

ATIK HALI LİFİ İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ KİLLİ ZEMİNLERİN DONMA- ÇÖZÜLME ETKİSİ ALTINDA PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF CLAYED SOILS STABILIZED WITH WASTE CARPET FIBER UNDER FREEZE-THAW EFFECT

Elife Sariye ÖZEN¹, Ekrem Burak TOKA², Alican ŞENKAYA³, İbrahim Hakkı ERKAN⁴, Murat
OLGUN⁵

ÖZET

Bu çalışmada Portland çimentosu ile birlikte yüksek fırın cürufu (YFC) ve atık halı lifi kombinasyonları ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin donma-çözülme performansı serbest basınç deneyi ile incelenmiştir. Deneysel çalışmada toplam kuru zemin kütlelerinin %0.5-1,84'ü ve 6.6-23,4 mm uzunluklarında halı lifi atıkları, toplam bağlayıcının %8,2-41,8'i arasında YFC kullanılmıştır. Toplam bağlayıcı oranı kuru zemin kütlelerinin ağırlıkça %12'si olacak şekilde belirlenmiş ve YFC, çimentoya ikame edilerek kullanılmıştır. Deneysel çalışma için yanıt-yüzey yöntemi (YYY) kullanılarak 17 adet tasarım oluşturulmuştur ve sonuçlar analiz edilmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler 28 günlük kür süresinin ardından 0, 3, 7 ve 10 donma-çözülme döngülerine maruz bırakılmışlardır. Lif oranı ve lif uzunluğu arttıkça kırılma sonrası gerilme oranı (R_{pp}), yani numunenin sünekliği artmıştır. Serbest basınç mukavemeti (UCS) değerleri için halı oranının %0,7 değerine kadar önemli bir azalma gözlenmezken, bu orandan sonra azalma miktarında artış olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Atık halı lifi, Yanıt-yüzey yöntemi, Donma-çözülme etkisi, Yüksek fırın cürufu, Serbest basınç mukavemeti, Kırılma sonrası gerilme oranı

ABSTRACT

In this study, the freeze-thaw performance of clayey soil samples stabilized with Portland cement, blast furnace slag (YFC) and waste carpet fiber combinations; investigated by the unconfined compression strength test. In the experimental study, 0.5-1.84% of the total dry soil mass and 6.6-23.4 mm long carpet fiber wastes, and YFC between 8.2-41.8% of the

¹100/2000 YÖK Doktora Bursiyeri, Konya Teknik Üniversitesi, elifesariyeozen@hotmail.com (Sorumlu Yazar)

²Araştırma Görevlisi, Konya Teknik Üniversitesi, ebtoka@ktun.edu.tr

³Öğretim Görevlisi, Konya Teknik Üniversitesi, asenkaya@ktun.edu.tr

⁴Doktor Öğretim Üyesi, Konya Teknik Üniversitesi, iherkan@ktun.edu.tr

⁵Profesör Doktor, Konya Teknik Üniversitesi, molgun@ktun.edu.tr

total binder were used. The total binder ratio was determined to be 12% by weight of the dry soil mass and YFC was used as a substitute for cement. For the experimental study, 17 designs were created using the response-surface method (RSM) and the results were analyzed. Samples prepared using optimum water contents were exposed to 0, 3, 7 and 10 freeze-thaw cycles after 28 days of curing. As the fiber ratio and fiber length increased, the post-peak stress ratio (R_{pp}), that is the ductility of the sample, increased. For the unconfined compressive strength (UCS) values, there was no significant decrease in the waste carpet fiber ratio up to 0.7%, but there was an increase in the amount of decrease after this ratio.

Keywords: *Waste carpet fiber, Response-surface method, Freeze-thaw cycles, Blast furnace slag, Unconfined compressive strength, Post-peak stress ratio*

1. GİRİŞ

Mevsimsel iklim değişikliklerinden etkilenen bölgelerde, zemin yılda birkaç kez donma-çözülme döngülerine maruz kalabilir. Özellikle killi zeminler donmaya ve nem değişimine karşı hassastırlar. Sıcaklık 0°C'nin altına düştüğünde, daneler arasındaki su kısmen buz kristaline dönüşerek hacim genişlemesine bağlı donma kabarmasına neden olabilir. Buna karşılık, sıcaklık 0°C'nin üzerine çıktığında zemin daneleri arasındaki buz kristali eriyerek oturmaya neden olur (Andersland vd., 2003). Bu donma-çözülme döngüleri zeminin makro yapısını ve mekanik davranışını değiştirebilir. Bunun sonucunda, iklim değişikliğinin neden olduğu donma-çözülme döngüleri, killi zemindeki altyapının mühendislik performansının uzun vadede güvenli ve istikrarlı olmasını etkileyebilir. Karayolu ve demiryolu tesislerinde oturma, deformasyon ve çatlaklar gibi mühendislik sorunları meydana gelebilir (Li vd., 2017; Li vd., 2018a; Zhou vd., 2018; Gao vd., 2020). Bu nedenle, killi zeminlerin mühendislik performansını güçlendirmek için geliştirilmiş malzemelerin uygulamasını incelerken, donma-çözülme döngülerinin etkisinin incelenmesi uygulamada iyi bir katkı sağlayabilir.

Stabilizasyon yöntemi, iyi bir taşıma kapasitesi ve mukavemet elde etmek için etkili bir tekniktir ve altyapı inşaatında yaygın olarak uygulanmaktadır. Zemin güçlendirme teknolojisinin yeni bir türü olarak, lif takviyeli zemin teknolojisi dolgu istinat duvarı, şev, yumuşak zemin temeli ve köprü kenar dolgu mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zaimoğlu, 2010; Kravchenko vd., 2018; Orakoğlu ve Liu, 2017).

Son yıllarda, donma-çözülme döngüleri altında özellikle lif takviyeli zemin olmak üzere yeni geliştirilmiş malzemelerle güçlendirilmiş zeminin mekanik özellikleri konusundaki çalışmaların sayısı artmıştır. Zaimoğlu (2010), donma-çözülme döngülerine maruz kalan ince daneli bir zeminin UCS değeri ve dayanıklılığı üzerindeki rastgele dağılmış polipropilen liflerinin etkilerini araştırmış ve 12 donma-çözülme döngüsünden sonra UCS değerinin genellikle artan lif içeriği ile arttığını bulmuştur. Kravchenko vd. (2018), bazalt ve polipropilen lifli kilin donma-çözülme davranışı araştırmış ve 15 donma-çözülme döngüsünden sonra, %0,75 polipropilen lif takviyeli zeminin ve %0,75 bazalt lif takviyeli zeminin kayma mukavemetinin, katkısız zemine kıyasla sırasıyla %71 ve %27,1 arttığını bulmuşlardır. Orakoğlu ve Liu (2017), cam lifi ve bazalt lifi ile takviyeli killi zeminin, donma-çözülme döngüleri altında kayma mukavemeti ve kil kohezyonunda kayıp oranının azaldığını bulmuşlardır. Güllü ve Khudir (2014), belirli miktarlarda sadece jüt lifi, çelik lif ve

kireç ilave edilen siltli zeminlerin donma-çözülme döngülerinden sonra UCS değerinin iyileştirilmesine rağmen, bu üç stabilizatörün belli bir kombinasyon halinde uygulandığında donma-çözülme sonrası UCS değerinin daha etkili bir şekilde iyileştirildiğini belirtmişlerdir. Li vd. (2018b), 8 şekilli bir kompaksiyon kalıbı kullanarak çekme deneyini gerçekleştirmiştir. Deneyler, donma-çözülme döngülerinin sayısı 9'a kadar çıktıkça çekme dayanımının azaldığını, dayanım azalmasının çoğunun ilk beş döngüde gerçekleştiğini ve 6. ila 9. döngü için nispeten sabit kaldığını göstermektedir.

Bu çalışmada atık halı lifi, çimento ve yerine ikame edilmiş yüksek fırın cürufu kombinasyonları ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin dondurulması, çözülmesi ve uygulanması sürecinde "lif-zemin" sisteminin etkileşim sürecini anlamak amacıyla serbest basınç dayanımı üzerindeki donma-çözülme performansının etkileri araştırılmıştır. Deney tasarımı için YYY kullanılmıştır. Çimentoya ikame YFC miktarı, atık halı lifi uzunluğu ve atık halı lifi içeriğinin parametre olduğu 17 adet deney tasarımı yapılmıştır. UCS ve R_{pp} değerlerine bağlı olarak sonuçlar analiz edilmiştir.

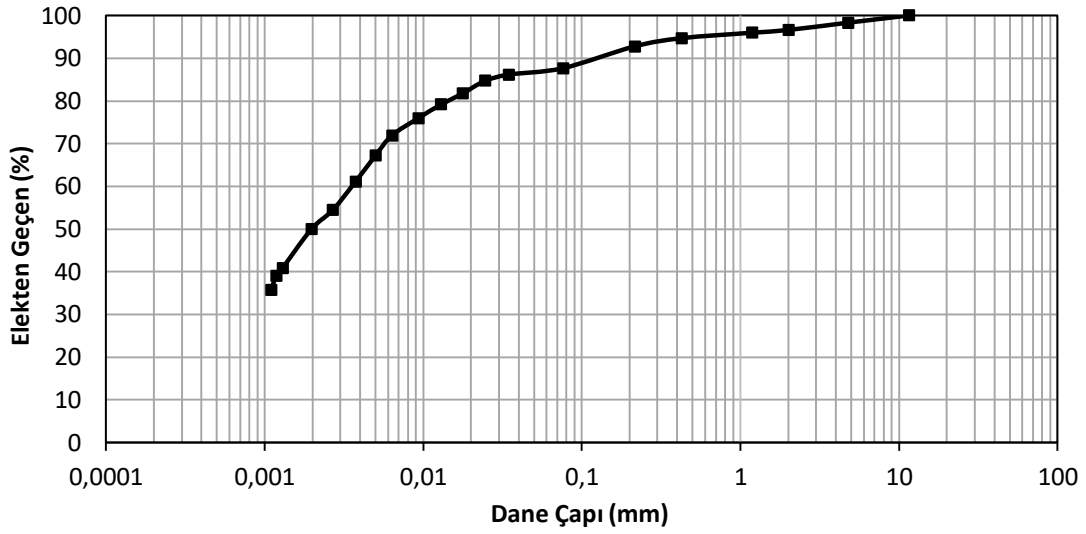
2. MATERYAL-METOT

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan killi zemin Konya ili, Selçuklu ilçesinden temin edilmiş olup zemine ait bazı özellikler Tablo 1'de verilmiştir. ASTM D2487 (2011) standardına göre belirlenen zeminin sınıfı yüksek plastisiteli kil (CH) olup granülometri eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan kilin geoteknik özellikleri

Zemin Özellikleri	Değer
Özgül ağırlık	2,65
Likit limit (%)	52
Plastik limit (%)	22,7
Plastisite indisi (%)	29,3
Maksimum kuru birim yoğunluk (g/cm^3)	1,64
Optimum su muhtevası (%)	22,6
USCS sınıfı	CH



Şekil 1. Zemine ait granülometri eğrisi

Bağlayıcı olarak CEM-I 42.5 R tipi çimento ve YFC kullanılmıştır. Kullanılan YFC Adana Çimento, İskenderun Tesislerinden temin edilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Çimento ve YFC'nin kimyasal içerikleri

Bileşen (%)	CEM-I 42,5 R	YFC
CaO	64,37	37,50
SiO ₂	20,11	35,00
Al ₂ O ₃	4,90	16,00
Fe ₂ O ₃	2,83	1,40
Diğer	7,79	10,10

Çalışmada kullanılan atık halı lifleri, üretim sürecinde halıların makaslama işlemi sırasında elde edilen lifler olup %100 polyesterden oluşmaktadır. Bu lifler halı imalatının sonucu oluşan atıklar olduğundan, lif uzunluğu arasında büyük farklar mevcuttur. Bu nedenle lif uzunluğunun etkisini değerlendirmek için, deney programında lif uzunluğu bağımsız değişken olarak kabul edilmiştir. Lifler YYY'ye göre belirlenen uzunluklarda kesilerek uygun boyutlara getirilmiştir.

2.2 Numunelerin Hazırlanması

Deney tasarımının oluşturulmasında YYY'nin merkezi kompozit tasarım türü kullanılarak 17 adet tasarım için numuneler hazırlanmıştır (Tablo 3). Bu tasarım 3 tane merkez, 6 tane eksenel ve 8 tane köşe noktadan meydana gelmektedir. Yaygın olarak kullanılan YYY, deneyleri tasarlayanın yanı sıra yanıtın optimum değerini bulmak, bağımsız değişkenler ve

yanıtlar arasındaki ilişkiyi incelemek, sonuçları analiz etmek ve değerlendirmek için de kullanılmaktadır. Bu yöntemle göre sonuçları etkileyen YFC, atık halı yüzdesi (H) ve halı uzunluğu (HU) bağımsız değişkenleri ile UCS sonuçları arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Toplam bağlayıcı oranı (çimento + YFC) kuru zemin kütlelerinin ağırlıkça %12'si olacak şekilde belirlenmiş ve YFC, çimentoya ikame edilerek kullanılmıştır. Deneyel çalışmada atık halı lifi toplam kuru kütlelerin %0,50-1,84'ü arasında 6,6-23,4 mm uzunluklarında, YFC ise toplam bağlayıcının %8,20-41,80'i arasında oranlarda kullanılmıştır.

Her bir tasarım için standart kompaksiyon deneyi ASTM D698 (2021) yapılarak optimum su muhtevası tespit edilmiş ve numuneler bu su muhtevasında hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken ilk olarak kuru halde kil, çimento, çimentoya ikame edilen YFC ve atık halı lifleri homojen olarak karıştırılmıştır. Ardından, belirlenen optimum su muhtevalarına göre su ilave edilerek homojen karışım sağlanmıştır. Tüm numuneler 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde kalıplarda sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler dış ortamdan plastik torbalar ve vakumlu kutular kullanılarak izole edilmiş ve 28 gün kür edilmiştir.

Tablo 3. Deney tasarımı ve bağımsız değişkenler

Tasarım No	YFC (A: %)	Halı içeriği (B: %)	Halı Uzunluğu (C: mm)
1	15	0,5	10
2	15	1,5	10
3	35	0,5	10
4	35	1,5	10
5	15	0,5	20
6	15	1,5	20
7	35	0,5	20
8	35	1,5	20
9	25	0,16	15
10	25	1,84	15
11	8,2	1	15
12	41,8	1	15
13	25	1	6,6
14	25	1	23,4
15	25	1	15
16	25	1	15
17	25	1	15

* A: Toplam bağlayıcı içerisindeki kütlece YFC oranı.

** B: Zeminin kuru kütlelerine oranla kütlece halı lifi oranı.

*** C: Halı liflerinin uzunluğu.

2.2. Donma-Çözülme döngüsü

Numuneler 28 gün süreyle kür edildikten sonra donma-çözülme (DÇ) döngüsünü gerçekleştirmek için ASTM D560 (2016), standartına göre sıcaklık kontrollü bir dondurucuya yerleştirilmiştir. Donma-çözülme döngüleri için kapalı sistem uygulanmıştır. Kapalı sistem, zeminin boşluklarında bulunan su kaynağından başka, işlem sırasında hiçbir su kaynağının bulunmadığı bir dondurma işlemi olarak tanımlanabilir (Jones, 1987). Dondurma sürecinde 24 saat boyunca -23 °C sıcaklıkta bekletilen numuneler bu sürenin ardından bağıl nemi %100 olan bir kaptaki 21 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca çözülmeye bırakılmıştır. Bu prosedür,

sonraki donma-çözülme döngüleri için tekrarlanmıştır. Donma-çözülme döngüsü sırasıyla 0, 3, 7 ve 10'dur. Donma-çözülme döngü sayısının maksimum 10 seçilmesinin nedeni; literatürde çoğu zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin 6 ila 8 donma-çözülme döngüsünden sonra değişmediğinin gösterilmiş olmasıdır (Wang vd., 2007; Qi vd., 2008; Ghazavi vd., 2010; Yu vd., 2010; Chang vd., 2014; Li vd., 2018).

Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan silindirik numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler, ASTM D2166'ya (2016) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 1 mm/dk.'dır. Tüm deneyler birim boy kısalması %15 olduğu noktaya kadar sürdürülmüştür. Sonuçların teyit edilebilmesi için her deney üç numune üzerinde tekrarlanmış ve UCS değeri üç numune için elde edilen sonuçların ortalaması olarak alınmıştır. Ayrıca zeminlerin sünek ve gevrek davranışını tanımlamak için kırılma sonrası gerilme oranı (Ding vd., 2018; Flores vd., 2009; Güllü ve Khudir, 2014) kullanılmış ve aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Eşitlik 1):

$$R_{pp}=(\sigma_{kal} / UCS) \times 100 \quad (1)$$

Burada σ_{kal} numunenin kırıldıktan sonraki kalıcı direncidir. Gerilme-birim deformasyon eğrisinin kararlı olduğu duruma karşılık gelen değer kalıcı direnç olarak alınmıştır. Tablo 3'te verilen YYY'ye göre hazırlanan deney tasarımları üzerinde yapılan serbest basınç dayanımı deneylerinin sonuçları ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin ikinci dereceden (kuadratik) model ile açıklanması uygun bulunmuştur. Modelin tutarlılığı ve istatistiksel anlamlılığını incelemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı uzunluk ve oranlarda atık halı lifleriyle güçlendirilmiş zeminin donma-çözülme davranışının araştırılması amacıyla 28 günlük kür süresinin ardından numuneler farklı sayıda donma-çözülme döngülerine maruz bırakıldıktan sonra serbest basınç deneyi yapılmıştır. UCS değerleri ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Oluşturulan modelin uygunluğu için R^2 değerleri kontrol edilmiştir. R^2 değerinin %91,6 olarak elde edilmesi, sonuçlar ile bağımsız değişkenler arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir. Oluşturulan kuadratik regresyon modeli, üç farklı değişken ve buna karşılık gelen UCS değerleri arasında en uygun model olarak belirlenmiştir (Eşitlik 2, 3, 4 ve 5).

Donma Çözülme 0 için:

$$UCS=6,93-0,15A-0,92B+0,0021C+0,04AB-0,0006AC-0,04BC+0,002A^2-0,38B^2+0,002C^2 \quad (2)$$

Donma Çözülme 3 için:

$$UCS=6,06-0,15A-0,52B-0,005C+0,04AB-0,0006AC-0,04BC+0,002A^2-0,38B^2+0,002C^2 \quad (3)$$

Donma Çözülme 7 için:

$$UCS=5,61-0,14A-0,53B+7,89e-05C+0,04AB-0,0006AC-0,04BC+0,002A^2-0,38B^2+0,002C^2 \quad (4)$$

Donma Çözülme 10 için:

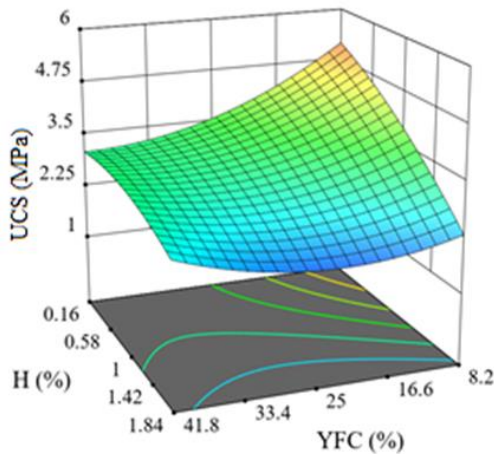
$$UCS=5,58-0,14A-0,47B-0,02C+0,04AB-0,0007AC-0,04BC+0,002A^2-0,38B^2+0,002C^2 \quad (5)$$

ANOVA'dan elde edilen p değeri, Eşitlik 2, 3, 4 ve 5'teki her bir terimin anlamlı etkisini kontrol etmek için kullanılmıştır. Tablo 4'e göre halı lifi içeriği değişkeni için F değerinin yüksek, p değerinin düşük olması halı lifi içeriğinin modellerde en etkin parametre olduğunu göstermektedir.

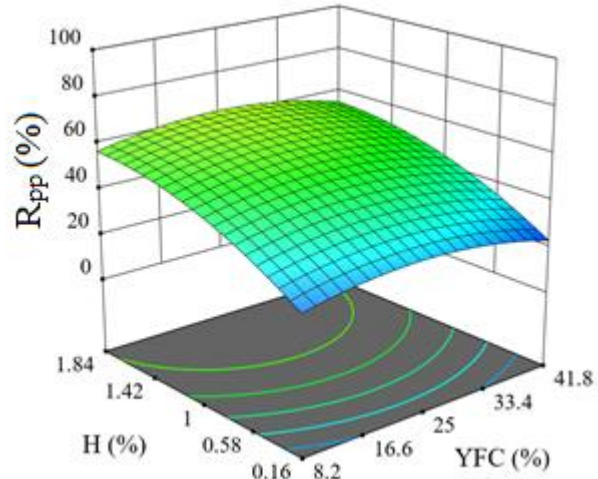
Tablo 4. UCS değerleri için elde edilen kuadratik modellerin ANOVA tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	29,98	1,43	23,94	< 0,0001
A-YFC	3,85	3,85	64,49	< 0,0001
B-H	13,03	13,03	218,56	< 0,0001
C-HU	0,0887	0,0887	1,49	0,2288
D-DÇ	7,79	2,60	43,56	< 0,0001
AB	1,43	1,43	24,02	< 0,0001
AC	0,0371	0,0371	0,623	0,4341
AD	0,1388	0,0463	0,776	0,5133
BC	0,3763	0,3763	6,31	0,0156
BD	0,4362	0,1454	2,44	0,0764
CD	0,0935	0,0312	0,523	0,6690
A ²	1,51	1,51	25,25	< 0,0001
B ²	0,4185	0,4185	7,02	0,0110
C ²	0,1708	0,1708	2,87	0,0973

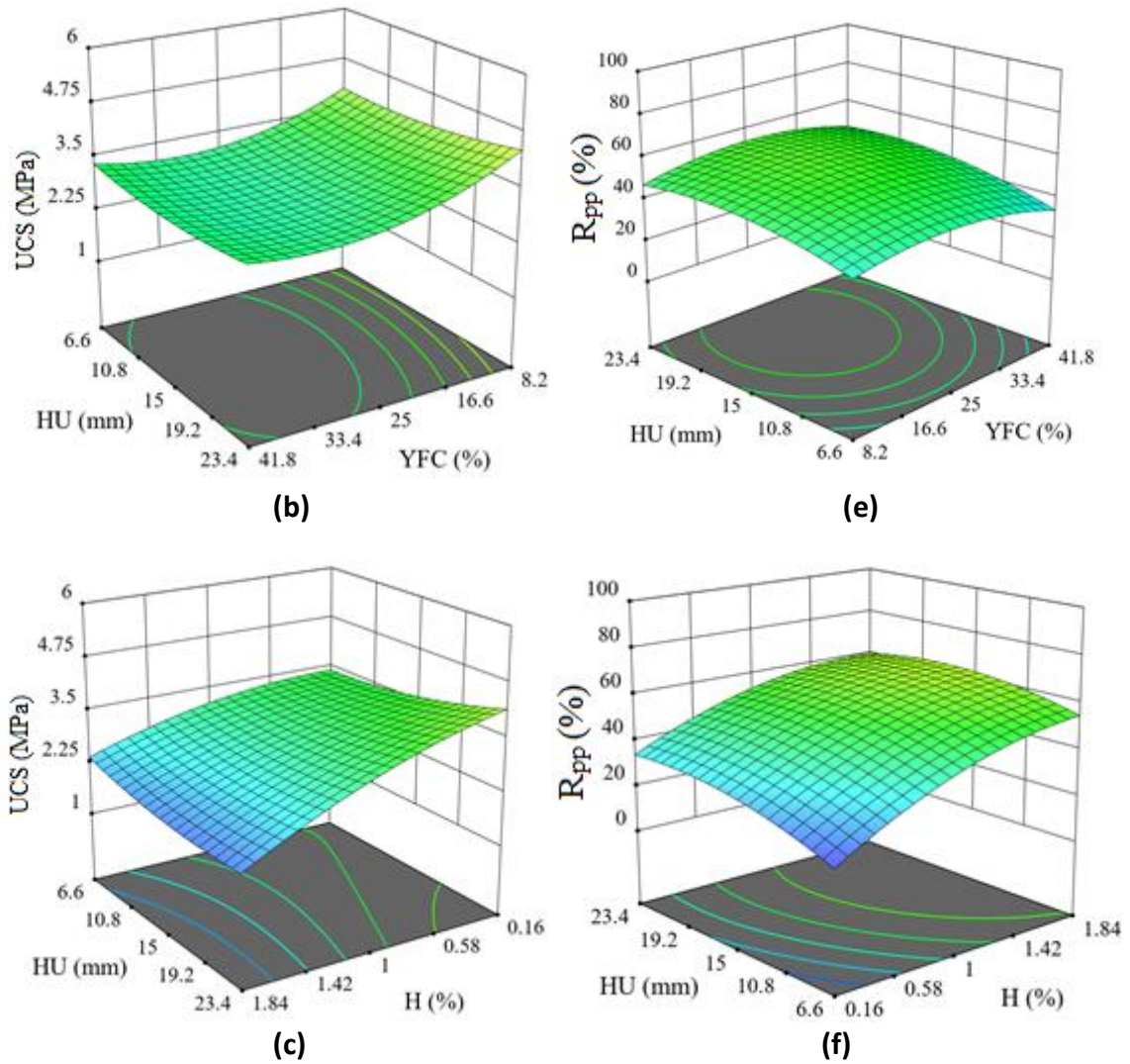
Yüksek halı lifi içeriklerinde (%1,84) ve büyük lif uzunluklarında (23,4mm), UCS değerleri en düşük seviyede olmuştur (Şekil 2-c). YFC içeriğinin %25'den fazla olduğu durumlarda halı içeriği arttıkça UCS değerlerinde azalma gözlenmiştir. Ancak %0,7 halı içeriği değerine kadar UCS değerlerinde önemli bir azalma gözlenmezken, bu değerden sonra UCS değerlerinde belirgin azalmalar gözlenmiştir (Şekil 2-c). Halı uzunluğunun fazla ve lif içeriğinin yüksek olması, kıvrılmaya ve bükülmeye bağlı olarak topaklaşmaya neden olur, bu da zemin ve lifler arasında daha az bağlantı ile sonuçlanır. Bu nedenle zemin iyileştirme için lif kullanıldığında, lif miktarı ve uzunluğu optimize edilmelidir. Halı yüzdesinin arttığı durumlarda karışım matrisinde oldukça büyük bir hacimde halı lifi bulunması, rijit olmayan halının dayanımı düşürmesine neden olmuştur. Bu durum, çimento ile muamele edilmiş kile göre daha sünek olan ve potansiyel olarak zemin matrisi ile çok iyi bir şekilde birleşmeyen bir malzemenin eklenmesinden kaynaklanmaktadır. YFC yüzdesinin azalması, beklendiği gibi, çimento miktarı arttırdıktan dayanımda artış meydana getirmiştir (Şekil 2-a-b).



(a)

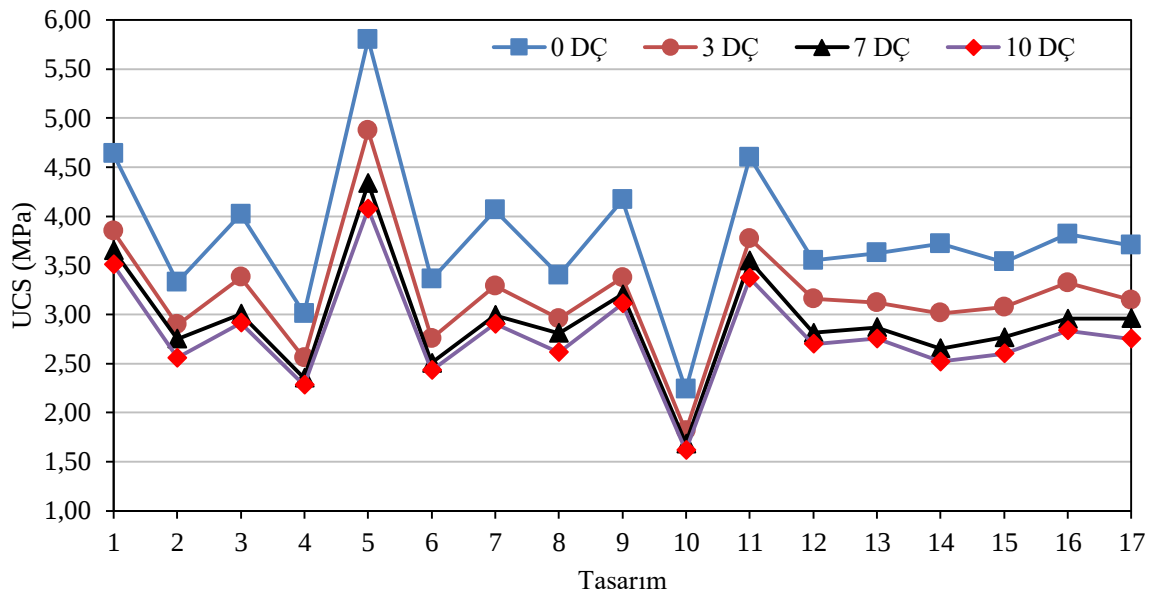


(d)



Şekil 2. a) Halı içeriği ve YFC, b) halı uzunluğu ve YFC, c) halı uzunluğu ve halı içeriğinin UCS değerlerine etkileri; d) halı içeriği ve YFC, e) halı uzunluğu ve YFC, f) halı uzunluğu ve halı içeriğinin gerilme oranına etkileri

Ayrıca, donma-çözülme döngüsüne maruz kalmış numunelerin UCS değerleri incelendiğinde genel olarak numuneler için döngü sayısının artması UCS değerlerinde bir azalma meydana getirmektedir (Şekil 3). Üç donma-çözülme döngüsüne kadar dayanımda azalma belirgin olup, 7 ve 10 döngüde dayanım kaybı daha az olmuştur. Bu azalma, atık halı liflerinin zeminde oluşturduğu kılcal boşluklardan kaynaklanabilir. Ayrıca, azalma, boşluk suyunun donarak zemin daneleri arasındaki boşlukta buz mercekleri oluşturmasına, daha sonra bu buz merceklerinin hacimce genişleyerek zemin danelerini itmesine ve yay gibi davranmasına, böylece zemin daneleri arasındaki boşlukları artırmaya bağlanabilir. Kil mineralleri arasındaki bağlar termal döngüler nedeniyle kırıldığından zeminde yumuşamaya neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3. Farklı donma-çözülme döngüleri için UCS değerlerinin değişimleri

R_{pp} değerleri ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Modelin uygunluğu için R^2 değerleri kontrol edilmiştir. R^2 değerinin %92,3 elde edilmiş olması, sonuçlar ile bağımsız değişkenler arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bahsedilen parametrelere dayalı kuadratik regresyon modeli, üç farklı değişken ve buna karşılık gelen R_{pp} arasında en uygun model olarak elde edilmiştir (Eşitlik 6, 7, 8 ve 9).

Donma Çözülme 0 için:

$$R_{pp} = -28,75 + 1,09A + 37,10B + 3,03C + 0,01AB + 0,007AC - 0,39BC - 0,02A^2 - 10,37B^2 - 0,08C^2 \quad (6)$$

Donma Çözülme 5 için:

$$R_{pp} = -10,91 + 0,75A + 47,68B + 3,58C + 0,01AB + 0,007AC - 0,38BC - 0,02A^2 - 10,37B^2 - 0,08C^2 \quad (7)$$

Donma Çözülme 7 için:

$$R_{pp} = -18,44 + 1,17A + 51,10B + 3,41C + 0,01AB + 0,007AC - 0,39BC - 0,025A^2 - 10,37B^2 - 0,08C^2 \quad (8)$$

Donma Çözülme 10 için:

$$R_{pp} = -19,76 + 1,31A + 44,47B + 2,98C + 0,013AB + 0,0075AC - 0,39BC - 0,02A^2 - 10,37B^2 - 0,08C^2 \quad (9)$$

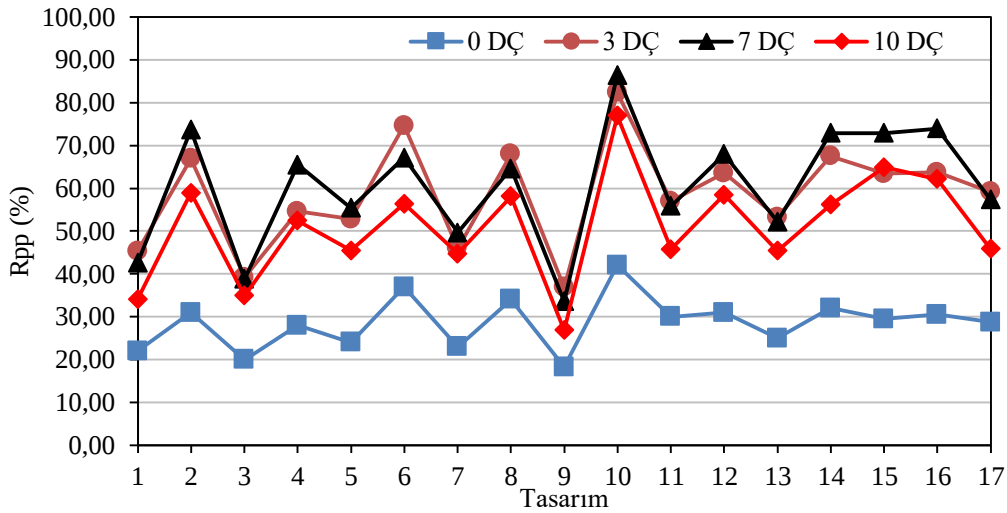
ANOVA'dan elde edilen p değeri, Eşitlik 6, 7, 8 ve 9'daki her bir terimin anlamlı etkisini kontrol etmek için kullanılmıştır. Tablo 5'e göre atık halı lifi içeriği değişkeni için F değerinin yüksek, p değerinin düşük olması modellerde etkisinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Yüksek lif içeriklerinde (%1,84) ve büyük halı lifi uzunluklarında (23,4 mm), R_{pp} yüksek değerlere ulaşmıştır (Şekil 2-f). Halı uzunluğunun artması, kayma yüzeyinin iki tarafında bir donatı görevi gören halının daha iyi performans göstermesini sağlamıştır. Halı yüzdesinin artması ise, donatı görevi gören malzeme oranını artırmıştır; dolayısıyla R_{pp} değerlerinde artış meydana gelmiştir. Liflerin eklenmesi malzeme davranışının daha sünek olmasını sağlar ve dolayısıyla iyileştirilmiş kilin kırılma sonrası davranışını etkiler. YFC yüzdesinin R_{pp} üzerinde etkisi az olmuştur (Şekil 2-d,e).

Tablo 5. Gerilme oranı için elde edilen kuadratik modellerin ANOVA tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	17081,95	813,43	26,310	< 0,0001
A-YFC	21,12	21,12	0,683	0,4128
B-H	4846,45	4846,45	156,740	< 0,0001
C-HU	563,15	563,15	18,210	< 0,0001
D-DÇ	10437,28	3479,09	112,520	< 0,0001
AB	0,1418	0,1418	0,005	0,9463
AC	4,60	4,60	0,149	0,7016
AD	232,36	77,45	2,500	0,0708
BC	30,28	30,28	0,979	0,3275
BD	364,96	121,65	3,930	0,0140
CD	86,50	28,83	0,933	0,4327
A ²	291,20	291,20	9,420	0,0036
B ²	302,25	302,25	9,770	0,0031
C ²	181,22	181,22	5,860	0,0195

Ayrıca, deney sonuçları incelendiğinde genel olarak numuneler için donma çözülme döngülerinin sayısının artması R_{pp} değerlerinde genel olarak bir artma meydana getirmektedir (Şekil 4). R_{pp} değerlerinde 3 donma çözülme döngüsü için belirgin bir artış olmuş, 3 döngüden 7 döngüye geçişte halı lifi varlığı daha da etkili olmuştur. Onuncu döngüde R_{pp} değerlerinde bir miktar azalma olmasına rağmen yine de halı lifinin kullanımının etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Farklı donma- çözülme döngüleri için R_{pp} değerlerinin değişimleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, endüstriyel atık olarak halı atığı lifleri ve YFC katkı maddeleri ile stabilize edilmiş killi bir zeminin donma-çözülme özelliklerindeki değişiklikleri değerlendirmek için YYY kullanılmıştır. Bulgulara dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- 1- Lif içeriği arttıkça UCS değerlerinde azalma meydana gelmektedir.
- 2- Lif içeriği ve halı uzunluğu arttıkça R_{pp} değerleri artmaktadır.
- 3- Donma çözülme döngüleri 3. ve 7.döngülerde UCS değerlerini ve R_{pp} değerlerini azaltmakta, bu azalma oranı 10. döngülerde çok fazla etkili olmamaktadır.
- 4- YYY, zeminlerin stabilizasyonunda katkı maddelerinin etkilerinin analiz edilmesi için güçlü bir deneysel tasarım yöntemidir.
- 5- Kullanılan lif, halı fabrikalarının atık ürünüdür ve takviye elemanları olarak uygulanması, zemin ıslahı için ekonomik bir malzeme sağlamanın yanı sıra bertaraf etme sorununu da çözebilir.

KAYNAKLAR

- Andersland, O.B., Ladanyi, B. (2003), "Frozen Ground Engineering", John Wiley and Sons Ltd.
- ASTM D2166, (2016), "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", American Society for Testing and Materials.
- ASTM D2487, (2011), "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D560, (2016), "Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698, (2021), "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Chang, D., Liu, J.K., Li, X. ve Yu, Q.M. (2014), "Experiment Study of Effects of Freezing-Thawing Cycles on Mechanical Properties of Qinghai-Tibet Silty Sand", Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(7), 1496-1502.
- Ding, M.T., Zhang, F. ve Lin, L.X.Z. (2018), "Effects of Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Properties of Polypropylene Fiber and Cement Stabilized Clay", Cold Regions Science and Technology, Vol 154, 155-165.
- Flores, R.V., Di Emidio, G. ve Van Impe, W.F. (2009), "Small-Strain Shear Modulus and Strength Increase of Cement-Treated Clay", Geotechnical Testing Journal, 33(1), 62-71.
- Gao, C. H., Du, G. Y., Guo, Q. ve Zhuang, Z. X. (2020), "Static and Dynamic Behaviors of Basalt Fiber-Reinforced Cement-Soil After Freeze-Thaw Cycle", KSCE Journal of Civil Engineering, 24(12), 3573-3583.
- Ghazavi, M. ve Roustaei, M. (2010), "The Influence of Freeze-Thaw Cycles on the Unconfined Compressive Strength of Fiber-Reinforced Clay", Cold Regions Science and Technology, 61, 125-131.
- Güllü, H. ve Khudir, A. S. (2014), "Effect of Freeze-Thaw Cycles on Unconfined Compressive Strength of Fine-Grained Soil Treated with Fute Fiber, Steel Fiber and Lime", Cold Regions Science and Technology, 106, 55-65.
- Jones, C.W. (1987), "Long Term Changes in the Properties of Soil Linings for Canal Seepage Control", Report No. REC-ERC-87-1. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, CO.

- Kravchenko, E., Liu, J. K., Niu, W. W. ve Zhang, S. J. (2018), "Performance of Clay Soil Reinforced with Fibers Subjected to Freeze-Thaw Cycles", Cold Regions Science and Technology, 153, 18–24. DOI 10.1016/j.coldregions.2018.05.002.
- Li, G. Y., Ma, W., Mu, Y. H. ve Wang, F. (2017), "Effects of Freeze-Thaw Cycle on Engineering Properties of Loess Used as Road Fills in Seasonally Frozen Ground Regions, North China", Journal of Mountain Science, 14(2), 356-368.
- Li, G. Y., Wang, F., Ma, W., Fortier, R. ve Mu, Y. H. (2018a), "Variations in Strength and Deformation of Compacted Loess Exposed to Wetting-Drying and Freeze-Thaw Cycles", Cold Regions Science and Technology, 151, 159-167.
- Li, Y., Ling, X.Z., Su, L., An, L.S., Li, P. ve Zhao, Y.Y. (2018b), "Tensile Strength of Fiber Reinforced Soil Under Freeze-Thaw Condition", Cold Regions Science and Technology, 146, 53-59.
- Orakoglu, M. E. ve Liu, J. K. (2017), "Effect of Freeze-Thaw Cycles on Triaxial Strength Properties of Fiber-Reinforced Clayey Soil", KSCE Journal of Civil Engineering, 21(6), 2128-2140.
- Qi, J.L., Ma, W. ve Song, C. X., (2008), "Influence of Freeze-Thaw on Engineering Properties of a Silty Soil", Cold Regions Science and Technology, 53, 397-404.
- Tunc, A. (2002), "Geotechnic and Its Applications on Road Engineering", Atlas Publisher, Istanbul, Turkey.
- Wang, D.Y., Ma, W., Niu, Y.L., Chang, X. X. ve Wen, Z. (2007), "Effects of Cyclic Freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay", Cold Regions Science and Technology, 48, 34-43.
- Yu, L., Xu, X.Y., Qiu, M.G., Yan, Z.L. ve Li, P.F. (2010), "Influences of freeze-thaw on shear Strength Properties of Saturated Silty Clay", Rock and Soil Mechanics, 31(8), 2448-2452.
- Zaimoğlu, A. S. (2010), "Freezing-Thawing Behavior of Fine-Grained Soils Reinforced with Polypropylene Fibers", Cold Regions Science and Technology, 60(1), 63-65.
- Zhou, Z. W., Ma, W., Zhang, S. J., Mu, Y. H. ve Li, G. Y. (2018), "Effect of Freeze-Thaw Cycles in Mechanical Behaviors of Frozen Loess", Cold Regions Science and Technology, 146, 9-18.