

# KATKI MADDELERİNİN DONMUŞ ZEMİNİN DAYANIMI ÜZERİNE ETKİLERİNİN TAGUCHİ OPTİMİZASYON YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

## INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ADDITIVES ON THE STRENGTH OF FROZEN SOIL BY TAGUCHI OPTIMIZATION METHOD

Yasemin PEKDEMİR<sup>1</sup>, A. Şahin ZAIMOĞLU<sup>2</sup>, Fatih ARTUK<sup>3</sup>

### ÖZET

Hava sıcaklığının 0°C' nin altına düşmesi ve bunun birkaç günden fazla sürmesi durumunda, soğuk mevsimlerde, suya doymun zeminlerde don olayı meydana gelmektedir. Zemin boşluklarındaki suyun donmasıyla birlikte zeminde yaklaşık %9 hacim artışı gözlenmektedir. Soğuk mevsimlerdeki donma olayının aksine sıcak mevsimlerde ise çözülme meydana gelmekte ve zeminin su içeriği artmaktadır. Bu durumda soğuk iklim bölgelerinde zeminler senede birkaç defa donma-çözümeye maruz kalmaktadırlar. Donma-çözülme olayı özellikle soğuk iklim bölgelerinde ince ve iri taneli zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Ülkemizde ve dünyadaki birçok bölgede sıcaklık değerlerinin 0 °C'nin altına düştüğü ve zeminin uzun süre don halde bulunduğu düşünülürse zeminlerin donmadan önce, don haldeyken ve tekrarlı donma-çözülme sonrasında davranışının belirlenmesi zemin üzerindeki mühendislik yapıları için önem arz etmektedir. Bu nedenle, çalışmada Taguchi Optimizasyon Yöntemi kullanılarak farklı oranlarda katkı ve atık maddeleri ile stabilize edilen ince taneli zemin farklı çevrimlerde donma-çözülme deneylerine tabi tutularak donmuş zeminin davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, çalışmada atık cam tozu (ACT), bazalt lif (BL), pirinç kabuğu külü (PK), geri dönüştürülmüş karbon karası (KK) ve kireç (K) parametre olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin seviyeleri ise sırasıyla %2-%4-%6-%8, %0,25-%0,50-%0,75-%1, %5-%10-%15-%20, %1-%3-%5-%7, %2-%4-%6-%8 olarak seçilmiştir. 28 günlük serbest basınç dayanımının maksimum olduğu değeri ve optimum karışım oranları, don haldeki zemin ve donma-çözülme deneyi sonucunda çözülmüş haldeki zemin için Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde 28 günlük donma-çözülme deneyi sonucunda serbest basınç dayanımı üzerinde 0, 1 ve 5. çevrimlerin hem don hallerinde hem de çözülmüş hallerinde en etkili parametrenin kireç olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *donmuş zemin, Taguchi Optimizasyon Yöntemi, kil, donma-çözülme.*

<sup>1</sup> Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, zaimoglu@atauni.edu.tr

<sup>2</sup> Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, yasemin.pekdemir@outlook.com

<sup>3</sup> Arş. Gör. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, fatih.artuk@atauni.edu.tr (Sorumlu yazar)

## ABSTRACT

In cold seasons, frost occurs in water-saturated soils when the air temperature drops below 0°C and lasts for more than a few days. As the water in the soil voids freezes, a volume increase of approximately 9% is observed in the soil. In contrast to freezing in cold seasons, thawing occurs in warm seasons and the water content of the soil increases. In this case, soils in cold climate regions are exposed to freezing and thawing several times a year. The freeze-thaw phenomenon adversely affects the physical and mechanical properties of fine and coarse-grained soils, especially in cold climate regions. Considering that in many regions of our country and the world, temperatures drop below 0 °C and the soil remains frozen for a long time, it is important to determine the behavior of soils before freezing, during freezing and after repeated freeze-thawing for engineering structures on the soil. Therefore, the aim of this study was to investigate the behavior of the frozen soil by subjecting the fine-grained soil stabilized with different proportions of additives and waste materials to freeze-thaw tests at different cycles using Taguchi Optimization Method. For this purpose, waste glass powder (ACT), basalt fiber (BL), rice husk ash (PK), recycled carbon black (KK) and lime (K) were selected as parameters. The levels of these parameters were selected as 2%-4%-6%-8%, 0.25%-0.50%-0.75%-1%, 5%-10%-15%-20%, 1%-3%-5%-7%, 2%-4%-6%-8%, respectively. The maximum 28-day unconfined compressive strength and optimum mix proportions were determined by Taguchi Optimization Method for the soil in the frozen state and the soil in the thawed state as a result of the freeze-thaw test. When the results obtained from the experiments were evaluated, it was determined that lime was the most effective parameter on the unconfined compressive strength as a result of the 28-day freeze-thaw test in both the frozen and thawed states of cycles 0, 1 and 5.

*Keywords: frozen soil, Taguchi Optimization Method, clay, freeze-thaw.*

## 1. GİRİŞ

Hava sıcaklığının 0°C'nin altına düştüğü zaman, özellikle de bunun birkaç günden fazla sürmesi durumunda, zemindeki boşluk suyunun donması mümkündür. Bu nedenle soğuk mevsimlerde, suya doymuş zeminlerde don olayı meydana gelmektedir. Zemin boşluklarındaki suyun donmasıyla birlikte meydana gelen yaklaşık %9 hacim artışından dolayı zeminin hacmi de kısa sürede artış göstermektedir (Andersland and Ladanyi, 2004). Donma derinliği, ülkemiz için, soğuk bölgelerde 1m-1,5m arasında değişim göstermektedir. Sıcak mevsimlerde, donma olayının aksine, çözülme meydana gelmekte ve zeminin su içeriği artmaktadır. Bahsedilen donma-çözülme olayı sonucunda zeminler fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından olumsuz yönde etkilenmektedir. Özellikle kılcal doymuş zeminlerde önce buz mercikleri oluşmakta ve bunlar kılcallık etkisi altında serbest su seviyesinden su çekerek büyümektedirler. Bundan ötürü zemin yüzeyinde aşırı kabarma meydana gelip mühendislik yapılarında büyük hasarlara sebep olmaktadır. Soğuk iklim bölgelerinde don olayı mevsimsel, sürekli ve süreksiz olmak üzere üç ana grupta incelenmektedir. Birinci sırada yer almakta olan soğuk iklim bölgelerinde zemin mevsimlere göre donma olayına maruz kalırken ikinci sıradaki sürekli soğuk iklim bölgelerinde zeminin tamamının, üçüncü sıradaki süreksiz soğuk iklim bölgelerinde ise zeminin bazı bölgelerinin donması söz konusu olmaktadır (Zaimoğlu vd., 2013). Soğuk iklimlerde mevsimsel don olayının görüldüğü bölgelerdeki zeminler yıl içinde en az bir kere donma-çözülme olayına

maruz kalmaktadır. İnce daneli zeminlerde donma olayı gerçekleştiğinde ilk olarak buz parçacıkları su potansiyelinin en fazla olduğu ve donma noktasının en yüksek olduğu en büyük gözeneklerde oluşurken daha küçük gözeneklerdeki sular ise daha sonra donmaktadır. Bunun sonucunda zemin içinde çatlaklar oluşmakta ve tekrarlı donma-çözülme çevrimleri sonucunda oluşan çatlaklar büyüyerek zeminin dayanımının düşmesine sebep olmaktadır (Erol,2007).

Ülkemizde ve dünyadaki birçok bölgede sıcaklık değerlerinin 0°C'nin altına düştüğü ve zeminin uzun süre don halde bulunduğu düşünülürse zeminlerin donmadan önce, don haldeyken ve tekrarlı donma-çözülme sonrasında davranışının belirlenmesi gerekmektedir.

Literatürde daha önce yapılan çalışmaların genellikle tekrarlanan donma-çözülme döngüleri sonunda zeminlerin özelliklerine odaklandığı görülmektedir. Bu nedenle çalışmamızda, tekrarlı donma-çözülme çevrimlerine maruz kalan ince daneli zeminin don öncesinde, don esnasında ve tekrarlı donma-çözülme sonrasında serbest basınç dayanımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmada yüksek plastisiteli (CH) killi bir zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için atık cam tozu (ACT), bazalt lif (BL), pirinç kabuğu külü (PK), geri dönüştürülmüş karbon karası (KK) ve kireç (K) katkı maddeleri kullanılmıştır. 28 günlük serbest basınç dayanımının maksimum olduğu değeri ve optimum karışım oranları don haldeki zemin ve donma-çözülme deneyi sonucunda çözülmüş haldeki zemin için Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile belirlenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

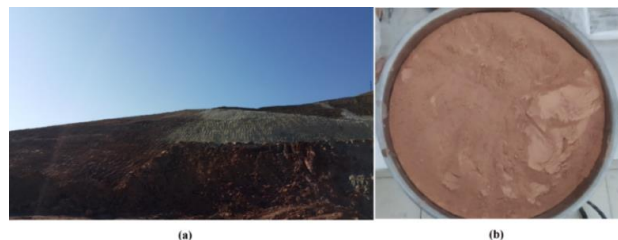
### 2.1. Kullanılan Malzemeler

Kil zemin Erzurum ilinin Kuzeydoğusunda yer alan Oltu ilçesinden alınmıştır (Şekil 1). Kil zeminin USCS sınıflandırma sistemine göre CH sınıfında olduğu belirlenmiştir. Kil zemine ait bazı geoteknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kil zemine ait bazı geoteknik özellikler

Temel Özellikler	Kil zemin
Renk	Kırmızı
Likit Limit (%)	81
Plastik Limit (%)	31
Plastisite İndisi (%)	50
Sınıflandırma (USCS)	CH
Optimum Su İçeriği (%)*	23
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )*	14,6

\*Harvard Minyatür Kompaksiyon Deneyi



Şekil 1. Kil zemin (a- alınan yer, b-elenmiş hali)

Kil zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için atık cam tozu (ACT), bazalt lif (BL), pirinç kabuğu külü (PK), geri dönüştürülmüş karbon karası (KK) ve kireç (K) katkı maddeleri kullanılmıştır. Bu katkı maddelerine ait üretici firma kataloğundan temin edilen bazı özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Katkı maddelerine ait bazı özellikler

Atık Cam Tozu (ACT)		Bazalt Lifi (BL)		Pirinç Kabuğu Külü (PK)		Geri Dönüştürülmüş Karbon Karası (KK)		Kireç	
Bileşen	Miktar (Ağırlıkça %)	Özellik	Değer	Bileşen	Miktar (Ağırlıkça %)	Bileşen	Miktar (Ağırlıkça %)	Bileşen	Miktar (Ağırlıkça %)
SiO <sub>2</sub>	69,42	Çekme Dayanımı (Mpa)	4840	SiO <sub>2</sub>	91.81	C	86.57	Ca(OH) <sub>2</sub>	80-86
LOI	16,18	Elastisite Modülü (Gpa)	89	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.27	Na	2.88	CaO + MgO	88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,09	Uygulama Sıcaklık limitleri (°C)	-260°C - +982	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	Si	3.6	MgO	1-2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,48	Ergime Sıcaklığı (°C)	1450	CaO	0.64	Au	3.32		
CaO	8,27	Özgül Ağırlık (gr/cc)	2,60-2,80	K <sub>2</sub> O	2.28	S	3.64		
MgO	4,25	Elyaf Çapı (micron)	9-23	MgO	0.78				
Na <sub>2</sub> O	12,31	Bazalt Elyaf Uzunluğu (mm)	6	Na <sub>2</sub> O	0.09				
SiO <sub>2</sub>	69,42	Çekme Dayanımı (Mpa)	4840	SiO <sub>2</sub>	91.81				

## 2.2. Yöntem

Bu çalışmada deney tasarım metodlarından biri olan Taguchi Optimizasyon Yöntemi kullanılmıştır. Deney tasarımı için ortogonal dizinler (OA) olarak bilinen standartlaştırılmış tablolar kullanılmaktadır. Deneysel çalışmamızda kullandığımız L<sub>16</sub> (4<sup>5</sup>) 5 parametrelili ve 4 seviyeli ortogonal dizisi Tablo 3’te verilmiştir. Çalışmada Atık Cam Tozu (ACT), Bazalt Lifi (BL), Pirinç Kabuğu Külü (PK), Geri Dönüştürülmüş Karbon Karası (KK) ve Kireç (K) parametre olarak seçilmiştir. Seçilen parametre ve seviyeleri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 3. Deneylerde Kullanılan Ortogonal Dizini L16 (4<sup>5</sup>)

Deney No	Parametreler ve Deneylerin Yapılacağı Parametre Seviyeleri				
	Atık Cam Tozu Oranı(%)	Bazalt Lifi Oranı(%)	Pirinç Kabuğu Külü Oranı (%)	Karbon Karası Oranı(%)	Kireç Oranı(%)
1	ACT1	BL1	PK1	KK1	K1
2	ACT1	BL2	PK2	KK2	K2
3	ACT1	BL3	PK3	KK3	K3
4	ACT1	BL4	PK4	KK4	K4
5	ACT2	BL1	PK2	KK3	K4
6	ACT2	BL2	PK1	KK4	K3
7	ACT2	BL3	PK4	KK1	K2
8	ACT2	BL4	PK3	KK2	K1
9	ACT3	BL1	PK3	KK4	K2
10	ACT3	BL2	PK4	KK3	K1
11	ACT3	BL3	PK1	KK2	K4
12	ACT3	BL4	PK2	KK1	K3
13	ACT4	BL1	PK4	KK2	K3
14	ACT4	BL2	PK3	KK1	K4
15	ACT4	BL3	PK2	KK4	K1
16	ACT4	BL4	PK1	KK3	K2

Tablo 4. Parametreler ve Seviyeleri

Parametreler	Seviyeler			
	1	2	3	4
(ACT) Atık Cam Tozu (%)	2.00(ACT1)	4.00(ACT2)	6.00(ACT3)	8.00(ACT4)
(BL) Bazalt Lifi (%)	0.25(BL1)	0.50(BL2)	0.75(BL3)	1.00(BL4)
(PK) Pirinç kabuğu Külü (%)	5.00(PK1)	10.00(PK2)	15.00(PK3)	20.00(PK4)
(KK) Karbon Karası (%)	1.00(KK1)	3.00(KK2)	5.00(KK3)	7.00(KK4)
(K) Kireç (%)	2.00(K1)	4.00(K2)	6.00(K3)	8.00(K4)

Tablo 3'teki ortogonal dizine göre hazırlanmış her bir deney karışımı için Harvard minyatür kompaksiyon (USBR-5510-1989) aletinde optimum su seviyesi ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir (Tablo 5).

Tablo 4. Her bir deneye ait optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı

Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8
$W_{opt}$ (%)	24	27	28	30	29	29	29	28
$\gamma_{kmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,27	13,55	12,83	12,4	12,9	13,1	12,8	12,85
Deney No	9	10	11	12	13	14	15	16
$W_{opt}$ (%)	30	29	31	29	29	31	29	27
$\gamma_{kmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	12,75	12,85	13,25	13,05	12,75	12,8	13,15	13,28

Donma-çözülme deneyi için Tablo 4'te verilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında 33mm çapında ve 71mm yüksekliğinde don öncesi (0.Çevrim) için üçer, don hal ve çözülme sonrası (1,5,10 çevrim) için üçer adet olmak üzere silindirik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler su muhtevalarını kaybetmemeleri için desikatöre konularak ortalama sıcaklığı  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  ve nem oranı % 45 olan ortamda 28 gün sürelerde kürlenmeleri için bekletilmiştir. Kür süresi tamamlanan her bir deneye ait numuneler donma-çözülme kabineye yerleştirilerek, kapalı sistem donma-çözülme çevrimlerine (1,5,10, çevrim) tabi tutulmuştur.

Zemin numuneleri 6 saat donmaya ( $-18^\circ\text{C}$ ) 6 saat çözülmeye ( $22^\circ\text{C}$ ) maruz kalmaktadır. 12 saatlik bu donma-çözülme süreci bir donma-çözülme çevrimi olarak belirlenmiştir (Ghazavi, Roustaei, 2010; Zaimoğlu, 2016; Saygılı and Dayan, 2019). Her bir çevrim süresini tamamlayan numuneler don ve çözülmüş durumlarda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Don durumundaki numunelerin deney süresince don sıcaklığında ( $-18^\circ\text{C}$ ) sabit olması için serbest basınç deney aletine uygun ayarlanabilir soğutma cihazı yaptırılmıştır. Soğutma cihazının görseli Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Soğutma Kabini ve Soğutma Ünitesi Serbest Basınç Deney aletine yerleştirilmiş şekilde

Serbest basınç deneyi için üretilen ve donma çözülme deneyine tabi tutulan numuneler soğutma ünitesi yardımıyla istenilen sıcaklıkta sabit tutularak kabinin yerleştirildiği bölgede ASTM D 2166'ya uygun olarak serbest basınç deneylerine tabi tutulabilmektedir (Şekil 3).



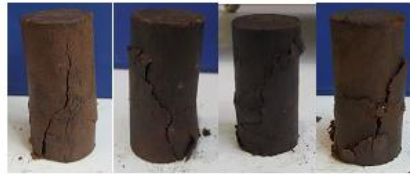
Şekil 3. Serbest basınç deney aleti

Serbest basınç deneyinde kırılan numuneler Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmektedir.



a) Don Öncesi b)1.çevrim c)5.çevrim d)10.çevrim

Şekil 4. Don öncesi (0.Çevrim) ve 1,5 ve 10. çevrim sonu don haldeki numunelerin serbest basınç deneyi sonucu kırılma düzlemleri



a) Don Öncesi b)1.çevrim c)5.çevrim d)10.çevrim

Şekil 5. Don öncesi (0.Çevrim) ve 1,5 ve 10. çevrim sonu çözülmüş haldeki numunelerin serbest basınç deneyi sonucu kırılma düzlemleri

### 3. SONUÇLAR

28 günlük kür süresi sonunda donma-çözülme deneyine tabi tutulmayan (0. çevrim),ve 1, 5, 10. Çevrim don ve çözülmüş numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçları Tablo 5'de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 5' de verilen serbest basınç deney sonuçları kullanılarak her bir deneye ait S/N analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda hesaplanan S/N değerleri ile parametrelerin ortalama S/N değerleri Tablo 6'da toplu halde verilmiştir.

Tablo 5. Serbest basınç deney sonuçları (0,1,5,10. Çevrim)

Deney no	Serbest basınç Dayanımı (MPa)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0. Çevrim	1	0,67	1,05	1,56	2,18	2,47	2,05	1,77	0,96	1,76	0,67	2,39	1,36	1,63	2,03	0,83	1,2
	2	0,79	1,06	1,37	2,11	2,05	1,61	1,33	0,92	1,55	0,67	1,92	1,31	1,72	2	0,79	1,14
	3	0,55	1,05	1,17	2,26	2,88	2,49	2,21	1,01	1,97	0,67	2,87	1,4	1,54	1,97	0,87	1,26
1. Çevrim don	1	1,43	3,41	4,13	4,85	3,98	4,36	3,37	2,85	4,35	2,89	4,51	4,02	4,19	5,34	3,27	3,97
	2	2,36	3,49	3,51	4,37	3,56	5,03	3,82	2,94	4,97	3,18	4,44	3,89	4,29	5,33	2,84	3,88
	3	3,3	3,34	4,75	5,34	4,39	3,69	2,92	2,77	3,73	2,61	4,58	4,16	4,09	5,36	3,7	4,06
1. Çevrim Çözülmüş	1	0,68	0,91	1,14	1,83	1,87	1,15	1,61	0,69	1,12	0,58	1,76	0,98	1,4	1,29	0,59	0,84
	2	0,63	0,76	1,18	1,78	1,79	0,67	1,68	0,71	1,1	0,58	1,28	1,09	1,09	0,9	0,6	0,74
	3	0,58	1,06	1,09	1,89	1,96	1,64	1,55	0,67	1,15	0,58	0,8	0,87	1,72	1,68	0,6	0,95
5. Çevrim don	1	1,6	3,18	3,53	4,08	3,3	3,42	3,35	2,21	3,74	2,05	3,83	3,67	3,12	5,2	2,61	3,2
	2	1,51	3,24	2,9	3,8	4,38	3,49	3,26	2,09	5,22	1,71	3,83	3,76	3,36	5,16	2,48	3,33
	3	1,43	3,12	4,16	4,36	2,21	3,34	3,44	2,34	2,26	2,4	3,83	3,85	3,6	5,24	2,75	3,08
5. Çevrim Çözülmüş	1	0,43	0,68	1,14	1,43	1,38	1,17	1,3	0,66	0,92	0,48	1,28	0,98	1,1	1,45	0,46	0,52
	2	0,5	0,75	0,9	1,77	1,38	1,29	1,48	0,61	1,09	0,49	1,32	0,95	1,18	1,54	0,4	0,55
	3	0,56	0,61	1,37	1,09	1,38	1,04	1,13	0,7	0,76	0,49	1,23	1,01	1,01	1,35	0,51	0,49
10. Çevrim Don	1	1,2	2,79	3,33	3,6	2,96	3,04	3,22	2,16	3,11	1,67	3,62	3,66	2,59	4,99	1,65	3,01
	2	1,46	2,69	2,96	3,87	3,57	3,24	2,55	2,12	1,75	1,94	3,42	4,77	2,51	5,09	2,22	2,65
	3	1,72	2,88	3,71	3,34	2,34	2,84	3,88	2,19	4,46	1,4	3,82	2,55	2,67	4,9	1,09	3,36
10. Çevrim Çözülmüş	1	0,48	0,44	1,1	1,37	1,26	1,09	1,2	0,6	0,9	0,47	1,26	0,96	0,98	1,38	0,43	0,47
	2	0,45	0,64	1,11	1,3	1,2	1,01	1,17	0,66	0,94	0,48	1,22	0,93	1,07	1,36	0,41	0,51
	3	0,42	0,24	1,09	1,43	1,32	1,16	1,23	0,55	0,87	0,45	1,3	1	0,89	1,4	0,45	0,42

Tablo 5 incelendiğinde don haldeki numunelerin 28 günlük serbest basınç dayanımlarının 10.çevrim sonunda dahi donma çözülme deneyine tabi tutulmayan hallerinin (0.çevrim) dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6. S/N Değerleri (0,1,5,10. Çevrim)

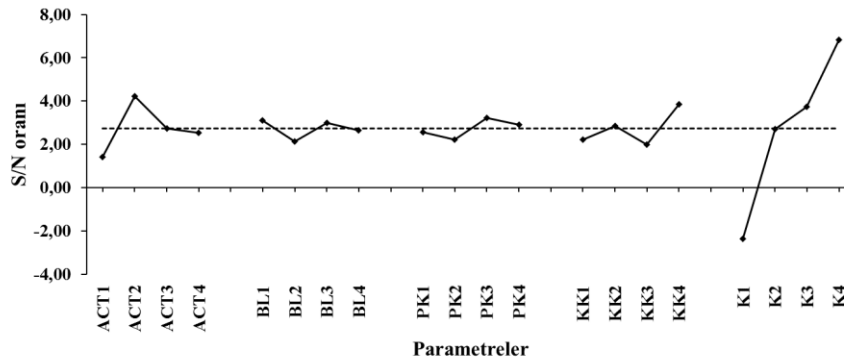
Deney No	S/N Değerleri							
	0.Çevrim	1. Çevrim		5.Çevrim		10.çevrim		
		DON	ÇÖZÜLMÜŞ	DON	ÇÖZÜLMÜŞ	DON	ÇÖZÜLMÜŞ	
1	-3,95	5,37	-4,11	3,56	-6,32	2,89	-6,98	
2	0,44	10,66	-1,15	10,04	-3,50	8,88	-9,89	
3	2,46	12,03	1,10	10,54	0,54	10,30	0,84	
4	6,77	13,59	5,26	12,15	2,36	11,07	2,67	
5	7,47	11,85	5,43	8,91	2,80	8,85	1,98	
6	5,63	12,48	-1,14	10,67	1,18	9,60	0,67	
7	4,13	10,32	4,14	10,49	2,08	9,58	1,54	
8	-0,34	9,09	-3,22	6,86	-3,72	6,68	-4,50	
9	4,72	12,50	1,01	9,35	-1,11	7,26	-0,89	
10	-3,51	9,10	-4,76	5,87	-6,27	4,11	-6,63	
11	7,06	13,08	0,28	11,66	2,11	11,14	1,97	
12	2,64	12,08	-0,35	11,51	-0,19	10,05	-0,35	
13	4,20	12,44	2,30	10,46	0,73	8,26	-0,27	
14	6,02	14,56	0,97	14,32	3,16	13,96	2,77	
15	-1,65	10,07	-4,46	8,31	-6,99	2,84	-7,39	
16	1,55	11,97	-1,68	10,10	-5,77	9,38	-6,68	
Ortalama S/N Oranı	2,73	11,32	-0,02	9,67	-1,18	8,43	-1,95	

Parametrelerin ve seviyelerin sonuca etkilerini belirlemede kullanılan, seviyelerin ortalama S/N değerleri Tablo 6' daki S/N değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Her bir parametreye ait seviyelerin ortalama S/N değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Parametrelerin ve Seviyelerin Ortalama S/N Değerleri (0,1,5,10. Çevrim)

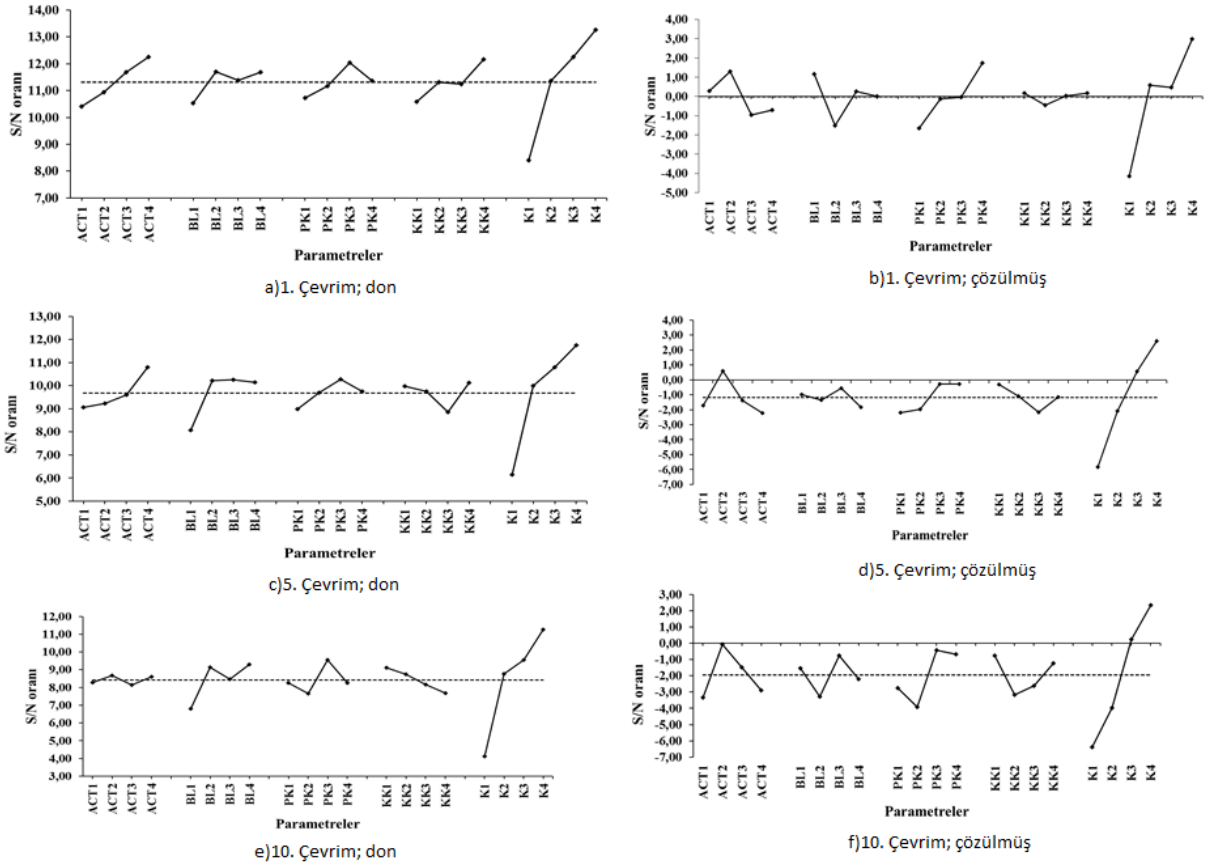
Çevrimler	Seviyeler	Ortalama S/N Etkileri				
		Atık Cam Tozu Oranı	Bazalt Lifi Oranı	Pirinç Kabuğu Külü Oranı	Karbon Karası Oranı	Kireç Oranı
0. Çevrim	1.seviye	1,43	3,11	2,57	2,21	-2,36
	2.seviye	4,22	2,14	2,22	2,84	2,71
	3.seviye	2,73	3,00	3,21	1,99	3,73
	4.seviye	2,53	2,65	2,90	3,87	6,83
1. Çevrim Don	1.seviye	10,41	10,54	10,73	10,58	8,41
	2.seviye	10,93	11,70	11,16	11,32	11,36
	3.seviye	11,69	11,38	12,04	11,24	12,26
	4.seviye	12,26	11,68	11,36	12,16	13,27
1. Çevrim Çözülmüş	1.seviye	0,27	1,16	-1,66	0,16	-4,14
	2.seviye	1,30	-1,52	-0,13	-0,44	0,58
	3.seviye	-0,96	0,27	-0,03	0,02	0,48
	4.seviye	-0,71	0,00	1,73	0,17	2,99
5. Çevrim Don	1.seviye	9,07	8,07	8,99	9,97	6,15
	2.seviye	9,23	10,23	9,69	9,76	9,99
	3.seviye	9,60	10,25	10,27	8,85	10,79
	4.seviye	10,80	10,15	9,75	10,12	11,76
5. Çevrim Çözülmüş	1.seviye	-1,73	-0,98	-2,20	-0,32	-5,82
	2.seviye	0,58	-1,36	-1,97	-1,09	-2,07
	3.seviye	-1,37	-0,57	-0,28	-2,18	0,56
	4.seviye	-2,22	-1,83	-0,28	-1,14	2,60
10. Çevrim Don	1.seviye	8,28	6,81	8,25	9,12	4,13
	2.seviye	8,68	9,14	7,66	8,74	8,77
	3.seviye	8,14	8,46	9,55	8,16	9,55
	4.seviye	8,61	9,29	8,25	7,69	11,25
10. Çevrim Çözülmüş	1.seviye	-3,34	-1,54	-2,76	-0,75	-6,37
	2.seviye	-0,08	-3,27	-3,91	-3,17	-3,98
	3.seviye	-1,48	-0,76	-0,44	-2,62	0,22
	4.seviye	-2,89	-2,21	-0,67	-1,24	2,35

Her bir parametre ve seviyelerinin 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini gösteren Parametre - S/N oranı ilişkisi Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekillerde yatay eksen deneylerdeki ortalama S/N değerlerini göstermektedir.



Şekil 6. Parametre – S/N oranı ilişkisi (0. çevrim)





Şekil 7. Parametre – S/N oranı ilişkisi (1,5,10. Çevrim; don, çözülmüş)

Tablo 7, Şekil 6 ve Şekil 7 incelendiğinde don öncesi (0.Çevrim), 1,5,10. çevrim; don, 1,5,10. çevrim; çözülmüş numuneleri için 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin kireç olduğu görülmektedir. 0. Çevrim ve 1. Çevrim; don numuneleri için parametrelerin 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etkinlik sıralaması kireç, atık cam tozu, karbon karası pirinç kabuğu külü ve bazalt liftir. 1. çevrim; çözülmüş numuneler için ise etkinlik sıralaması kireç, pirinç kabuğu külü, bazalt lif, atık cam tozu ve karbon karasıdır. 5. çevrim; don numuneler için etkinlik sıralaması kireç, atık cam tozu, bazalt lif, pirinç kabuğu külü ve karbon karasıdır. 5. çevrim; çözülmüş numuneler için etkinlik sıralaması kireç, atık cam tozu, pirinç kabuğu külü, karbon karası, bazalt liftir. 10. çevrim; don numuneler için etkinlik sıralaması kireç, bazalt lif, pirinç kabuğu külü, karbon karası ve atık cam tozudur. 10. çevrim; çözülmüş numuneler için ise etkinlik sıralaması kireç, pirinç kabuğu külü, atık cam tozu, bazalt lif, karbon karasıdır.

28 günlük serbest basınç dayanımının maksimum olduğu değeri ve karışım oranlarını belirlemek için Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile beklenen 28 günlük serbest basınç dayanım değeri ve güven aralığı hesaplanarak Tablo 8’de verilmiştir. Ayrıca 28 günlük serbest basınç dayanımının maksimum olacağı karışım oranları için hazırlanan numuneler üzerinde doğrulama deneyi yapılmış ve doğrulama deney sonuçlarının ortalaması yine Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Optimum Deney Koşulları ve Beklenen Değerler (0,1,5,10. Çevrim)

Çevrimler	Optimum Koşullardaki Parametre ve Seviyeleri (%)					Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N) / (MPa)	%95 Güven Aralığı (S/N)	Doğrulama Deney Sonucu (S/N) / (MPa)
	ACT	BL	PK	KK	K			
0.Çevrim	4	0,25	15	7	8	9,46 / 2,97	7,98 - 10,95	8,40 / 2,63
1.Çevrim Don	8	0,50	15	7	8	15,04 / 5,65	13,16 - 16,92	14,95 / 5,59
1.Çevrim Çöz	4	0,25	20	7	8	7,25 / 2,30	6,12 - 8,38	6,24 / 2,05
5.Çevrim Don	8	0,75	15	7	8	13,46 / 4,71	11,58 - 15,34	13,22 / 4,58
5.Çevrim Çöz	4	0,75	20	1	8	5,28 / 1,84	3,00 - 7,55	4,71 / 1,72
10.Çevrim Don	4	1	15	1	8	13,24 / 4,59	11,58-14,90	11,82 / 3,90
10.Çevrim Çöz	4	0,75	20	1	8	2,89 / 1,39	0,18 - 5,59	2,73 / 1,37

Optimum şartlarda beklenen değer doğruluğunu ispatlamak amacıyla ilgili parametre ve seviyelerine göre numune hazırlanarak 28 gün kür koşulları ardından tekrar kırımı gerçekleştirilmiş ve serbest basınç dayanım değerleri Tablo 8’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Doğrulama deneyleri sonucu elde edilen serbest basınç değerlerine karşılık gelen S/N değerleri incelendiğinde bu değerlerin don öncesi(0. Çevrim) ve yapılan tüm donma-çözülme çevrimleri için % 95 güven aralığında olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, % 95 güven aralığında söz konusu değer doğru olduğu söylenebilir. Bu durum Taguchi Yöntemi ile yapılan serbest basınç dayanımı tahmininin (beklenen değer) doğruluğunu ve deneylerde parametreler arasında önemli bir iç etkileşim olmadığını göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- Andersland, O. B. and Ladanyi, B., 2004. Frozen Ground Engineering Second Edition. Wiley  
ASTM D 2166. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Erol, A., 2007. C sınıfı uçucu kül katkılı siltlerin dayanım ve donma-çözülme direncinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Saygili, A. and Dayan, M., 2019. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers. Cold Regions Science and Technology.
- USBR-5510-1989. Performing Laboratory Compaction of Soils-Harvard Miniature, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Zaimoğlu, A. Ş., Hattatoğlu, F., Akbulut, R. K., 2013. Freezing-thawing behaviour of fine-grained soils subjected to surcharge loads. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 19(3), 117-120.
- Zaimoğlu, A. Ş., Çalik, Y., Akbulut, R. K., Yetimoğlu, T., 2016 a. A Study on Freeze-Thaw Behavior of Randomly Distributed