Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

MICP İLE İYİLEŞTİRİLEN KUMLU ZEMİNLERE İYİLEŞTİRME SOLÜSYONUNUN ETKİSİ

Zehra ERTOSUN KARABULUT[1], Sabriye Banu İKİZLER[2]

ÖZET (14 PUNTO)

MICP veya biyosementasyon, zemin parçacıkları üzerinde $CaCO_3$'ü çökelterek zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştiren biyolojik aracılı bir teknolojidir. Son zamanlarda zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olarak kullanılan MICP'nin temel prensibi, belirli bakterilerin metabolitlerinin çevredeki bileşiklerle etkileşime girmesi yoluyla kalsiyum karbonat sentezlemesi yöntemidir. MICP teknolojisi, çevre dostu bir yaklaşımdır ve geoteknik mühendisliğinden çevresel iyileştirmelere kadar geniş bir alanda etkili çözümler sunmaktadır. MICP işleminde iyileştirme solüsyonu, genellikle üre ve kalsiyum klorür karışımını içermektedir. Bu karışıma bazen gerekli besin maddeleri de dahil edilir. Çalışma kapsamında beş farklı molarite (0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5) değişimine göre MICP ile iyileştirme yapılmıştır. Bu molarite değerleri üç farklı kum tipi (AFS 65/70, AFS 55/60, CEN) için ayrı ayrı uygulanmıştır. Üç farklı kumda değişen molaritelere göre oluşan serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. 0.5 ve 0.75 molaritelerdeki MICP ile iyileştirme düşük serbest basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Kumların 1.0, 1.25 ve 1.5 molaritelerde aldığı dayanım değerlerinin sürekli arttığı görülmüştür. Ayrıca üç farklı kum türü için de en yüksek dayanımın 1.5 molaritede elde edildiği görülmektedir. Kumlardaki farklı dayanım değerleri tane boyutlarından kaynaklı olup, en ince tane yapısına sahip olan AFS 65/70 kumunda en yüksek dayanımlar görülürken, en iri tane yapısına sahip olan CEN kumunda en düşük dayanımlar görülmektedir.
Anahtar Kelimeler: *İyileştirme solüsyonu, MICP, zemin İyileştirme*

ABSTRACT

MICP, or biosementation, is a biologically mediated technology that improves the engineering properties of soils by precipitating $CaCO_3$ onto soil particles. The basic principle of MICP, which has recently been used as a soil improvement method, involves the synthesis of calcium carbonate through the interaction of metabolites produced by specific bacteria with surrounding compounds. MICP technology is an environmentally friendly approach and offers effective solutions across a wide range of applications, from geotechnical engineering to environmental remediation. In the MICP process, the remediation solution typically consists of a mixture of urea and calcium chloride. Necessary nutrients are sometimes added to this mixture. As part of the study, MICP treatment was performed at five different molarities (0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5). These molarity values were applied separately to three different sand types (AFS 65/70, AFS 55/60, CEN). The unconfined compressive strengths resulting from varying molarities were determined for the three different sands. MICP treatment at molarities of 0.5 and 0.75 yielded low unconfined compressive strength values. It was observed that the strength values of the sands increased steadily at molarities of 1.0, 1.25, and 1.5. Furthermore, it was observed that the highest strength for all three sand types was achieved at a molarity of 1.5. The differences in strength values among the sands are due to their grain sizes; the highest strengths are observed in AFS 65/70 sand, which has the finest grain structure, while the lowest strengths are observed in CEN sand, which has the coarsest grain structure
Keywords: *Treatment solution, MICP, soil treatment*

[1] Arş. Gör. Dr., Muş Alparslan Üniversitesi, z.ertosun@alparslan.edu.tr (Sorumlu Yazar)
[2] Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, banuh@ktu.edu.tr

1. GİRİŞ

Zemin stabilizasyonunda uygulanacak yöntemin seçimi, öncelikle zeminin mineralojik yapısının, bileşenlerinin ve temel mühendislik davranışının doğru biçimde tanımlanmasına bağlıdır. Çünkü zeminlerin dane yapısı, plastisite özellikleri, suya karşı duyarlılığı ve taşıma kapasitesi, stabilizasyon uygulamalarına verdikleri tepkiyi doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, belirli bir zemin türünde etkili olan bir iyileştirme tekniğinin farklı özelliklere sahip başka bir zeminde aynı düzeyde başarı göstermesi beklenmemelidir(Ertosun Karabulut**,**2025). Örneğin, ince daneli ve kohezyonlu zeminlerde tercih edilen bir yöntem, iri daneli ve kohezyonsuz zeminler açısından teknik veya ekonomik bakımdan uygun olmayabilir. Uygun olmayan yöntem seçimi, hedeflenen mukavemet artışının sağlanamamasına ve uygulama maliyetlerinin gereksiz biçimde yükselmesine neden olabilir. Bu doğrultuda stabilizasyon yöntemi belirlenirken zemin türü ve mühendislik parametrelerinin yanı sıra maliyet, uzun süreli performans, dayanıklılık ve çevresel etkiler birlikte değerlendirilmelidir. Böylece zemin, proje kapsamında öngörülen stabilite ve mukavemet koşullarını sağlayacak biçimde tasarlanabilir (Archibong vd., 2020). Uygulanacak geleneksel iyileştirme tekniğinin seçimi, zeminin türü ile projenin teknik beklentileri ve maliyet kısıtlarının ortak değerlendirilmesine bağlıdır (Das, 2010). Yerel kaynaklardan temin edilebilen malzemelere dayanan geleneksel zemin iyileştirme uygulamaları, ileri teknoloji gerektiren yöntemlere göre çoğu durumda daha ekonomik bir seçenek sunmaktadır (Das, 2010). Güncel araştırmalar, zemin iyileştirme uygulamalarından kaynaklanabilecek çevresel etkilerin azaltılmasına odaklanmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen çevre dostu yaklaşımlar, genel olarak biyo-aracılı zemin iyileştirme yöntemleri kapsamında değerlendirilmektedir. Biyo-aracılı zemin iyileştirme yaklaşımı, zemin ortamında kontrollü olarak gerçekleştirilen biyokimyasal süreçlerden yararlanarak zeminin mühendislik davranışını geliştirmeyi esas almaktadır. Bu süreçlerde mikroorganizmaların faaliyetleri sonucunda oluşan biyolojik ürünler, zemin yapısında çeşitli fiziksel ve kimyasal değişimlerin meydana gelmesini sağlayarak mukavemet, rijitlik ve dayanıklılık gibi özelliklerin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır (DeJong vd., 2010a). Geleneksel stabilizasyon uygulamalarına alternatif olarak değerlendirilen bu yaklaşım, çevresel etkilerinin görece düşük olması nedeniyle yenilikçi ve sürdürülebilir bir zemin iyileştirme yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Biyo-aracılı zemin iyileştirme yaklaşımlarından biri olan biyosementasyon, canlı organizmaların metabolik faaliyetleri sonucunda mineral çökeltilerinin oluşmasına dayanmaktadır. Canlıların etkisiyle çeşitli minerallerin meydana gelmesi ve çökelmesi, biyomineralizasyon olarak tanımlanmaktadır (Boquet vd., 1973). Bu doğal süreç yalnızca belirli mikroorganizma gruplarında görülmemekte; bakterilerden protistalara ve mantarlardan bitki ve hayvanlara kadar farklı canlı gruplarında gerçekleşebilmektedir (Lowenstam, 1981). Biyomineralizasyon alanındaki çalışmalar; minerallerin hangi biyolojik ve çevresel koşullarda oluştuğunun, oluşum mekanizmalarının ve meydana gelen mineral yapıların anlaşılmasına odaklanmaktadır. Bu bilimsel birikim, biyomineral oluşumunun kontrollü biçimde yönlendirilmesine ve oluşan ürünlerin zemin iyileştirme gibi biyomühendislik uygulamalarında kullanılmasına olanak sağlamıştır (Knoll, 2003; Van Paassen vd., 2010; Whiffin vd., 2007).

Mikrobiyal olarak indüklenen kalsiyum karbonat çökelmesi (MICP), diğer adıyla biyosementasyon, zemin taneleri arasındaki bağlanmayı artırarak zeminin mühendislik davranışını geliştiren biyo-aracılı bir iyileştirme tekniğidir. Bu yöntemde kalsiyum karbonat kristalleri, özellikle tane temas bölgelerinde ve zemin parçacıklarının yüzeylerinde

çökelerek doğal bir bağlayıcı etki oluşturmaktadır (Wang & Yin, 2021). MICP sürecinin temelinde, belirli bakterilerin metabolik faaliyetleri sonucunda oluşan ürünlerin ortamda bulunan kalsiyum iyonlarıyla tepkimeye girmesi yer almaktadır. Üreolitik bakteriler tarafından ürenin hidrolize edilmesiyle karbonat iyonları CO_3^{2-}meydana gelmekte; bu iyonların kalsiyumla birleşmesi sonucunda ise $CaCO_3$ çökelmesi gerçekleşmektedir (DeJong et al., 2006). Oluşan mineral çökeltileri zemin taneleri arasında köprü görevi görerek dayanım ve rijitliğin artmasına katkı sağlamaktadır. Geleneksel çimento ve kireç esaslı stabilizasyon yöntemlerine alternatif oluşturan bu yaklaşım, bağlayıcı malzeme kullanımını ve buna bağlı karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli taşımaktadır. Böylece zemin bünyesindeki mikrobiyal faaliyetlerden yararlanılarak daha doğal ve çevresel etkisi düşük bir çimentolaşma mekanizması elde edilmektedir (DeJong et al., 2010).

MICP uygulamalarında kullanılan sementasyon çözeltisi çoğunlukla üre ve kalsiyum klorürden oluşmakta, bakteriyel gelişimin desteklenmesi amacıyla bu karışıma çeşitli besin bileşenleri de eklenebilmektedir (Stocks-Fischer et al., 1999; Whiffin, 2004; Qian et al., 2015; Tang et al., 2020; Zhang et al., 2024). Çözeltinin bileşimi ve konsantrasyonu; bakteriyel üreaz aktivitesini, kalsiyum karbonat oluşum miktarını, çökelme verimini, kristal morfolojisini ve kristallerin zemin içindeki dağılımını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sementasyon çözeltisinin uygun biçimde tasarlanması, MICP ile iyileştirilen geomalzemelerin mekanik dayanımı ve hidrolik davranışı açısından belirleyici bir role sahiptir. Literatürdeki bulgular, yüksek reaktif konsantrasyonlarının her zaman daha fazla mineral çökelmesi sağlamadığını göstermektedir. Akoğuz ve ark. (2019), kumlu zeminlerin mikrobiyal olarak indüklenen kalsit çökelmesi (MICP) yöntemiyle iyileştirilmesinde farklı kalsiyum kaynaklarının etkisini incelemiştir. Çalışmada iyileştirme solüsyonunda üre konsantrasyonu 1.5 M, kalsiyum kaynağı konsantrasyonu ise 0.75 M olarak kullanılmış; kalsiyum klorür, kalsiyum nitrat ve kalsiyum asetat alternatif kalsiyum kaynakları olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kullanılan kalsiyum kaynağının iyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Dayanım artışı ve maliyet birlikte değerlendirildiğinde, kalsiyum klorürün MICP uygulamaları açısından uygun bir seçenek olduğu belirtilmiştir. Soon et al. (2013), kumlu zeminlerde kalsiyum karbonatın ağırlıklı olarak tane temas bölgelerinde biriktiğini ve Bacillus megaterium kullanılan deneylerde 0.50 mol/L'lik sementasyon çözeltisinin 0.25 mol/L düzeyine göre daha düşük çökelme oluşturduğunu bildirmiştir. Bu sonuç, yüksek iyonik yoğunluğun bakterinin metabolik faaliyetlerini baskılayabileceğine işaret etmektedir. Benzer biçimde Nemati et al. (2005), Proteus vulgaris ile yürüttükleri çalışmada, $CaCl_2$ konsantrasyonunun 15 g/L'nin altında tutulmasının kalsiyum karbonat üretimini artırdığını, buna karşılık 20 g/L'nin üzerindeki değerlerde çökelmenin büyük ölçüde durduğunu ortaya koymuştur. Araştırmacılar ayrıca $CaCl_2$ ile üre arasındaki molar oranın çökelme verimi üzerinde etkili olduğunu ve 2.5–3.0 aralığındaki oranlarda verimin yaklaşık %99'a ulaşabildiğini belirtmiştir. Üre konsantrasyonu da bakteriyel aktiviteyi ve mineralizasyon düzeyini etkileyen temel değişkenlerden biridir. Zhao et al. (2014), 1.6 mol/L'nin altındaki değerlerde üre miktarının artırılmasının Bacillus türlerinin üreaz aktivitesini geliştirebildiğini göstermiştir. Okwadha ve Li (2010) ise başlangıç kalsiyum iyonu konsantrasyonunun 25 mmol/L'den 250 mmol/L'ye, üre konsantrasyonunun da 333 mmol/L'den 666 mmol/L'ye çıkarılmasıyla kalsiyum karbonat oluşumunda yaklaşık iki kat artış elde edildiğini raporlamıştır. Bununla birlikte bu artış, konsantrasyonların sınırsız biçimde yükseltilebileceği anlamına gelmemekte; optimum aralığın kullanılan bakteri türüne ve deney ortamına bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir. İyileştirme solüsyonu yalnızca

çökelti miktarını değil, oluşan kristallerin büyüklüğünü ve dağılım biçimini de değiştirmektedir. Al Qabany ve Soga (2013), Sporosarcina pasteurii kullanılarak yürütülen deneylerde 0.25–1.00 mol/L aralığındaki daha yüksek çözeltı konsantrasyonlarının, kuvars yüzeylerinde daha büyük kalsit kristallerinin oluşmasına ve daha heterojen bir çökelme dağılımına yol açtığını belirlemiştir. Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, MICP performansının yalnızca toplam $CaCO_3$ miktarına bağlı olmadığı; bakteriyel aktivite, reaktif oranları, iyon konsantrasyonu, kristal boyutu ve çökeltilerin zemin içindeki konumsal dağılımının eş zamanlı olarak dikkate alınması gerektiği görülmektedir.

Bu çalışmada, iyileştirme solüsyonu konsantrasyonu ile kumların tane boyu özelliklerinin MICP uygulamalarının dayanım performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda AFS 65/70, AFS 55/60 ve CEN kumları, 0.50–1.50 mol/L aralığındaki beş farklı çözelti konsantrasyonunda biyosementasyon işlemine tabi tutulmuş ve numunelerin serbest basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Böylece farklı granülometrik özelliklere sahip kumlarda uygun iyileştirme solüsyonu konsantrasyonunun belirlenmesine ve MICP etkinliğinin kum türüne bağlı olarak değerlendirilmesine yönelik deneysel bir yaklaşım ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL METHOD

Deneyler kullanılacak üç farklı kumun fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Bakteri ile iyileştirilen zemin numunelerine bakıldığında genellikle ince taneli zeminler kullanıldığı görülmektedir. Tablo 1 incelendiğinde kullanılan üç farklı kumun da ince taneli fakat CEN kumunun en iri taneli AFS 65/70 kumunun ise en ince taneli kum olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan kumlu zeminlerin fiziksel özellikleri (Ertosun Karabulut,2025)

Kum Tipi	D_{10}[mm]	D_{30}[mm]	D_{50}[mm]	D_{60}[mm]	C_u	C_c	G_s	e_{min}	e_{max}
(AFS 65/70)	0.17	0.185	0.205	0.25	1.47	0.805	2.65	0.612	0.947
(AFS 55/60)	0.185	0.22	0.296	0.31	1.676	0.844	2.65	0.574	0.885
(CEN)	0.16	0.426	0.60	0.76	4.75	1.49	2.63	0.398	0.63

Çalışmada, üre hidrolizi yoluyla kalsiyum karbonat çökelmesini sağlayabilen gram-pozitif *Sporosarcina pasteurii* bakterisi kullanılmıştır. *Sporosarcina pasteurii*, üre hidrolizini indükleyebilmesi ve yüksek alkali koşullarda yaşayabilmesi nedeniyle MICP uygulamalarında tercih edilen gram pozitif bir bakteridir. Çalışmada bakteri kültürünün çoğaltılması için öncelikle kullanılan şişe, petri kabı, pH metre ve kimyasallar hazırlanmış ve cam malzemeler otoklavda sterilize edilmiştir(Şekil 1). Kültür ortamının hazırlanmasında 15.75 g Tris bazı 1 L damıtılmış su içerisinde çözülerek 0.13 M Tris tampon çözeltisi elde edilmiş, başlangıçta yaklaşık 10.4 olan pH değeri yaklaşık 1 mL HCl ilavesiyle pH 9'a ayarlanmıştır. Hazırlanan tampon çözeltisi farklı hacimlere ayrılarak amonyum sülfat, yeast extract ve agar ilaveleriyle sıvı ve katı kültür ortamları hazırlanmış; tüm çözeltiler ayrı ayrı otoklavlanmıştır. Katı besiyeri hazırlanmasında 100 mL Tris tamponuna 2 g amonyum sülfat, diğer 100 mL Tris tamponuna ise 4 g yeast extract ve 4 g agar eklenmiş ve iki çözelti karıştırılarak yaklaşık 10–12 petri kabına dökülmüştür. Sıvı kültür ortamı için 400 mL Tris tamponu–amonyum sülfat çözeltisi ile 400 mL Tris tamponu–yeast extract çözeltisi birleştirilmiş ve elde edilen 800 mL'lik ortamın 125 mL'lik kısmına *S. pasteurii* inokule

edilmiştir. Kültür, 30 °C'de ve 150 rpm'de 2–3 gün süreyle çalkalamalı inkübatörde çoğaltılmıştır. İnkübasyon sonrasında elde edilen kültür süspansiyonundan 9 mL'lik alikotlar steril 10 mL'lik santrifüj tüplerine aktarılmış ve ilerleyen deneylerde kullanılmak üzere −80 °C'de saklanmıştır(Şekil 2).



Şekil 1. Bakterinin çoğaltılması için gerekli malzemelerin sterilizasyonu



Şekil 2. Bakterinin çoğaltılarak -80°'de muhafaza edilmiş hali

Bakteri ve iyileştirme solüsyonlarının zemin numunelerine kontrollü ve homojen biçimde uygulanabilmesi amacıyla pleksiglas borular, çok kanallı peristaltik pompa, bağlantı hortumları ve filtre kâğıtlarından oluşan bir deney düzeneği kurulmuştur. İyileştirme solüsyonunun hazırlanmasında nutrient broth, sodyum hidrojen karbonat, amonyum klorür, üre ve kalsiyum klorür kullanılmıştır. Numuneler beş gün süreyle iyileştirme işlemine tabi tutulmuş, bu süre boyunca solüsyonlar belirli aralıklarla yenilenerek numunelere ilave edilmiştir. Her bir numune için toplam 1140 mL iyileştirme solüsyonu uygulanmıştır. Yapılan deneylerde üre ve kalsiyum klorür molariteleri 0,5, 0,75, 1, 1,25 ve 1,5 M düzeylerinde değiştirilmiştir. Çözeltinin numune içerisindeki kalış süresini artırmak amacıyla drenaj vanaları kısmen kapatılmış ve uygulama 0,2 mL/dk debiyle gerçekleştirilmiştir. İyileştirme aşamasının ardından numuneler deiyonize su ile yıkanmış ve 60 °C sıcaklıktaki etüvde 14 gün süreyle kurutulmuştur. Kurutma işlemi tamamlanan numunelerin mekanik davranışları serbest basınç deneyleri ile belirlenmiştir.

Zemin numunelerine uygulanacak bakteri ve iyileştirme solsüyonlarının kontrollü biçimde aktarılması amacıyla, akış hızının hassas olarak ayarlanmasına olanak sağlayan peristaltik pompa kullanılmıştır. Pompanın farklı deney aşamalarında 2 mL/dk ve 0,2 mL/dk gibi düşük debilerde çalışabilmesi, solüsyonların numunelere belirlenen hızlarda verilmesini sağlamıştır. Aynı anda birden fazla numunenin işleme alınabilmesi ve bakteri çözeltisinin dış ortamla temasının sınırlandırılması amacıyla sekiz kanallı pompa sistemi tercih edilmiştir. Pompa başlıklarında bulunan kasetlere 11 cm uzunluğunda kesilen uygun hortumlar yerleştirilmiş, bu hortumların bağlantı hortumlarıyla birleştirilmesinde plastik konnektörlerden yararlanılmıştır (Şekil 3). Deneylere başlanmadan önce, pompa üzerinde ayarlanan debi ile numunelere aktarılan gerçek çözelti miktarının uyumlu olup olmadığını belirlemek amacıyla sistemin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Hortumların peristaltik pompa kasetine yerleştirilmesi (Ertosun Karabulut,2025)

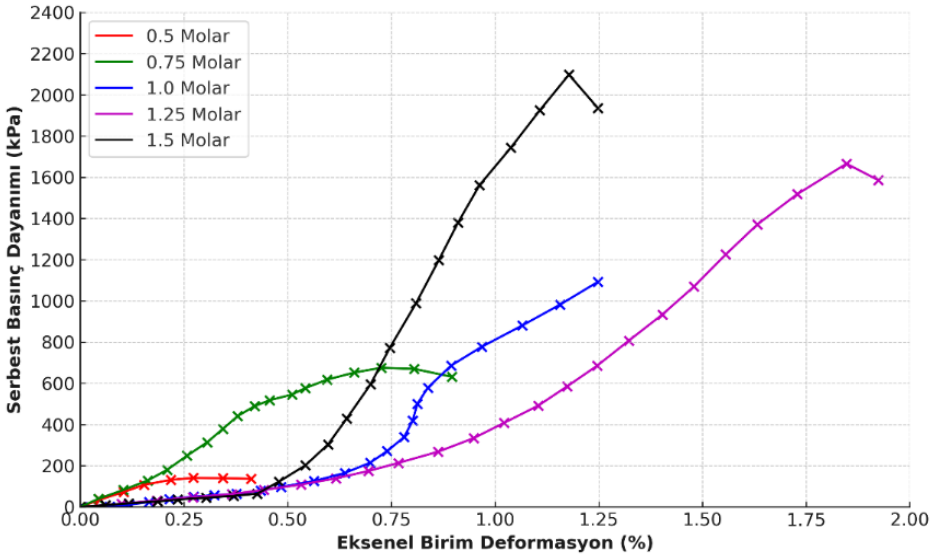
Tüm hazırlıklar tamamlandıktan sonra deney düzeneği hazır hale getirilerek bakteri ve iyileştirme solüsyonları verilerek zeminlerin iyileştirme süreç başlatılmıştır (Şekil 4).



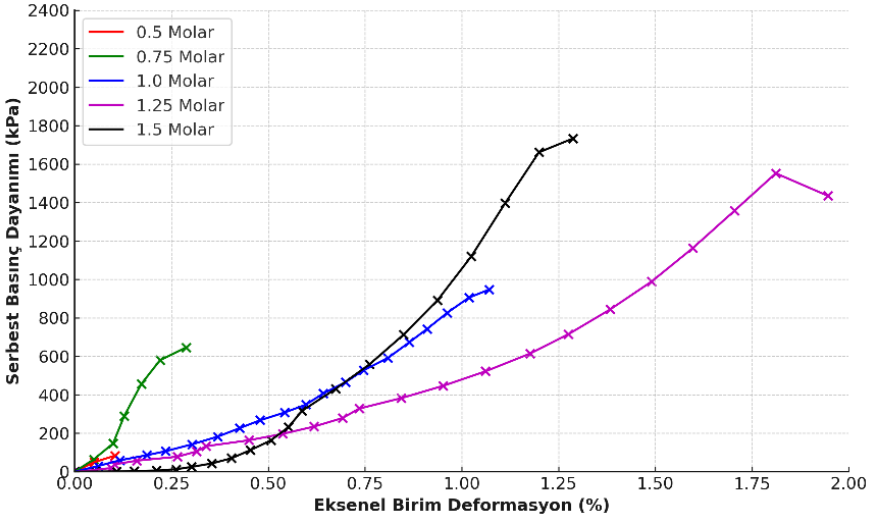
Şekil 4. Deney düzeneği

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

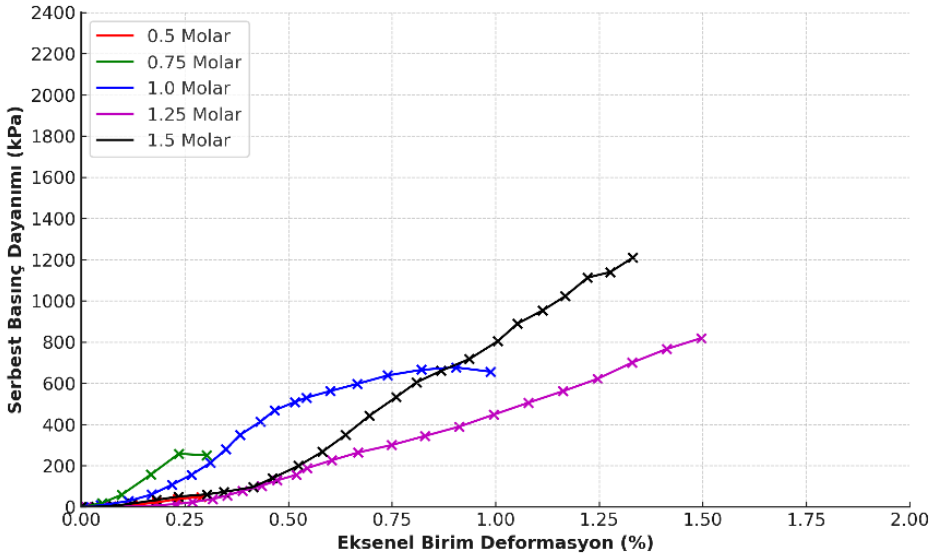
Çalışmada, MICP uygulamasının etkinliği 0,50, 0,75, 1,00, 1,25 ve 1,50 M olmak üzere beş farklı molarite düzeyinde araştırılmıştır. Belirlenen molarite değerleri AFS 65/70, AFS 55/60 ve CEN olmak üzere üç farklı kum türüne ayrı ayrı uygulanmıştır. Tüm numuneler gevşek durumda, (D_r=%35-40) bağıl sıkılık aralığında hazırlanmış; iyileştirme işlemi beş gün süreyle ve 0,2 mL/dk çözelti akış hızında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan iyileştirme solüsyonunda tüm kimyasal bileşenler sabit tutulurken, yalnızca üre ve $CaCl_2$ molariteleri deneysel değişken olarak ele alınmıştır. Farklı kum türleri ve molarite düzeyleri sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 5'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Serbest basınç deneyleri ASTM D2166 esas alınarak gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. MICP ile iyileştirilen üç farklı kumda molarite etkisi (a) AFS 65/70 kumu, (b) AFS 55/60 kumu, (c) CEN kumu (Ertosun Karabulut,2025)

Şekil 5'de gösterilen gerilme–deformasyon eğrileri değerlendirildiğinde, üre ve $CaCl_2$ molaritelerinin numunelerin mekanik davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Her üç kum türünde de en düşük serbest basınç dayanımı 0,50 M düzeyinde elde edilmiştir. Bu molaritede dayanım artışının sınırlı kalması ve numunelerin düşük eksenel deformasyon seviyelerinde hızlı biçimde şekil değiştirmesi, meydana gelen kalsiyum karbonat çökelmesinin taneler arasında yeterli bağlanmayı sağlayamadığını göstermektedir. Dolayısıyla 0,50 M uygulanan iyileştirme solüsyonunun zeminin dayanım ve rijitlik özelliklerini geliştirmede yetersiz kaldığı görülmektedir. 0,50 M molaritedeki tüm kum türlerinde oldukça düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu koşulda en yüksek serbest basınç dayanımı 141,5 kPa ile AFS 65/70 kumunda, en düşük değer ise 51,6 kPa ile CEN kumunda ölçülmüştür. Üre ve $CaCl_2$ molaritelerinin 0,75 M'a yükseltilmesiyle serbest basınç dayanımında 0,50 M düzeyine kıyasla artış meydana gelmiştir. AFS 65/70 ve AFS 55/60 kumlarında serbest basınç dayanımları sırasıyla 677,4 ve 649,5 kPa'a ulaşırken, CEN kumunda bu değer 271,5 kPa olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, eksenel deformasyon davranışının 0,50 M molaritedeki numunelere benzer bir eğilim göstermesi, bu molarite düzeyinde oluşan çimentolanmanın henüz yeterli rijitlik sağlayamadığını ortaya koymaktadır. Molaritenin 1,00 M'a çıkarılmasıyla üç kum türünde de dayanım değerleri belirgin biçimde yükselmiş ve göçme anındaki eksenel deformasyon azalmıştır. Bu değişim, kum taneleri arasında oluşan kalsit bağlarının etkisinin arttığına, dolayısıyla MICP uygulamasının mekanik iyileştirme açısından daha etkin hâle geldiğini göstermektedir. Daha yüksek molaritelerin kullanıldığı 1,25 ve 1,50 M deneylerinde numunelerin daha rijit ve gevrek bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Molarite artışına bağlı olarak serbest basınç dayanımının yükseldiği ve en yüksek dayanım değerlerine 1,50 M düzeyinde ulaşıldığı görülmüştür. Bu sonuç, artan üre ve $CaCl_2$ molaritesinin uygun deney koşulları altında kalsiyum karbonat çökelmesini ve taneler arası bağlanmayı güçlendirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek molaritede elde edilen rijit yapının deformasyon kapasitesini sınırlandırdığı ve numunelerde daha belirgin kırılma yüzeylerinin oluşmasına neden olduğu

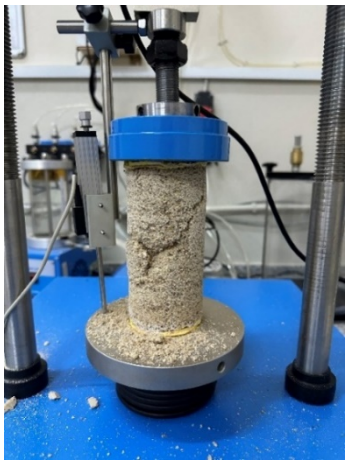
gözlenmiştir. 1,50 M e gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonrasında numunelerde meydana gelen çatlak ve kırılma biçimleri Şekil 6'da sunulmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6. MICP ile iyileştirilen üç farklı kumda 1,5 M etkisinde kırılma çatlakları (a) AFS 65/70 kumu, (b) AFS 55/60 kumu, (c) CEN kumu (Ertosun Karabulut,2025)

Üre ve $CaCl_2$ molaritesinin 1,00, 1,25 ve 1,50 M düzeylerine çıkarılmasıyla serbest basınç dayanımının düzenli olarak arttığı görülmüştür. En yüksek dayanımlar 1,50 M elde edilmesine karşın, bu numunelerin daha rijit ve gevrek bir kırılma davranışı sergilediği belirlenmiştir. Buna karşılık 1,25 M ile iyileştirilen numuneler, yüksek dayanım değerlerini korurken 1,50 M numunelerine kıyasla daha yüksek deformasyon kapasitesi göstermiştir. Bu nedenle yalnızca maksimum dayanım dikkate alındığında 1,50 M öne çıkmasına rağmen, dayanım ve kırılma davranışının birlikte değerlendirilmesi sonucunda 1,25 M daha dengeli bir uygulama koşulu sunduğu düşünülmektedir. Kum türleri karşılaştırıldığında, hemen hemen tüm molarite düzeylerinde en yüksek dayanımlar AFS 65/70, en düşük dayanımlar ise CEN kumunda elde edilmiştir. Bu farklılığın, kumların tane boyutu dağılımı ve tane temas yapılarıyla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Daha ince taneli AFS 65/70 kumunda daha fazla tane temas noktası bulunması, çökeltilen kalsiyum karbonatın taneler arasında daha yaygın bağlar oluşturmasına katkı sağlamış olabilir. Buna karşılık daha iri taneli CEN kumunda temas noktalarının daha sınırlı olması, çimentolanma etkinliğini ve buna bağlı dayanım artışını azaltmış olabilir.

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç farklı kum türünün MICP yöntemiyle iyileştirilmesinde üre ve $CaCl_2$ molaritesinin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, iyileştirme solüsyonu molaritesindeki artışın genel olarak numunelerin mekanik dayanımını yükselttiğini göstermiştir. Özellikle 0,50 ve 0,75 molaritelerde dayanım artışının sınırlı kaldığı, buna karşılık 1,00 M ve üzerindeki uygulamalarda daha belirgin bir iyileşme meydana geldiği belirlenmiştir. MICP uygulaması sonucunda zemin gözeneklerinde oluşan kalsiyum karbonat çökeltileri, kum tanelerinin temas noktalarında bağlayıcı köprüler meydana getirerek zemin yapısının bütünlüğünü artırmıştır. Bu bağlanma mekanizması, numunelerin serbest basınç dayanımında önemli artışlara yol açmıştır. Yüksek UCS değerleri, taneler arasında daha fazla çimento benzeri bağ oluştuğunu ve numune yapısının daha rijit bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, rijitlikteki artışın özellikle yüksek molaritelerde deformasyon kapasitesini azalttığı ve daha gevrek bir kırılma davranışına neden olduğu görülmüştür. En yüksek serbest basınç dayanımları 1,50 molaritede elde edilmiştir. Ancak bu koşulda numunelerin daha kırılgan davranması, yalnızca maksimum dayanımın optimum uygulama koşulunun belirlenmesi için yeterli olmadığını ortaya koymuştur. Buna karşılık 1,25 molaritede hazırlanan numuneler, yüksek dayanım ile daha dengeli deformasyon davranışını birlikte sergilemiştir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan kumlar ve deney koşulları açısından 1,25 molaritede hazırlanan solüsyonla mekanik performans bakımından daha uygun olduğu görülmüştür. Kum türleri arasında elde edilen dayanım farklılıklarının tane boyutu, temas noktalarının sayısı ve boşluk yapısıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Daha ince tane dağılımına sahip AFS 65/70 kumunda daha yüksek dayanımlar elde edilirken, daha iri taneli CEN kumunda daha düşük değerler belirlenmiştir. Bu durum, kalsiyum karbonat çökeltilerinin tane temas bölgelerinde oluşturduğu bağların kumun granülometrik özelliklerinden etkilendiğini göstermektedir. Sonuç olarak, MICP uygulamasının etkinliği yalnızca iyileştirme solüsyonunun molaritesine bağlı değildir. Bakteri yoğunluğu, kumun tane boyutu dağılımı, boşluk oranı, solüsyon akış

hızı, uygulama süresi ve çökelmenin numune içerisindeki dağılımı da nihai dayanım üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle optimum MICP koşullarının belirlenmesinde maksimum serbest basınç dayanımının yanı sıra numunelerin deformasyon kapasitesi, kırılma biçimi ve çimentolanmanın homojenliği birlikte değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

Akoğuz, H. (2019). Mikrobiyal aracılı kalsit çökelmesi ile zeminlerin biyolojik iyileştirilmesinde bazı değişkenlerin etkisinin araştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.

Archibong, G. A., Sunday, E. U., Akudike, J. C., Okeke, O. C., & Amadi, C. (2020), "A review of the principles and methods of soil stabilization", International Journal of Advanced Academic Research| Sciences, 6(3), 2488-9849.

ASTM, D. (2010). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International.

Boquet, E., Boronat, A., & Ramos-Cormenzana, A. (1973), "Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon" , Nature, 246(5434), 527-529.

Das, B. M. (2010), "Principles of Foundation Engineering (7 b.)", Cengage Learning.

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. (2010a), "Bio-mediated soil improvement" , Ecological engineering, 36(2), 197-210.

Ertosun Karabulut, Z. (2025), "Mikrobiyolojik Yöntemlerle İyileştirilen Kumlu Zeminlerin Dinamik ve Mühendislik Özelliklerinin Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi" [Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi].

Knoll, A. H. (2003) , "Biomineralization and evolutionary history" , Reviews in mineralogy and geochemistry, 54(1), 329-356.

Lowenstam, H. A. (1981), "Minerals formed by organisms" , Science,, 211(4487), 1126-1131.

Nemati, M., Greene, E. A., & Voordouw, G. (2005), "Permeability profile modification using bacterially formed calcium carbonate: comparison with enzymic option" , Process Biochemistry, 40(2), 925-933.

Okwadha, G. D., & Li, J. (2010), "Optimum conditions for microbial carbonate precipitation" , Chemosphere, 81(9), 1143-1148.

Qabany, A. A., & Soga, K. (2013), "Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils", In Bio-and chemo-mechanical processes in geotechnical engineering: géotechnique symposium in print 2013 . (s. (pp. 107-115)).

Qian, C. X., Wang, A. H., & Wang, X. (2015), "Advances of soil improvement with bio-grouting" , Rock and Soil Mechanics, 36(6), 1537-1548.

Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999), "Microbiological precipitation of CaCO3" , Soil Biology and Biochemistry, 31(11), 1563-1571.

Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., & Ling, H. S. (2013), "Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation" , KSCE Journal of Civil Engineering, 17(4), 718-728.

Tang, C. S., Yin, L. Y., Jiang, N. J., Zhu, C., Zeng, H., Li, H., & Shi, B. (2020), "Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review" , Environmental Earth Sciences, 79, 1-23.

Wang, H. L., & Yin, Z. Y. (2021), "Unconfined compressive strength of bio-cemented sand: state-of-the-art review and MEP-MC-based model development" , Journal of Cleaner Production, 315, 128205.

Whiffin, V. S. (2004). Microbial CaCO3 precipitation for the production of biocement . Doctoral dissertation, Murdoch University.

Whiffin, V. S., Van Paassen, L. A., & Harkes, M. P. (2007) , "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique" , Geomicrobiology Journal, 24(5), 417-423.

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.

Zhao, Q., Li, L., Li, C., Li, M., Amini, F., & Zhang, H. (2014), "Factors affecting improvement of engineering properties of MICP-treated soil catalyzed by bacteria and urease" , Journal of Materials in Civil Engineering,, 26(12), 04014094.

Zhang, J., Xiao, Y., Cui, H., He, X., & Liu, H. (2024), "Dancing with crystals: Bacterial functions and interactions in biomineralization" , Biogeotechnics, 2, 100084.