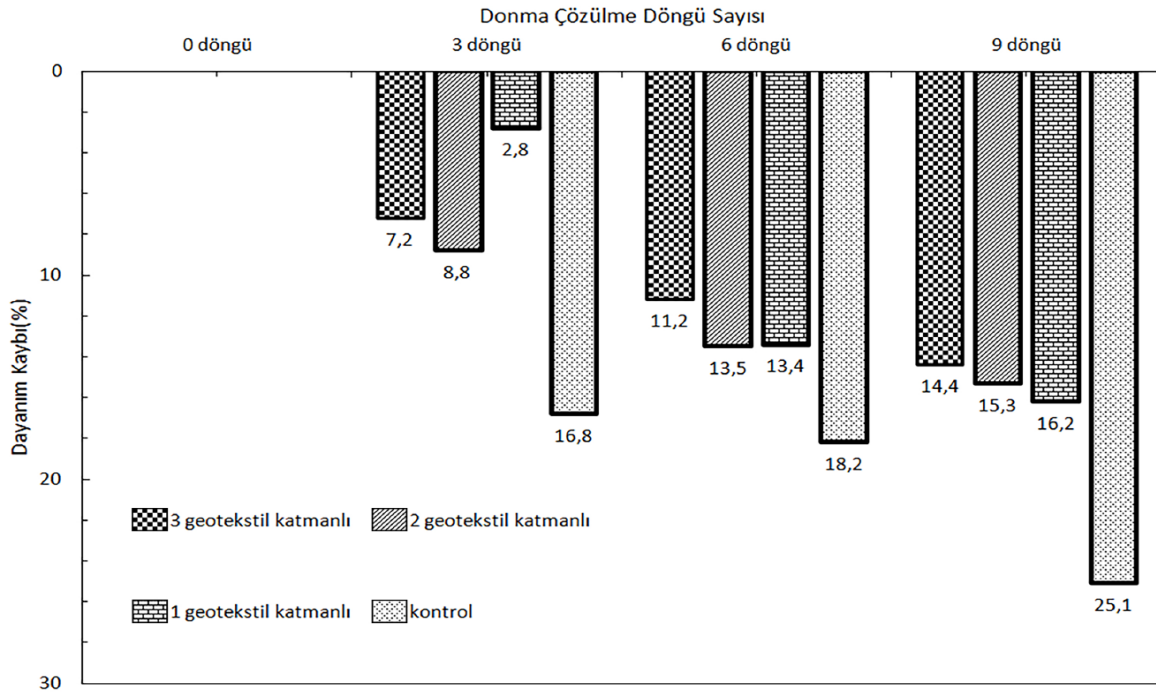
0 - 9 donma çözünme döngüsüne maruz kalan kontrol ve iyileştirilmiş kaolin numunelerin ortalama basınç dayanımı değerleri Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Her nokta üç numunenin ortalamasını göstermektedir.



Şekil 4.4. Geotekstille iyileştirilmiş ve kontrol numunelerin donma-çözünme döngülerine maruz bırakıldıktan sonraki serbest basınç dayanım değerleri

Şekil 4.4'e göre , donma-çözünme döngü sayısının artmasıyla hem kontrol hem de iyileştirilmiş numunelerin serbest basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, ayrıca geotekstil tabaka sayısının artmasıyla da test edilen numunelerdeki dayanım kaybının azaldığı görülmektedir.

Şekil 4.5'teki dayanım kayıp yüzdeleri incelendiğinde, kontrol (geotekstilsiz) numunelerin serbest basınç dayanımı 9 donma-çözünme döngüsüne maruz kaldığında %25 oranında azalırken, 3 katlı geotekstilli numunelerde dayanım değerleri %14 oranında azaldığı görülmektedir. 9 donma-çözünme döngüsünde maksimum dayanım kaybı kontrol numunelerinde %25 ve güçlendirilmiş numunelerde ise %16 olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. Geotekstil katman sayıları ile döngüler sonrası dayanım kaybı ilişkisi

4.3. Donma-Çözünme Döngülerine Maruz Kalan Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Davranışlarına Geotekstil Kullanımının Etkisi

Dayanım kaybı yüzdesindeki değişiklik, donma-çözünme işlemi sırasında meydana gelen fiziksel aksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Geotekstil tabakasının yüksek geçirgenliği sayesinde suyun geotekstil içerisinde ve dolayısıyla zemin numunesinde yatay ve düşey yönde hareket etmesine olanak sağlamıştır. Donma-çözünme esnasında donma aşamasında buz kristalleri oluşmakta ve çözünme aşamasında serbest su zemin matrisine girerek eridikten sonra zeminin alt kısımlarına doğru hareket etmektedir. Geotekstil katmanlar suyun yerçekimi ile zemin matrisinde daha kolay bir şekilde hareket etmesini sağlamıştır (Ghazavi ve Roustaei, 2013). Suyun zemin matrisi boyunca hareketi, numunelerin üst kısmındaki su içeriğini azalttığı düşünülmekte ve bu durumun artan döngü sayısı ile beraber iyileştirilmiş numunelerdeki donma-çözünme tahribatını görece azalttığı test sonuçları ile tutarlı olarak bulunmuştur. Geotekstille güçlendirme durumunda zeminin su içeriği değerlerinin azalması sebebi ile yapılar ve yollar için en kritik bölge olan zemin yüzeyine yakın zondaki donma-çözünme döngüleri sırasında daha az buz kristalleri

oluşumunun sağlanacağı düşünülmektedir. Zemin matrisindeki geotekstil katmanlarının sayısının artmasıyla suyun zemin matrisinden serbestçe hareket etmesi daha da kolaylaşacak ve bu da donma-çözünme etkisi nedeniyle oluşacak tahribatı azaltıp, dayanımı arttırabilecektir. Bu dayanım artışı, donma-çözünme riski olan bölgelerde inşa edilen yol ve yapıların bakım maliyetlerini azaltacaktır, çevreye ve ekonomiye ciddi katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Boz, A. and Sezer, A. (2018) Influence of fiber type and content on freeze-thaw resistance of fiber reinforced lime stabilized clay, *Cold Reg Sci Technol* 151: 359–366.
- Ghazavi, M. and Roustaei, M. (2010) The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay, *Cold Reg. Sci. Technol* 61(2–3): 125–131.
- Ghazavi, M. and Roustaei, M. (2013) Freeze-thaw performance of clayey soil reinforced with geotextile layer, *Cold Reg Sci Technol* 89: 22-29.
- Konrad, J.M. and Samson, M. (2000) Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to close-system freezing and thaw consolidation, *Can Geotech J* 37: 857–869.
- Kravchenko, E., Liu, J., Niu, W. and Zhang, S. (2018) Performance of clay soil reinforced with fibers subjected to freeze-thaw cycles, *Cold Reg Sci Technol* 153: 18-24.
- Lai, Y., Zhang, S. and Yu, W. (2012) A new structure to control frost boiling and frost heave of embankments in cold regions, *Cold Reg Sci Technol* 79-80: 53-66.
- Li, C., Vennapusa, P.K.R., Ashlock, J. and White D.J. (2017) Mechanistic-based comparisons for freeze-thaw performance of stabilized unpaved roads, *Cold Reg Sci Technol* 141: 97-108.
- Li, Y., Ling, X.Z., Su, L., An, L.S., L, P. and Zhao, Y.Y. (2018) Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition, *Cold Reg Sci Technol* 146: 53–59.
- Liu, C., Lv, Y., Yu, X. and Wu, X. (2020) Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil, *Geotex Geomembranes* 48(4): 581-590.
- Noorzad, R. and Mirmoradi, S.H. (2010) Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay, *Geotex Geomembranes* 28: 386-392.
- Qi, J., Vermeer, P.A. and Cheng, G. (2006) A review of the influence of freeze–thaw cycles on soil geotechnical properties, *Permafrost Periglac Proces* 17: 245–252.
- Saygili, A. and Dayan, M. (2019) Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers, *Cold Reg Sci and Technol* 161: 107-114. doi: 10.1016/j.coldregions.2019.03.010
- Tang, C.S., Shi, B., Gao, W., Chen, F.J. and Cai, Y. (2007) Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil, *Geotext Geomembranes* 25 (3): 194–202.
- Yarbasi, N., Kalkan, E. and Akbulut, S. (2007) Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze–thaw, of granular soils with waste additives, *Cold Reg Sci Technol* 48: 44–54.
- Zaimoglu, A.S. (2010) Freezing–thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers, *Cold Reg Sci Technol* 60 (1): 63–65.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
CL	Kil
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
UCS	Serbest Basınç Dayanımı