

## DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLEN ZEMİNLERİN GERİLME-ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞININ FARKLI LABORATUVAR DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ

### DETERMINATION OF STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF SOILS IMPROVED BY DEEP MIXING METHOD USING DIFFERENT LABORATORY EXPERIMENTS

Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN<sup>1</sup>, Güldem KORKMAZ<sup>2</sup>,  
Sinan SARĞIN<sup>3</sup>, İlknur BOZBEY<sup>4</sup>

#### ÖZET

Derin karıştırma yöntemi (DSM) son yıllarda ülkemizde de sıklıkla kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. DSM iyileştirmesi kapsamında yapılan laboratuvar deneylerinde genellikle serbest basınç deneyleri yapılmaktadır. Ancak bu deney DSM ile iyileştirilmiş zeminler için arazideki gerilme ortamını temsil edemediğinden gerçek gerilme deformasyon davranışını temsil etmekten uzaktır. Bu çalışma kapsamında derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen numuneler üzerinde mukavemet değerlerini ölçmeye yönelik farklı laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bir karayolu dolgusu için derin karıştırma kolonları ile iyileştirme yapılan bir bölgeden alınan inorganik doğal zemin numunesi ile laboratuvarda çimento katkı ve katkısız derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Zemin sınıfı CH'tır. Katkı maddesi olarak CEM I Portland çimentosu kullanılmıştır. Su-çimento oranı (w:c) 1.0 olarak, çimento dozajı ise 300 kg/m<sup>3</sup> olarak seçilmiştir. Numuneler, Japon Geoteknik Topluluğu standardında belirtilen numune hazırlama yöntemi ile hazırlanmış ve 28 gün süre ile küre bırakılmıştır. Laboratuvarda hazırlanan özdeş numuneler üzerinde iki farklı çevre gerilmesi altında konsolidasyonlu drenajsız (CU) ve konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere ek olarak serbest basınç mukavemet deneyleri de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar mukavemet, gerilme-şekil değiştirme davranışları ve mukavemet değerleri bakımından değerlendirilmiştir. İlave boşluk suyu basınçları, toplam ve efektif mukavemet değerleri karşılaştırılmıştır.

*Anahtar Kelimeler: Derin karıştırma yöntemi, gerilme-şekil değiştirme davranışı, mukavemet, ilave boşluk suyu basıncı, serbest basınç mukavemet deneyi, üç eksenli basınç deneyi*

<sup>1</sup> Arş. Gör. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, [fcinar@ksu.edu.tr](mailto:fcinar@ksu.edu.tr) (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Arş. Gör., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, [gorkmaz@iuc.edu.tr](mailto:gorkmaz@iuc.edu.tr)

<sup>3</sup> Arş. Gör. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, [ssargin@iuc.edu.tr](mailto:ssargin@iuc.edu.tr)

<sup>4</sup> Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, [ibozbey@iuc.edu.tr](mailto:ibozbey@iuc.edu.tr)

## ABSTRACT

Deep mixing method (DSM) is a soil improvement method that has been frequently used in our country in recent years. In laboratory experiments carried out within the scope of DSM improvement, unconfined pressure tests are generally performed. However, this experiment is far from representing the actual stress-strain behavior of the soils improved by DSM since it neglects the groundwater and effective stress state of the surrounding soil. Within the scope of this study, deep mix samples with and without cement additives were prepared in the laboratory with an inorganic natural soil sample taken from an area improved with deep mixing columns for a highway embankment. The soil class is CH. CEM I Portland cement was used as binder. The water-cement ratio (w:c) was selected as 1.0 and the cement dosage as 300 kg/m<sup>3</sup>. The samples were prepared by the sample preparation method specified in the Japanese Geotechnical Society standard and left to cure for 28 days. Consolidated undrained (CU) and unconsolidated undrained (UU) triaxial compression tests were carried out on identical specimens prepared in the laboratory under two different cell pressures. In addition to these tests, unconfined compressive strength tests were also performed. The results obtained were evaluated in terms of strength and stress-strain behaviour. Excess pore water pressures, total and effective strength parameters were compared.

*Keywords: Deep mixing method, stress-strain behavior, strength, excess pore water pressure, laboratory experiments*

## 1. GİRİŞ

Derin karıştırma yöntemi (DSM) son yıllarda ülkemizde de sıklıkla kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde, doğal zemin çeşitli bağlayıcı malzemeler ile karıştırılarak zemin yerinde iyileştirilir. Derin karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcılar genellikle çimento ve kireçtir. Bunların yanı sıra uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu vb. gibi bağlayıcılar da kullanılmaktadır. Derin karıştırma ile iyileştirilen zeminlerin özellikleri, doğal zeminin ve bağlayıcıların özelliklerine, yükleme durumuna ve kür süresine bağlıdır (Bruce ve diğ., 2013).

İyileştirilmiş zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışı arazide gösterecekleri performans bakımından büyük önem taşımaktadır. DSM iyileştirmesi kapsamında yapılan laboratuvar deneylerinde genellikle serbest basınç deneyleri yapılmaktadır. Ancak bu deney DSM ile iyileştirilmiş zeminler için arazideki gerçek gerilme durumunu temsil edemediği için, iyileştirilmiş zeminin gerilme deformasyon davranışını temsil etmekten uzaktır. Bunun çözümü arazideki gerilme durumlarını daha iyi temsil eden üç eksenli basınç deneylerinin yapılmasıdır. İyileştirilmiş zeminler üzerinde yapılacak olan konsolidasyonlu drenajsız (CU) basınç deneyleri ile numunede oluşan ilave boşluk suyu basınç değerleri de ölçülerek iyileştirilmiş zemin davranışı en doğru şekilde incelenebilir. Farklı çevre basınç değerleri altında oluşan gerilme-şekil değiştirme davranışı, arazide farklı derinliklerdeki iyileştirilmiş zemin davranışını en iyi şekilde temsil edecektir.

Üç eksenli basınç deneyleri serbest basınç deneyine kıyasla davranışı daha doğru yansıtabilir. Üç eksenli basınç mukavemeti deneyinin daha fazla bilgi sağladığı zaten bilinmektedir, ancak iyileştirilmiş kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme davranışının iki

yöntem arasında nasıl farklılaştığını görmek önemlidir. Amin (2015) iki farklı deneyin (serbest basınç deneyi ve üç eksenli basınç deneyi) zeminin gerilme şekil değiştirme davranışı üzerinde etkilerini ve iki farklı deneye ait sekant elastisite modül,  $E_{50}$  değerlerini incelemiştir. Çalışma sonucunda üç eksenli basınç deneyinden elde edilen modül değerlerinin, serbest basınç deneyinden elde edilen modül değerlerinden daha yüksek olduğunu ve her iki deneyde gerilme-şekil değiştirme davranışının farklı olduğunu ifade etmiştir. Üç eksenli basınç deneyinde diğer deneylerden daha yüksek drenajsız kayma mukavemeti,  $c_u$  ve elastisite modülü,  $E$  elde edildiği belirtilmektedir.

Baker (2000) iyileştirilmiş kil numuneleri üzerinde üç eksenli deneyler gerçekleştirmiştir. Deneyler, artan kür süresiyle, beklenen mukavemet artışı ve göçme birim deformasyonu azalımı göstermiştir. Ayrıca, serbest basınç deneylerine göre üç eksenli basınç deneylerinde daha yüksek elastisite modülü elde edilmiştir.

Muhunthan ve Sariosseiri (2008), çimento ile iyileştirilmiş zeminler üzerinde konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyleri yapmıştır. Düşük ve yüksek çevre basıncı değerlerinde iyileştirilmiş zemin içerisinde oluşan ilave boşluk suyu basınçları ölçülmüştür. İyileştirilmemiş ve çimento ile iyileştirilmiş zeminler için eksenel birim deformasyon artışına karşı ilave boşluk suyu basıncı ve deviatör gerilmeler değerlendirilmiştir. Artan çevre basıncı ile deviatör gerilmelerin arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış çimento miktarına önemli ölçüde bağlıdır. İyileştirilmemiş zeminler sünek bir davranış sergilerken çimento ile iyileştirilen numuneler daha gevrek davranış göstermiştir. Çimento yüzdesinin daha fazla olduğu numuneler ise daha yüksek deviatör gerilmede göçmeye ulaşmıştır. Bu göçme çok küçük şekil değiştirmelerde meydana gelmiş ve gevrek davranış görülmüştür.

Konsolidasyonlu drenajsız, CU deneylerinde düşük ve yüksek çevre basıncı değerlerinde iyileştirilmiş zemin içerisinde oluşan ilave boşluk suyu basıncının farklı olduğu ve çevre basıncı değerine göre davranışın değiştiği (negatif veya pozitif ilave boşluk suyu basıncı değerlerinin oluşması, vb.) az sayıda çalışma ile gösterilmiştir (Amin, 2015; Åhnberg, 2006).

Bu çalışma kapsamında bir karayolu dolgusu için derin karıştırma kolonları ile iyileştirme yapılan bir bölgeden alınan inorganik doğal zemin numunesi ile laboratuvarda derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Laboratuvarda hazırlanan özdeş numuneler üzerinde iki farklı çevre gerilmesi altında konsolidasyonlu drenajsız (CU) ve konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri ve serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar mukavemet, gerilme-şekil değiştirme davranışları bakımından değerlendirilmiştir. İlave boşluk suyu basınçları, toplam ve efektif gerilmeler bakımından mukavemet değerleri karşılaştırılmıştır. Deneylere farklı çimento dozajları ile devam edilmektedir.

## 2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bir karayolu dolgusu için derin karıştırma kolonları ile iyileştirme yapılan bir bölgeden inorganik doğal zemin numunesi alınmıştır. Doğal zeminin indeks özelliklerini belirlemek üzere elek analizi ve Atterberg Limitleri yapılmış ve zemin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda USCS'e göre zemin sınıfı yüksek plastisiteli kil, CH olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Zemin özellikleri

Birim Hacim Ağırlığı, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Doğal Su Muhtevası, $w_i$ (%)	Likit Limit, LL (%)	Plastisite İndeksi, PI
17.5	42	66.8	35.1

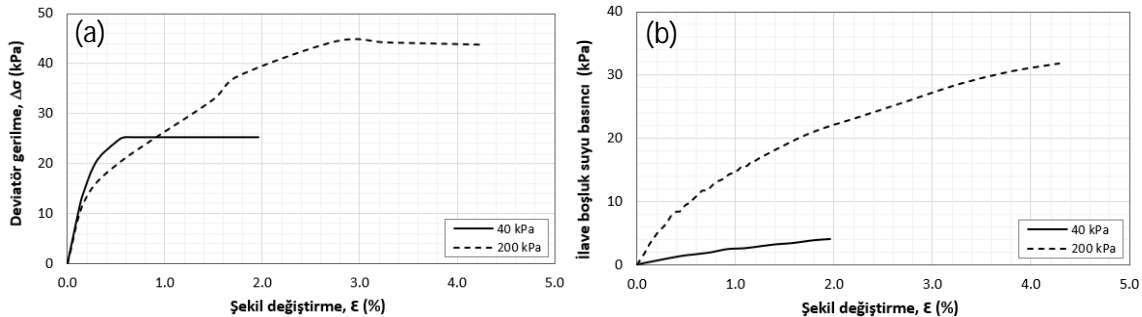
Yüksek plastisiteli kil zemin ile laboratuvar da derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken katkı maddesi olarak 300 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajında CEM I Portland çimentosu kullanılmış ve su-çimento oranı (w:c) 1.0 olarak seçilmiştir. Japon Geoteknik Topluluğu standardında belirtilen numune hazırlama yöntemi ile derin karışım numuneleri hazırlanmış ve 28 gün süre ile küre bırakılmıştır. Bu numuneler üzerinde serbest basınç (UCS) mukavemet deneyleri yapılmıştır. Ayrıca iki farklı çevre gerilmesi altında özdeş numuneler üzerinde konsolidasyonlu drenajsız (CU) ve konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

## 2.1. Doğal Zemin Numuneleri Üzerinde Yapılan Mukavemet Deneyleri

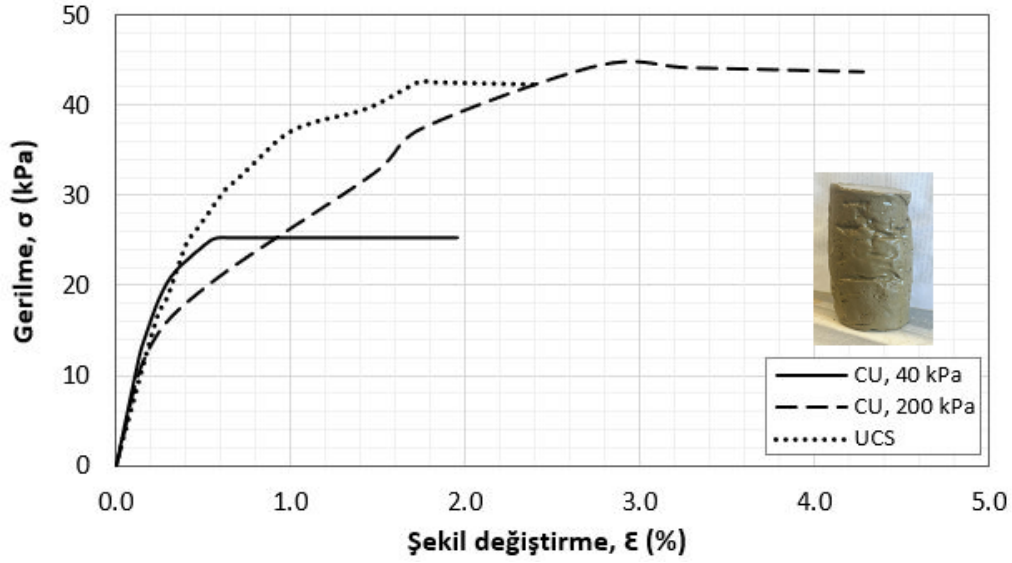
İlk aşamada yüksek plastisiteli doğal kil zemin ile çimento katkısız numuneler hazırlanmış ve farklı çevre gerilmeleri altında CU deneylerine tabii tutulmuştur. Deneyde uygulanan çevre gerilmeleri, DSM kolonlarının imalat derinlikleri bakımından üst ve alt derinlikleri yaklaşık olarak temsil edebilecek şekilde 40 kPa ve 200 kPa olarak belirlenmiştir. Hazırlanan numunelerde doğal zeminin su muhtevası %42'dir.

Şekil 1(a) ve (b)'de iyileştirilmemiş doğal zemin ile hazırlanan numuneler üzerinde farklı çevre gerilmeleri altında yapılan CU deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme ve ilave boşluk suyu basıncı-şekil değiştirme davranışı verilmektedir. Konsolidasyonlu drenajsız deney aşamalarından biri olan doyum kontrolü ( $B \geq 0.95$ ) sırasında doğal zeminde yumuşama oluşmuştur. Bu nedenle deneyin kesme aşamasında gözlemlenen deviyör gerilme değerleri düşüktür. Numunelerde pozitif ilave boşluk suyu basıncı oluşmuş ve 5 ila 30 kPa seviyelerine kadar çıkmıştır. (Şekil 1(b)). Buna ilaveten, deviyör gerilmeler de ise 25 ila 45 kPa seviyelerine ulaşabilmiştir. Benzer bir numune üzerinde serbest basınç deneyi de yapılmıştır. Göçme birim deformasyonları %0.5 ila %3 arasındadır.

Farklı deneysel şartların etkisini tartışabilmek amacıyla Şekil 2'de özdeş numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Her iki durumda da gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 1. İyileştirilmemiş zemin numunelerinin 40 kPa ve 200 kPa'lık çevre gerilmesi ( $\sigma_3$ ) altındaki gerilme-şekil değiştirme ve ilave boşluk suyu basıncı-şekil değiştirme davranışı



Şekil 2. İyileştirilmemiş zemin numunelerinin CU ve UCS deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değişimi davranışı

## 2.2. DSM ile İyileştirilmiş Numuneler Üzerinde Yapılan Mukavemet Deneyleri

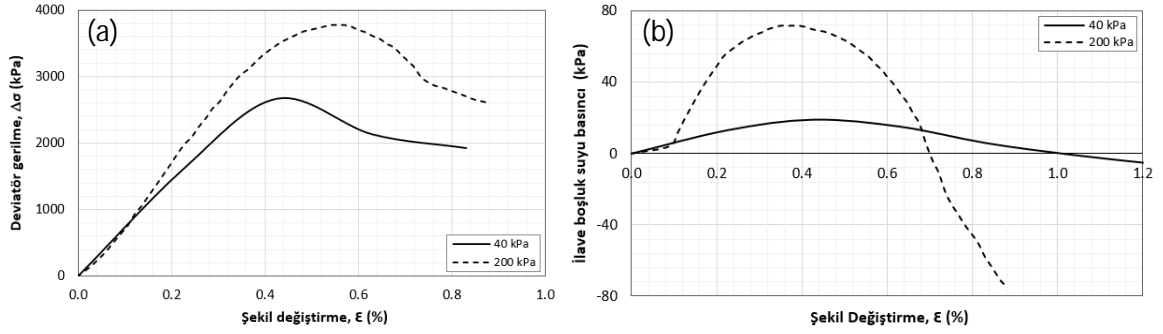
Çimentoyla iyileştirilmiş zemin ile derin karışım numuneleri hazırlanmış ve doğal numune üzerinde uygulanan çevre basıncı koşulları ( $\sigma_3=40-200$  kPa) ile kesme hızı aynı tutularak deneyler tekrarlanmıştır.

Şekil 3 (a) ve (b)'de derin karışım numuneleri üzerinde farklı çevre gerilmeleri uygulanarak yapılan CU deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değişimi ve ilave boşluk suyu basıncı-şekil değişimi davranışı verilmektedir. Şekil 3(a)'da katkılı numunelerin pekleşme davranışı sonrası yumuşama gösterdiği ve küçük birim deformasyon değerlerinde göçtüğü gözlemlenmiştir. Göçme %1'den daha küçük birim deformasyon değerlerindedir. Bununla birlikte, ilave boşluk suyu basıncında önce artış, sonrasında ise negatif boşluk suyu basıncı oluşmuştur. İyileştirilen numunelerde hem gerilme-birim deformasyon ilişkisi, hem de ilave boşluk suyu basınçları bakımından aşırı konsolide zeminlerde görülen davranışa benzer bir durum olduğu görülmektedir.

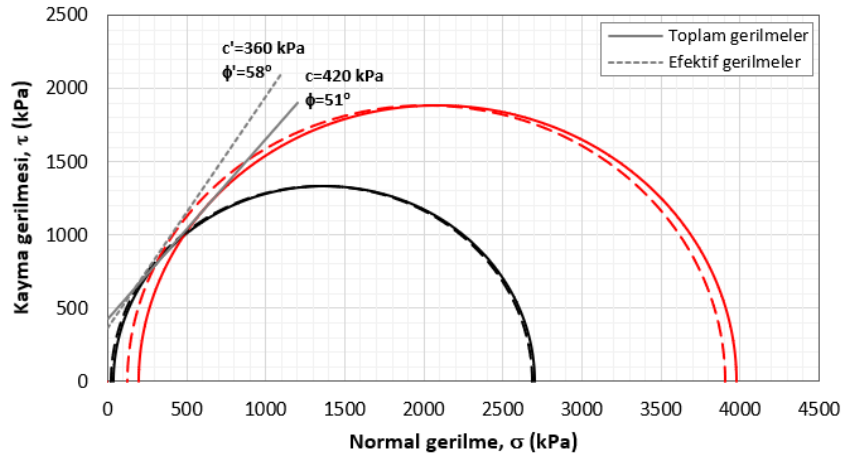
Şekil 4'te CU deneyi sonucunda pik devitör gerilmeler için toplam ve efektif gerilmeler için Mohr daireleri sunulmuştur. Şekil 5'te ise UU deneyleri sonucunda elde edilen Mohr daireleri gösterilmektedir. İlave boşluk suyu basıncının oluşturulmadığı UU deneylerinde drenajsız kayma mukavemeti ( $c_u$ ) yaklaşık 2000 kPa olarak ölçülmüştür. Drenajsız durumdaki mukavemet değerlerinde her iki deneyde de benzer seviyelere ulaşıldığı görülmektedir.

Şekil 6'da ise aynı özellikte hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan CU, UU ve UCS deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Deney sonunda numunelere ait fotoğraflar da görülebilir.

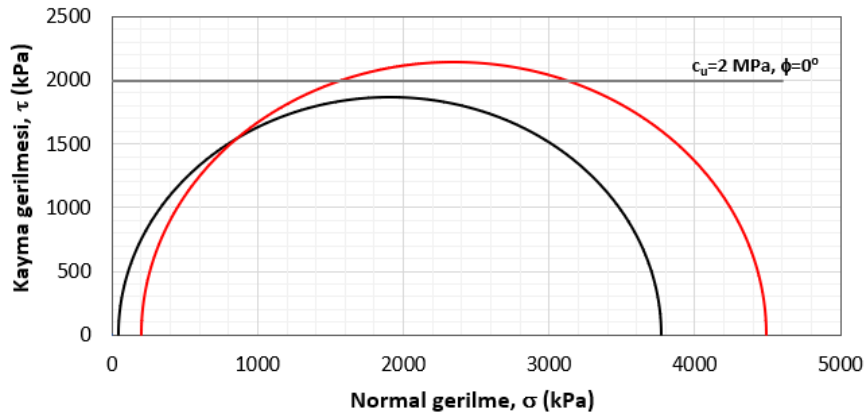
Derin Karıştırma Yöntemi ile iyileştirilen Zeminlerin Gerilme-Şekil Değişirme Davranışının Farklı Laboratuvar Deneyleri ile Belirlenmesi



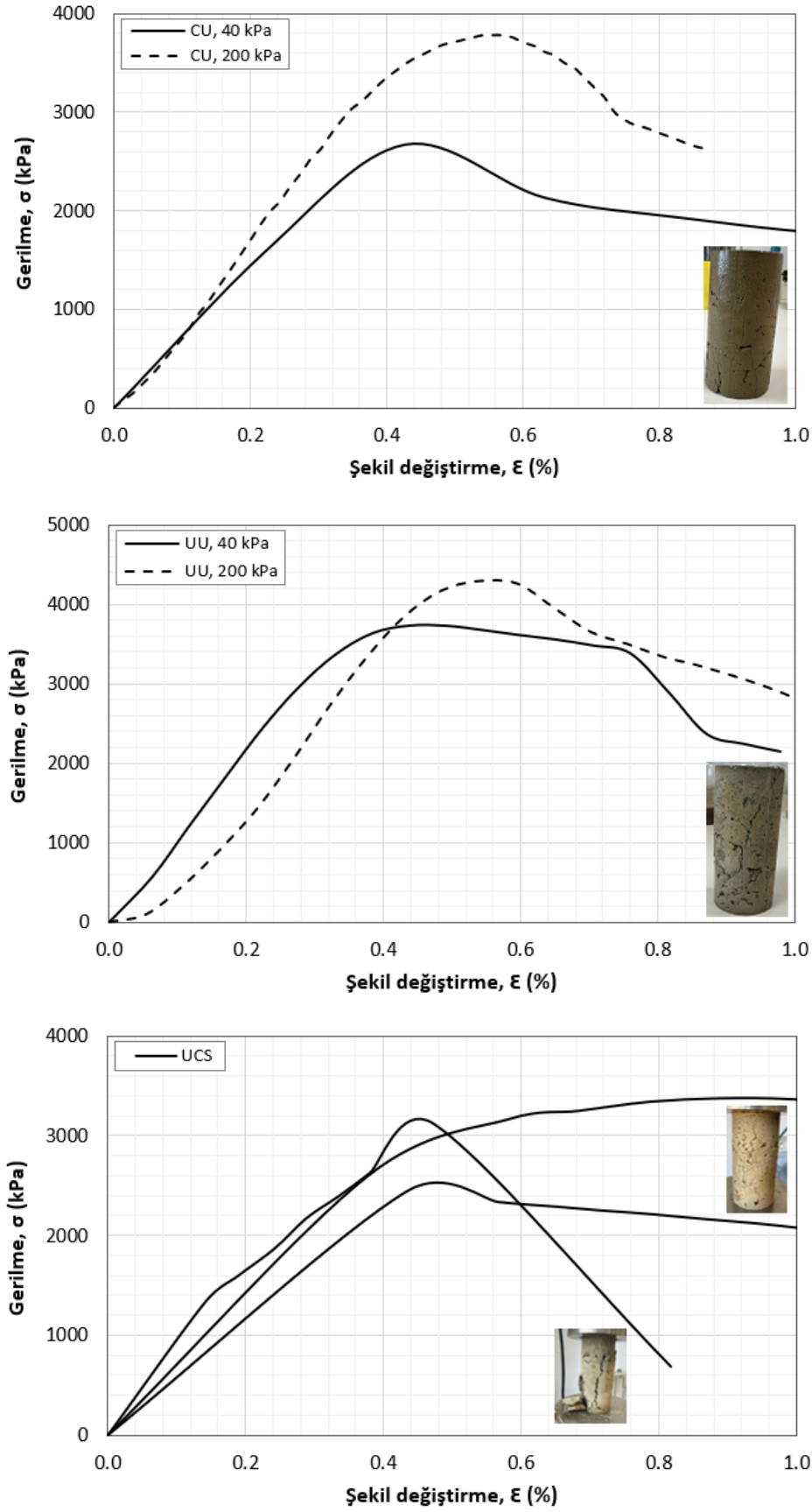
Şekil 3. DSM numunelerinin 40 kPa ve 200 kPa'lık çevre gerilmesi ( $\sigma_3$ ) altındaki gerilme-şekil değişirme ve ilave boşluk suyu basıncı-şekil değişirme davranışı (CU deneyi)



Şekil 4. DSM numunelerinin 40 kPa ve 200 kPa'lık çevre gerilmesi ( $\sigma_3$ ) altındaki toplam ve efektif gerilmeler cinsinden Mohr daireleri (CU deneyi)



Şekil 5. DSM numunelerinin 40 kPa ve 200 kPa'lık çevre gerilmesi ( $\sigma_3$ ) altındaki toplam gerilmeler cinsinden Mohr daireleri (UU deneyi)



Şekil 6. DSM numunelerinin CU, UU ve UCS deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değişirme davranışı

### 3. SONUÇLAR

Laboratuvarda, arazide derin karıştırma kolonu uygulaması yapılan bir sahadan alınan yüksek plastisiteli kil numune ile katkılı ve katkısız numuneler hazırlanarak; farklı mukavemet deneylerinin sonuçlarının karşılaştırıldığı bu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Katkısız numuneler üzerinde farklı gerilme koşulları altında yapılan konsolidasyonlu drenajsız (CU) deneyleri sonucunda numunenin doygunluk safhasında yumuşadığı ve kesme sırasında deviatör gerilmelerin oldukça düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Her iki tip deneyde gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin benzer olduğu görülmektedir.
- Katkısız numuneler üzerinde yapılan CU deneylerine ait Mohr daireleri incelendiğinde toplam ve efektif gerilmeler cinsinden mukavemet parametrelerinin benzer olduğu görülmektedir. Oluşan ilave boşluk suyu basınçlarının deviatör gerilme değerine kıyasla oldukça küçük olması her iki duruma ait mukavemet değerlerinin benzer olmasına neden olmuştur.
- Bununla birlikte bu çalışmanın kapsamı dışında kalan küçük ve orta deformasyon seviyesinde, zemin modül değerlerinin gerilme koşulları ve kesme hızına bağlı değişiminin gelecekte yapılacak çalışmalarda incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca daha az çimento dozajı ile daha düşük mukavemete sahip iyileştirilmiş zeminlerde toplam ve efektif mukavemet değerleri ile deneylere devam edilecektir.

### KAYNAKLAR

- Åhnberg, H. (2006), "Strength of stabilized soils:A laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder", Doctoral thesis, Department of Construction Sciences, 197 pages, ISBN: 78-91-628-6790-4.
- Amin, D. (2015), "Triaxial testing of lime-cement stabilized clay, a comparison with unconfined compression tests", Master thesis, KTH Royal Institute of Technology, 91 p.
- Baker, S. (2000), "Deformation behaviour of lime/cement column stabilized clay", Doctoral Thesis, Linköping: Swedish Deep Stabilization Research Centre Chalmers University of Technology.
- Bruce, M.E.C., Berg, R.R., Collin, J.G., Filz, G.M., Terashi, M., Yang, D.S. (2013), "Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support", (No. FHWA-HRT-13-046).
- JGS (Japanese Geotechnical Society) (2000), "Practice for Making and Curing Stabilized Soil Specimens without Compaction", JGS, Tokyo, Japan, JGS T 0821-2000, in Japanese.
- Muhunthan, B., Sariosseiri, F. (2008), "Interpretation of geotechnical properties of cement treated soils", FHWA Contract DTFH61-05-C-00008, Compaction Control of Marginal Soils in Fills, 155 p.