

MİKROBİYOLOJİK KAYNAKLI KALSİT ÇÖKELMESİNİN(MICP) ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN KULLANIMI

Mert Kavala¹, Tolga Aydın², Kerem Sarıkaya³,
Deniz Kuran⁴, Tulga Okay⁵, Kaan Kara⁶,
Prof.Dr Feyza Çinicioğlu, Doç. Dr. Zeynep Başaran Bundur,
Dr. Ayşen Çelebi, Doç. Dr. Ali Reza Negahdar

ÖZET

Mikrobiyolojik kaynaklı kalsit çökmesi (MICP) tekniği, hem sürdürülebilir oluşu hem de çevresel problemlere çözüm olabilme potansiyeli neticesinde, son yıllarda inşaat endüstrisinde oldukça ilgi görmüştür. Bu yöntem günümüzde geoteknik alanında zemin özelliklerini iyileştirmeye yönelik araştırmalar için etkili bir rol elde etmeye başlamıştır. Bu çalışmada, MICP sağlamak üzere kil ve kum iki tür zemin üzerinde uygulanan biyolojik süreçlerin bu zeminler üzerindeki etkilerinin saptanabilmesi için çeşitli zemin deneyleri gerçekleştirilmiştir. Asıl amaç zemin özelliklerinin ne yönde etkilendiğini bulmak olmakla birlikte söz konusu değişimin bir zemin yapısını ne ölçüde etkileyeceğini tartışmak üzere elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak, bir şev örneği üzerinde stabilite değişimi de değerlendirilmiştir. Bu verilere göre, bildiride sunulan MICP tekniğinin; zeminin boşluk oranını azalttığı, kayma mukavemetini arttırdığı, ve kayma dayanımı parametreleri olan kohezyon ve kayma direnci açısı değerlerini yükselttiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, MICP tekniğinin, mühendislik çalışmalarında güncel literatür göz önüne alınarak sahada uygulanabilirliğine dair potansiyel vaat ettiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Mikrobiyal geo-teknoloji, mikrobiyolojik kaynaklı kalsit çökmesi (MICP), şev stabilizasyonu, zemin iyileştirmeleri

Abstract

Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) has taken significant attention in Architecture, Engineering & Construction (AEC) industry in the last decades due to having unique features which can be listed as addressing sustainability impact and being environmentally friendly. Due to these benefits of MICP, its research has attracted

¹ Ozyegin University, Civil Engineering Department, Cekmekoy, Istanbul, Turkey, (mert.kavala@ozu.edu.tr)

² Ozyegin University, Civil Engineering Department, Cekmekoy, Istanbul, Turkey, tolga.aydin@ozu.edu.tr

³ Ozyegin University, Civil Engineering Department, Cekmekoy, Istanbul, Turkey, kerem.sarikaya@ozu.edu.tr

⁴ Ozyegin University, Civil Engineering Department, Cekmekoy, Istanbul, Turkey, deniz.kuran@ozu.edu.tr

⁵ Ozyegin University, Civil Engineering Department, Cekmekoy, Istanbul, Turkey, tulga.okay@ozu.edu.tr

⁶ Ozyegin University, Civil Engineering Department, Cekmekoy, Istanbul, Turkey, kaan.kara@ozu.edu.tr

*Corresponding Authors: Prof. Dr. Feyza Çinicioğlu, Assoc. Prof. Zeynep Başaran Bundur, Dr. Ayşen Çelebi, Assoc. Prof. Ali Reza Negahdar

upsurging interest as an alternative and promising tool to improve soil properties in the context of geotechnical engineering practices. This study focuses on the implementation of biological processes on two typical kinds of soils which are sand and clay. The results of this research indicated that a considerable improvement was attained with MICP treatment in the considered soils. The results indicated that the porosity of the soil was reduced thus causing an enhancement in the shear strength capacity and parameters. MICP-treatment plays a major role in this consequence by condensing and stiffening the soil particles. This innovative treatment process that cultivates soil properties can stabilize soil embankments. To promote, valuable findings of the present study have shown that MICP technique implementation for engineering practices, is promising for using this approach for a full-scale soil improvement project with the consideration of preliminary designs.

Keywords: *Microbial geotechnology, microbial induced carbonate precipitation (MICP), slope stabilization, soil improvement*

1. Introduction

Kentleşme ve nüfus artışının bir sonucu olarak, istenmeyen zemin koşullarına(yüksek derecede sıkışabilir killer, şişen killer, gevşek zeminler, göçen zeminler v.b.) karşı zemin iyileştirme çalışmaları mühendislik ve geoteknik için kaçınılmaz hale gelmiştir (Mitchell & Santamarina, 2005). Zeminin özelliklerini iyileştirmek için uygulanmakta olan yöntemler mekanik teknikler, kimyasal enjeksiyon, ve biyosementasyondur (Ivanov & Chu, 2008). Uygulanan mekanik teknikler (örneğin mekanik kompaksiyon), literatürde 10 metreden derin uygulamalar için verimsiz ve maliyetli bulunmuş olup, kil katmanlar içinse kullanışsız bir yöntem olduğu belirtilmiştir. En yaygın yöntem olan kimyasal enjeksiyon için kullanılan kimyasal maddelerin başlıcaları çimento, silikat, ve akrilamiddir. Bir yandan, kimyasal enjeksiyon için kullanılmakta olan akrilamid ve metilol akrilamidlerin yalnızca çevremiz açısından toksik ve zararlı değil, insan sağlığı açısından da zararlı oldukları belirtilmiştir. (Weideborg et al., 2001; Hagmar ve diğ., 2001). Öte yandan, 21. Yüzyılda en çok üretilen ürün olan çimentonun üretiminde, fosil yakıtların yakılması ve kireç taşı ayrışması ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) süreçleri sebebiyle yüksek çevresel ayakzine sahip olduğu belirtilmiştir (Scrivener ve diğ., 2018). Dolayısıyla, zemin iyileştirmesinde uygulanmak üzere alternatif sürdürülebilir metodların çalışılması elzem hale gelmiştir ve biyo aracılı zemin iyileştirme çalışmaları önem kazanmıştır. Biyolojik aktivitelerin zemin üzerindeki geomekanik, fiziksel, iletken ve kimyasal davranışların etkilerinin keşfedilmesi geoteknik mühendisliği için önemlidir (Mitchell & Santamarina, 2005; Kucharski ve diğ., 2006; DeJong ve diğ., 2010; Jiang ve diğ., 2022). Bu hızla gelişmekte olan inovatif dal “mikrobiyal geoteknoloji” olarak isimlendirilmiş olup, inşaat ve çevresel amaçlar doğrultusunda zemin özelliklerinin iyileştirilmesi hususunda elverişli sonuçlar ortaya çıkarması amaçlanmaktadır (Ivanov & Chu, 2008).

Biyomineralizasyon ile mikrobiyolojik metabolik aktiviteler neticesinde, zeminlerde meydana gelen kalsiyum karbonat (CaCO_3) çökmesi yaklaşımı mikrobiyolojik olarak indüklenmiş karbonat çökmesi veya kısaca MICP olarak adlandırılmıştır (Stocks-Fischer ve diğ., 1999; DeJong ve diğ., 2006, Al Qabany ve diğ., 2012). Çeşitli mikroorganizmaların (bu çalışmada *Sporosarcina Pasteurii*) yüksek üreaz enzimi aktivitesi, katalizör olarak katkı vermekte ve ürenin amonyum ve karbonata hidrolizini hızlandırmaktadır. Sonuç olarak

oluşan hidroksit sistemin pH değerini yükseltmektedir. Ayrıca, sistemde serbest kalsiyum iyonu bulunması halinde, bu iyonlar negatif yüklü bakteriyel hücre duvarında bulunmaktadırlar (örneğin hidroksil, amin, karbosit gibi negatif iyon grupları). Bu durum kalsiyum karbonatın kristallerinin çekirdeklenmesi ve hücre etrafını sarmalaması için bölgesel aşırı doymuş şartları yaratmaktadır (De Muynck ve diğ., 2010; Martinez ve diğ., 2013; Wang ve diğ., 2021). Üre hidrolizinin ve kalsiyum karbonat çökmesinin genel reaksiyonları **Eşitlik 1.** ve **Eşitlik 2.** Olarak sırasıyla aşağıda yer almaktadır.



Mevcut literatürde, zeminin özelliklerinin iyileştirmesi amacıyla kullanılan MICP tekniğinin, büyük boşluk boyutları ve yüksek geçirgenlikleri sebebiyle en çok kum zeminlerde uygulanmaya elverişli olduğu belirtilmiştir (Mitchell & Santamarina, 2005; DeJong ve diğ., 2006). Kumun bu özellikleri, mikroorganizmaların zemin matriksinde bir gözenekten diğer gözeneğe geçerek besin ve oksijene ulaşımını mümkün kılmaktadır (Mitchell & Santamarina, 2005; DeJong ve diğ., 2010). DeJong ve diğ. (2006), yapmış olduğu araştırmada, MICP kullanılarak iyileştirilmiş kum numuneleri, başlangıç kayma rijitliği ve elastisite modülü bakımından alçıtaşı (jips) esaslı çimentolanmış kontrol numunelerine oldukça yakın bir davranış göstermiştir, ayrıca bu “yeşil” teknolojinin zemin iyileştirmeleri alanında potansiyel vaat ettiğinin ve sıvılaşılabilen kum katmanlarının iyileştirilmesi, tünelleme öncesi zeminin ön iyileştirme uygulamaları, binaların oturmalarının azaltılması, ve şev stabilitesi alanlarında kullanılabileceğinin altı çizilmiştir. Van Paasen ve diğ. (2010), biyo-enjeksiyon tekniğinin, granüler zeminlerin güçlendirilmesinde büyük hacimleri etkileyecek şekilde (100 metreküp) uygulanabileceğini göstermiştir. Başka bir MICP tekniğiyle kum zeminlerin iyileştirilmesi çalışmasında, Martinez ve diğ. (2013), üre-kalsiyum oranının (bu çalışmada 2:1 olarak kullanılmıştır) birden büyük olmasının iyileştirmenin verimliliğini arttırdığını açığa çıkarmış ancak bu oranın artışının amonyum gibi yan ürünlerin açığa çıkmasına da sebebiyet verdiğini belirtmiştir. Dolayısıyla, büyük çaplı uygulamalarda kullanılacak olan üre-kalsiyum oranı, hem efektif hem de çevre dostu olacak bir şekilde seçilmelidir. Xiao ve diğ. (2021), kumun gradasyonunun ve kalsiyum kaynağının etkileri üzerine gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, sıkışabilirlik(kompresibilite) ve kalsiyum karbonat miktarı arasında ters orantı olduğu sunulmuştur. Tam tersi olarak, üniformluk katsayısı (Cu) ve sıkışabilirlik arasında doğru orantı olduğu belirtilmiştir. Song ve diğ. (2022), tek eksenli basınç mukavemetinin, MICP tekniği uygulanmış köşeli kumlarda , azalan dane boyutu ile arttığını ve aynı zamanda küresel ve küresele yakın kumların en yüksek tek eksenli basınç mukavemetinin 0.420-0.707 mm (25-40 mesh) aralığında verdiği bulgusunu sunmuştur. Bu sebeple, dane boyutu ve şeklinin MICP tekniği uygulanan zemin iyileştirmesinde önemli bir etkisi vardır. Dahası, Wang ve diğ. (2021), MICP tekniğiyle iyileştirilmiş kum setlerinin erozyon performansını laboratuvar ölçeklerinde çalışmış, erozyon kütlesinin ana toprak kütlesinden kopmasının MICP tekniğiyle önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuştur (685 gr’dan 101 gr’a ve 5.87 gr/ (m².s)’den 0.87 gr/ (m².s)’ye, sırasıyla).

Kil zeminlerde MICP yaklaşımının uygulanması üzerine yapılan çalışmalar, killerin boşluklarının küçüklüğü ve bunun sonucunda olan düşük geçirgenliği gibi karakteristik özellikleri sebebiyle oldukça azdır. Cardoso ve diğ. (2018), X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ve X-ray Fluorescence (XRF) testlerini uygulayarak kaolin kilinin kimyasal analizini gerçekleştirmiş ve sonuç olarak kaolin kilinin ana bileşim maddelerinin silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) dir. Sonrasında, Sun ve diğ. (2019), kaolin kilinin içerdiği ana bileşim maddelerinin üreaz aktivitesine olan etkilerini ve kaolin kilinin kum-kil karışımlarına olan etkisini %7.5'e kadar kaolin kili kullanarak araştırmıştır. Söz konusu araştırmacılar kaolin kilinin içermiş olduğu silisyum oksiti, silisyumun dengeli bir element olması sebebiyle ihmal etmişler ve alüminyum oksit içeriğini üreaz aktivitesiyle ilişkilendirerek başlangıçta 8 olan pH değerinin, sistemde açığa çıkan H^+ iyonları sebebiyle dramatik bir biçimde 7'nin altına düştüğünü ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, Sun ve diğ. (2019), başlangıç pH'ını 8 olarak kullanmış ve kum-kil numuneleri arasında en çok kaolin kili içermeyen numunede kalsiyum karbonat üretkenliği derecesinin en yüksek olduğunu belirlemişlerdir (%0, %2.5, %5 ve %7.5 kaolin kili içeren numuneler arasında). Kaolin kili içeren kil numuneler arasında kalsiyum karbonat üretkenliği açısından bir karşılaştırma yapılacak olur ise diğer kil minerallerine kaolin kili miktarının artışıyla üretkenlik derecesinin artışı söz konusudur. Punnoi ve diğ. (2021), araştırmasında, MICP tekniğini (Energy Dispersive X-Ray analizine göre yüksek miktarda Si, Al ve Ca içeren) sıkıştırılmış Bangkok killlerinde kirecin silisyum oksit ve alüminyum oksite oranının, kil tanelerinin arasındaki bağ kuvvetiyle doğru orantılı olduğunu bildirmiştir. Bu çalışmada pH azalma ihtimaline yönelik olarak, hazırlanan bütün solüsyonlar(fosfat tamponlu solüsyon ve besiyeri) pH değeri 9 olacak şekilde hazırlanmıştır. Stock-Fischer ve diğ. (1999), yapmış oldukları çalışmaya göre üreaz aktivitesi pH 8 için en yüksek değerdedir ve aynı çalışmada pH= 9 değeri' de aktivite bakımından yeterli bulunmuştur (üreaz aktivitesi en yüksek nokta olan pH=8' e kadar hızlanarak artış gösterirken, bu noktadan sonra yavaşlayarak azalmaktadır). Vail ve diğ. (2019), MICP tekniği uygulanmış sıkıştırılmış genişleyen bentonitlerin kuruma çatlağı oluşumu davranışlarını analiz etmiş ve çatlak oluşumunda gecikme sağlandığını ve çatlak miktarında azalma olduğunu saptamıştır (yüzey çatlak oranı ve çatlak genişliğine göre). Kannan ve diğ. (2020), karıştırma ve enjeksiyon yöntemleriyle MICP tekniği uygulanmış denizel killerin sıkışabilirlik ve kayma davranışlarını araştırmıştır. Sonuç olarak, karıştırma metodunun, kalsiyum karbonatın homojen olarak çökmesi yönünden daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur ve uygulanan MICP tekniği sıkışabilirliği %32 azaltırken, drenajsız kayma dayanımında %148 artış elde edilmiştir. Yine MICP uygulamasında karıştırma yöntemi kullanarak, Teng ve diğ. (2021), düşük pH'lı Taipei siltli killlerinde kayma dayanımında %100 artış elde etmiştir.

Bu bildiride, deney ve modelleme metodları, biyolojik süreçlerden faydalanarak, kil bazlı zeminlerin mühendislik özelliklerini modifiye etmek için kullanılmıştır. Araştırmanın odağı, yüksek oranda kil içeren zeminlerdeki MICP tekniğinin uygulaması olduğu için, kalsiyum karbonat çökmesindeki homojenliğin sağlanması açısından yüksek parçalayıcı karıştırıcı (Thermomac) kullanılarak karıştırma tekniği tercih edilmiştir. Bu tasarım bazlı disiplinlerarası çalışma, mikrobiyoloji, geoteknik mühendisliği ve malzeme mühendisliğini inovatif iyileştirme süreçleri için bir araya getirmektedir. Bildiride yer alan daha sonraki bölümler; araştırma süresince kullanılan malzemeler ve metodoloji, deneysel veriler, şev stabilitesi modeli ve analizi ve mevcut çalışmanın önemli bulgularını içermektedir.

2. Materyaller ve Kullanılan Metodlar

2.1. Bakteri Seçimi , Büyütülmesi, ve Saklanması

Bu çalışmada *S.pasteurii* (DSMZ 33) türü (Leibniz Institute- German Collection of Microorganisms and Cell Cultures: *S. pasteurii*) ayrıca bilinen ismi ile *Bacillus pasteurii* türü pH değerini artırmak için yeterli amonyak üreten yüksek bir üreaz enzimi aktivitesi olduğundan seçildi (Stock-Fischer et al.,1999). Sıvı besiyeri (Ph=9) 1 litre distile su (DI) için üre, 20 gr; sodyum asetat, 10 gr; maya özü, 10 gr; ve trizma baz, 14.93 gr eklenerek hazırlandı. Üre, üre hidroliz reaksiyonları boyunca hücreleri aktif bir halde tutmak için azotlu bileşik olarak tercih edilmiştir. Maya özütü hem karbon kaynağı olarak hem de hücrelerin direncini arttırmak için amino asit ve vitamin kaynağı olarak kullanılmıştır. (Stocks-Fischer et al., 1999; Tezer, 2020; Sandalcı et al., 2021). Besleyici ortam ilk önce otoklavda sterilize edilmiştir (NUVE – NC 40M 121° C da 25 dakika). Daha sonra besiyeri soğutulmuş ve buna *S.pasteurii* hücreleri eklenmiştir. Bakteri hücreleri ve sterilize edilmiş besiyeri, 30-36 saat boyunca (sabit faz elde edilene kadar, 10^9 CFU/ml) 175 rpm'de 30.0 °C'de çalkalama koşullarıyla aerobik inkübasyon için inkübatörde (IKA KS 4000i) çalkalanır (Tezer, 2020; Sandalcı et al., 2021). Daha sonra bakterili solüsyon 8000g'de 8 dakika (NUVE – NF 800R) santrifüj edilmiştir. Santrifüj işlemi sırasında tüm hücreler iki kez pH'ı 9 olan fosfat tamponlu solüsyon (PBS) ile yıkanmıştır. Daha sonra hücreler numunere eklenen kadar 4°C'de en fazla 15 gün sürecek şekilde saklanmıştır. Her kullanımdan önce hücreler, 175 rpm'de 30°C'de bir saat boyunca besiyeri ile tekrardan çalkalanmıştır.

Tablo 1 Numunelerin içeriği

Örnek ismi	Kum (g)	Kil (g)	Sıvı besiyeri (mL)	<i>S.pasteurii</i> hücreleri (g)	Kalsiyum asetat hidrat
MICP işlemi görmüş Kum	1000	-	200	4	10
MICP işlemi görmüş Kil	-	1000	694	8	20

2.2. Testler ve Numunelerin Hazırlanışı

Bu çalışmada, kum numunelerinin tane boyutunun dağılımını belirlemek için ASTM C136-06 standartlarına göre elek analizi yapılmıştır. Kil tanelerinin boyutlarına ve dağılımlarına göre sınıflandırmak için ASTM D7928-21e1'i takiben hidrometre testi yapıldı. Ayrıca kum ve kil numunelerinin özgül ağırlığını belirlemek için ASTM D6026 prosedürü izlenerek piknometre deneyi yapılmıştır. ASTM D4318-17e1'e göre kilin plastik limiti ve likit limiti de belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan kum ve kaolin kilinin özelliklerini belirlemeye yönelik elek analizi, hidrometre, piknometre, likit limit ve plastik limit testleri sonuçları **Tablo 2'**de sunulmuştur. Mevcut çalışmadaki tüm MICP işlemi görmüş numuneler, **Tablo 1'e** göre yüksek parçalayıcı karıştırıcı (Thermomac) ile karıştırma tekniği uygulanarak hazırlanmıştır. MICP tekniği uygulanan ve uygulanmayan kil numuneleri için ASTM D2435-04'e göre odometre testi gerçekleştirilmiştir. ASTM D3080-04 standartları izlenerek hem kum hem de kil numuneleri için direct kesme deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyi için silindirik şekilli 2:1 kalıplar hazırlanmıştır. Kalıplar ikiye bölünüp, lastik kullanılarak bir araya getirilmiştir. Ayrıca kalıpların alt tabanları numune kaybı olmayacak şekilde filtre kağıdı ile kaplanmıştır.

Tablo 2. Kullanılan zeminlerin özellikleri (a) silis kumu ve (b) kaolin kili

(a) Silis kum 60-70 birleşimi

D ₆₀	0.33
D ₃₀	0.21
D ₁₀	0.13
C _u	2.5
C _c	1
Özgül Ağırlık	2.60

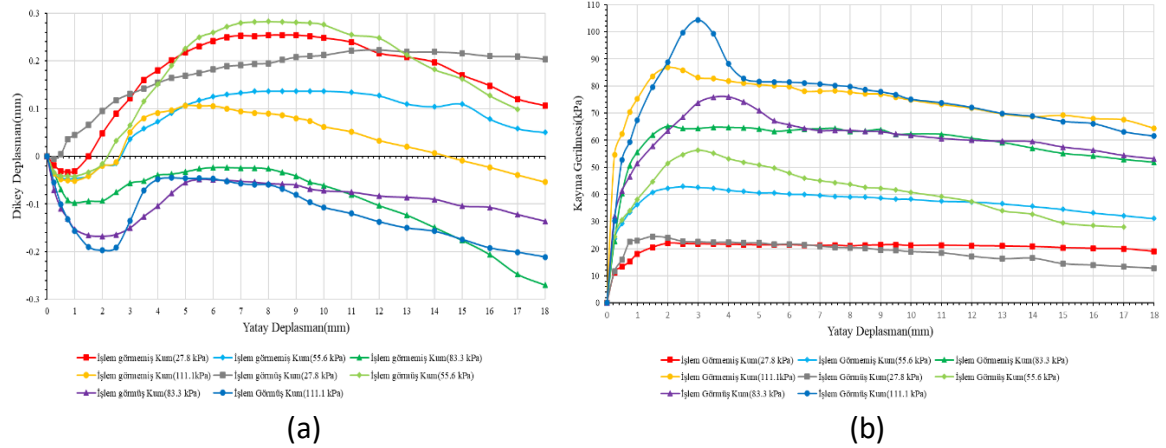
(b) Kaolin kili

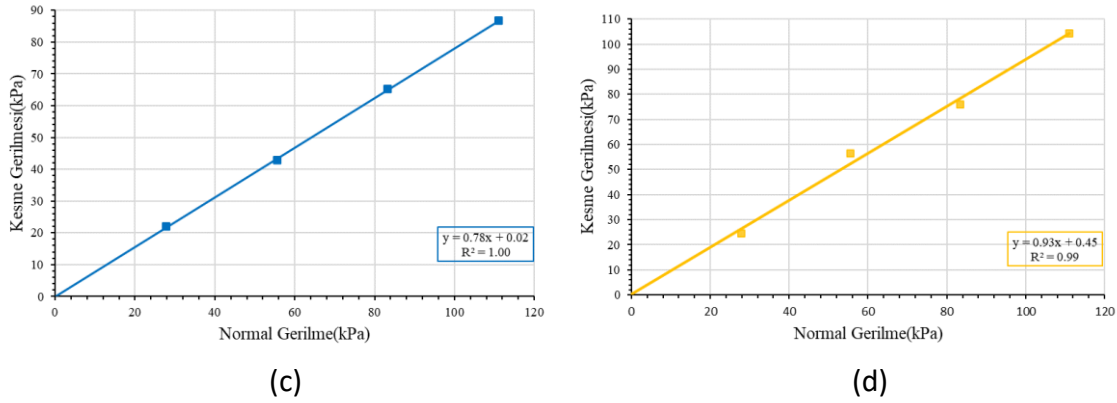
Likit Limit (%)	78
Plastik Limit (%)	55.1
Plastisite İndeksi	23
Tutarlılık İndeksi	1
Likidite Endeksi	0
Özgül Ağırlık	2.79
Kil (%)	50

3. BULGULAR

3.1. İşlenmemiş ve İşlenmiş Kum Örnekleri için Doğrudan Kesme Testi Sonuçları

Direkt kesme kutusu deneylerindeki yatay ve düşey deformasyon ilişkileri incelendiğinde yanal yer değiştirmeye karşı dikey yer değiştirme açısından bakteri iyileştirilmesi yapılmayan (işlem görmemiş) ve bakteri iyileştirilmesi uygulanan (işlem görmüş) kumun davranışları karşılaştırıldığında hem işlem görmemiş hem de işlem görmüş kum numunelerinin her normal gerilme değerinde sıkışma, genleşme ve tekrar sıkışma davranışı gösterdiği sonucuna varılmıştır. Davranışsal olarak numuneler arasında önemli bir fark yoktur. Öte yandan, işlem görmüş kum numunelerinde işlem görmemiş numunelere göre kayma gerilmesi değerleri artmış ve bu da kumun uygulamayla daha rijit bir yapı kazandığını, taneciklerin birbirlerine tutunma özelliğinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, MICP uygulamasının, kum numunelerin kohezyonunu ve sürtünme açısını da arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Kohezyon artmış olup, sürtünme açısı da yaklaşık 38° de 43° ye çıkmıştır. **Şekil 1.** de işlem görmüş ve işlem görmemiş kum numuneler arasındaki değişimi ve yapılan iyileştirmenin sonuçlarını görmektedir.



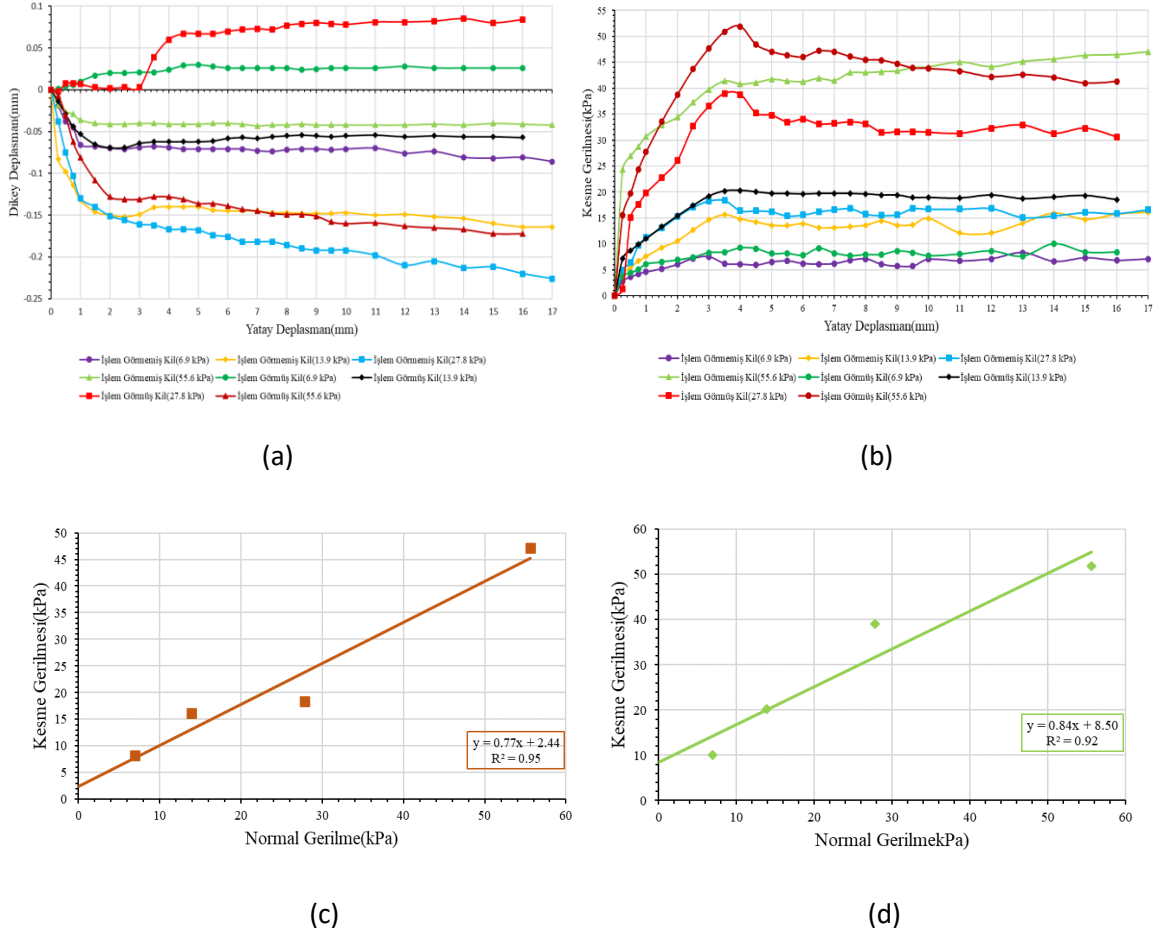


Şekil 1. (a): Farklı Normal Gerilme Değerleri için İşlenmemiş ve İşlenmiş Kum Numuneleri Arasındaki Düşey Yer Değiştirme ve Yanal Yer Değiştirme, (b): Farklı Normal Gerilme Değerleri için İşlenmemiş ve İşlenmiş Kum Numuneleri Arasındaki Kayma Gerilmesine Karşı Yanal Yer Değiştirme, (c): Farklı Normal Gerilme Değerleri için İşlenmemiş Kum Numunelerinin Mukavemet Zarfı, (d): Farklı Normal Gerilme Değerleri için İşlenmiş Kum Numunelerinin Mukavemet Zarfı

3.2. İşlenmemiş ve İşlenmiş Kil Numuneleri için Doğrudan Kesme Testi Sonuçları

Şekil 2., işlenmiş kil örneklerinin, işlenmemiş kil örneklerine kıyasla aynı normal gerilme değerleri için farklı bir davranış tepkisine sahip olduğunu göstermektedir. İşlem görmüş kil örneklerinin genişleme davranışı gösterme eğiliminde olduğu ve deneysel verilere göre düşey yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür. Bir noktaya ulaştıktan sonra, düşey yer değiştirme değerleri sabit kalma eğilimi göstermiştir, ancak normal gerilme değerleri arttırıldıkça dönüş noktalarında farklılıklar gözlemlenmiştir. İşlenmemiş ve işlenmiş kiler düşey yer değiştirmeye karşı yanal yer değiştirme açısından karşılaştırıldığında, kil numunelerinde bakteriyle iyileştirme etkisinin taneciklerin birbirlerini daha sıkı bir şekilde tutmasını sağladığı ve bunun sonucunda kile daha rijit bir yapı kazandırdığı sonucuna varılmıştır.

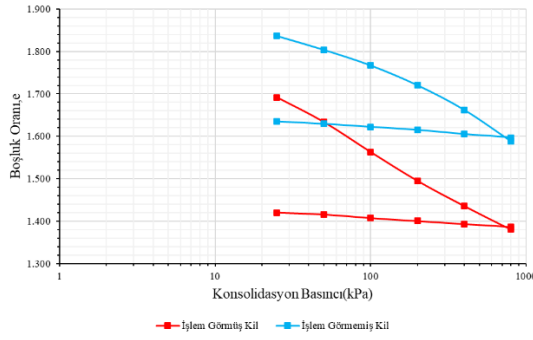
Kalsit çökeltmesinin etkisi, davranışsal tepkilerini analiz ederken kilde açıkça görülmektedir. İşlenmiş kil numunelerindeki kayma gerilmesi seviyeleri, işlenmemiş kil numunelerine göre daha yüksektir ve bu, kil numunesinde çöken katı kalsit parçacıkları arasındaki ek sürtünme ile açıklanabilir. Ayrıca, kohezyon ve sürtünme açısı olan mukavemet parametrelerindeki değişiklikleri görmek için her normal gerilme için maksimum kesme gerilmesi değerleri bir grafik üzerinde çizildi. MICP tekniğinin uygulanmasıyla kilin kohezyon değeri 2,44 kPa'dan 8,50 kPa'a ve kayma mukavemeti açısı 37,60° değerinden 40° ye yükselmiştir.



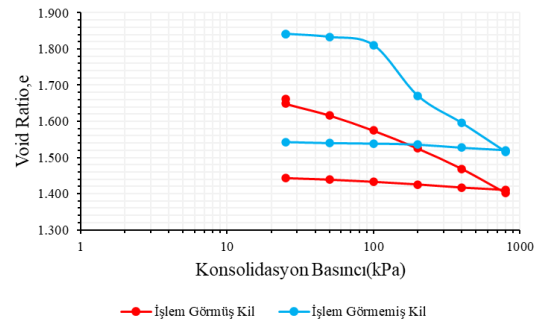
Şekil 2. (a): Farklı Normal Gerilme Değerleri için İşlenmemiş ve İşlenmiş Kil Numuneleri Arasındaki Dikey Yer Değiştirme ve Yanal Yer Değiştirme, (b): Farklı Normal Gerilme Değerleri için İşlenmemiş ve İşlenmiş Kil Numuneleri Arasındaki Kayma Gerilmesi ve Yanal Yer Değiştirme, (c): İşlenmemiş Kil Numunelerinin Farklı Normal Gerilme Değerleri İçin Mukavemet Zarfı, (d): Farklı Normal Gerilme Değerleri için İşlenmiş Kil Numunelerinin Mukavemet Zarfı

3.3. İşlenmemiş ve İşlenmiş Kil Örnekleri için Ödeometre Test Sonuçları

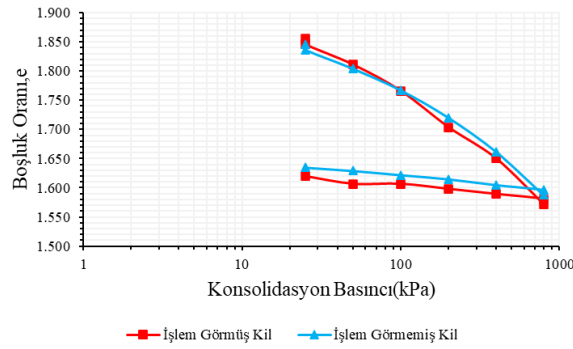
Şekil 3. farklı durumlar için işlem görmemiş ve işlem görmüş kil arasında değişen boşluk oranını özetlemektedir. İlk durumda deneysel veriler analiz edildikten sonra, bakteri enjeksiyonunun tam olarak (72 saat) tamamlanması halinde boşluk oranının azaltılması açısından büyük bir etkisi olduğu ve bunun nedeninin gözenekler içinde kalsit çökeltmesi ve aralarında bağ oluşması olduğu görülmüştür. İkinci durumda ise kuru MICP ile muamele edilmiş kil numuneleri (tedaviden 16 saat sonra test başlamıştır) 72 saat bekletilen numunelere benzer bir tepki gösterirmiş olup boşluk oranında önemli bir azalma görülmüştür. Son durumda ise bakteri enjeksiyonu tam olarak tamamlanmadan (16 saat) deney yapılmış olup boşluk oranında istenilen azalma gözlemlenmemiş olup, işlenmiş ve işlenmemiş numuneler arasında neredeyse hiçbir farkın olmadığı görülmüştür. Bu bulgu kür süresinin önemini vurgulamaktadır.



(a)



(b)

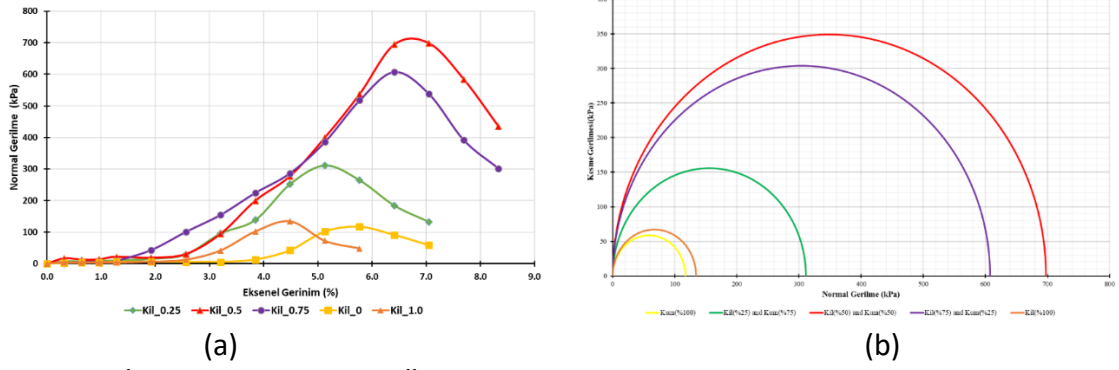


(c)

Şekil 3. (a): İşlenmemiş ve İşlem Görmüş Kil Yerleşim Eğrisi Karşılaştırması (72 saat beklendi), (b): İşlem görmemiş ve İşlenmiş Kil Yerleşim Eğrisi Karşılaştırması (16 saat bekleme koşulu, kuru ödometre testi) Karşılaştırması, (c): İşlenmemiş ve İşlenmiş Kil Arasındaki Oturma Eğrisi Karşılaştırması (16 saat bekleme koşulu) Karşılaştırması

3.4. Serbest Basınç Mukavemeti Deney Sonuçları

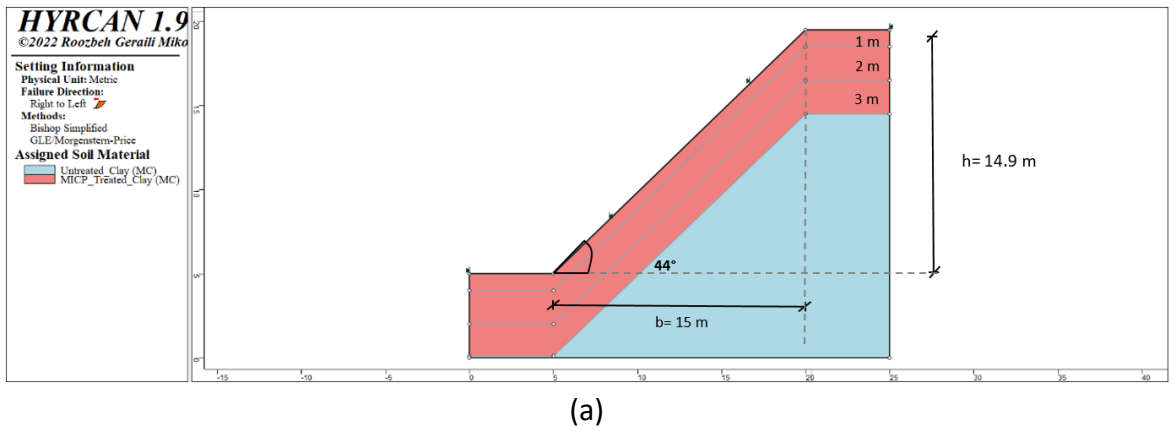
Bu kombinasyonlar arasındaki maksimum kayma gerilmesi değerini belirlemek ve bulmak için işlenmiş kum ve kil numunelerinin farklı bileşimleri hazırlanmıştır. Aşağıdaki örnekler seçilmiştir: %100 Kum, %25 Kil ve %75 Kum, %50 Kil ve %50 Kum, %75 Kil ve %25 Kum, %75 Kil ve %25 Kum, %100 Kil. Bu deneyler sonucunda elde edilen maksimum gerilme değerleri kullanılarak çizilen Mohr daireleri **Şekil 4.**'te sunulmaktadır. Görüldüğü gibi uygulama tüm zemin türlerinin kayma mukavemetinde önemli artış oluşturmakla birlikte ilginç bir şekilde uygulamanın en zor olduğu killi zeminlerle elde edilen mukavemet kapasitesi en yüksektir. Bu ilginç sonuç uygulama zorluğuna karşın killerde ulaşılan iyileştirmenin çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. Kil ve kum aynı miktarda kullanıldığında eksenel gerilim (%) değeri 8,3'e ulaşmış ve daha yüksek deformasyon davranışı göstermiştir. Diğer bileşimler, düşük kesme gerilimi değerleriyle daha kırılğan tepki verdiği gözlemlenmiştir.

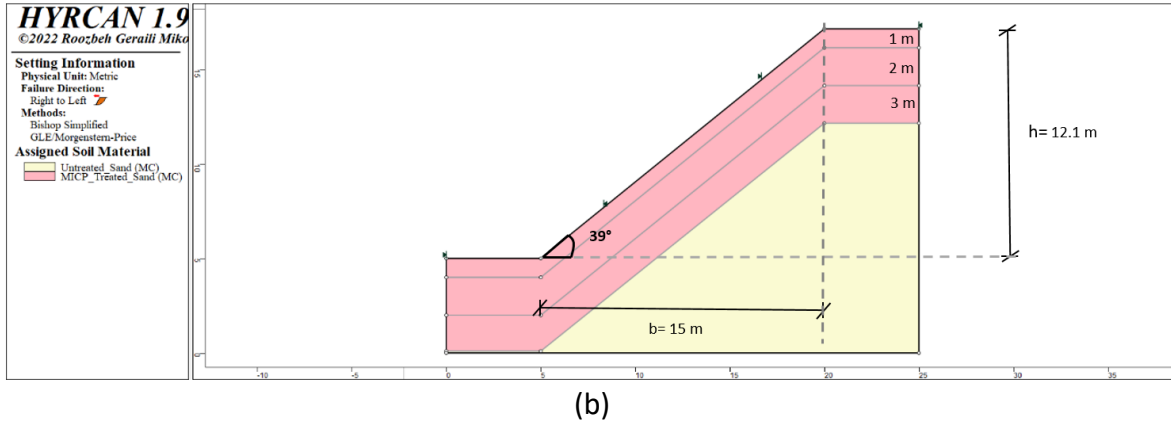


Şekil 4. (a) İşlenmiş Kil ve Kum Örneklerinin Tüm Bileşimleri Arasındaki Mohr Çemberi Karşılaştırması, (b) İşlenmiş Kil ve Kum Örneklerinin Tüm bileşimleri Arasındaki Normal Gerilme ve Eksenel Gerilme Karşılaştırılması

3.5. Şev Stabilitesi Analizi Örneği

Örnek bir şev profili oluşturularak şev stabilitesi analizi bu bildiride yer alan **3.1.** ve **3.2.** bölümlerinin sonuçlarına göre kum ve kil zeminler için gerçekleştirilmiştir. Şev stabilitesi analizinde kullanılan güvenlik katsayısının, kayma dayanımı parametreleri olan c (kohezyon) ve ϕ (kayma direnci açısı) ile direkt olarak ilişkisi bulunmaktadır (Wang ve diğ., 2021). Yapılan bütün hesaplamalarda ve modelleme aşamalarında HYRCAN 1.9. yazılımı kullanılmıştır. **3.3.** bölümüne göre MICP tekniğinin uygulanmasının hemen ardından zeminin su ile temas etmesi, zeminin iyileştirilmesi için yeterli miktarda kalsiyum karbonat çökmesini engel teşkil etmektedir. Bu sebeple, tasarlanan modelde yeraltı suyu tablası derinliği hiçbir etki yaratmayacak derinlikte alınmıştır. Tasarlanan modeldeki bir diğer önemli nokta ise MICP tekniği uygulanmamış olan genel kum ve kil setlerinin 1' den daha küçük stabil olmayan bir güvenlik katsayısına sahip olmasıdır. Tasarlanan modellerdeki başlangıç güvenlik katsayısı kil ve kum setler için 0.97'dir. Bu değere, kil için 44 derece kum içinse 39 derece eğimde elde edilmiştir. Güvenlik katsayısının hesaplanmasında, Bishop Simplified ve Morgenstern-Price metodları kullanılmıştır (Öser, C. & Çinicioglu, S. F., 2017). Tasarlanan kum ve kil setlerin genel modelleri **Şekil 5.** 'de sunulmuştur, hesaplanan güvenlik katsayıları ise **Tablo 3.** de sunulmuştur.





Şekil 5. (a): Genel kum seti modeli, (b): Genel kil seti modeli

Tablo 3. Şev stabilitesi analizi güvenlik katsayıları özeti

Malzeme Özellikleri	Güvenlik Katsayısı (FOS)	
	Bishop Simplified Metodu	GLE/ Morgenstern-Price Metodu
MICP uygulanmamış kum	0.973	0.972
1m derinliğinde MICP uygulanmış kum	1.059	1.062
3m derinliğinde MICP uygulanmış kum	1.236	1.236
5m derinliğinde MICP uygulanmış kum	1.236	1.236
MICP uygulanmış kum	1.236	1.236
MICP uygulanmamış kil	0.970	0.969
1m derinliğinde MICP uygulanmış kil	1.030	1.029
3m derinliğinde MICP uygulanmış kil	1.131	1.134
5m derinliğinde MICP tekniği uygulanmış kil	1.255	1.261
MICP tekniği uygulanmış kil	1.284	1.281

4. SONUÇLAR

Yeni ve hızla gelişen bir yaklaşım olan MICP tekniği, geoteknik mühendisliğinin geleceği için büyük önem taşımaktadır. Bu araştırma çalışması, bu tekniğin potansiyelini ortaya çıkarmak için yapılmıştır. Bu amaca ulaşmak için eksiksiz bir araştırma modeli tasarlanmış ve deneysel verilerin sonuçları şev stabilitesi analizi modeli tasarlamak için kullanılmıştır. Aşağıdakiler, mevcut çalışmanın ana bulgularını sunmaktadır:

- Kil numunelerinde MICP işlemi, ödometre deney sonuçları değerlendirildiğinde boşluk oranı açısından önemli bir gelişme göstermiştir. Bu bulgu, killi zeminler için uygulanan MICP prosedürünün zeminin boşluk oranını azalttığını ortaya koymaktadır.

- Bununla birlikte, MICP tekniği uygulanmasında kür süresinin etkisinin ne ölçüde önemli olduğu da önemli bulgular arasında yer almaktadır. Onaltı saat sonra ödometre testinin başlatıldığı kil numunesi seti için davranış, ödometre testinden önce 72 saat beklenmiş olan diğer MICP işlemi görmüş kil setlerinden dikkate değer oranda farklılık göstermiş ve yerleşim eğrilerinin, işlenmemiş numunelere benzediği belirlenmiştir. Aynı sette, bu davranışın nedenini belirlemek için deney su olmadan tekrarlandığında MICP tekniği uygulanmış kil numuneleri için tekrarlanan ve MICP uygulamasından 16 saat sonra başlatılan kuru ödometre testi, 72 saat beklenmiş numunelere benzer davranış göstermiştir. Bu bulgu, tekniğin uygulanmasından hemen sonra zeminin suya maruz kalmasının, yeterli kalsiyum karbonat çökmesinin oluşmasını engellediğini göstermiştir. Bu nedenle, suya maruz kalmanın bir “yıkama etkisine” neden olduğu ve büyük ölçekli saha MICP tekniği uygulamalarından önce yeraltı suyu tablasının dikkate alınmasının şart olduğu ortaya çıkmıştır.
- MICP işlemi görmüş kil için kayma gerilimi seviyeleri, işlenmemiş kil örneklerinden daha yüksek olarak bulunmuştur. Bu sonuç MICP tekniğinin bir sonucu olarak zemin parçacıklarının bağlanma seviyesindeki bir artışla ilişkilendirilebilir. Ayrıca MICP tekniğinin uygulanmasıyla kil zeminin mukavemet parametreleri; kohezyon ve kayma mukavemeti açısı değerlerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Kil dolguların şev stabilitesi analizine göre, kesme dayanımı parametrelerindeki artışla hem Bishop Simplified hem de Morgenstern-Price yöntemleri için güvenlik katsayısında %32'lik bir artışa ulaşılmıştır.
- İşlem görmemiş kaolin kili numuneleri ile MICP tekniği uygulanmış kaolin kili numuneleri arasındaki bu farklar, kaolin kilinin yüksek alüminyum oksit içeriğinden dolayı pH düşüşünde bile üre hidrolizinin meydana geldiğini ve kalsiyum karbonat çökmesinin gerçekleştiğini gözler önüne sermektedir. Bu bulguda, deneylerin başında beklendiği gibi başlangıç pH değerinin 9.0 olarak kullanımı etkili olmuştur.
- MICP tekniği ile kum numunelerinin kohezyon ve sürtünme açısı da iyileştirilmiş olup, kohezyon 0,02'den 0,45'e ve sürtünme açısı yaklaşık 38° den 43° ye yükselmiştir. Bu nedenle, kum dolguların şev stabilize analizi için güvenlik faktörü değeri, Bishop Simplified ve Morgenstern-Price yöntemlerine göre %27'lik bir iyileşmenin sağlandığını göstermiştir..
- Serbest basınç deneyi verileri, ağırlıkça %50 kil içeren numunenin, sıkıştırma altında diğer numunelerden (kil eklenmemiş, %25 kil, %50 kil ve %100 kil) önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiğini (348.94kPa C_u değerine sahip olarak) göstermiştir. Bu bulgu, bu çalışmada kullanılan kil ve kum örneklerinin parçacık boyutları ile ilişkilendirilebilir.

Teşekkür

Yazarlar, danışman hocalar Prof. Dr. Feyza Çinicioğlu ve Doç. Dr. Zeynep Başaran Bundur'a bu çalışma boyunca gösterdikleri değerli emek için teşekkür eder. Ayrıca laboratuvar deneyleri boyunca verdiği destek için Dr. Ayşen Çelebi'ye ve tavsiyeleri için Doç.Dr.Ali Reza Nagehdar'a teşekkür ederiz.

Referanslar

- Al Qabany, A., Soga, K., & Santamarina, C. (2012). Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(8), 992-1001.
- Cardoso, R., Pires, I., Duarte, S. O., & Monteiro, G. A. (2018). Effects of clay's chemical interactions on biocementation. *Applied Clay Science*, 156, 96-103.
- De Muynck, W., De Belie, N., & Verstraete, W. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. *Ecological engineering*, 36(2), 118-136.
- DeJong, J. T., Fritzges, M. B., & Nüsslein, K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(11), 1381-1392.
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210.
- Hagmar, L., Törnqvist, M., Nordander, C., Rosén, I., Bruze, M., Kautiainen, A., ... & Axmon, A. (2001). Health effects of occupational exposure to acrylamide using hemoglobin adducts as biomarkers of internal dose. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 219-226.
- Ivanov, V., & Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2), 139-153.
- Jiang, N. J., Wang, Y. J., Chu, J., Kawasaki, S., Tang, C. S., Cheng, L., ... & Wang, Y. Z. (2022). Bio-mediated soil improvement: An introspection into processes, materials, characterization and applications. *Soil Use and Management*, 38(1), 68-93.
- Kannan, K., Bindu, J., & Vinod, P. (2020). Engineering behaviour of MICP treated marine clays. *Marine Georesources & Geotechnology*, 38(7), 761-769.
- Kucharski, E. S., Cord-Ruwisch, R., Whiffin, V. S., & Al-Thawadi, S. (2006). Microbial biocementation. Patent.
- Martinez, B. C., DeJong, J. T., Ginn, T. R., Montoya, B. M., Barkouki, T. H., Hunt, C., ... & Major, D. (2013). Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(4), 587-598.
- Mitchell, J. K., & Santamarina, J. C. (2005). Biological considerations in geotechnical engineering. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(10), 1222-1233.
- Öser, C., & Cinicioglu, S. F. (2017). Embankment Design Method Combining Limit-State Approach with Stress-Path Application. *International Journal of Geomechanics*, 17(4), 04016101.
- Punnoi, B., Arpajirakul, S., Pungrasmi, W., Chompoorat, T., & Likitlersuang, S. (2021). Use of microbially induced calcite precipitation for soil improvement in compacted clays. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(4), 1-11.
- Sandalci, I., Tezer, M. M., & Basaran Bundur, Z. (2021). Immobilization of bacterial cells on natural minerals for self-healing cement-based materials. *Frontiers in Built Environment*, 7, 46.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based Materials Industry.

- Cement and Concrete Research, 114, 2–26.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Song, C., Wang, C., Elsworth, D., & Zhi, S. (2022). Compressive Strength of MICP-Treated Silica Sand with Different Particle Morphologies and Gradings. *Geomicrobiology Journal*, 39(2), 148-154.
- Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), 1563-1571.
- Sun, X., Miao, L., & Chen, R. (2019). Effects of different clay's percentages on improvement of sand-clay mixtures with microbially induced calcite precipitation. *Geomicrobiology Journal*, 36(9), 810-818.
- Teng, F., Sie, Y. C., & Ouedraogo, C. (2021). Strength improvement in silty clay by microbial-induced calcite precipitation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(8), 6359-6371.
- Tezer, M. M. (2020). Development of two-phase biological self-healing agents for cement-based mortar (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Vail, M., Zhu, C., Tang, C. S., Anderson, L., Moroski, M., & Montalbo-Lomboy, M. T. (2019). Desiccation cracking behavior of MICP-treated bentonite. *Geosciences*, 9(9), 385.
- van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J., van der Star, W. R., & van Loosdrecht, M. C. (2010). Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(12), 1721-1728.
- Wang, L. Q., Wu, J. H., & Zhang, W. G. (2021). Efficient seismic stability analysis of embankment slopes subjected to water level changes using gradient boosting algorithms. *Front Earth Sci* 9: 1179–1179.
- Wang, Z., Zhang, N., Jin, Y., Li, Q., & Xu, J. (2021). Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) in sand embankments for scouring/erosion control. *Marine Georesources & Geotechnology*, 39(12), 1459-1471.
- Weideborg, M., Källqvist, T., Ødegård, K. E., Sverdrup, L. E., & Vik, E. A. (2001). Environmental risk assessment of acrylamide and methylolacrylamide from a grouting agent used in the tunnel construction of Romeriksporten, Norway. *Water Research*, 35(11), 2645-2652.
- Xiao, Y., Zhao, C., Sun, Y., Wang, S., Wu, H., Chen, H., & Liu, H. (2021). Compression behavior of MICP-treated sand with various gradations. *Acta Geotechnica*, 16(5), 1391-1400.