



## Donma-çözülme etkisi altındaki killi zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerinin Duncan-Chang modeli ile deneysel karşılaştırması

### Experimental comparison of stress-strain relationships of clay soils under freeze-thaw effect with Duncan-Chang model

Veysel Özlü <sup>1</sup>, Müge Elif Orakoğlu Fırat <sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada, killi bir zemine ait gerilme-deformasyon ilişkileri Duncan-Chang modeli ile tahmin edilmiş olup, model parametreleri ve donma-çözülme çevrimleri arasındaki matematiksel ilişkiler açıklanmıştır. Deneysel ve matematiksel model sonuçları arasındaki korelasyonlar incelenerek, modelin donma-çözülme altındaki killi zeminin gerilme-deformasyon ilişkilerini ne ölçüde tahmin edebildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, farklı eğri uydurma fonksiyonları kullanılarak donma-çözülme döngü sayıları ve Duncan-Chang model parametreleri arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Grey korelasyon analizi, donma-çözülme etkisinin model parametrelerinin üzerindeki değişiminin göz ardı edilemeyeceğini göstermiştir. Duncan-Chang modelinin tanjant deformasyon modülünde bulunan model parametreleri oluşturularak, gerilme-deformasyon eğrilerinin donma-çözülme döngüleri altındaki değişimi konsolidasyonsuz- drenajsız zeminler için yüksek korelasyonlarla elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Donma-çözülme, Killi zemin, Duncan-Chang model, Regresyon analizi

#### 1 Giriş

Donma-çözülme (D-Ç) süreçlerinde zemin değişime uğrayan çok fazlı bir sistem olduğundan hem fiziksel özellikleri hem de mekanik özellikleri büyük ölçüde değişmektedir. Ortam sıcaklığı düştükçe zemin bünyesindeki mevcut su buza dönüşür, hacim genişlemesi boşlukları artırır ve donma süreci zemin tanelerinin ayrılmasına ve parçacıkların kırılmasına sebep olur [1]. Donma sırasında zemin yapısında meydana gelen değişiklikler tamamen eski haline dönemez [2, 3]. Tekrarlı D-Ç döngülerinin etkisiyle, zemin yeni bir denge durumu kazanır ve su içeriği [4- 6], boşluk yapısı [7-9], hidrolojik özellikleri [5, 10], permeabilitesi [8, 11], mukavemet ve deformasyon [12, 13] gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli ölçüde değişiklikler gözlenir. Bu nedenle, zeminler mühendislik altyapısının bir parçası olarak kullanıldığında, uygun bir çözümün belirlenmesi her zaman gereklidir. D-Ç döngülerinden sonra, altyapı zemininin mekanik özellikleri, mevsimsel olarak donmuş bölgelerde geri dönüşü olmayan bir değişime uğramaktadır. Son yıllarda, konuyla ilgili araştırmalar, gerilme parametrelerinin D-Ç döngülerinden

#### Abstract

In this study, the stress-strain relationships of clayey soil were estimated by Duncan-Chang model, and the mathematical relationships between model parameters and freeze-thaw cycles were explained. By examining the correlations between the experimental study and the model outputs, it was determined to what extent the model was able to predict the stress-strain relationships of clay soils under freeze-thaw cycles. As a result, the relationship between the numbers of the freeze-thaw cycle and Duncan-Chang model parameters was revealed by using different curve fitting functions. Gray correlation analysis showed that the freeze-thaw effect on the model parameters cannot be ignored. By creating model parameters in the tangent deformation modulus of the Duncan-Chang model, the variation of stress-strain curves under freeze-thaw cycles was obtained with high correlations for unconsolidated-undrained soils.

**Keywords:** Freezing-Thawing cycles, Clay soil, Duncan-Chang model, Regression analysis

nasıl ve ne şekilde etkilendiğine odaklanmışlardır [14- 16]. Bu nedenle, bünye model parametreleri ile D-Ç döngüleri arasındaki ilişkiyi incelemek bir gerekliliktir.

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, zemin deformasyonu ve dayanım özellikleri ile doğrudan açıklanmaktadır. Mühendislik yapılarında altyapı zeminin bulunduğu mevcut duruma göre analiz için uygun bünye modelinin seçilmesi gereklidir [17]. Zeminler çeşitli çevresel etkilere maruz kaldığında, anizotropik, doğrusal olmayan ve zamana bağlı bir davranış sergilemektedir. Doğal koşullar altında zemin, yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme işlemlerine maruz kalır ve yenilme öncesinde doğrusal olmayan bir davranış gösterir. Ayrıca, zemin plastik deformasyona maruz kaldığında ise, kararsız bir durum sergilemektedir. Bu süreçler sonunda zemin, küçük gerilme oranları ile deneyimlenmektedir. Zeminlerin bu davranışı, lineer elastik-mükemmel plastik teorisi ile açıklanamaz [18].

Zeminler için geliştirilen bünye modelleri arasında, tipik doğrusal olmayan elastik model olan Duncan-Chang modeli, genellikle konsolide olmayan ve drenajsız üç eksenli deneylerde pekleşme gerilme-deformasyon eğrilerini

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, morakoglu@firat.edu.tr (M. E. Orakoğlu, Fırat)

Geliş / Received: 15.06.2022 Kabul / Accepted: 05.08.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1131247

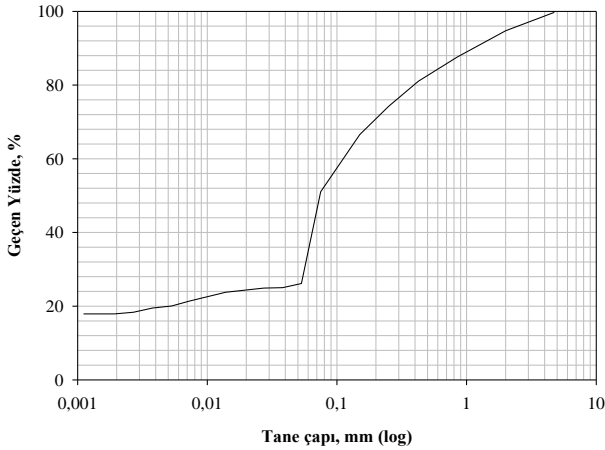
incelemek için ve farklı zeminlerin gerilme hesaplanmasında ve tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır [19-22].

Bu çalışmada, Elazığ ilinde açılmış olan bir temel çukurundan alınan killi bir zemine ait gerilme-deformasyon ilişkileri Duncan-Chang modeli ile tahmin edilmiş olup, model parametreleri ve donma-çözülme çevrimleri arasındaki matematiksel ilişkiler açıklanmıştır. Ayrıca, deneysel ve model çıktıları arasındaki korelasyonlar incelenerek, modelin donma-çözülme altındaki killi zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerini ne ölçüde tahmin edebildiği belirlenmiştir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Zemin özelliklerinin belirlenmesi

Çalışmada kullanılan zemin numunesi Elazığ ilindeki Ataşehir Mahallesi'nde açılmış olan bir temel çukurundan temin edilmiştir. Bu zemin numunesinin laboratuvar çalışmalarından; likit limit değeri %58.23 ve plastisite indeksi %45.67, maksimum kuru yoğunluk 1.656 gr/cm<sup>3</sup> 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 zemine ait dane boyu dağılım eğrisini gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan zemine ait dane boyu dağılım eğrisi

### 2.2 Donma-Çözülme testleri

Donma sıcaklıkları, zemin numunelerinin alındığı yerin yaklaşık ortalama minimum donma sıcaklığı dikkate alınarak seçilmiştir. Zemin örnekleri belirlenen donma sıcaklığında belli bir sürede kapalı sistem dondurma kabineine yerleştirilmiştir. Dondurma kabineinin sıcaklığı ayarlanan sıcaklığa ulaştığında, numuneler ve ortam arasındaki sıcaklık dengesini korumak için belli bir süre tutulmuştur. Daha sonra zemin örnekleri nem kabineine içine yerleştirilerek çözülme sürecine maruz bırakılmıştır. Tüm bu işlemler tek bir donma-çözülme döngüsü olarak kabul edilmiştir. Tablo 1'de çalışmada kullanılan zeminlere ait donma-çözülme test süreçleri sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan zemine ait donma-çözülme test süreçleri

Zemin Özellikleri			D-Ç sayısı	Sıcaklık*		
USCS sınıfı	w* (%)	$\gamma_k^*$ (gr/cm <sup>3</sup> )	N*	D (°C)	Ç (°C)	T (°C)
CH	21.5	1.656	0, 2, 5, 10	-18	20	-20

\* w: Su içeriği;  $\gamma_k$ : Maksimum kuru birim hacim ağırlık; N: donma-çözülme döngü sayısı; D: Donma; Ç: Çözülme; T: Test sıcaklığıdır.

### 2.3 Konsolidasyonsuz-Drenajsız (UU) üç eksenli basınç testleri

Bu çalışmada, UU üç eksenli basınç testleri ASTM D2850-95'ye göre yapılmıştır [23]. 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 üç eksenli basınç deney hücresi içine yerleştirilmiş ve hücreye su doldurularak, farklı oranlarda (100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa) yanıl hücre basıncı uygulanmıştır. UU yükleme altında kırılma kriterleri %25'lik kesme deformasyonu ile tanımlanmıştır. Gerilme hızı dakikada 0.780 mm'de sabit tutulmuştur.

### 2.4 Duncan-Chang hiperbolik zemin modeli parametreleri

Zeminlerin asal gerilme ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ve birim deformasyon ( $\epsilon$ ) değerleri arasındaki ilişkiyel eğriler hiperboliktir. Bu nedenle, numune gerilimi ve birim deformasyon arasındaki ilişkiyi analiz etmek için Duncan-Chang modeli uygundur [24]. Kondner [25] farklı sayıda üç eksenli basınç test verisi kullanarak zemin gerilme-şekil değiştirme eğrisini analiz etmiş ve şu bağıntıyı önermiştir:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_i}{a + b\epsilon_i} \quad (1)$$

burada  $a$  ve  $b$ , üç eksenli basınç testi ile belirlenebilen parametrelerdir.

Birincil tanjant modülü ( $E_i$ ) şu şekilde tanımlanır:

$$E_i = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\epsilon} \Big|_{\epsilon_i=0} = \frac{1}{a} \quad (2)$$

Sonsuz bir birim deformasyonda, nihai asal gerilme, ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>ult</sub>, değeri denklem (3) ile belirlenir:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \lim_{\epsilon_i \rightarrow \infty} \frac{\epsilon_i}{a + b\epsilon_i} = \frac{1}{b} \quad (3)$$

Hiperbolik ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )- $\epsilon$  eğrisi için ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>ult</sub> maksimum değeri, sonsuz deformasyon için bulunurken, zemin numuneleri için gözlemlenen maksimum yenilme, ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>f</sub>, sonlu bir deformasyon,  $\epsilon_f$ , ile belirlenir ve hiperbolik eğrisini geçmeye zorlar. Gözlenen hata noktası [ $\epsilon_f - (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ] boyunca bir hasar oranı,  $R_f$ , ile açıklanır;

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{1/b} \quad (4)$$

Denklem (1) şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$a + b\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_i}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (5)$$

burada  $\varepsilon_i - \varepsilon_i / (\sigma_1 - \sigma_3)$  grafiğinin eğimi  $b$  ve kesme noktası  $a$  parametresidir.

Hiperbolik model değişken bir parametre modeli olarak tanımlanmaktadır. Zeminin doğrusal olmayan gerilme-deformasyon ilişkisini modellemek için kullanılır. Model, Hansen [26] tarafından değiştirilmiş olup, gerilme ve şekil değiştirme arasındaki hiperbolik ilişki, Duncan ve Chang [24] tarafından dahil edilmiştir. Başlangıç elastisite modülü aşağıdaki denklem (6) ile tanımlanır:

$$E_i = P_a K \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (6)$$

burada  $K$  modül sayısıdır;  $n$  modül üssüdür; ve  $P_a$  atmosferik basınçtır (101.3 kPa'ya eşittir).

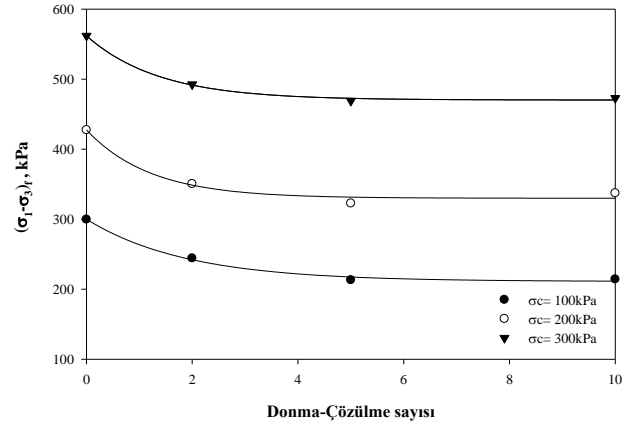
Gerilme-deformasyon ilişkisinde,  $E_t$  teğet modülü, kohezyon ( $c$ ), içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değerlerini de göz önüne alarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$E_t = \left[ 1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (7)$$

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Konsolidasyonsuz-Drenajsız (UU) üç eksenli basınç testleri

Şekil 2'de farklı hücre basınçlarına ve farklı sayıda donma-çözülme testlerine maruz kalmış killi zeminlerin UU üç eksenli basınç test sonuçlarına göre elde edilmiş maksimum gerilme değerleri verilmiştir. 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 2. UU deney sonuçlarına farklı D-Ç altında maksimum kayma gerilmeleri

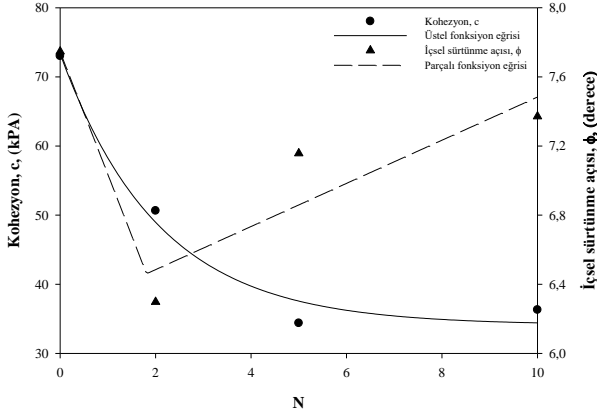
Donma-çözülme döngülerine maruz kalmış zeminlerin kohezyon ( $c$ ) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değerleri hesaplanmış ve Şekil 3'de sunulmuştur.  $c$  ve  $\phi$  değerleri temel olarak parçacık boyutunun bileşimi, dizilimi ve parçacıklar arası bağlanma kuvvetinden etkilenen zeminin kayma mukavemetini değerlendirmek için iki önemli göstergedir [27, 28]. Deneysel verilere göre, donma-çözülme döngüleri arttıkça zeminin kohezyonunda azalma gözlenmiştir. Bununla birlikte, donma-çözülme döngülerinin bazı sayılarında ( $N$ ) kil parçacıklarının sebep olduğu boşluklar ile ilgili olarak, numunelerin artan hacmi sebebiyle kohezyonda hafif bir artış gözlenmiştir. Diğer taraftan, içsel sürtünme açısı değerlerinde,  $N$ 'deki artışla bir artış gözlenmiştir.  $c$  ve  $N$  arasındaki ilişki üstel fonksiyon ile açıklanırken (Denklem 8),  $\phi$  ve  $N$  arasındaki ilişkiyi parçalı fonksiyon (Denklem 9) açıklayabilir. İki fonksiyonun parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

$$f(c) = a_1 \exp(-a_2 N) + a_3 \exp(a_4 N) \quad (8)$$

burada  $N$  numunelere uygulanan donma-çözülme döngü sayısını ifade etmektedir.  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  ve  $a_4$  uydurma eğrisinin parametreleridir.

$$\phi(N) = \begin{cases} \frac{Y_1(T_1 - N) + Y_2(N - N_1)}{(T_2 - T_1)} & N_1 \leq N \leq T_1 \\ \frac{Y_2(N_2 - N) + Y_3(N - T_1)}{(N_2 - T_1)} & T_1 \leq N \leq N_2 \end{cases} \quad (9)$$

burada  $T_1$  bir sabit olup 1.8116'ya eşittir.  $Y_1$ ,  $Y_2$  ve  $Y_3$  parametreleri donma-çözülme döngü sayısı,  $N$  ile içsel sürtünme açılarının azalma oranlarını temsil eden eğimlerdir.  $N_1$ , ilk iki donma-çözülme döngüsü arasındaki kritik döngü sayısıdır ve  $N_2$  ise son iki donma-çözülme döngüsü arasındaki ikinci kritik döngü sayısını ifade etmektedir.



Şekil 3. Farklı donma-çözülme sayılarında kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri

Tablo 2. c, φ ve N arasındaki üstel ve parçalı fonksiyonlarının parametreleri

c (kPa)-N				
a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	R <sup>2</sup>
39.273	0.4858	34.110	1.191E-012	0.9825
φ (°)-N				
Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>
7.747	6.461	7.483	1.811	0.8794

### 3.2 Duncan-Chang model parametrelerinin tahmini

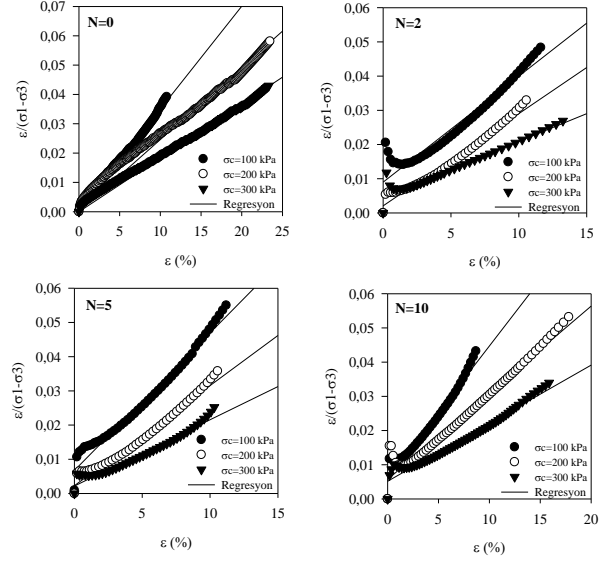
Denklem 7’de belirtildiği gibi Duncan-Chang modelinde zeminlerin tanjant modülünü üç temel faktör etkilemektedir. Bunlardan ilki, herhangi bir hücre basıncında malzemenin hasar oranına karar vermek için kullanılabilen, farklı hücre basınçlarında ortalama bir değerden belirlenen hasar oranı, R<sub>f</sub>’dir; ikincisi, hücre basıncı ile ilgili ilk teğet modülü E<sub>i</sub>’dir; ve üçüncüsü, aynı zamanda hücre basıncına bağlı kırılma mukavemeti (σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>f</sub>’dir.

UU üç eksenli testlerden elde edilen sonuçlar, Kondner [25] ve Duncan ve ark. [24] tarafından önerilen hiperbolik model parametrelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Şekil 4’ten farklı bir koordinat sistemine dönüştürülerek elde edilen gerilme-deformasyon ilişkisinin (ε- ε/(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)) birinci mertebeden lineer bir korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Numunenin gerilme-deformasyon eğrisi hiperbolik fonksiyona uygundur. Eğri uydurma çizgisinin y-kesişimi a parametresini gösterirken ve eğimi ise b parametresini ifade eder. a ve b parametrelerinin karşılığı sırasıyla başlangıç tanjant modülü, E<sub>i</sub> ve nihai gerilme değeri (σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>ult</sub>’dir. Tablo 3’de ε- ε/(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>) ilişkisine ait hiperbolik fonksiyonun parametreleri verilmiştir.

Tablo 3’de verilen a ve b parametrelerinden elde edilen farklı donma-çözülme döngüleri altında ve farklı hücre basınçlarına maruz kalmış zeminlerin başlangıç tanjant modülü (E<sub>i</sub>) değerleri Şekil 5’de sunulmuştur.

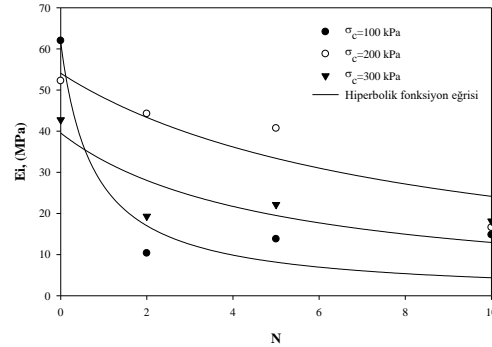
Tablo 3. ε- ε/(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>) ilişkilerinden elde edilen a ve b parametreleri

N	σ <sub>c</sub> =100 kPa		σ <sub>c</sub> =200 kPa		σ <sub>c</sub> =300 kPa	
	a (kPa <sup>-1</sup> ) x E-05	b (kPa <sup>-1</sup> )	a (kPa <sup>-1</sup> ) x E-05	b (kPa <sup>-1</sup> )	a (kPa <sup>-1</sup> ) x E-05	b (kPa <sup>-1</sup> )
0	1.61	0.00329	1.91	0.0022	2.34	0.00169
2	9.68	0.00301	2.26	0.0027	5.18	0.00157
5	7.25	0.00396	2.46	0.0029	4.51	0.00191
10	6.75	0.00375	6.03	0.0025	5.51	0.00167



Şekil 4. a ve b parametrelerini elde etmek için çizilen ε- ε/(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>) ilişkileri

Farklı hücre basınçları altında, zeminlerin başlangıç teğet modülleri N ile azalma eğilimi göstermiş olup, bu azalma oranı 5 donma-çözülme döngüsüne kadar daha hızlı olup, bu döngüden sonra daha yavaş düşme eğilimi göstermiştir. E<sub>i</sub> ile N arasındaki regresyon ilişkisi hiperbolik fonksiyon ile uydurulabilir ve uydurma eğrisi parametreleri Tablo 4’de gösterilmektedir. Farklı hücre basınçları altında, E<sub>i</sub> değeri artan donma-çözülme döngülerinden sonra azalma eğilimindedir.



Şekil 5. Farklı hücre basınçlarına maruz kalmış zeminin E<sub>i</sub>- N ilişkileri

**Tablo 4.**  $E_i$ -  $N$  arasındaki hiperbolik fonksiyonun parametreleri

$f(E_i) = \frac{a_1 a_2}{a_2 + N}$		
$a_1$	$a_2$	$R^2$
61.629	0.763	0.8976

Duncan-Chang model parametrelerinden olan hasar oranı,  $R_f$ , ve modül parametreleri  $K$  ve  $n$  değerlerinin farklı donma-çözülme döngüleri altındaki değişimi Şekil 6a'da gösterilmiştir. Hasar oranı  $R_f$ , artan donma-çözülme döngülerinden sonra artan bir eğilim göstermiştir. 2 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış zeminlerde  $R_f$  değeri %16.35 oranında, 5 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış zeminlerde %21.49 oranında ve 10 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış zeminlerde %13.81 oranında artmıştır. Şekil 2'deki farklı sayıda donma-çözülme altında maksimum kayma gerilmeleri grafiğine göre, zemin numuneleri 5. donma-çözülme döngüsünden 10. donma-çözülme döngüsüne geçerken yeni bir denge durumu kazanmış bu döngüden sonra gösterdiği davranış maksimum kayma gerilmelerini çok az miktarda değiştirmiştir. Zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli değişikliklerin görüldüğü 5 donma-çözülme döngüsüne maruz kalmış zemin numunelerinin  $R_f$  değerlerinde de maksimum değerler gözlenmiştir.  $R_f$  değerleri ve donma-çözülme çevrim sayılarındaki ilişki Gauss fonksiyonu ile açıklanmış olup, Denklem 10'da verilen fonksiyona ait parametreler Tablo 5'de sunulmuştur.

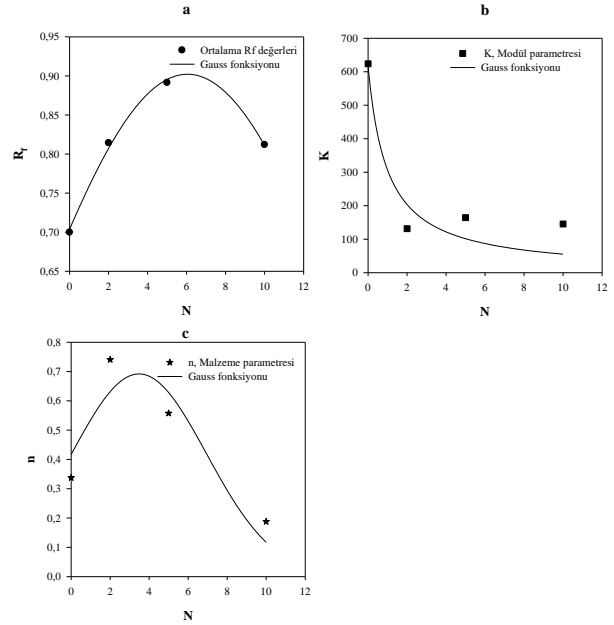
$$f(R_f) = a_1 \exp\left(-0.5 \left(\frac{N - a_3}{a_2}\right)^2\right) \quad (10)$$

**Tablo 5.**  $R_f$ ,  $K$ ,  $n$  ile  $N$  arasındaki fonksiyonların parametreleri

$R_f$ - $N$				$K$ - $N$		
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$R^2$	$a_1$	$a_2$	$R^2$
0.9021	8.5762	6.044	0.9956	618.3403	0.9823	0.8989
$n$ - $N$						
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$R^2$			
0.6917	3.4601	3.4797	0.8405			

Öte yandan, modül parametresi  $K$ , sabit bir hücre basıncında başlangıç tanjant modülünün sabit bir atmosfer basıncına oranını ( $P_a=101.3$  kPa) gösterir. Donma-çözülme döngü sayısının artmasıyla  $K$  parametresinin değeri azalmış ve en keskin azalma donma-çözülme öncesinden 2 donma-çözülme maruz kalmış zemin örnekleri için gözlenmiştir.  $K$  ve  $N$  arasındaki ilişki hiperbolik fonksiyon ile açıklanmıştır (Şekil 6b). Tablo 5'de  $K$  ve  $N$  arasında kurulan hiperbolik ilişkinin katsayıları sunulmuştur. Bununla birlikte, malzeme parametrelerinden  $n$ , hücre basıncıyla ilk tanjant modülünün artan oranını yansıtır. Malzeme parametresi  $n$ , zeminin donma-çözülme maruz kalması ile başlangıçta artan bir eğilime sahipken, döngülerin artmasıyla azalma eğilimindedir. Şekil 6c'de gösterildiği üzere, Gauss fonksiyonu, model parametresi  $n$  ile döngü sayısı  $N$

arasındaki ilişki için uygundur ve Tablo 5'de hesaplanan fonksiyon parametreleri verilmiştir.



**Şekil 6.** Duncan-Chang model parametrelerinin donma-çözülme döngüleri sayısı ile değişimi

### 3.3 Grey korelasyon analizi

Grey korelasyon analizinin hesaplama prosedürü kullanılarak [29], modeldeki sekiz parametre ( $c$ ,  $\phi$ ,  $\sigma_{F100kPa}$ ,  $\sigma_{F200kPa}$ ,  $\sigma_{F300kPa}$ ,  $R_f$ ,  $K$ ,  $n$ ) ile donma-çözülme döngü sayısı ( $N$ ) arasındaki Grey korelasyon derecesi Tablo 6'da gösterilmiştir.

**Tablo 6.** Farklı donma-çözülme döngüleri için Grey korelasyon derecesi değerleri

	$R_f$	$K$	$n$
$N$	0.99381	0.738314	0.99248
$N$	$\sigma_{F100kPa}$	$\sigma_{F200kPa}$	$\sigma_{F300kPa}$
$N$	0.684534	0.611836	0.555858
$N$	$c$	$\phi$	
$N$	0.9193	0.988247	

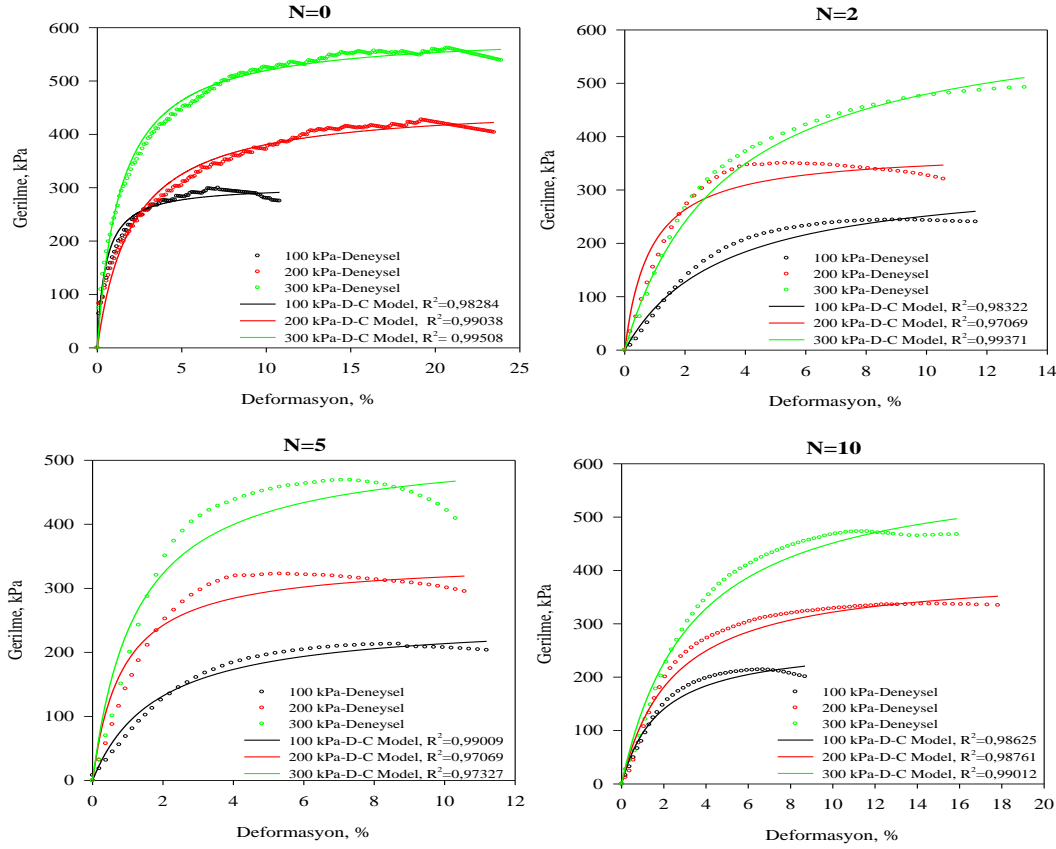
Modelde kullanılan verilerin korelasyonun anlamlılık derecesi olan 0.5'den büyük olduğu için model parametreleri ve test faktörleri arasındaki ilişki anlamlıdır. Donma-çözülme döngüleri için  $R_f > n > \phi > c > K > \sigma_{F100kPa} > \sigma_{F200kPa} > \sigma_{F300kPa}$  olarak korelasyon dizisi belirlenmiştir. Burada, hasar oranı, malzeme parametreleri ve kayma direnci parametrelerinin donma-çözülme döngülerinin artan sayısı ile yenilme anındaki maksimum kayma gerilmesi ( $\sigma_f$ ) değerlerine göre daha anlamlı bir ilişki sergilediği görülmektedir. Öte yandan, 100 kPa'lık hücre basıncına maruz kalmış zemin numunelerinin yenilme anındaki maksimum kayma gerilmesi ( $\sigma_{f-100}$  kPa), 300 kPa'lık hücre basıncına maruz kalmış zemin numunelerinin yenilme anındaki maksimum kayma gerilmesi ( $\sigma_{f-300}$  kPa) değerine

kıyasla donma-çözülme döngülerinden daha fazla etkilenmiştir. Bu durum, Roustaei ve ark. [30]'nın yapmış oldukları çalışmalarında donma-çözülme döngülerinin etkisinin daha küçük bir hücre basıncında, büyük hücre basıncına kıyasla daha belirgin olduğunu göstermişlerdir. Donma-çözülme döngülerinin artan sayıları, etki ettiği alanda büyük hasarlara ve çatlaklara sebep olurken, yüksek çevre basıncından kaynaklanan zemin danelerinin yeniden dizilimi ile bu çatlaklar birbirine yaklaşarak zemin mukavemeti iyileştirebilir.

### 3.4 Duncan-Chang modelinin doğrulanması

Bu çalışmada, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen gerilme-deformasyon eğrilerinden elde edilen model

parametrelerine bağlı olarak hesaplanan gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. Farklı hücre basınçları altında ve farklı sayıda donma-çözülme döngülerine maruz bırakılan zemin numunelerinin Duncan-Chang modeli kullanılarak tahmin edilen gerilme-deformasyon eğrileri ile deneysel gerilme-deformasyon eğrileri yüksek bir korelasyona sahiptir. Öte yandan, zeminlerin Duncan-Chang modeli tarafından tahmin edilen gerilme-deformasyon eğrileri, test sonuçlarını küçük deformasyon oranlarında, yani elastik deformasyonun meydana geldiği bölgede en iyi yansıttığı görülmektedir. Deformasyon arttıkça, model çıktıları ve test sonuçları arasındaki sapmalar artmaktadır.



Şekil 7. Farklı donma-çözülme döngülerinde deney sonuçları ile Duncan-Chang (D-C) modelin karşılaştırılması

## 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, killi bir zemin örneğinin gerilme-deformasyon ilişkileri Duncan-Chang modeli ile tahmin edilmiş olup, model parametreleri ve donma-çözülme döngüleri arasındaki matematiksel ilişkiler açıklanmıştır. Deneysel çalışma ve model çıktıları arasındaki korelasyonlar incelenerek, modelin donma-çözülme altındaki killi zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerini ne ölçüde tahmin edebildiği belirlenmiştir. Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

(1) Maksimum donma-çözülme döngülerinden sonra, zeminlerin  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  değerleri 100 kPa'lık hücre basıncı için %28.48, 200 kPa'lık hücre basıncı için %21.08, 300 kPa'lık hücre basıncı için %15.82 oranlarında azalma göstermiştir.

Kayma direnci parametrelerinden kohezyon N'ye bağlı olarak azalma göstermiş olup, aralarındaki ilişki üstel fonksiyonla tanımlanmıştır. Diğer taraftan, N ile içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki parçalı fonksiyon ile açıklanmıştır. Her iki parametrenin de eğri uydurma sonuçları, korelasyon katsayısı değerlerinin  $0.5 < R^2 < 1$  aralığında olmasından dolayı gerçek sonuçları iyi yansıttığını göstermiştir (c için;  $R^2 = 0.9825$ ,  $\phi$  için;  $R^2 = 0.8794$ ).

(2) Duncan-Chang model parametrelerinden olan  $R_f$  ve n parametreleri ile N arasındaki ilişki Gauss fonksiyonuyla açıklanmış olup, K ve  $E_i$  parametreleri ile N arasındaki ilişki hiperbolik fonksiyonla açıklanmıştır.  $E_i$  ve K parametreleri artan donma-çözülme sayılarına bağlı olarak azalma eğilimi göstermiştir. Diğer taraftan,  $R_f$  ve n parametreleri de

numunelerin donma-çözölmeye maruz kalması ile başlangıçta artan bir eğilime sahipken, döngülerin artmasıyla azalmışlardır.

(3) Model parametreleri ve donma-çözölmeye döngü sayıları arasındaki Grey korelasyon analizi sonuçlarına göre, N' den en fazla etkilenen parametre hasar oranı  $R_f$  olmuştur. Öte yandan, korelasyon derecelerinin 0.5'den daha yüksek olduğundan, N etkisinin model parametrelerinin üzerindeki etkisi göz ardı edilemez.

(4) Model doğrulaması, hesaplanan ve deneysel gerilme-deformasyon eğrileri karşılaştırılarak yapılmıştır. Düşük deformasyon değerlerinde elastik deformasyon bölgesinde, model sonuçlarının deney sonuçlarıyla diğer bölgelere göre daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.

#### **Çıkar çatışması**

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %9

#### **Kaynaklar**

- [1] O. B. Andersland and L. Branko, Frozen Ground Engineering. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2004.
- [2] D. Y. Wang, W. Ma, Y. H. Niu, X. X. Chang and Z. Wen, Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay. Cold Regions Science and Technology, 48 (1), 34-43, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.008>.
- [3] Y. Lu, S. Liu, Y. Zhang, L. Wang and Z. Li, Hydraulic conductivity of gravelly soils with various coarse particle contents subjected to freeze-thaw cycles. Journal of Hydrology, 598, 126302, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126302>.
- [4] J. Li, Y. Zhao, A. Zhang, B. Song and R. L. Hill, Effect of grazing exclusion on nitrous oxide emissions during freeze-thaw cycles in a typical steppe of Inner Mongolia. Agriculture, Ecosystems & Environment, 307, 107217, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107217>.
- [5] Y. Han, Q. Wang, W. Xia, J. Liu, J. Wang, Y. Chen and J. Shen, Experimental study on the hydraulic conductivity of unsaturated dispersive soil with different salinities subjected to freeze-thaw. Journal of Hydrology, 583, 124297, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124297>.
- [6] B. Liu, H. Fan, W. Han, L. Zhu, X. Zhao, Y. Zhang and R. Ma, Linking soil water retention capacity to pore structure characteristics based on X-ray computed tomography: Chinese Mollisol under freeze-thaw effect. Geoderma, 401, 115170, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115170>.
- [7] J. Shen, Q. Wang, Y. Chen, Y. Han, X. Zhang and Y. Liu, Evolution process of the microstructure of saline soil with different compaction degrees during freeze-thaw cycles. Engineering Geology, 106699, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106699>.
- [8] J. Xu, Y. Li, C. Ren, S. Wang, S. K. Vanapalli and G. Chen, Influence of freeze-thaw cycles on microstructure and hydraulic conductivity of saline intact loess. Cold Regions Science and Technology, 181, 103183, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103183>.
- [9] G. T. Zhao, W. L. Zou, Z. Han, D. X. Wang and X. Q. Wang, Evolution of soil-water and shrinkage characteristics of an expansive clay during freeze-thaw and drying-wetting cycles. Cold Regions Science and Technology, 186, 103275, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103275>.
- [10] M. Lv, Y. Wang and Z. Gao, The change process of soil hydrological properties in the permafrost active layer of the Qinghai-Tibet Plateau, CATENA, 210, 105938, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105938>.
- [11] Y. Lu, Y. Zhang, S. Liu, W. Guo and F. Xu, Mechanical behaviour and permeability of expansive soils mixed with scrap tire rubbers subjected to freeze-thaw cycles, Cold Regions Science and Technology, 199, 103580, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103580>.
- [12] 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, 304, 127157, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127157>.
- [13] F. Changizi, H. Ghasemzadeh, and S. Ahmadi, Evaluation of strength properties of clay treated by nano-SiO<sub>2</sub> subjected to freeze-thaw cycles, Road Materials and Pavement Design, 1-18, 2021. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1883466>.
- [14] Y. Liu, H. Deng, J. Xu, G. Tian, and J. Deng, Association study on the pore structure and mechanical characteristics of coarse-grained soil under freeze-thaw cycles, Minerals, 12(3), 314, 2022. <https://doi.org/10.3390/min12030314>.
- [15] X. Liu, X. Wei, and H. Qin, Characterizing compressive strength of compacted saline loess subjected to freeze-thaw cycling with wave velocity, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(4), 2022. <https://doi.org/10.1007/s10064-02202663-6>.
- [16] A. Yorulmaz, O. Sivrikaya, and F. Uysal, Evaluation of the bearing capacity of poor subgrade soils stabilized with waste marble powder according to curing time and freeze-thaw cycles, Arabian Journal of Geosciences, 14(5), 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06749-5>.
- [17] B. Huang, R. J. Bathurst, and K. Hatami, Numerical study of reinforced soil segmental walls using three different constitutive soil models, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(10), 1486-1498, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000092](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000092).
- [18] W. Zhang, J. Ma, and L. Tang, Experimental study on shear strength characteristics of sulfate saline soil in Ningxia region under long-term freeze-thaw cycles, Cold Regions Science and Technology, 160, 48-57, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.01008>.

- [19] J. H. Xiong, X. Y. Kou, F. Liu, and M. J. Jiang, Applicability of Duncan-Chang model and its modified versions to methane hydrate-bearing sands, *Advanced Materials Research*, 347–353, 3384–3387, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.34735-3.3384>.
- [20] J. Liu, D. Chang, and Q. Yu, Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand, *Engineering Geology*, 210, 23–32, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.05.019>.
- [21] C. Yan, Y. Cheng, M. Li, Z. Han, H. Zhang, Q. Li, F. Teng and J. Ding, Mechanical experiments and constitutive model of natural gas hydrate reservoirs, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (31), 19810–19818, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.135>.
- [22] X. Liu, J. Liu, Y. Tian, D. Chang, and T. Hu, Influence of the freeze-thaw effect on the Duncan-Chang model parameter for lean clay, *Transportation Geotechnics*, 21, 100273, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100273>.
- [23] ASTM D2850-95, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
- [24] J. M. Duncan and C. Y. Chang, Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5), 1629–1653, 1970. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001458>.
- [25] R. L. Kondner, Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(1), 115–143, 1963. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0000479>.
- [26] J. B. Hansen, Discussion of hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(4), 241–242, 1963. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0000542>.
- [27] E. Amiri, H. Emami, M. R. Mosaddeghi, and A. R. Astaraei, Shear strength of an unsaturated loam soil as affected by vetiver and polyacrylamide, *Soil and Tillage Research*, 194, 104331, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104331>.
- [28] M. Wang, S. Meng, X. Yuan, Y. Sun, J. Zhou, X. Yu and L. Chen, Research on freezing-thawing correction coefficients of shear strength parameters of seasonal frozen soil, *Journal of Rock Mechanical Engineering*, 37, 3756–3764, 2018. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2016.1317>.
- [29] J. L. Deng, Introduction to grey system theory. *Journal of Grey System*, 1(1): 1-24, 1989.
- [30] 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*, 120, 127-137, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.011>.

