

NANOSİLİKA KATKILI ZEMİNLERDE DONMA-ÇÖZÜLME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

EVALUATION OF FREEZE-THAW CYCLES ON NANOSILICA ADDED SOILS

İsmail TAŞ¹, Tuğba ESKİŞAR²

ÖZET

Çeşitli katkılarla stabilize edilen zeminlerin donma-çözülme etkilerine maruz kalmaları önemli derecede mukavemet kayıplarına sebep olabilmektedir. Bu çalışmada nanosilika, kireç ve bu katkıların her ikisi ile stabilize edilmiş kil zeminlerin kür süresine bağlı olarak donma-çözülme etkileri altındaki mukavemet değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Kireç %5 oranında, nanosilika katkısı ise %0.3, %0.5, %0.7, %1 oranlarında kullanılmıştır. Örneklerin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda ulaştıkları serbest basınç dayanımları incelenmiştir. Çalışmada sadece nanosilika katkısı kullanılmasının belirgin bir mukavemet artışı oluşturmadığı gözlenmiştir. Bununla beraber, nanosilika ve kireç ilavesi ile hazırlanan örneklerde dayanım artışları gözlenmiştir. Donma-çözülme çevrimleri 1'den 10 çevrime kadar 12 saatlik süreler halinde ± 18 °C ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Kil örnekler üzerindeki donma-çözülme çevrimleri ile %41 oranına ulaşan dayanım kayıpları gözlenmiştir. Ayrıca numunelerin donma-çözülme çevrimlerinden kaynaklanan dayanım kayıpları nanosilika ve kireç ilavesi ile kısmen önlenebilmiştir. Örneklerin hacim değişimleri donma-çözülme çevrim sayıları ile ilişkili olarak incelenmiştir. Numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri, donma-çözülme çevrimleri uygulanan örneklerde çok daha gevrek bir davranış sergilendiğini göstermiştir. Sonuç olarak, donma-çözülme çevrimlerine maruz kalan zeminlerde nanosilikanın kireçle birlikte kullanımının daha başarılı bir iyileştirme sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: kil, nanosilika, kireç, serbest basınç dayanımı, donma-çözülme

ABSTRACT

The exposure to freeze-thaw effects can cause significant strength losses in stabilized soils. In this study, the strength of clay soils stabilized with nanosilica, lime, and nanosilica-lime under freeze-thaw effects were investigated depending on the curing time. Nanosilica contents were 0.3%, 0.5%, 0.7%, 1%, and lime content was 5% in the specimens. The unconfined compressive strengths of the specimens at the end of 7 and

¹ İnş. Müh., Ege Üniversitesi, ismail.taas@gmail.com (Sorumlu yazar)

² Doç. Dr., Ege Üniversitesi, tugba.eskisar@ege.edu.tr

28 days of curing were examined. It was observed that using only nanosilica additive did not create a significant increase in strength. However, strength increases were observed in the specimens prepared with the addition of nanosilica-lime. Freeze-thaw cycles were carried out from 1 to 10 cycles for 12 hours at ± 18 °C ambient conditions. Strength losses reaching to 41% were observed after the freeze-thaw cycles on clay specimens. In addition, the strength losses of the specimens caused by the freeze-thaw cycles were partially prevented by the addition of nanosilica-lime. The volume changes in the soil were investigated in relation to the number of freeze-thaw cycles. The stress-strain curves of the specimens showed that the soil exhibited a brittle behavior after the freeze-thaw cycles. As a result, the use of nanosilica-lime provided a more successful improvement in soils exposed to freeze-thaw cycles.

Keywords: clay, nanosilica, lime, unconfined compressive strength, freeze-thaw

1. GİRİŞ

Çevresel şartlar zemin özellikleri üzerinde değişimlerin yaşanmasında etkili olabilmektedir. Zeminin donması dünyanın farklı bölgelerinde soğuk iklim şartlarında sıklıkla rastlanan bir olaydır (Lu vd., 2019). Donma-çözülme etkilerine maruz kalınması özellikle şişebilen kil içeriği yüksek olan zeminlerde ve etkileşimde bulundukları yapılarda büyük hasarlara ve buna bağlı olarak büyük maliyetlere neden olabilmektedir. Donma-çözülme gibi çeşitli etkilere karşı zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesi önemli bir araştırma konusudur (Shahsavani vd., 2021).

Bell (1995), zemin stabilizasyonu için kil mineralojisinin çok önemli bir kriter olduğunu belirtmiştir. Zemin mineralojisi ve sıcaklık kriterlerinin zeminlerde plastisite, dayanım kazanma hızı ve stabilizasyonun başarısı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bell (1996), farklı mineralojilere sahip killerin kireç ile stabilizasyonunu incelemiştir. Bell, kil zeminlere kireç ilave edildiğinde kalsiyum iyonlarının kireç sabitlenme noktasına kadar kil mineralleri ile etkileşime girdiğini savunmuştur. Katkı olarak kireç kullanılması, optimum kireç içeriğine kadar dayanımdan çok işlenebilirlik açısından etkili olmuştur. Kaolin, kireç ile reaksiyona montmorillonite göre daha geç girse de montmorillonite göre daha yüksek bir geç dayanım değeri vermektedir. Bell (1996), ayrıca kireç ile yapmış olduğu iyileştirme çalışmaları sonunda optimum kireç içeriği olarak %4-6 aralığını tespit etmiştir. Dash ve Hussain (2012), yüksek ve düşük plastisiteli zeminler üzerinde sönmemiş kirecin etkilerini araştırmıştır. Silika jel oluşturan silika bakımından zengin zeminlerde aşırı kirecin varlığı nihai mukavemetin azalmamasına yol açtığı ortaya koymuştur. Silika jelin zeminlerin plastisitesinin artmasına ve şişmesine neden olduğu savunulmuştur.

Zhang (2007), nanopartiküllerin zemin içerisinde bulunmasının çok küçük miktarlarda bile zeminlerin davranışları ve mekanik özellikleri üzerinde önemli olabileceğini öne sürmüştür. Nanopartiküllerin sahip oldukları çok geniş yüzey alanlarının zeminlerin sahip oldukları fiziko-kimyasal davranışları etkilediğini savunulmuştur. Changizi ve Haddad (2017), düşük ve yüksek likit limite sahip killi zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için nanopartiküllerin etkisini araştırmıştır. Çalışmada %0,5, %0,7 ve %1,0 oranlarında nanosilika kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın sonunda serbest basınç dayanımında %56'a varan iyileşme olduğu görülmüştür. Nanosilika içeriğinin artması ile kırılma anında ölçülen deformasyonlar azalmış ve elastik modül değeri artmıştır. Nanosilika ilavesinin kilin

mekanik özellikleri üzerinde önemli oranda iyileştirme gösterdiği tespit edilmiştir. Moayed vd. (2017), yaptıkları çalışmada kaolin kili ve nanosilikanın etkileşimini araştırmışlardır. %1 ile %5 arasında değişen oranlarda nanosilika katkısı ile eklenen zemin örnekleri incelenmiştir. Mukavemette dikkate değer artışın %4 nanosilika içeriğinde gerçekleştiği gözlenmiştir. Nanosilika bu kapsamdaki araştırmaların odak noktası olsa da nano boyuta sahip farklı malzemeler ile gerçekleştiren çalışmalar bulunmaktadır. Nano-bakır, nano-kil ve nano-magnezyum (Majeed vd., 2014); nano-ZnO (Ghorbani vd., 2019) literatürde yer alan çalışmalara örneklerdir.

Kalhor vd. (2019), %2 oranında nanosilika katkısı eklediği ince daneli zemini 9 donma-çözülme çevrimine tabi tutmuştur. Shahsavani vd. (2021), cüruf ve nanosilika ile ikame edilmiş örneklerde kür süresi etkisini incelemiş ve kür süresinin artmasının donma-çözülme etkilerine karşı önemli bir katkı sunduğunu ifade etmiştir.

Zemin iyileştirme çalışmalarında kullanım potansiyeline sahip birçok katkı maddesi olmasına rağmen çevre dostu çözümler sağlayabilecek katkı türleri sınırlıdır. Nanosilika katkısı, “yeşil bağlayıcı” kategorisinde yer almaktadır ve nihai etkileri henüz ortaya çıkmamıştır (Aksu ve Eskişar, 2021). Nanosilika katkılı zeminlerde donma-çözülme etkilerine dair çalışmalar literatürde sınırlı olarak yer almaktadır.

Bu çalışma, nanosilika ve kireç ile stabilize edilmiş kil zemindeki donma-çözülme çevrimlerinin etkileri ele almaktadır. Bu kapsamda zemin özelliklerinde meydana gelen değişimlerin tespit edilebilmesi için Atterberg limitleri, kompaksiyon, serbest basınç deneyleri ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan kaolin tipi kil zemin yüksek plastisiteli kil olarak sınıflandırılmıştır (ASTM D2487, 2006). ASTM D4318 (2017) ve ASTM D698 (2012) standartları takip edilerek sırasıyla Atterberg limitleri ve standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. İncelenen zeminin likit limit değeri %52, plastik limiti %34 ve bunlara bağlı olarak plastisite indisi %18 olarak belirlenmiştir. Zeminin optimum su içeriği %32 olarak elde edilmiştir.

Stabilizör olarak sönmemiş kireç tercih edilmiştir. Kireç, bir maden firmasından temin edilmiş olup kimyasal analiz sonuçlarına göre %95.6 CaO ve %0.9 MgO içermektedir. Kalan miktarı eser miktarda barındırdığı diğer elementler oluşturmaktadır. Kullanılan nanosilika partikülleri 15 nm boyutunda ve %99.5 saflığa sahiptir.

Bu çalışmada kullanılan kireç içeriği zemin kuru ağırlığının %5'i olarak belirlenmiştir. Nanosilika içeriği %0.3, %0.5, %0.7 ve %1 oranlarında tercih edilmiştir.

2.2. Yöntem

Donma-çözülme deneyleri ve serbest basınç deneyleri uygulanacak numuneler şu şekilde hazırlanmıştır: İlk aşama olarak belirlenen oranlara uygun olarak zemin ve kireç kuru biçimde karıştırılmıştır. Daha sonra nanosilika yüksek devirli (120 rpm) bir karıştırıcı ile 5

dakika suda homojen dağılım elde edilene kadar karıştırılmış ve kuru karışıma ilave edilmiştir. Kullanılan su miktarı kompaksiyon deneyleri sonucunda belirlenen optimum su içeriklerinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Elde edilen numuneler 50 mm çap ve 100 mm uzunluğa sahiptir. Numunelerin sahip oldukları su içeriklerini muhafaza edebilmeleri için hava geçirmez film ile kaplanmış ve kür süresinin sonuna kadar nem odasında tutulmuştur. Oda içerisindeki sıcaklık $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nem içeriği %90-95'tir.

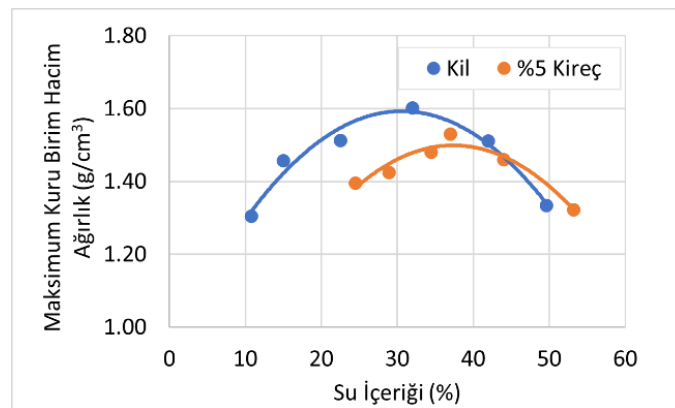
Kütleme sürecini tamamlayan numuneler üzerinde donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Deney süreci başlamadan önce numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Donma-çözülme deneyleri 1'den 10'a kadar ardışık biçimde artan çevrimler olarak uygulanmıştır. Donma-çözülme deneyleri ASTM D560 (2012) kriterlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Donma sıcaklığı $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ aralığında, çözülme sıcaklığı $+18\pm 2^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Her bir donma ve çözülme süreci 12 saat olarak uygulanmış ve 1 çevrim 24 saatte tamamlanmıştır. Donma-çözülme çevrimlerini tamamlayan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ASTM 2166 (2006) takip edilerek yapılmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Kireç Katkısının Etkisi

%5 oranında sönmemiş kireç katkısı kullanılarak hazırlanan zemin örnekleri üzerinde Atterberg limitleri deneyleri gerçekleştirilmiştir. Likit limit ve plastik limit değerleri sırasıyla %75 ve %44 olarak saptanmıştır. Atterberg limitlerindeki artış, kil partikül yüzeyleriyle suyun birbirine bağlanmasını sağlayan hidroksil iyonlarının etkisinden kaynaklanmaktadır. Kısa sürede tespiti yapılan plastisite özellikleri, kireç ilavesiyle kil parçacıklarının yeniden düzenlenmesine bağlı olarak elde edilmiştir. Bu aşamada henüz puzolanik reaksiyonlar oluşmaya başlamamıştır (Vitale vd., 2020). Dolayısıyla, plastisite tamamen kirecin malzeme özelliklerine bağlı olarak tespit edilebilmiştir.

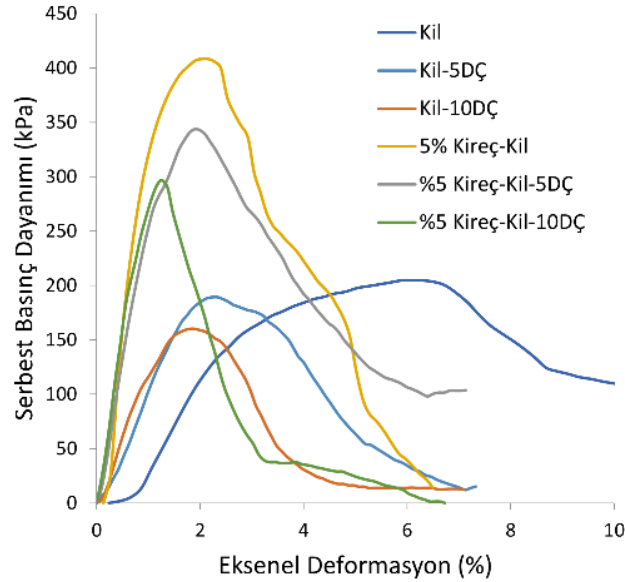
Kil ve kireç katkılı killerin kompaksiyon deneyleri ayrı ayrı yapılmıştır (Şekil 1). Zemin içerisine kireç ilavesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlık azalmış ve optimum su içeriği artmıştır. Kil ve kireç katkılı kil zeminin optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla %32, %38 ve 1.60 g/cm^3 , 1.50 g/cm^3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Saf kil ve kireç katkılı kilin optimum su içerikleri

Donma-çözülme çevrimleri tamamlanan örnekler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Saf kilden oluşan örnekler 205 kPa değerinde mukavemet göstermiştir. 5 ve 10 donma-çözülme çevrimlerinin ardından kil örneklerin mukavemetleri sırasıyla 192 ve 160 kPa'ya düşmüştür. Bir gün süre ile kür odasında bekletilen ve ardından 10 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılan %5 kireç içeriğine sahip kil numunenin 195 kPa mukavemete sahip olduğu görülmüştür. %5 kirecin katkı olarak kullanıldığı bu örnek grubunda gözlenen mukavemet 7 gün sonra 312 kPa, 28 gün sonra ise 408 kPa olarak kaydedilmiştir.

Saf kil örneklerdeki sünek davranışın donma-çözülme çevrimlerinin etkisiyle daha gevrek bir davranışa evirildiği Şekil 2'de görülmektedir. Saf kilde görülen en yüksek mukavemet değerine %6.09 deformasyonda ulaşılmışken 10 çevrim donma-çözölmeye maruz kalan örneklerde eksenel deformasyon %1.89'da ulaşılmıştır. Kireç ilave edilmesi de kilin daha kırılgan davranış göstermesine katkıda bulunmuştur. %5 kireç ile iyileştirmeye gidilmiş 28 günlük kil örneklerin gerilme-deformasyon eğrisi de Şekil 2 üzerinde verilmiştir.

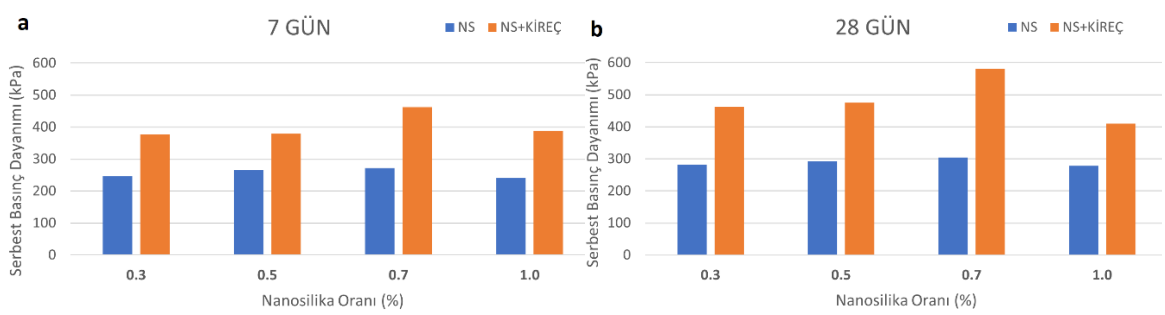


Şekil 2. Örneklerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri

3.2. Nanosilika Etkisi

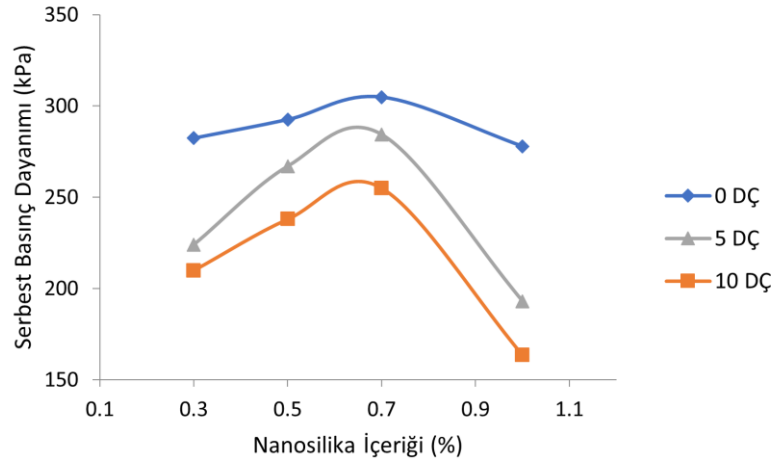
Nanosilikanın dayanım üzerindeki bireysel etkisini incelemek amacıyla %0.3, %0.5, %0.7 ve %1 nanosilika içeren örnek grubu hazırlanmıştır. Nanosilika kullanımının 7 günlük örnekler üzerinde bile dayanıma katkı sunduğu görülmüştür (Şekil 3a). %0.3, %0.5 ve %0.7 nanosilika katkılı örnekler arasında nanosilika içeriğinin artışı ile mukavemetlerde de kademeli olarak bir artış olduğu görülmüştür. Ancak bu verilerin aksine %1 nanosilika katkılı numunelerde mukavemet artışında azalma olduğu görülmüştür. Nanosilika oranının aşırı olması durumunda mukavemeti artırmaktan ziyade mukavemeti azaltan bir etki gösterdiği görülmüştür. %0.7 nanosilika katkısı ile hazırlanan numunelerin 28 günlük kür sonunda mukavemeti 305 kPa'ya yükselmiştir. Bu artış katkılı örneğin sahip olduğu mukavemetin saf kilin yaklaşık 1.5 katına çıkmasını sağlamıştır. Bu sonuçlar göz önüne alındığında kil numuneler için optimum nanosilika içeriği olarak %0.7 seçilmiştir.

Changizi ve Haddad (2016), Hu vd. (2018); kile su eklendiğinde, nanosilika partiküllerinin kilin difüz çift tabakası boyunca viskoz jel ürettiğini ifade etmiştir. Viskoz jel oluşumu nedeniyle, kil parçacıkları arasındaki bağlanma kuvveti emilen sudan daha güçlüdür. Viskoz jel partiküller arasındaki mesafeyi azaltırken partiküllerin temasını da artırmaktadır. Viskoz jel oluşumundan dolayı kil partikülleri arasındaki kohezyon, absorbe edilmiş suyun varlığından dolayı kil partikülleri arasındaki kohezyondan daha güçlüdür (Changizi ve Haddad, 2017). Viskoz jel, killerdeki makro gözenekleri bir dereceye kadar doldurmuştur (Hu vd., 2018; Landman vd., 2014).



Şekil 3. Kireç ve farklı oranlarda nanosilika katkılı örneklerin (a) 7 günlük (b) 28 günlük dayanımları (NS: Nanosilika)

%0.7 nanosilika ve %5 kireç ile ayrı ayrı yapılan iyileştirme çalışmalarının 28 günlük sonuçları karşılaştırıldığında kireç ile stabilizasyonun dayanım açısından daha verimli sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 3b). Bu nedenle, nanosilika ve kireç katkılarının beraber kullanılmasıyla daha iyi bir stabilizasyon sağlanabileceği düşünülmüştür.



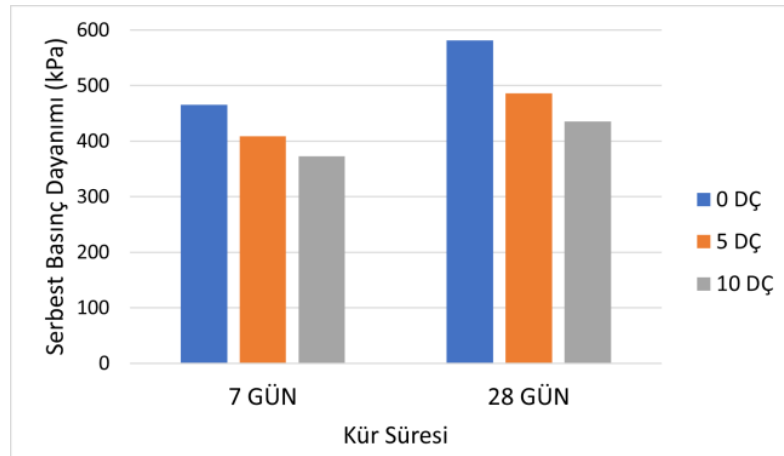
Şekil 4. Donma-çözülme çevrimlerinin nanosilika katkılı zemine etkileri

Nanosilika katkısının ilave edildiği örnekler üzerinde 5 ve 10 donma-çözülme çevrimleri uygulanarak çevrimlerin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada çevrimler 'denge' olarak ifade edilen donma-çözülme çevrimlerinin mukavemet üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir hale geldiği noktaya kadar ardışık olarak tekrarlanmıştır (Shahsavani vd., 2021; Kalhor vd., 2019). İlk 5 çevrim sonucunda görülen dayanım kaybının, 10 donma-çözülme çevrimi ardından görülen dayanım kaybına göre daha belirgin olduğu görülmüştür (Şekil 4).

Dayanımdaki azalma ilk çevrimlerde ortaya çıkarken 5. çevrimden itibaren 10.'u çevrime kadar bir denge durumu ifade eder (Ghavazi ve Roustaie, 2010). 5. donma-çözülme çevriminden sonra %0.3 ve %1 nanosilika içeren örneklerin mukavemetlerinde önemli ölçüde bir azalma olmuştur. Numunenin hiç çevrime girmemiş halindeki dayanımı %100 olarak kabul edilmiş ve bu değerden yüzde olarak hesaplanan dayanım azalmasına "mukavemet kaybı" adı verilmiştir. %0.7 nanosilika içeren numunelerin mukavemet kaybı %16 iken, %1 nanosilika içeren numunelerin mukavemet kaybı %41 olmuştur. Bu veriler numune dayanımlarının 10 donma-çözülme çevriminden sonra gerileme seviyesini göstermektedir. Bu çalışmada çok küçük miktarda nanosilika kullanılmış olmasına rağmen, %0.5 ve %0.7 nanosilika barındıran numuneler, donma-çözülme çevrimlerine karşı mukavemetlerinin büyük bir kısmını korumuştur. Nanosilikanın zemin partiküllerinin bağlayıcı etkisini güçlendirmek için kireç gibi bir katkı maddesi ile birlikte kullanılmasının da donma-çözölmeye karşı bozulmaları da önlemeye yardımcı olması beklenmiştir.

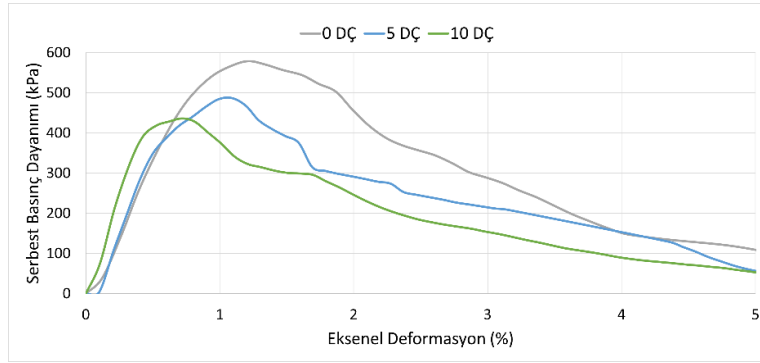
3.3. Nanosilika ve Kirecin İkili Etkisi

%5 kireç içeriği ile nanosilikanın farklı oranlarda birlikte kullanıldığı örnekler üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonuçlarına göre en yüksek dayanım 28 gün kür koşullarına tabi olan %0.7 nanosilika ve %5 kireç içeren örnek grubunda elde edilmiştir (Şekil 3b). %0.7 nanosilika ve %5 kireç içeren numunelerin 28 günlük dayanımları, 7 günlük dayanımlarından %125 daha yüksek olmuştur. Bu numunenin 28 günlük dayanımı 581 kPa olup, deney grupları arasında elde edilen en yüksek dayanımdır.



Şekil 5. Kür süresine bağlı olarak farklı donma-çözölme çevrimlerinin etkisi

7 günlük %0.7 nanosilika ve %5 kireç içeren numuneler üzerinde donma-çözölme etkileri incelendiğinde 5 ve 10 donma-çözölme çevriminin ardından mukavemetleri sırasıyla 409 kPa ve 373 kPa'ya düşmüştür. Aynı örnek grubunda 28 günlük kür süresinin ardından 5 ve 10 donma-çözölme çevrimleri sonucu dayanımın sırasıyla 486 ve 435 kPa'ya düştüğü görülmüştür. Elde edilen bu sonuç, katkılar ile iyileştirilmeye çalışılmış zemin örneklerinin sahip olduğu mukavemetin saf haldeki kile göre 1.82 kat daha yüksek bir dayanım gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Zemin içerisine kireç eklenmesi uzun süreli puzolanik reaksiyonların gerçekleşmesine neden olmuştur. Aynı zamanda nanosilikanın zemin içerisindeki reaksiyonları hızlandırıcı etkisi olmuştur. Ayrıca, donma-çözölme çevrimlerine maruz bırakıldıkları zaman, viskoz jel oluşumu numunelerin dayanıklılığını arttırmıştır.

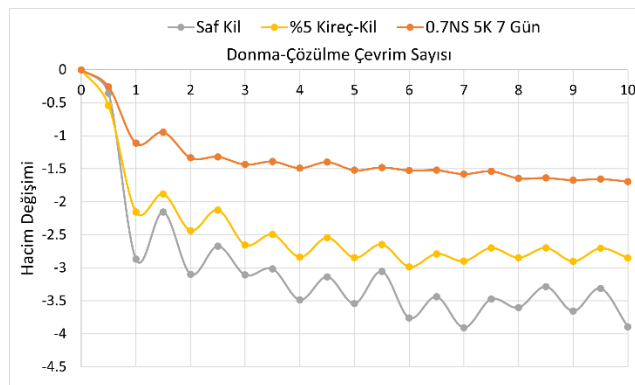


Şekil 6. Farklı donma-çözülme çevrimleri sonucu oluşan gerilme-şekil değiştirme eğrileri

3.4. Donma-Çözülmenin Hacim Değişimine Etkisi

Bu çalışmada bazı örneklerin serbest basınç dayanımlarına ek olarak hacim değişimleri incelenmiştir. Donma ve çözülme süreçlerinin öncesinde silindir numunelerin 5 farklı noktasından çap ve 3 farklı noktasından uzunlukları ölçülmüştür. Ölçümlerin her defasında aynı noktadan alınabilmesi için bu noktalar örnekler üzerinde işaretlenmiştir. Serbest basınç dayanımları 5 ve 10 çevrimin sonundaki değerler şeklinde sunulmuştur; ancak hacim değişiminin anlaşılabilir olması için örneklerin her bir çevrim sonunda çap ve uzunluk ölçümleri alınmıştır. Her çevrimin sonunda alınan ölçümler ile hesaplanan hacim ile ilk durumdaki hacim karşılaştırılmıştır. savunulmuştur.

İlk çevrimler sonunda yaşanan görece büyük hacim değişimleri 10. çevrime doğru azalmaktadır. Saf kil zeminden oluşan örneklerin hacim değişimleri yaklaşık %3.5-4 aralığında iken bu oran %5 kireç ilavesi ile hazırlanan örneklerde %2.5-3 aralığına düşmüştür. 7 günlük %0.7 nanosilika ve %5 kireç katkılı örnekler donma-çözölmeye tabi tutulduktan sonra bu örneklerde hacim kaybının %1.5-2 aralığına kadar gerilediği tespit edilmiştir. Her çevrim için hacim değişimleri üçer örnek üzerinde incelenmiştir. Bu 3 örnek arasında davranışı en iyi temsil eden örneğin verileri grafikte yer almıştır.



Şekil 7. Donma-çözülme çevrimleri sonucu oluşan hacim değişimleri

Donma sırasında oluşan buz mercekleri çözülme sırasında hacmini kaybederek zemin yapısında bozunma ve değişime sebep olmaktadır. ilk çevrimlerde etkin olan hacim değişimi ilerleyen çevrimlerde denge durumuna yaklaşmaktadır (Hotineanu, 2015). Shahsavani vd. (2021), nanosilika katkısı kullanılan örneklerde katkısız örneklere göre

azalmış bir maksimum hacimsel deformasyon gösterdiğini ve bu deformasyonun 3. çevrim sonunda yaşandığını belirtmiştir. Donma etkisiyle zeminin doygunluk derecesine bağlı olarak hacimsel bir genleşme ya da büzülme görülebiliyorken çözülme sırasında zeminler genleşme eğilimi göstermektedir (Lu vd., 2019).

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada nanosilika ve kireç katkıları ile iyileştirilen kil bir zeminin serbest basınç dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- 1) Kil zemine kireç katkı uygulaması sonucunda maksimum kuru birim ağırlık azalmış ve zeminin optimum su içeriği artmıştır.
- 2) Kil ve kireç katkılı kilde serbest basınç dayanımları donma-çözülme çevrimleri sonunda azalmıştır. 10 donma-çözülme çevriminden sonra kilin ve %5 kireç katkılı kilin mukavemeti sırasıyla 160 kPa ve 195 kPa'ya düşmüştür.
- 3) Kil zemin üzerine %0,3 ile %1 arasında değişen oranlarda nanosilika ilavesi, 7 ile 28 gün arasında bir miktar dayanım artışı göstermiştir. En yüksek mukavemet %0.7 nanosilika içeriğinde elde edilmiştir. Buna rağmen yalnızca kireç kullanılarak iyileştirilmiş numunelerin mukavemeti, sadece nanosilika kullanılarak iyileştirilen numunelerden daha yüksektir.
- 4) Optimum miktarda nanosilika ve kireç ile hazırlanan numunelerin mukavemeti, 7 ve 28 günlük kürlenmenin ardından sırasıyla 462 kPa ve 581 kPa'ya yükselmiştir. Bu sonuçlar, diğer deney grupları arasında elde edilen en yüksek dayanım değerleri olmuştur. Aynı numune grubunun 10 donma-çözülme çevriminden sonra elde edilen mukavemeti 373 kPa ile saf haldeki kilin mukavemetinden 1.82 kat daha fazladır.
- 5) Saf kilden oluşan zemin numunelerinde donma-çözülme çevrimleri esnasında yaşanan hacim kaybı yaklaşık %4 ile en yüksek olurken nanosilika ve kirecin bir arada kullanıldığı numunelerde hacim kaybı yaklaşık %1.5 ile en az olmuştur. İlk çevrimler sırasında yaşanan hacim değişimleri ilerleyen çevrimlerde denge durumuna ulaşmaktadır.

KAYNAKLAR

- Aksu G., Eskişar T. (2021), "Mechanical Behavior of Cement-Treated Soils with Nanosilica—A Green Binder". *Advances in Sustainable Construction and Resource Management. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 144, Springer, Singapore. pp 609-618.
- ASTM D2166, (2006), "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil". *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D2487, (2006), "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D4318, (2017), "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils". *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D560, (2012), ASTM D560-96 "Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures", ASTM Int. <https://doi.org/10.1520/D0560>.
- ASTM D698, (2012), "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort". *Annual Book of ASTM Standards*.
- Bell, F. G. (1995), "Cement stabilization and clay soils, with examples", *Environmental & Engineering Geoscience*, 1(2), 139-151.
- Bell, F. G. (1996), "Lime stabilization of clay minerals and soils", *Engineering geology*, 42(4), 223-237.

- Changizi F., Haddad A. (2016), "Effect of Nano-SiO₂ on the Geotechnical Properties of Cohesive Soil". *Geotech Geol Eng*, 34:725–33. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9962-9>.
- Changizi, F., Haddad, A. (2017), "Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 170(2), 62-71.
- Dash, S.K., Hussain, M. (2012), "Lime Stabilization of Soils: Reappraisal", *Journal of Materials in Civil Engineering*. 24, 707-714.
- Ghazavi, M., Roustaie, M. (2010), "The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay", *Cold Regions Science and Technology*, 61, pp. 125-131.
- Ghorbani, A., Hasanzadehshooili, H., Mohammadi, M., Sianati, F., Salimi, M., Sadowski, L., Szymanowski, J. "Effect of selected nanospheres on the mechanical strength of lime-stabilized high-plasticity clay soils", *Advances in Civil Engineering* (2019).
- Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaood, A., Al-Mukhtar, M. (2015), "Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays", *Cold Regions Science and Technology*, 119, 151-157.
- Hu K., Chen X., Chen J., Ren X. (2018), "Laboratory Investigation of the Effect of Nano-Silica on Unconfined Compressive Strength and Frost Heaving Characteristics of Silty Clay", *Soil Mech Found Eng*, 55:352–7. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9548-7>.
- Kalhor, A., Ghazavi, M., Roustaei, M., Mirhosseini, SM. (2019), "Influence of nano-SiO₂ on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles", *Cold Reg Sci Technol*, 161:129–36 <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.011>.
- Landman J., Paineau E., Davidson P., Bihannic I., Michot J., Philippe AM. (2014), "Effects of added silica nanoparticles on the nematic liquid crystal phase formation in beidellite suspensions", *J Phys Chem B*, 118:4913–9.
- Lu, Y., Liu, S., Alonso, E., Wang, L., Xu, L., Li, Z. (2019), "Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles", *Cold Regions Science and Technology*, 157, 206-214.
- Majeed, Z. H., Taha, M. R., & Jawad, I. T. (2014), "Stabilization of soft soil using nanomaterials", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8(4), 503-509.
- Moayed, R. Z., Rahmini, H. (2017), "Effect of Nano-SiO₂ Solution on the Strength Characteristics of Kaolinite", *World Academy of Science, Engineering Technology, International Journal of Geotechnical and Geological Engineering* vol:11, no:1.
- Shahsavani, S., Vakili, A. H., Mokhberi, M. (2021), "Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag", *Cold Regions Science and Technology*, 182, 103216.
- Shahsavani, S., Vakili, AH., Mokhberi, M. (2021), "Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag", *Cold Reg Sci Technol*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103216>.
- Vitale, E., Deneele, D., Russo, G. (2020), "Microstructural Investigations on Plasticity of Lime-Treated Soils". *Minerals*, 10(5):386. <https://doi.org/10.3390/min10050386>
- Zhang, G. (2007), "Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils", In *Advances in measurement and modeling of soil behavior*, Geo-Denver, pp. 1-13.