

# Uçucu Kül Katkısının Derin Karıştırma Kolonlarının Sıkışabilirliğine Etkisi

Yavuz YENGİNAR<sup>1</sup>  Murat OLGUN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

## Makale Bilgisi

## ÖZET

### Makale Geçmişi

Geliş Tarihi: 14.11.2023

Kabul Tarihi: 08.02.2024

Yayın Tarihi: 30.04.2024

### Anahtar kelimeler:

Derin karıştırma yöntemi,  
Killi zemin,  
Sıkışabilirlik,  
Süper akışkanlaştırıcı,  
Taguchi yöntemi,  
Uçucu kül.

Sunulan bu çalışmanın özgün tarafı uçucu kül katkıli derin karıştırma kolonlarının (DKK) sıkışma kapasitesini en aza indirecek optimum enjeksiyon parametrelerini belirlemektir. Çalışmada killi bir zemin ıslak karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiştir. Zeminin likitlik indisi, su/bağlayıcı oranı, çimento oranı, süper akışkanlaştırıcı miktarı ve uçucu kül ikame oranı gibi değişkenlerin DKK'nın sıkışabilirlik özelliğine etkisi incelenmiştir. Deneilerin tasarımı Taguchi yöntemine göre yapılmıştır. 5 parametre ve 4 seviye için L16 ortogonal dizin tablosuna göre DKK numuneleri hazırlanmıştır. Kürde bekletilen (28 ve 56 gün) numunelerin konsolidasyon deneyleri yapılarak numunenin sıkışma indisi, kabarma indisi ve boşluk oranındaki değişim belirlenmiştir. Analizler sonunda parametrelerin optimum değerleri (zeminin likitlik indisi=0.4, su/bağlayıcı oranı=0.8, bağlayıcı dozajı=425 kg/m<sup>3</sup>, süper akışkanlaştırıcı oranı=%3, uçucu kül oranı=%40) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar DKK imalatında %40 oranında uçucu kül kullanılması ile enjeksiyon maliyetlerinin de bu oranda azalacağını göstermektedir. Ayrıca atık bir ürün olan uçucu kül kullanımının artması ile çevresel zararlar en aza inecektir.

## Effect of Fly Ash Replacement on Compressibility of Deep Mixing Columns

## Article Info

## ABSTRACT

### Article History

Received: 14.11.2023

Accepted: 08.02.2024

Published: 30.04.2024

### Keywords:

Clayey soil,  
Compressibility,  
Deep mixing method,  
Fly ash,  
Super plasticizer,  
Taguchi method.

The unique aspect of this study is to determine the optimum injection parameters that will minimize the compression capacity of fly ash-containing deep mixing columns (DMC). In the study, a clayey soil was improved by wet mixing method. The effects of variables such as soil liquidity index, water/binder ratio, cement, superplasticizer and fly ash amounts on the compression properties of DMC were examined. The design of the experiments was made according to the Taguchi method. DMC samples were prepared according to the L16 orthogonal index table for 5 parameters and 4 levels. Consolidation experiments were performed on the samples kept in cure (28 and 56 days) and the change in the compression index, swelling index and void ratio of the sample was determined. At the end of the analyses, optimum values of the parameters (liquidity index of the soil = 0.4, water/binder ratio = 0.8, binder dosage = 425 kg/m<sup>3</sup>, superplasticizer ratio = 3%, fly ash ratio = 40%) were obtained. The results obtained show that by using 40% fly ash in DMC production, injection costs will also decrease at this rate. In addition, environmental damage will be minimized by increasing the use of fly ash, which is a waste product.

### To cite this article:

Yenginar, Y. & Olgun, M. (2024). Uçucu kül katkısının derin karıştırma kolonlarının sıkışabilirliğine etkisi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 139-152. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.38>

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Yavuz Yenginar, [yavuzyenginar@gmail.com](mailto:yavuzyenginar@gmail.com)



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geoteknik mühendisliği disiplininde herhangi bir yapının temas ettiği zeminde taşıma gücü, oturma, sıvılaşma, stabilite problemlerinden bir veya birkaç tanesinin bulunması halinde o zeminin uygun bir yöntemle stabilize edilmesi veya daha sağlam bir zeminle yer değiştirilmesi gerekmektedir. Problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde derin karıştırma yöntemi yaygın olarak kullanılan stabilizasyon yöntemlerinden bir tanesidir [1–3]. Bu yöntem ilk olarak 1975 yılında uygulanmaya başlanmış [4,5], bu tarihten itibaren ise arazi koşulları ve inşaat sektörünün gereksinimleri doğrultusunda farklı makine ekipmanları geliştirilmiştir. Derin karıştırma yöntemi ile zemin iyileştirmesi ıslak ve kuru yöntem olarak uygulanabilmektedir. Kuru karıştırma yönteminde bağlayıcı madde (çimento, kireç vb.) kuru halde zemine püskürtülmekte ve karıştırılmaktadır. Islak derin karıştırma yönteminde ise bağlayıcı malzeme ile hazırlanan enjeksiyon zeminle mekanik olarak karıştırılmaktadır. Karıştırma işlemi, delgi gövdesi ucuna bağlı olan belirli bir çaptaki karıştırma bıçağının ucundaki püskürtme memelerinden enjeksiyonun yüksek basınçla (300-600 bar) püskürtülmesi ve delgi gövdesinin aşağı/yukarı hareketiyle eş zamanlı dönmesi ile devam etmektedir. Karıştırma işlemi sonunda zemine göre rijitliği daha fazla olan kolonlar imal edilmiş olmaktadır. Derin karıştırma yöntemi çakıllı zeminler hariç tüm zemin cinslerinde uygulanabilmektedir [6]. Bu yöntem ile iyileştirilmiş zeminin dayanımı artmakta, sıkışabilirliği ve geçirimsizliği azalmaktadır. Derin karıştırma kolonları (DKK) sızdırmazlık perdesi oluşturmak [7], derin kazıların desteklenmesi [8], sıvılaşabilir zeminlerin iyileştirilmesi [9] ve şev stabilitesinin artırılması [10,11] amacıyla kullanılmaktadır.

DKK'nın dayanım, sıkışma ve geçirimsizlik gibi özellikleri enjeksiyon parametrelerine (bağlayıcı dozajı, su/bağlayıcı oranı), imalat parametrelerine (delgi gövdesinin batma, çekme ve dönme hızları) ve zemin özelliklerine (zemin cinsi, kıvamı, dayanımı vb.) göre değişiklik göstermektedir. Islak karıştırma yönteminde bağlayıcı olarak genellikle çimento kullanılmaktadır. Çimentolu DKK'nın performans özellikleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır [12–20]. Genellikle bağlayıcı dozajı ve kür süresi ile dayanım artarken, su/bağlayıcı oranı arttıkça dayanım düşmektedir [2,21,22]. Fakat, çimentonun yaygın kullanımı nedeniyle doğal kaynaklar azalırken [23], çimento üretimi sırasında hem çok fazla enerji tüketilmekte hem de CO<sub>2</sub> gaz salınımı artmaktadır [24,25]. DKK imalatında çimento yerine atık/yan ürün maddeler kullanılarak çevresel zararlar azaltılabilir.

Çimentolu DKK imalatında kısmi miktarda uçucu kül (UK) kullanıldığında; karışımın işlenebilirliği artmakta [26], dayanım artmakta [27], geçirimsizlik azalmakta [19,28], hidrasyon reaksiyonları uzun sürede gerçekleşmektedir [29]. Çimentolu DKK nihai dayanımının büyük çoğunluğunu 28 günde kazanırken, uçucu kül katkılı DKK'nın nihai dayanıma ulaşması daha uzun sürmektedir. Yine de yeterli miktarda uçucu kül kullanıldığında 28 günlük DKK dayanımı zemin stabilizasyonu için gerekli koşulları sağlamaktadır [30]. Zemin iyileştirme projelerinde DKK'nın tasarım dayanımı için genellikle 1 MPa yeterli olmaktadır [31]. Yenginar [20], 275 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı dozajı ve %40 uçucu kül katkılı çimento DKK'nın dayanımını 28 günde 1.5 MPa elde etmiştir. DKK'nın performans özelliklerindeki iyileşme zemin-çimento-su karışımında meydana gelen kasyon değişimi ve hidrasyon reaksiyonlarının neticesinde olmaktadır [17].

Uçucu kül katkılı DKK kolonlarının dayanım özellikleri yeterince araştırılmasına rağmen DKK'nın sıkışabilirlik özelliğini araştıran çalışmalar oldukça sınırlıdır. Uçucu kül katkılı DKK'nın sıkışabilirlik özelliği bilinirse düşey yükler altında kolondaki boşluk oranı değişimi ve oturma miktarı belirlenebilir. Bununla birlikte iyileştirilmiş zeminin (zemin-kolon kombinasyonu) sayısal çözümlerine (sonlu elemanlar yöntemi ile) olanak sağlayacak parametreler elde edilebilecektir. Bu çalışmada farklı kıvam özelliklerine sahip killi zeminler ile uçucu kül katkılı

çimento enjeksiyonları karıştırılarak DKK numuneleri hazırlanmış ve küre tabi tutulmuştur. İmalat sırasında zeminin likitlik indisi, bağlayıcı dozajı, su/bağlayıcı oranı, süper akışkanlaştırıcı oranı ve uçucu kül oranı değişken parametreler olarak seçilmiştir. Deney tasarımı ve istatistiki çalışmalar için Taguchi yöntemi ve S/N analizi kullanılmıştır. DKK numunelerinin 28 ve 56 gün sonunda konsolidasyon deneyleri yapılarak numunedeki boşluk oranı değişimleri ve sıkışma indisleri belirlenmiştir. Ayrıca minimum sıkışma özelliğine sahip DKK imalatı için imalat parametrelerinin optimum değerleri belirlenmiştir.

## MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

### Malzemeler (Materials)

Çalışmada kullanılan zemin, Konya 2. Organize sanayi bölgesindeki bir araziden açık kazı usulü ile 6-7 m derinlikten temin edilmiştir. Zemin, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine [32] göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Killi zeminin diğer geoteknik özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Zeminin geoteknik özellikleri

Özellik	Değer
Tane dağılımı	
Çakıl (%)	1.6
Kum (%)	10.8
Silt (%)	37.7
Kil (%)	49.9
Kıvam limitleri	
Likit limit (%)	52.1
Plastik limit (%)	22.7
Zemin sınıfı (USCS)	CH
Özgül yoğunluk	2.67

DKK numunelerinin hazırlanmasında ana bağlayıcı malzeme olarak CEM-1 42.5R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun priz başlangıç süresi 200 dk, priz bitiş süresi 240 dk ölçülmüştür. Çimentonun özgül yoğunluğu 3.2’dir.

DKK numunelerinin hazırlanmasında ikincil bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül (UK) kullanılmıştır. UK, Kütahya Seyitömer’de bulunan termik santralden temin edilmiştir. Uçucu külün kimyasal yapısında %54.49 SiO<sub>2</sub> (S), %20.58 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A) ve %9.27 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F) bulunmaktadır. UK içerisindeki S+A+F=84.34% (>70%) ve CaO<%10 olduğundan dolayı, UK F sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmıştır [33]. Uçucu külün özgül yoğunluğu 2.13’dür.

UK katkılı enjeksiyonun vizkozitesini azaltmak amacıyla modifiye fosfonat bazlı süper akışkanlaştırıcı madde kullanılmıştır.

### Taguchi yöntemi ve deney tasarımı (Taguchi design and experimental design)

Deney tasarımı güçlü bir optimizasyon tekniği olan Taguchi yöntemine [34–37] göre yapılmıştır. Taguchi yöntemi süreç üzerinde etkili olan parametrelerin optimum seviyesini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir.

Bu çalışmada, minimum sıkışabilirliğe sahip UK katkılı DKK imalatı yapılabilmesi amaçlanmaktadır. Bahsedilen geoteknik probleme özgü olarak Taguchi yönteminin uygulanma aşamaları aşağıda kısaca anlatılmıştır.

- Parametre ve seviyelerinin belirlenmesi: DKK’nın sıkışma özelliği zemin ve enjeksiyon parametrelerine göre değişmektedir. İyileştirilmemiş zeminin likitlik indisi için plastik kıvam (LI=0.4)

ile likit kıvam (LI=1.0) arasında geniş bir aralık seçilmiştir. Doğal zeminin likitlik indisine (veya su muhtevası) göre enjeksiyondan gelen su DKK numunesinin toplam su/bağlayıcı oranını, dolayısıyla sıkışabilirlik özelliğini değiştirmektedir. Bu nedenle DKK numunelerinin sıkışabilirlik özellikleri belirlenirken farklı kıvamlardaki killi zeminler dikkate alınmıştır. Arazideki uygulamalarda bağlayıcı dozajı genellikle 100-500 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir [38]. Birçok çalışmada optimum uçucu kül oranı %10 [39] ile %40 [19,20] arasında elde edilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı için üretici firma %5 oranına kadar kullanılabilceğini bildirmiştir [40]. Su/bağlayıcı parametresinin alt sınırı Marsh hunisi deneyleri [41] ile belirlenmiş olup, enjeksiyonun rahatlıkla pompalanabilmesi için belirli bir viskoziteye sahip olması gerekmektedir [42]. Marsh hunisi deney sonuçları için Yenginar'ın [20] çalışmasına bakılabilir. Su/bağlayıcı oranının en fazla 1.4 olabileceği ifade edilmektedir [2,38,43]. Bu açıklamalar doğrultusunda enjeksiyon parametreleri için seçilen alt ve üst limitler; bağlayıcı dozajı (BD) için 200-425 kg/m<sup>3</sup>, UK ikame oranı (UKO) için %0-60, süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı (S) için %0-5 ve su/bağlayıcı oranı (s/b) için 0.8-1.4 seçilmiştir.

• Ortogonal dizin seçimi: Deney tasarımında 5 parametre (BD, UKO, S, s/b, LI) bulunmaktadır. Her bir parametre için 4 seviye belirlenmiş ve deney tasarımı L16 (4<sup>5</sup>) ortogonal dizin tablosuna göre oluşturulmuştur (Tablo 2 ve Tablo 3).

**Tablo 2.** DKK imalatındaki değişkenler ve seviyeleri

Değişkenler	Seviye-1	Seviye-2	Seviye-3	Seviye-4
BD (kg/m <sup>3</sup> )	200	275	350	425
UKO (%)	0	20	40	60
S (%)	0	1	3	5
s/b	0.8	1.0	1.2	1.4
LI	0.4	0.6	0.8	1.0

**Tablo 3.** L16 ortogonal dizin tablosu ile Taguchi deney tasarımı

Tasarım No	Parametre ve seviyeleri				
	BD (kg/m <sup>3</sup> )	UKO (%)	S (%)	s/b	LI
1	200	0	0	0.8	0.4
2	200	20	1	1.0	0.6
3	200	40	3	1.2	0.8
4	200	60	5	1.4	1.0
5	275	0	1	1.2	1.0
6	275	20	0	1.4	0.8
7	275	40	5	0.8	0.6
8	275	60	3	1.0	0.4
9	350	0	3	1.4	0.6
10	350	20	5	1.2	0.4
11	350	40	0	1.0	1.0
12	350	60	1	0.8	0.8
13	425	0	5	1.0	0.8
14	425	20	3	0.8	1.0
15	425	40	1	1.4	0.4
16	425	60	0	1.2	0.6

• Deney ve analiz süreci: DKK numunesi hazırlandıktan belirli zaman sonra (28-56 gün) numunelerin sıkışma indisi (C<sub>c</sub>) belirlenmiştir. Deney sonuçları S/N analizleri ile değerlendirilmiştir. S/N değeri Taguchi yöntemine özgü bir sonuç göstergesi olup, ortalamanın standart sapmaya oranı olarak tariflenmiştir. Çalışmada sonuç parametresinin (C<sub>c</sub>) minimize edilmesi amaçlandığından “en küçük en iyi” durumuna karşılık gelen S/N formülü kullanılmıştır (Denklem 1).

$$S/N = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (1)$$

Burada  $Y_i$  i. deneydeki sonucu ve n deney tekrar sayısını göstermektedir.

• Optimizasyon ve doğrulama: DKK'nın sıkışma özelliğini etkileyen tüm parametrelerin optimum seviyesi belirlendikten sonra, optimum parametreler ile tekrar DKK numunesi hazırlanmış ve optimizasyon sonuçları doğrulanmıştır.

### **Numune hazırlama (Sample preparation)**

Araziden getirilen doğal zemin etüvde  $60^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulmuştur çünkü daha yüksek sıcaklıklarda ( $>100^{\circ}\text{C}$ ) kilin mineral yapısı değişebilmektedir [44]. Kil kurutulduktan sonra plastik tokmak ile dövülmüş, sonra 20 mm çaplı elekten elenerek zemin numunesi elde edilmiştir. DKK numuneleri hazırlanırken karışımda bulunan çimento, süper akışkanlaştırıcı katkı, uçucu kül, zemin ve suyun kütle ve hacimlerinin bilinmesi gerekmektedir. DKK numuneleri konsolidasyon ringi (50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde) içerisine yerleştirileceği için toplam karışım hacmi ( $V_T$ ) bilinmektedir.  $V_T$  ile BD çarpılarak toplam kuru bağlayıcı miktarı (çimento+uçucu kül) ( $M_k$ ) belirlenmiştir.  $M_k$  ile UKO çarpılarak UK kütlesi, dolayısıyla çimento kütlesi belirlenmiştir.  $M_k$  ile S ve s/b çarpımı sırasıyla süper akışkanlaştırıcı ve su kütlelerini vermektedir. Kütleleri belirlenen malzemeler için ilgili malzemenin yoğunluk bilgisi kullanılarak hacimleri hesaplanmıştır. Daha sonra toplam hacimden enjeksiyon hacmi çıkarılınca doğal (yaş) zemin hacmi bulunabilir. Zeminin likitlik indisine göre, her bir karışımdaki kuru zemin hacmi ve kütlesi hesaplanmaktadır. Tüm malzemelerin kütleleri belirlendikten sonra, malzemeler tartılarak karıştırma kabına dökülmüş ve mikser yardımıyla 10 dakika süresince karıştırılmıştır (Şekil 1a-1c). Hazırlanan karışım konsolidasyon ringlerine dökülmüş (Şekil 1d) ve sert zemine birkaç kez vurularak içerisindeki hava kabarcıklarının çıkması sağlanmıştır. Daha sonra numuneler poşetlenerek kür havuzuna bırakılmıştır. Numuneler 28 ve 56 gün kür edildikten sonra konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 1e). Konsolidasyon deneyleri ASTM D2435 standardına [45] uygun yapılmıştır. Deneylerde numune üzerine 50-100-200-400-800-1600 kPa gerilme ( $\sigma$ ) uygulanmış (yükleme durumu), her yükleme kademesinde oturmalar bitene kadar beklenmiştir. Son yükleme kademesinden sonra numune üzerindeki gerilme 100 kPa'ya indirilmiş (boşaltma durumu) ve kabarma bitene kadar beklenmiştir. Numunelere ait kütle, hacim, eksenel boy kısalması, su muhtevası gibi değerler belirlendikten sonra her yükleme kademesinden sonra numunenin boşluk oranı (e) hesaplanmıştır. Deneyler sonunda konsolidasyon eğrileri (e-log $\sigma$ ) çizilerek sıkışma indisi ( $C_c$ ), kabarma indisi ( $C_s$ ) ve boşluk oranındaki değişim ( $\Delta e$ ,  $\Delta e/e$ ) değerleri belirlenmiştir. Sıkışma ve kabarma indisleri sırasıyla yüklem ve boşaltma eğrilerinin eğimi hesaplanarak ( $C_c$ ,  $C_s = \Delta e / \log \Delta \sigma$ ) bulunmuştur. Deformasyon modülü (M) ise gerilme-birim boy kısalma ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) eğrilerinden,  $E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon$  bağıntısı ile hesaplanmıştır.

## **BULGULAR (RESULTS)**

### **Fiziksel Özellikler (Physical Properties)**

DKK imalatı sırasında bağlayıcı dozajı, bağlayıcı faktörü, bağlayıcı içeriği, toplam su/bağlayıcı oranı ( $W_T:W_B$ ), hacim oranı ve karışımın likitlik indisi değerleri bilinmelidir (Tablo 4). Bağlayıcı dozajı ( $\alpha_{\text{yerinde}}$ ); kuru bağlayıcı kütlelerinin karışım hacmine oranıdır. Bağlayıcı faktörü ( $\alpha$ ); kuru bağlayıcı kütlelerinin kuru zemin hacmine oranıdır. Bağlayıcı içeriği ( $a_w$ ); kuru bağlayıcı kütlelerinin kuru zemin hacmine oranıdır. Karışımın toplam su/bağlayıcı oranı ( $W_T:W_B$ ); karışımdaki toplam su kütlelerinin (enjeksiyon suyu ve doğal zemin suyu) kuru bağlayıcı kütlelerine oranıdır. Hacim oranı (VR); enjeksiyon hacminin iyileştirilmemiş zemin hacmine oranıdır. Karışımın likitlik indisi ( $LI_{\text{karışım}}$ ), doğal zemin-enjeksiyon karışımının likitlik indisidir.

Numunelerin fiziksel özellikleri Tablo 4'de verilmiştir.  $\alpha_{\text{yerinde}}$  ve  $\alpha$  sırasıyla 200-425  $\text{kg/m}^3$  ve 257-1760  $\text{kg/m}^3$  arasında değişmektedir.  $a_w$  %18.7-128 arasında, VR %29-314 arasında,  $W_T:W_B$  1.48-3.22 arasında,  $LI_{\text{karışım}}$  ise 0.55-1.57 arasında değişkenlik göstermektedir.



Şekil 1. a) Karıştırma kabı, b) karıştırıcı, c) mikser, d) konsolidasyon deney numuneleri, e) konsolidasyon deney aleti

Tablo 4. Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Deney No	$\alpha_{\text{yerinde}} (\text{kg/m}^3)$	$\alpha (\text{kg/m}^3)$	$a_w (\%)$	$W_T:W_b$	VR (%)	$L_{\text{karışım}}$
1	200	257	18.7	2.67	29	0.55
2	200	274	21.3	2.88	37	0.83
3	200	294	24.4	3.05	47	1.19
4	200	318	28.5	3.22	59	1.57
5	275	473	42.4	2.43	72	1.45
6	275	528	43.7	2.43	92	1.52
7	275	414	32.2	2.04	51	0.88
8	275	454	33.0	2.06	65	1.01
9	350	896	69.6	1.97	156	1.50
10	350	790	57.4	1.81	126	1.29
11	350	675	60.6	1.86	93	1.48
12	350	609	50.4	1.69	74	1.10
13	425	1007	83.3	1.54	137	1.01
14	425	847	76.0	1.48	99	0.90
15	425	1760	128.0	1.67	314	1.46
16	425	1340	104.2	1.58	215	1.53

Zemin-enjeksiyon karışımlarına ait DKK numunelerinin hem kür öncesi hem de kür sonundaki su muhtevası ve yoğunluk değerleri ölçülmüştür. DKK numunelerinin yoğunluk değerleri kür öncesinde (taze karışım)  $1.464-1.761 \text{ g/cm}^3$  ve kür sonunda (sertleşmiş karışım)  $1.526-1.756 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmektedir. DKK numunelerinin kür sonundaki su muhtevası değerleri, karışımın likitlik indisine bağlı olarak kür öncesindeki duruma göre %2-20 oranında azalmaktadır (Tablo 5). Kür süresi boyunca DKK numunelerinin yoğunluğundaki artış ve su muhtevasındaki azalmanın iki tane sebebi bulunmaktadır. Birinci neden, likitlik indisi fazla olan karışımlarda priz başlangıç süresine kadar karışım

içerisindeki suyun bir miktarı dışarı sızmaktadır. İkinci neden ise priz başlangıcından kür sonuna kadar suyun bir kısmı hidratasyon (çimentolanma) tepkimelerinde kullanılmaktadır.

**Tablo 5.** DKK numunelerinin yoğunluk ve su muhtevası özellikleri

Tasarım numarası	Zemin $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Enjeksiyon $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	DKK Numunesi			
			Kür başı		Kür bitimi	
			$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)
1	1.854	1.618	1.761	42.1	1.756	38.9
2	1.794	1.485	1.694	50.5	1.698	47.1
3	1.741	1.391	1.629	59.7	1.641	57.5
4	1.706	1.322	1.559	71.5	1.567	68.6
5	1.706	1.452	1.601	72.3	1.601	65.1
6	1.741	1.376	1.578	73.9	1.595	67.1
7	1.794	1.513	1.676	49.7	1.681	48.5
8	1.854	1.415	1.654	51.1	1.644	52.2
9	1.794	1.396	1.575	81.0	1.613	66.5
10	1.854	1.414	1.611	66.0	1.633	60.5
11	1.706	1.454	1.574	70.1	1.591	66.0
12	1.741	1.488	1.653	56.7	1.646	54.9
13	1.741	1.508	1.626	70.0	1.675	52.3
14	1.706	1.561	1.629	64.1	1.667	49.2
15	1.854	1.350	1.464	93.9	1.548	65.5
16	1.794	1.369	1.497	80.8	1.526	67.7

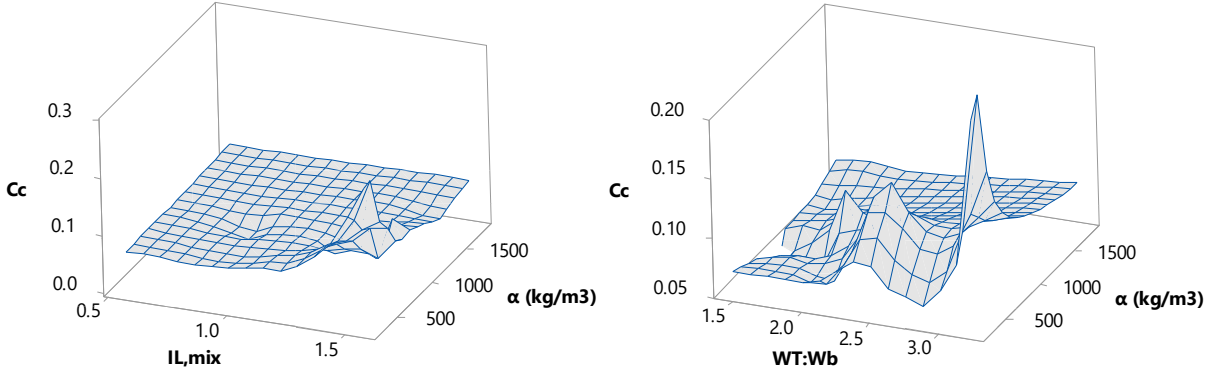
#### Konsolidasyon Parametreleri (Consolidation Parameters)

DKK numunelerinin konsolidasyon testleri ile boşluk oranı değişimi ( $\Delta e$ ), sıkışma ( $C_c$ ) ve kabarma indisleri ( $C_s$ ), deformasyon modülü ( $M$ ) gibi parametreler elde edilmiştir (Tablo 6). Sıkışma indisi en yüksek 4. tasarımda, en düşük ise 14. tasarımda elde edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde kür süresinin artmasıyla birlikte  $C_c$ ,  $C_s$ ,  $\Delta e$  ve  $\Delta e/e$  değerleri azalırken,  $M$  değeri artmaktadır. Bu sonuç zamanla hidratasyon reaksiyonlarının devam ettiğini, DKK numunelerinin dayanım kazanmakla birlikte konsolidasyon parametrelerinde (oturma, sıkışabilirlik özelliklerinde) azalmanın, deformasyon direncinde artmanın olduğunu göstermektedir. İmalat parametrelerinin konsolidasyon parametreleri üzerindeki etkisi bu sonuçlardan tam olarak anlaşılmamaktadır. Daha detaylı bir inceleme için deney sonuçları Taguchi yöntemine göre yorumlanacaktır.

**Tablo 6.** DKK numunelerinin konsolidasyon deneyi sonuçları

Tasarım No	28 günlük kür sonunda					56 günlük kür sonunda				
	$C_c$	$C_s$	$\Delta e$	$\Delta e/e$ (%)	$M$ (MPa)	$C_c$	$C_s$	$\Delta e$	$\Delta e/e$ (%)	$M$ (MPa)
1	0.077	0.022	0.080	6.9	22.6	0.067	0.014	0.072	6.0	27.1
2	0.063	0.013	0.059	4.4	20.4	0.075	0.006	0.042	3.1	23.5
3	0.112	0.016	0.080	5.3	16.0	0.063	0.015	0.070	4.7	28.1
4	0.457	0.027	0.251	13.5	5.8	0.266	0.018	0.120	6.6	10.0
5	0.119	0.020	0.110	5.6	13.4	0.116	0.011	0.100	5.2	16.4
6	0.166	0.016	0.123	6.6	12.3	0.082	0.015	0.064	4.4	18.9
7	0.058	0.018	0.062	4.5	28.7	0.045	0.015	0.060	2.8	36.9
8	0.079	0.018	0.075	5.6	21.9	0.059	0.018	0.058	4.4	28.3
9	0.124	0.024	0.160	8.4	13.2	0.110	0.018	0.110	5.8	17.3
10	0.046	0.015	0.073	4.8	32.7	0.045	0.010	0.067	4.1	37.3
11	0.061	0.015	0.076	4.5	25.4	0.055	0.013	0.062	3.6	31.9
12	0.068	0.018	0.096	7.5	23.0	0.051	0.014	0.054	4.0	36.3
13	0.091	0.026	0.119	7.2	17.3	0.071	0.014	0.088	5.6	25.9
14	0.045	0.016	0.091	4.2	33.4	0.042	0.012	0.059	5.8	48.7
15	0.080	0.028	0.293	13.6	19.5	0.054	0.014	0.067	5.9	33.9
16	0.062	0.018	0.073	5.1	24.2	0.059	0.013	0.068	3.6	30.7

DKK numunelerinde bağlayıcı faktörü arttığında Cc azalmaktadır (Şekil 2). Karışımdaki bağlayıcı faktörünün artması daha fazla çimentolanma ürününün oluştuğunu ve DKK performansının arttığını göstermektedir. Karışımın likitlik indisi (Şekil 2a) ve toplam su/bağlayıcı oranı (Şekil 2b) arttığında ise sıkışma indisi artmaktadır. Bunun sebebi karışım içerisindeki su miktarı arttığı için taneler arasındaki bağ zayıflamakta ve numunenin rijitliği azalmakta, konsolidasyon sırasında ise daha fazla sıkışmaktadır. Bir başka deyişle, karışımdaki su miktarının fazla olması daha boşluklu bir DKK yapısını gösterirken, bu numunelerden su çıkışı daha fazla olmaktadır.



Şekil 2. Sıkışma indisinin DKK numunelerinin fiziksel özellikleriyle ilişkisi

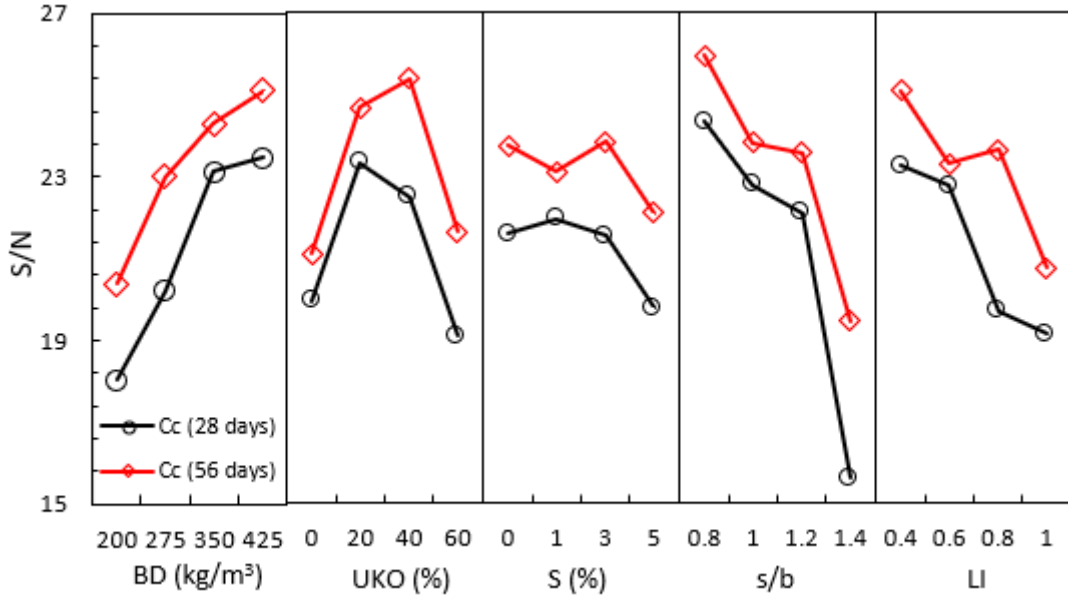
### İstatistiksel Analiz Sonuçları (Statistical Analysis Results)

#### S/N analizi (S/N analysis)

S/N analizinde her bir parametrenin sonuç üzerinde ne kadar etkili olduğu ve her parametrenin optimum seviyesi anlaşılabilir. Sıkışma indisi için S/N ana etki grafiği Şekil 3’de verilmiştir. 28 ve 56 gün kür sürelerinde bağlayıcı dozajı arttıkça sıkışma indisi azalmaktadır. Tüm kür sürelerinde su/bağlayıcı oranı ve zeminin likitlik indisi arttıkça sıkışma indisi azalmaktadır. Uçucu kül oranı 28 günde %20, 56 günde %40 oranına kadar sıkışma indisinin azalmasına sebep olurken, daha fazla kullanıldığında sıkışma indisini artırmaktadır. Bunun nedeni; kür süresine bağlı olarak uçucu kül oranı optimum seviyeyi geçtikten sonra performansın azalması veya sıkışabilirliğin artmasıdır. Uçucu kül tam manasıyla etkisini 56 günde göstermektedir. 28. günde %20, 56. günde %40 optimum oranın bulunması bunu desteklemektedir. Ayrıca çimento ana bağlayıcı iken, uçucu kül ikincil bağlayıcıdır. Yani önce çimento hidratasyonu daha sonra uçucu kül hidratasyonu gerçekleşmektedir. Kil-çimento-uçucu kül-su karışımında her malzemenin kimyasal bileşimi birbirinden farklıdır. Malzemelerin yapısında bulunan alüminyum, demir ve silisyum oksitlerin birbirleriyle bağ kurması ve belirli bir doyumluğa ulaşması malzemelerin oranlarıyla ilgilidir. Uçucu kül optimum seviyeyi geçtikten sonra (buna bağlı olarak çimento kütlesi azalmaktadır) hidrate olmayan uçucu kül taneleri numunenin sıkışabilirlik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. S/N analiz sonuçlarına göre 56 gün kür süresinde parametrelerin optimum seviyeleri;  $\alpha$ yerinde için 425 kg/m<sup>3</sup>, UKO için %40, S için %3, s/b oranı için 0.8 ve LI için 0.4 belirlenmiştir.

Her parametrenin en küçük ve en büyük S/N değerleri arasındaki fark (delta değeri) ne kadar büyükse sonuç üzerinde o kadar etkilidir. Sıkışma indisi üzerinde en etkili parametre su/bağlayıcı oranı olmaktadır (delta=7.56). Diğer parametrelerin önem sırası; likitlik indisi (delta=3.84), bağlayıcı dozajı (delta=3.64), uçucu kül oranı (delta=2.41) ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranı (delta=1.84) şeklindedir. Sıkışma indisini etkileyen en önemli parametrelerin su/bağlayıcı oranı ve likitlik indisi olması, bu parametrelerin karışımın su içeriğini yani boşluk oranını etkilemesi yüzündendir. Karışımdaki boşluk oranı ne kadar fazla olursa DKK numunesi o kadar fazla sıkışabilmektedir.



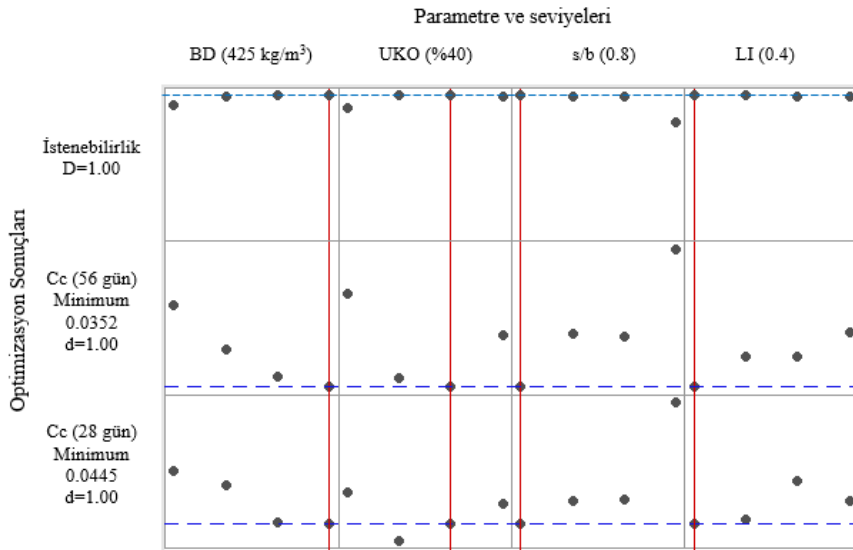


Şekil 3. S/N Ana Etki Grafikleri

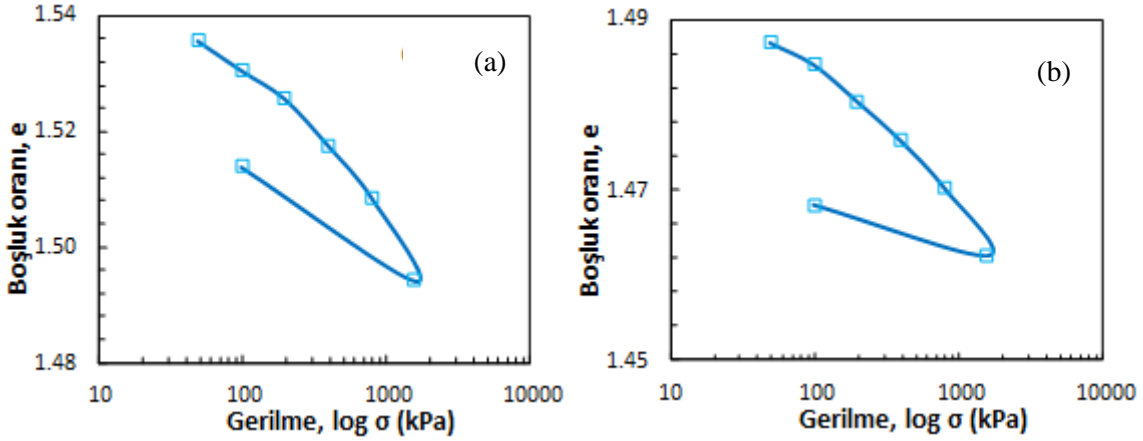
### Optimizasyon ve Doğrulama (Optimization and Verification)

Optimum sıkışma indisi değerlerinin tahmin edilmesinde Minitab programı kullanılmıştır. Optimizasyon sırasında, sistemin serbestlik derecesini ayarlayabilmek için sonuç üzerinde etkisi en az olan parametre (süper akışkanlaştırıcı) modelden çıkarılmıştır. Optimizasyon sırasında 28 ve 56 günlük sıkışma indisi değerleri minimum elde edilmesi hedeflenmiştir. Optimizasyon sonucunda 28 ve 56 günlük sıkışma indisi değerleri sırasıyla 0.0445 ve 0.0352 tahmin edilmiştir. Ayrıca optimizasyon sonuçlarının İstenebilirlik değeri yani olma olasılığı 1.00 (%100) çıkmıştır (Şekil 4).

S/N analizinden elde edilen optimum parametre seviyeleri ile DKK numuneleri hazırlanmış ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır (Şekil 5). Doğrulama deneylerinde 28 günlük sıkışma indisi 0.044, 56 günlük sıkışma indisi 0.026 elde edilmiştir. Buna göre doğrulama deneylerinden bulunan sıkışma indisi değerleri optimizasyon sonuçlarına göre 28 günde %1.1, 56 günde %26.1 daha düşük elde edilmiştir. Doğrulama deneylerinden bulunan sıkışma indisi değerleri L16 tasarımındaki değerlerden daha düşük elde edilmiştir. Bu sonuç optimizasyon sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Optimizasyon grafiği



Şekil 5. Konsolidasyon Doğrulama Deneyleri: a) 28 Gün, b) 56 Gün

### SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada uçucu kül katkısının derin karıştırma kolonlarının sıkışabilirlik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında killi bir zemin, ıslak karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Derin karıştırma kolonlarının imalatında en düşük sıkışma indisini elde etmek için optimum imalat parametreleri; bağlayıcı dozajı için  $425 \text{ kg/m}^3$ , uçucu kül oranı için %40, süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi için %3 ve su/bağlayıcı oranı için 0.8 belirlenmiştir.
- Bağlayıcı dozajı arttıkça kil taneleri arasında daha fazla çimentolanma ürünleri oluştuğundan DKK numunelerinin sıkışma indisi azalmaktadır. Enjeksiyonun su/bağlayıcı oranı arttıkça ise numunenin boşluk oranı artmakta ve DKK numunesinin sıkışma kapasitesi artmaktadır.
- Optimum imalat parametreleriyle DKK imalatı yapıldığında sıkışma indisi minimum seviyeye gelmektedir. Enjeksiyon içerisindeki uçucu kül miktarı toplam kuru bağlayıcının %40'ına kadar numunenin sıkışma indisini azaltmaktadır. Bu sonuç DKK imalatında çimento kullanımının %40 oranında azaltılmasıyla enjeksiyon maliyetlerinin azalacağını göstermektedir. Ayrıca atık bir ürün olan uçucu külün kullanımı artarak çevresel zararlar da azaltılmış olacaktır.

Sonuç olarak, optimum enjeksiyon parametreleri ile arazide düşük sıkışma indisine (sıkışabilirliğe) sahip derin karıştırma kolonları imal edilebilir. İnşaat sahasında çimento silosuna ek olarak uçucu kül silosu kurulabilir ve uygun oranlarda çimento, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı katkı ve su içeren enjeksiyon hazırlanarak kolon imalatı yapılabilir. Optimum imalat parametrelerinin arazinin zemin yapısına göre değişiklik gösterebileceği unutulmamalıdır

### Çıkar çatışması (Conflict of interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur. (The authors have no conflicts of interest to disclose for this study.)

### Finansal destek (Funding)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 217M946 numaralı proje ile desteklenmektedir. Bu çalışma doktora tezinden üretilmiştir.

### Yazar katkı oranı (Authorship contribution statement)

**Y.Y.:** Fikir/Kavram (Conceptualization), Tasarım ve Dizayn (Methodology), Yazılım (Software), Malzemeler (Resources), Veri Toplama ve/veya İşleme (Data Curation), Analiz ve/veya Yorum (Formal Analysis), Literatür Taraması (Investigation), Yazı Yazan (Writing - Original Draft), **M.O.:**

Fikir/Kavram (Conceptualization), Tasarım ve Dizayn (Methodology), Denetleme/Danışmanlık (Supervision), Eleştirel İnceleme (Writing - Review & Editing)

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] S. Larsson, M. Dahlström, B. Nilsson, Uniformity of lime-cement columns for deep mixing: a field study, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*. 9 (2005), 1-15. doi:10.1680/grim.2005.9.1.1.
- [2] M. Kitazume, M. Terashi, The deep mixing method, *CRC press*, 2013.
- [3] EN 14679, Execution of special geotechnical works - Deep mixing, European Standard, 2005.
- [4] B.B. Broms, P. Boman, Lime stabilized column, içinde: *5th Asian Regional Conference on Soil Mech. and Found. Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 1975*: ss. 227-234.
- [5] T. Okamura, M. Terashi, Deep lime mixing method of stabilization for marine clays, içinde: *5th Asian Regional Conference on Soil Mech. and Found. Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 1975*: ss. 69-75.
- [6] J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz, P. Mengé, Construction Processes, içinde: *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009*: ss. 3006-135. doi:10.3233/978-1-60750-031-5-3006
- [7] O. Helson, J. Eslami, A. Beaucour, A. Noumowe, P. Gotteland, Hydro-mechanical behaviour of soilcretes through a parametric laboratory study, *Construction and Building Materials*. 166 (2018), 657-667. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.177
- [8] P. Jamsawang, P. Voottipruex, P. Tanseng, P. Jongpradist, D.T. Bergado, Effectiveness of deep cement mixing walls with top-down construction for deep excavations in soft clay: case study and 3D simulation, *Acta Geotechnica*. 14 (2019), 225-246. doi:10.1007/s11440-018-0660-7
- [9] A. Hasheminezhad, H. Bahadori, Seismic response of shallow foundations over liquefiable soils improved by deep soil mixing columns, *Computers and Geotechnics*. 110 (2019), 251-273. doi:10.1016/j.compgeo.2019.02.019
- [10] C. Phutthananon, P. Jongpradist, D. Dias, P. Jamsawang, Numerical study of the deformation performance and failure mechanisms of TDM pile-supported embankments, *Transportation Geotechnics*. 30 (2021), 100623. doi:10.1016/j.trgeo.2021.100623
- [11] C. Phutthananon, P. Jongpradist, P. Jongpradist, D. Dias, P. Jamsawang, D.T. Bergado, Performance-based design optimization of embankments resting on soft soil improved with T-shaped and conventional DCM columns, *Acta Geotechnica*. 16 (2021), 3301-3326. doi:10.1007/s11440-021-01258-x
- [12] D.T. Bergado, G.A. Lorenzo, Economical mixing method for cement deep mixing, içinde: *Innovations in Grouting and Soil Improvement, 2005*: ss. 1-10. doi: 10.1061/40783(162)12
- [13] G.A. Lorenzo, D.T. Bergado, Fundamental parameters of cement-admixed clay—new approach, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 130 (2004), 1042-1050. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1042)
- [14] S. Horpibulsuk, N. Miura, T.S. Nagaraj, Clay–water/cement ratio identity for cement admixed soft clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131 (2005), 187-192. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(187)
- [15] N. Miura, S. Horpibulsuk, T.S. Nagaraj, Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations*. 41 (2001), 33-45. doi:10.3208/sandf.41.5\_33
- [16] Y. Yenginar, İ. Özkan, Local site conditions and hydromechanical effects in service life of cantilever retaining walls, *Engineering Failure Analysis*. 153 (2023), 107536. doi:10.1016/j.engfailanal.2023.107536
- [17] Y. Yenginar, M. Olgun, Optimizing installation parameters of DM columns in clay using Taguchi method, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 82 (2023), 145. doi:10.1007/s10064-023-03168-6

- [18] Y. Yenginar, M. Olgun, Optimizing construction parameters of DMC in high plasticity soils, içinde: *8th Geotechnical Symposium*, İstanbul, Turkey, 2019.
- [19] Y. Yenginar, A.A.A.M. Mobark, M. Olgun, Investigating the construction parameters of deep mixing columns in silty soils, *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 5 (2021), 464-474. doi:10.35860/iarej.978978
- [20] Y. Yenginar, Derin karıştırma kolonlarının performansını etkileyen faktörlerin model deneylerle araştırılması, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi*, 2020.
- [21] M. Kitazume, M. Grisolia, E. Leder, I.P. Marzano, A.A.S. Correia, P.J. V. Oliveira, H. Åhnberg, M. Andersson, Applicability of molding procedures in laboratory mix tests for quality control and assurance of the deep mixing method, *Soils and Foundations*. 55 (2015), 761-777. doi:10.1016/j.sandf.2015.06.009
- [22] M.T.M. Zulkifley, T.F. Ng, J.K. Raj, R. Hashim, A.F.A. Bakar, S. Paramanathan, M.A. Ashraf, A review of the stabilization of tropical lowland peats, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 73 (2014), 733-746. doi:10.1007/s10064-013-0549-5
- [23] M. Kianimehr, P.T. Shourijeh, S.M. Binesh, A. Mohammadinia, A. Arulrajah, Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils, *Construction and Building Materials*. 227 (2019), 116792. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116792
- [24] H. Mujtaba, T. Aziz, K. Farooq, N. Sivakugan, B.M. Das, Improvement in engineering properties of expansive soils using ground granulated blast furnace slag, *Journal of the Geological Society of India*. 92 (2018), 357-362. doi:10.1007/s12594-018-1019-2
- [25] Y. Verma, B. Mazumdar, P. Ghosh, Dataset on the electrical energy consumption and its conservation in the cement manufacturing industry, *Data in Brief*. 28 (2020) 104967. doi:10.1016/j.dib.2019.104967
- [26] M.S. Deepak, S. Rohini, B.S. Harini, G.B.G. Ananthi, Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil, *Materials Today: Proceedings*. 37 (2021), 2014-2018. doi:10.1016/j.matpr.2020.07.497
- [27] P. Jongpradist, N. Jumlongrach, Y. Sompote, S. Chucheeesakul, Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content *Journal of Materials in Civil Engineering*. 22 (2010), 49-58. doi:10.1061/ASCE0899-1561201022:149.
- [28] H.Y. Kek, Y. Pan, Y.C.H. Ng, F.H. Lee, An approach for modelling spatial variability in permeability of cement-admixed soil, *Acta Geotechnica*. 16 (2021), 4007-4026. doi:10.1007/s11440-021-01344-0
- [29] P. Hou, K. Wang, J. Qian, S. Kawashima, D. Kong, S.P. Shah, Effects of colloidal nanoSiO<sub>2</sub> on fly ash hydration, *Cement and Concrete Composites*. 34 (2012), 1095-1103. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.06.013
- [30] Y. Yenginar, Investigation of factors affecting the performance of deep mixing columns by model experiments, PhD Thesis, *Konya Technical University*, 2020.
- [31] FHWA, Federal highway administration design manual: Deep mixing for embankment and foundation support, *Report No. FHWA-HRT-13-046*, Federal Highway Administration, Washington, DC., 2013.
- [32] ASTM D2487, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), içinde: *Book of Standards Volume: 04.08*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. doi:10.1520/D2487-17E01
- [33] ASTM C618-23, Standard specification for coal ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, içinde: *Book of Standards Volume: 04.02*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
- [34] G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, Taguchi's Quality Engineering Handbook, *John Wiley &*

- Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2004. doi:10.1002/9780470258354
- [35] G. Taguchi, S. Konishi, Taguchi methods orthogonal arrays and linear graphs: Tools for quality engineering, *American Supplier Institute*, 1987.
- [36] G. Taguchi, Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes, 4. bs, *Asian Productivity Organization*, Tokyo, 1988. doi:10.1002/qre.4680040216
- [37] G. Taguchi, E.A. Elsayed, T.C. Hsiang, Quality engineering in production systems, *McGraw-Hill*, New York, N.Y., 1989.
- [38] M. Topolnicki, In situ soil mixing, içinde: *Ground improvement*, 2013: ss. 377-378.
- [39] F. Zha, S. Liu, Y. Du, K. Cui, Behavior of expansive soils stabilized with fly ash, *Natural Hazards*. 47 (2008), 509-523. doi:10.1007/s11069-008-9236-4.
- [40] <https://uk.chryso.com/p/6906/chryso-optima-100>, CHRYSO®Optima 100, (2023).
- [41] ASTM D6910, Standard test method for Marsh funnel viscosity of construction slurries, içinde: *Book of Standards Volume: 04.09*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. doi:10.1520/D6910\_D6910M-09.
- [42] H. Güllü, M.M.D. Al Nuaimi, A. Aytek, Rheological and strength performances of cold-bonded geopolymer made from limestone dust and bottom ash for grouting and deep mixing, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 80 (2021), 1103-1123. doi:10.1007/s10064-020-01998-2
- [43] M. Topolnicki, Design and execution practice of wet soil mixing in Poland, içinde: *International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization*, Okinawa, 2010: ss. 195-202.
- [44] Y. Gulgun, The effects of temperature on the characteristics of kaolinite and bentonite, *Scientific Research and Essays*. 6 (2011), 1928-1939. doi:10.5897/SRE10.727
- [45] ASTM D2435, Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading, içinde: *Book of Standards Volume: 04.08*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. doi:10.1520/D2435\_D2435M-11R20