Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

İNCE DANE İÇEREN GRANÜLER ZEMİNLERİN MICP İLE İYİLEŞTİRİLMESİNDE KÜRLENME SÜRESİNİN ETKİSİ

THE EFFECT OF TREATMENT PERIOD ON THE MICP-BASED STABILIZATION OF FINE-GRAINED GRANULAR SOILS

Şevval Yaren ÖZ[1,2], Murat Ergenokon SELÇUK[3], Elif Özlem ARSLAN AYDOĞDU[4]

ÖZET

Geoteknik mühendisliğinin temel zorluklarından biri, sismik yükler altında gevşek granüler zeminlerde gözlemlenen sıvılaşma davranışı ve düşük mukavemet problemleridir. Günümüzde bu tür zayıf zeminlerin iyileştirilmesi için genellikle yüksek basınçla enjekte edilen veya mekanik yolla zemin içerisine karıştırılan çimento, silikat ve poliüretan gibi çeşitli kimyasal enjeksiyon yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu geleneksel yöntemlere kıyasla çevreye duyarlı ve sürdürülebilir bir alternatif olan Mikrobiyal Olarak İndüklenmiş Kalsit Çökelmesi (MICP) yöntemi öne çıkmaktadır. MICP, üreaz aktif bakterilerin metabolik faaliyetleri sonucunda çökelen kalsiyum karbonat ile zemin danelerini birbirine bağlayan ve zeminin yapısal bütünlüğünü artıran doğal biyokimyasal bir süreçtir. Bu çalışmada, ince dane içeriğine sahip granüler zeminlerde deprem yüklerinin tekrarlı davranışı sonucu oluşabilecek sıvılaşma problemini MICP yöntemi ile iyileştirmek için deneysel çalışmalar ortaya konmuştur. Deneysel süreç boyunca suya doygun zemin numuneleri içerisine bakteri enjeksiyonu gerçekleştirilmiş, hazırlanan numuneler farklı kürlenme süresince incelenmiştir. Kürlenme süreleri sonucunda, yapılan serbest basınç deneyleriyle zemin numuneleri parametreleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Biyolojik süreçlerle elde edilen bu stabilizasyon yöntemi ile zemin içerisinde oluşan mikro ölçekteki değişimlerin mühendislik parametrelerine doğrudan yansıması gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Zemin Sıvılaşması, Sürdürülebilir Geoteknik, MICP, Kürlenme Süresi*

ABSTRACT

One of the fundamental challenges in geotechnical engineering is the liquefaction behavior and low strength characteristics observed in loose granular soils under seismic loading. Although most research papers focus on chemical injection methods that involve cement, silicate, or polyurethane applied via high-pressure grouting or mechanical mixing, a new

[1] Arş. Gör. Şevval Yaren Öz, Karadeniz Teknik Üniversitesi, syoz@ktu.edu.tr (Sorumlu Yazar)
[2] Yüksek Lisans Öğrencisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, yaren.oz@std.yildiz.edu.tr
[3] Dr. Öğretim Üyesi Murat Ergenokon SELÇUK, Yıldız Teknik Üniversitesi, meselcuk@yildiz.edu.tr
[4] Dr. Öğretim Üyesi Elif Özlem ARSLAN AYDOĞDU, İstanbul Üniversitesi, eoarslan@istanbul.edu.tr

method that is a low-impact and sustainable alternative, Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP), has recently emerged. MICP is a natural biochemical process that bonds soil particles through calcium carbonate precipitation resulting from the metabolic activities of urease-active bacteria, thereby enhancing structural integrity. In this study, experimental investigations were conducted to mitigate the liquefaction problem in granular soils with fine content, occurring under the cyclic behavior of earthquake loads, by utilizing the MICP method. Throughout the experimental phase, bacterial injection was performed on saturated soil specimens, and the prepared samples were analyzed over treatment periods. Following these durations, the strength parameters of the soil specimens were comparatively evaluated through unconfined compression tests. This stabilization method, achieved through biological processes, led to the observation of how micro-scale changes occurring within the soil matrix directly reflect onto its engineering parameters.

Keywords: *Soil Liquefaction, Sustainable Geotechnics, MICP, Treatment Periods*

1. GİRİŞ

Sismik aktivitelerin yüksek olduğu bölgelerde hem zemin kaynaklı hem de üstyapı güvenliğini ilgilendiren birçok problem karşımıza çıkmaktadır. Yapıların performansını belirlemek için bu bölgelerde yapı-zemin etkileşimi çok daha önemli bir hale gelir. Özellikle suya doygun granüler zeminlerin olduğu bölgelerde dinamik aktiviteler sonucunda taşıma gücü hızla azalarak efektif gerilme sıfırlanır ve zeminde sıvılaşma oluşur. Dinamik yüklerin tekrarlı davranışı boşluk suyu basıncını hızla artırarak zeminin sıvı gibi davranmasına yol açar.

Sıvılaşma problemi ele alındığında geleneksel olarak kullanılan başlıca birkaç yöntem bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları boşluk oranını azaltarak gevşek zemin tabakasında bulunan danelerin birbirine yaklaştırılmasını sağlayan; vibrasyonla sıkıştırma ve dinamik kompaksiyon yöntemleridir. Bunların yanı sıra enjeksiyon yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin etkili olduğu bilinmekle birlikte bazı uygulama sorunları, maliyet ve yüksek karbon salınımı gibi problemler ortaya çıkabilmektedir. Özellikle enjeksiyon yöntemlerinde yanlış uygulamalar sonucu çevre yapılara zarar verme ve ekolojik kirlilik yaratma potansiyeli gibi riskler bulunmaktadır (Bao vd., 2019).

Sürdürülebilirlik çerçevesinde zeminin mukavemet ve rijitlik gibi özelliklerini iyileştirmeye yönelik yeni çözümler sunulabilmek amacıyla doğal ve biyolojik süreçlerden faydanılmaya başlanmıştır (DeJong vd., 2010). Zeminin mekanik özelliklerini optimize etmek için içerisindeki mikroorganizmaların biyolojik faaliyeti sonucu yerinde biyoçimentolaşma oluşturması temeline dayanan Mikrobiyal Olarak İndüklenmiş Kalsit Çökelmesi (MICP), doğal bir zemin stabilizasyon yöntemidir (DeJong vd., 2006; Whiffin vd., 2007).

De Muynck vd., (2010); MICP sürecinin $CaCO_3$ çökelmesinin üreaz aktif bakteriler tarafından katalize edilen üre hidrolizi ile kontrol edildiği bir süreç olduğunu belirtmiştir. Bu süreç şu şekilde açıklanmaktadır:

• Ürenin mikrobiyal üreaz tarafından hidrolize edilmesiyle amonyum ve karbonat iyonları oluşur:

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{-2}$$

• Oluşan karbonat iyonları kalsiyum iyonlarıyla reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturur (Mujah vd., 2019):

$$CO_3^{-2} + Ca^{+2} \rightarrow CaCO_3$$

MICP yönteminde, zeminde yaşayan veya zemine eklenen belirli bakteri türlerinin üreyi ($(NH_2)_2CO$) hidrolize etmesi için uygun koşullar sağlanmaktadır. Bu yöntem, kalsiyum karbonatın ($CaCO_3$) çökelmesi oluşturmak amacıyla çimentolama çözeltisiyle reaksiyona girmesi için patojenik olmayan üreolitik bakterilerin zemine enjekte edildiği, çevre dostu bir zemin iyileştirme tekniği olarak son zamanlarda öne çıkan umut verici bir yöntemdir. Üre hidrolizinden açığa çıkan amonyum (NH_4^+) ile çökelme teşvik edilerek pH artışına neden olur. Süreç sonunda zemin içerisinde oluşan kalsiyum karbonat, zemin danelerini birbirine bağlayarak zemin mukavemetinin ve rijitliğinin artmasını sağlamaktadır (Sun ve Miao, 2019; Mujah vd., 2019).

Sıvılaşabilir kum zeminlerin dinamik davranışlarının incelenmesi sonucunda MICP yöntemiyle uygulanılan enjeksiyon sürecinin, sıvılaşma direnci üzerinde etkili olduğu bulunmuştur (Han vd., 2016). Cheng ve Shahin (2015)'in, kontrollü kil yüzdelerine sahip killi kumların iyileştirilmesi amacıyla enjeksiyon, ön karıştırma ve difüzyon dahil olmak üzere üç farklı MICP yöntemini değerlendirdiği çalışmada; farklı yöntemlerin, farklı kil oranları içeren killi kumlar üzerinde uygulanabilirliği belirlenmiştir.

DeJong ve arkadaşları (2010) çalışmalarında *Sporosarcina pasteurii*'nin biyosementasyon sürecinde kullanım potansiyeli olduğunu "Yaygın alkalofilik bir toprak bakterisi olan *Sporosarcina pasteurii*, yüksek üreaz aktivitesine sahiptir ve sementasyonu indükleyen kimyasal reaksiyonu kolaylaştırmak amacıyla kullanılmaktadır." ifadesiyle ortaya koymuştur. Bu çalışmada da geleneksel yöntemlere kıyasla düşük karbon salınımlı ve sürdürülebilir bir alternatif sunan MICP yönteminde; sıvılaşmanın kontrol edildiği aralığı aşan, sınıflandırma ve kil davranış sınırı olan %13 ince dane içeren granüler zemin örneklerinin (SM-SC) kullanımıyla, yapılacak çalışmalar için bir ön çalışma oluşturulması amaçlanmıştır. Uygulanacak olan yöntem; zeminin yapısal bütünlüğünü ve mukavemet davranışını etkileyeceğinden kullanılacak olan bakteri türü, kürlenme malzemeleri ve süresi gibi parametrelere önem arz etmektedir.

Deneysel süreçte *Sporosarcina pasteurii* bakterisi kullanılarak farklı kürlenme süreleri içinde killi kum zeminde uygulanmıştır. Bakteriler, suya doygun zemin numunelerine enjekte edildikten sonra kürlenme süreleri sonunda mukavemet testlerine tabii tutularak kürlenme sürelerinin, zemin numunesinin mukavemetine etkisi ortaya konmuştur. İnce dane içeriğine sahip zeminlerdeki mukavemet parametrelerinin MICP yöntemi ile nasıl değiştiği gözlemlenmiştir.

2- MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Malzemeler

Zemin Numuneleri

ASTM D1140 ve ASTM D6913 standartlarına göre yapılan yıkamalı elek ve ASTM D7928 standardına uygun hidrometre analizine dayanarak zeminlerin dane çapı dağılım eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1. Granülometri Eğrisi

Literatürde mevcut çalışmaların büyük bir çoğunluğu yalnızca temiz kumların stabilizasyonuna odaklanmışken bu çalışmada sismik bölgelerde bulunan zemin profilini temsil etmek amacıyla %13 oranında ince dane içeren zemin numuneleri kullanılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre Siltli-Killi Kum (SM-SC) grubunu temsil eden zemin profili doğada sıvılaşma riskiyle sıkça karşılaşılan ince dane içerikli kum tabakalarıyla doğrudan paralellik göstermektedir.
Deneysel çalışma kapsamında hazırlanan numuneler, biyolojik stabilizasyon sürecinde uygulanan serbest basınç deney düzeneği standartlarına uygun ve sıvılaşabilir gevşek zemin yapısını simüle etmek için rölatif sıkılık derecesi %40 olacak şekilde silindirik biçimde hazırlanmıştır.

Bakteri Kültürü

Bu çalışmada, İstanbul Üniversitesi Mikrobiyoloji Laboratuvarı bünyesinde hazırlanarak teslim alınan ve literatürde de MICP yönteminde yaygın olarak kullanılan *Sporosarcina pasteurii* olarak bilinen üreaz aktif bakteri türü (ATCC 6453) kullanılmıştır. Bakteri suşu, %20 (v/v) gliserol içeren stok kültürlerde -86ºC'de muhafaza edilmiştir. Deneysel süreç öncesinde stok kültürlerden alınan örnekler ATCC besiyerine (20 g/L maya özütü, 10 g/L $(NH_4)_2SO_4$, katı ortam için 20 g/L agar ve 0,13 M Tris tamponu pH 9,0) sıçratma yöntemiyle ekim yapılmış ve oluşturulan bakteri kültürleri 30º C'de 24 saat boyunca aerobik koşullarda inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrasında bakteri hücreleri, steril fizyolojik tuzlu su (FTS, %0,85 NaCl) kullanılarak toplanmış ve toplamda 4mL konsantre bakteri süspansiyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan süspansiyon yaklaşık 7×10^{11} CFU toplam hücre içerecek şekilde standardize edilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılmak üzere optik yoğunluk OD600 ≈ 1 olacak şekilde farklı hacimlerde ATCC sıvı besiyeri hazırlanmış ve besiyeri ile birlikte hazırlanan bakteri süspansiyonu sonraki deneysel aşamalarda 24-48 saat içerisinde kullanılmak üzere ilgili laboratuvardan teslim alınmıştır.

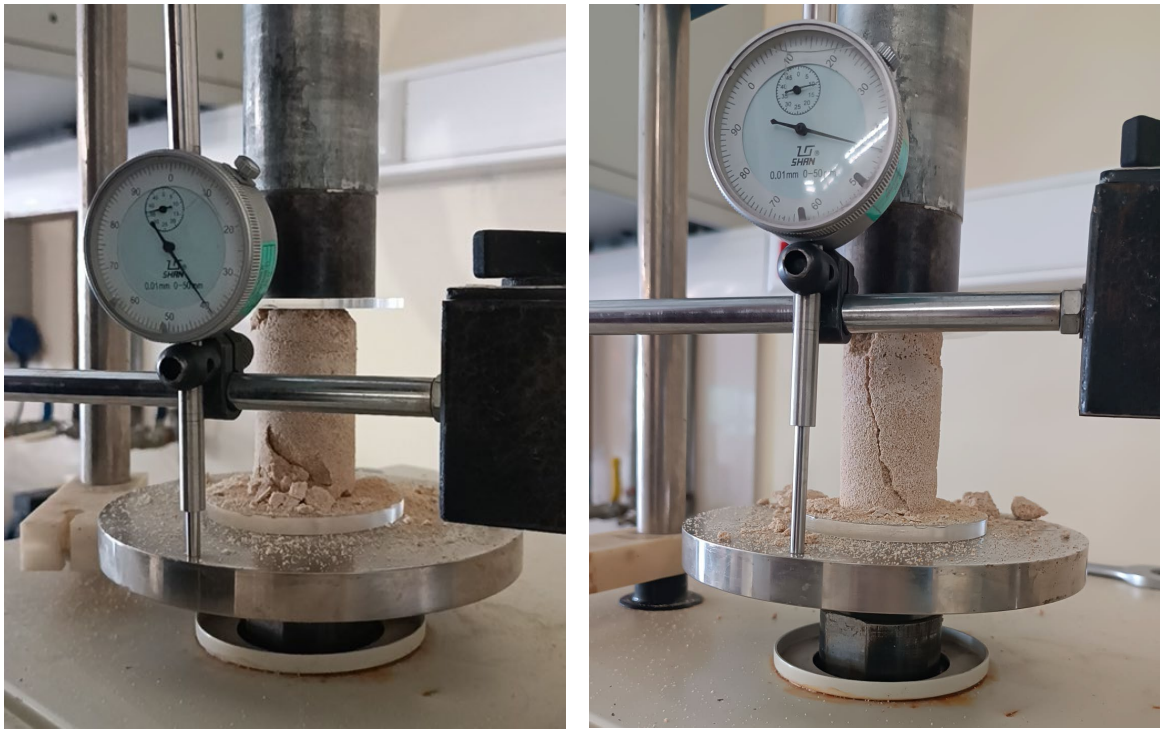
2.2-Yöntem

%40 rölatif sıkılıkta hazırlanan numuneler önce 24 saat boyunca suya doygun hale getirilmiştir. Daha sonra besiyeriyle birlikte solüsyon haline getirilen bakteri kültürleri zemin numunesine, boşluk hacminin yarısı (0,5 PV) miktarında 5 mL/dk hızda Cui vd.

(2021)'nin çalışmasına benzer şekilde enjeksiyon yöntemi ile uygulanmıştır. Bakterilerin zemin içerisindeki boşluklara yerleşebilmesi için yaklaşık 2 saat kadar beklendikten sonra bakteriyel aktiviteleri ve kalsiyum karbonat çökelmesini tetiklemek amacıyla 1 M üre ve $CaCl_2$ çözeltisi 10 mL/dk hızda kürlenme süresi boyunca uygulanmıştır. Oluşturulan numuneler 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiş ve bu sürenin sonunda bir boşluk hacminde (1 PV) çimentolama çözeltisi enjekte edilmiştir. Daha sonra bakteriyal aktiviteyle ürenin hidroliz edilmesi için tekrar 24 saat bekletilmiştir. Toplamda 6 gün olacak şekilde bu döngü tekrarlanmış, 6.günün sonunda yeni bakteri kültürü eklendiğinde permeabilite problemi yaşanmaması için 24 saat kalıpların muslukları açılarak beklenmiştir. 7.gün ek olarak yarım boşluk hacminde tekrar bakteri kültürü uygulanmış, devam eden günlerde bir boşluk hacminde çimentolama çözeltisi uygulanarak toplamda 14 gün olacak şekilde döngü tamamlanmıştır. 14 günlük kürlenme periyodu boyunca numunelerin sıcaklık koşulları, biyokimyasal reaksiyonun sürekliliğini sağlayacak şekilde kontrol altında tutulmuştur.
Kürlenme süresi sonunda kalıptan çıkarılabilen iyileştirilmiş zemin numuneleri 60˚C'de etüvde 72 saat süreyle bekletilmiş ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.

2.3-Serbest Basınç Deneyi

İyileştirilmiş zemin numuneleri üzerinde literatürdeki çalışmalara paralel olarak mukavemet açısından değerlendirme yapmak için serbest basınç deneyi yapılmıştır. Belirlenen kürlenme süreleri sonunda kalıplardan bütünlüğünü koruyacak şekilde çıkarılan numunelerin çap, boy ve ağırlık değerleri hassas şekilde kaydedilmiştir. Serbest Basınç (UCS) deneyi, ASTM D2166 standardına göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Serbest Basınç Deneyleri

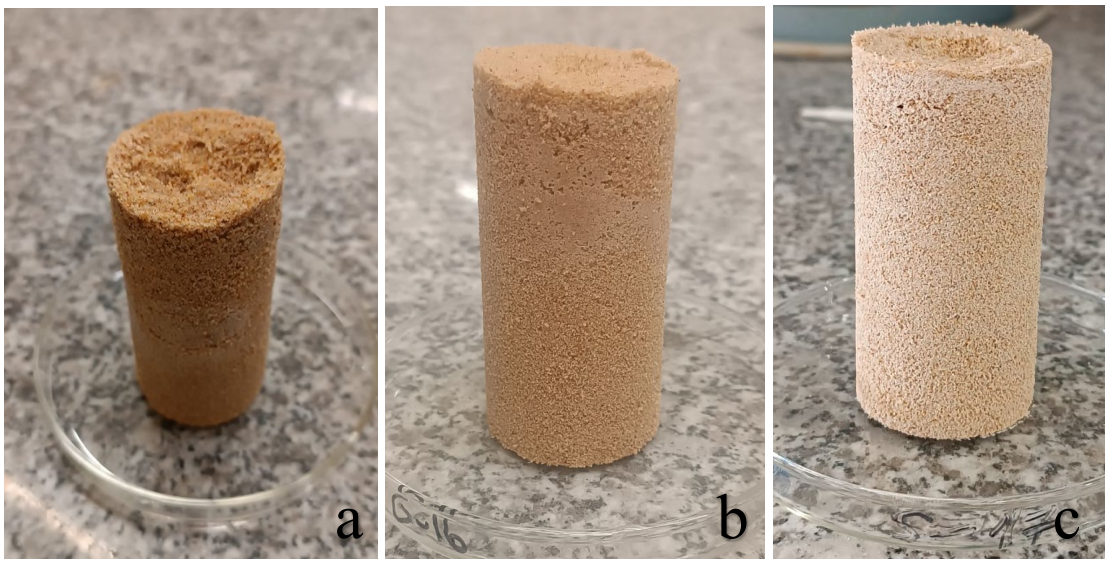
Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, iyileştirilmiş zemin numunelerinin kırılma anındaki gerilme dayanımlarının zamana bağlı olarak artış gösterdiği ortaya konmuştur. Bu durum, MICP sürecinde *Sporosarcina* bakterilerinin kalsiyum karbonat çökelmesi sonucunda zemin daneleri arasında sementasyon yoluyla bağlar oluşturduğunu kanıtlar niteliktedir. 10. günün sonunda çıkarılan zeminin kırılma anındaki gerilmesi 14,6 kPa olarak bulunmuştur. Bu dayanım, biyokimyasal iyileştirme periyodunda zemin içerisindeki çimentolama sürecinin henüz gelişim aşamasında olduğunu göstermektedir. 12. günün sonunda çıkarılan zemin numunelerinin kırılma anındaki gerilmeleri yaklaşık iki kat artarak 28,8 kPa ve 26,2 kPa olarak bulunmuştur. 14.günün sonunda çıkarılan zemin numunelerinin kırılma anındaki gerilmeleri ise 10 günlük kürlenme süresine sahip numunelere göre yaklaşık üç kat artarak 41,3 kPa ve 44,1 kPa seviyelerine ulaşmıştır.

3- BULGULAR VE TARTIŞMA

Deney sürecinde, 7. günün sonunda kalıptan çıkarılan numunelerde Şekil 3'teki gibi kısmi iyileşmeler gözlemlenmiştir. Fakat bu kür süresi boyunca bakteriyal aktivite sonucu çökelen kalsiyum karbonat miktarının zemin içerisindeki daneler arasında yeterli çimentolaşma oluşturamaması nedeniyle yapısal bütünlüğünü sağlayamamış, dağılmalar görülmüştür. 10. ve 12. günün sonunda kalıplardan çıkarılan numunelerde zemin daneleri arasında çimentolama belirli bir düzeye ulaştığından kalıptan çıkarıldığında şeklini koruyabilmiş, iyileşme görülmüştür (Şekil 4).



Şekil 3. 7.Gün Çıkarılan Numune Örnekleri



Şekil 4. a) 10.Gün Sonunda Çıkarılan Numune Örneği; b) 12.Gün Sonunda Çıkarılan Numune Örneği; c) 14.Gün Sonunda Çıkarılan Numune Örneği

Bu çalışmada, sismik sıvılaşma riski altındaki granüler zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla çevre dostu bir stabilizasyon yöntemi olan Mikrobiyal İndüklenmiş Kalsit Çökelmesi (MICP) uygulamasının etkinliği araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda biyolojik iyileştirmenin ince dane içeren zeminlerde de etkili olabileceği ve van Paassen vd., (2010)'nin büyük ölçekli çalışmasında sunulduğu gibi, zemin içerisinde oluşan kalsit çökelmelerinin daneler arası sementasyon kaynaklı bağlar kurarak zeminde iyileştirme oluşturduğu görülmüştür. Uygulanan biyosementasyon işleminin zeminin drenajsız kayma mukavemeti üzerindeki etkisi, 14 günlük kürlenme süresi boyunca detaylı olarak incelenmiştir.

Şekil 5. Farklı Kürlenme Sürelerinde MICP Uygulanmış Zemin Örneklerinin Serbest Basınç Dayanımları

14 günlük kürlenme süresi sonunda ölçülen serbest basınç mukavemeti değeri, 10 günlük kürlenme süresi sonunda ölçülen değere göre yaklaşık üç kat artmıştır (Şekil 5). Kürlenme süresi arttıkça zeminlerin serbest basınç mukavemeti de bir miktar artış göstermiştir. Literatürdeki çalışmalarda vurgulandığı üzere elde edilen mukavemet artışındaki düzgün dağılım verileri, bakterilerin oluşturduğu kalsiyum karbonat çökelmesinin homojen dağılımıyla ve uygulanan enjeksiyon yöntemleriyle doğrudan ilişkilidir (Cheng vd., 2013).

4-SONUÇLAR

Ön çalışma niteliğindeki bu araştırma, çevre dostu biyosementasyon yönteminin ince dane içeren granüler zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Yöntemin yaygınlaşabilmesi için bundan sonraki çalışmalarda; farklı ince dane oranlarının etkisinin incelenmesi, zeminde homojen bir iyileşme oluşturulabilecek yeni enjeksiyon stratejileri geliştirilmesi ve iyileştirilmiş zeminlerin dinamik yükler altındaki performansının incelenmesi tavsiye edilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği Laboratuvarı personeline ve İstanbul Üniversitesi Mikrobiyoloji Bölümündeki değerli hocalarıma deney sürecindeki katkıları için teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

ASTM (2016), “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, ASTM D2166 / D2166M-16, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM (2017), “Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Soils by Washing”, ASTM D1140 / D1140M-17, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM (2017), “Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis”, ASTM D6913 / D6913M-17, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM (2021), “Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis”, ASTM D7928-21, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bao, X. vd. (2019), “Soil liquefaction mitigation in geotechnical engineering: An overview of recently developed methods”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 120, 273-91.

Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., Shahin, M. A. (2013). "Cementation of sand soil in one-dimensional flow through continuous and batch injection systems". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(1), 76-86.

Cheng, L. ve Shahin, M.A. (2015), "Assessment of different treatment methods by microbial-induced calcite precipitation for clayey soil improvement", GeoQuebec 2015, Quebec, Kanada.

Cui, M. J. vd. (2021), "Bio-Mediated Calcium Carbonate Precipitation and Its Effect on the Shear Behaviour of Calcareous Sand", Acta Geotechnica, Vol 16, 1377-1389.

De Muynck, W. vd. (2010), "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review", Ecological Engineering, Vol 36, 118-36.

DeJong, J. T. vd., (2006). "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(11), 1381-1392.

DeJong, J.T. vd. (2010), "Bio-Mediated Soil Improvement", Ecological Engineering, Vol 36, 197-210.

Han, Z., Cheng, X. ve Ma, Q. (2016), "An experimental study on dynamic response for MICP strengthening liquefiable sands", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol 15, 673-679.

Mujah, D. vd. (2019). "Microstructural and Geomechanical Study on Biocemented Sand for Optimization of MICP Process". Journal of Materials in Civil Engineering, 31(4).

Soltani-Jigheh, H. vd. (2020), "Bacterial Treatment of Remoulded Fine-Grained Cohesive Soils", International Journal of Civil Engineering, Vol 18, 463-73.

Sun, X. vd. (2019), "Effects of Different Clay's Percentages on Improvement of Sand-Clay Mixtures with Microbially Induced Calcite Precipitation", Geomicrobiology Journal, Vol 36, 810-18.

Sun, X. vd. (2021), "Liquefaction Resistance of Biocemented Loess Soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 147, 04021117.

Wang, Y. vd. (2023), "Applications of Microbial-Induced Carbonate Precipitation: A State-of-the-Art Review", Biogeotechnics, Vol 1, 100008.

Whiffin, V. vd. (2007), "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique", Geomicrobiology Journal, Vol 24, 417-23.

van Paassen, L. A. vd. (2010), "Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 136, 1721-1728.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	**Açıklama**
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması
SM-SC	Siltli-Killi Kum
ATCC	American Type Culture Collection

CFU	Colony Forming Unit
FTS	Fizyolojik Tuzlu Su
OD600	600 nm Dalga Boyunda Optik Yoğunluk
PV	Pore Volume (Boşluk Hacmi)