



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Mikrobiyal Aracılı Kalsit Çökmesi (MICP) Tekniğinde Çimentolama Solüsyonu Enjeksiyonuna Sodyum Aljinat Yoğunluğunun Etkisinin İncelenmesi

 Harun AKOĞUZ<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Erzinan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzinan, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: [hakoguz@erzincan.edu.tr](mailto:hakoguz@erzincan.edu.tr)

DOI: 10.29130/dubited.1143123

### ÖZ

Günümüzde zeminlerin iyileştirilmesi için birçok farklı metot kullanılmaktadır. Bu metotların birçoğu çevreye zararlı bileşenler içerdiğinden alternatif zemin iyileştirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda zemin iyileştirme yöntemlerine çevreci bir yaklaşım olarak ortaya çıkan Mikrobiyal Aracılı Kalsit Çökmesi (MICP) tekniği ile zeminlerin mühendislik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Ancak MICP tekniği ile zeminlerin iyileştirilmesinde karşılaşılan problemlerden biri uygulama süresidir. Uygulama süresi genelde oldukça fazla olan MICP tekniği için farklı uygulamalara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Bu amaçla çalışmamızda çimentolama solüsyonuna (kalsiyum klorür) ilave edildiğinde uygulama süresini azaltabilecek bir biyopolimer türü olan sodyum aljinatın enjeksiyon özellikleri incelenmiştir. Farklı yoğunluklarda hazırlanan sodyum aljinat solüsyonu zemine enjeksiyon yöntemiyle verilerek zemin içerisindeki dağılımı uygulama süresince takip edilmiş ve sonuçlar permeabilite deneyi ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak çimentolama solüsyonuna ilaveten sodyum aljinat kullanımının tüm yoğunluklarda (0.1 g/l, 0.3 g/l, 0.6 g/l) permeabilite üzerinde olumlu sonuçları olmuştur. Daha düşük yoğunluklarda ise (0.1 g/l) uygulama süresi biraz daha artmış ancak daha iyi geçirimsizlik sonuçlarıyla beraber daha homojen bir dağılım elde edilebilmiştir. SEM analizleri sonucunda oluşan jel yapının taneler arasında bağ oluşturduğu gözlemlenmiştir. MICP tekniği ile zeminlerin iyileştirmesinde düşük yoğunluklarda (en fazla 0.1 g/l) sodyum aljinat kullanımının uygulama süresine olumlu etkisinin olabileceği değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sodyum aljinat, Zemin İyileştirme, MICP

## Investigation of the Effect of Sodium Alginate Density on Cementing Solution Injection in Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) Technique

### ABSTRACT

Today, many different methods are used to improve soils. Since many of these methods contain environmentally harmful components, alternative soil improvement methods are needed. In this context, the engineering properties of soils can be improved with the Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) technique, which emerged as an environmentally friendly approach to soil improvement methods. However, one of the problems encountered in improving soils with the MICP technique is the application time. It is understood that different applications are needed for the MICP technique, which has a very long application time. For this purpose, the injection properties of sodium alginate, a biopolymer type that can reduce the application time when added to the

cementing solution (calcium chloride), were investigated. Sodium alginate solution prepared in different densities was injected into the soil. Its distribution in the soil was followed during the application; the results were evaluated by permeability test and Scanning Electron Microscope (SEM) analysis. As a result, using sodium alginate in addition to the cementing solution had positive results on permeability at all densities (0.1 g/l, 0.3 g/l, 0.6 g/l). At lower densities (0.1 g/l), the application time was slightly longer, but a more homogeneous distribution could be obtained with better permeability results. It was observed that the gel structure formed as a result of SEM analyses formed a bond between the grains. It has been evaluated that using sodium alginate at low densities (up to 0.1 g/l) in soil improvement applications made with the MICP technique may positively affect the application time.

*Keywords: sodium alginate, Soil Improvement, MICP*

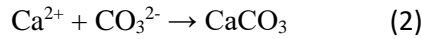
## **I. GİRİŞ**

Zeminlerin iyileştirilmesinde günümüzde birçok farklı metot kullanılmaktadır. Bu metotlar ile zeminlerin mukavemet, geçirimsizlik vb. mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Bu metotlardan kullanımında çoğunlukla çevre kirliliği vb. problemlerle karşılaşmaktadır. Örneğin yapılan bir araştırmada artan çimento kullanımının çevreye zarar verdiği ve bu zararların önlenmesi için çeşitli teknolojilerin geliştirilmeye çalışıldığı belirtilmektedir [1]. Bu kapsamda zeminlerin iyileştirilmesinde Mikrobiyal Aracılı Kalsit Çökmesi (MICP) yeşil, sürdürülebilir ve doğa dostu bir teknik olarak karşımıza çıkmakta [2] ve MICP üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

MICP bir dizi reaksiyon sonucunda gerçekleşmektedir. Zemin içerisine dahil edilen üreaz aktif enzime sahip bakteri ürenin hidrolizini gerçekleştirmektedir. Bu reaksiyon sonucunda amonyum ve karbonat oluşmaktadır [3]:



Sonrasında kalsiyum kaynağı (sıklıkla kalsiyum klorür) varlığında, kalsiyum iyonları ile karbonat iyonları reaksiyona girerek  $\text{CaCO}_3$  kristallerini meydana getirmektedir [3]:



MICP ile yapılan çalışmalarda çimentolama solüsyonunda genellikle kalsiyum klorür kullanılmaktadır [4]. Yapılan çalışmalarda oldukça fazla uygulama süresine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin Dagliya et al., [5] yapmış oldukları çalışmada çimentolama solüsyonunu 24 saat aralıklı olarak 7, 14 ve 21 gün süresince uygulamışlardır. Benzer şekilde bir diğer çalışmada ise çimentolama solüsyonu iki günde bir olmak üzere 14 ve 28 gün boyunca uygulanmıştır [6]. Buradan uygulama süresini azaltacak yöntemlere ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Akoğuz [7] yapmış olduğu çalışmada çimentolama solüsyonuna magnezyum klorür eklenerek uygulama süresinin kısaltılabileceğini belirtmiştir. Bu amaçla uygulama süresini kısaltmada faydalı olabilecek bir biyopolimer türü olan sodyum aljinatın enjeksiyonu üzerine çalışma yapılmıştır. Literatürde zeminlerin iyileştirilmesinde sadece sodyum aljinat [8], sodyum aljinat ve kalsiyum klorür [9] ve Enzim Aracılı Kalsit Çökmesi (EICP) ile sodyum aljinat [10, 11] üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalarda genellikle sodyum aljinat zemine karıştırma metodu ile uygulanmıştır. MICP ile yapılan çalışmaların çoğunda ise enjeksiyon yöntemi kullanılmaktadır [12]–[15]. Kalsit çökmesinin verimli ve etkili olabilmesi için enjeksiyon sistemi gibi çeşitli parametrelerin süreç boyunca kontrol edilmesi gereklidir [16]. Sodyum aljinatın enjeksiyon yöntemi ile MICP-EICP uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabilmesi için enjeksiyon parametrelerinin araştırılması gerekmektedir.

Bu amaçla çalışmamızda sodyum aljinat ve kalsiyum klorürün oluşturduğu jel yapının zemine enjeksiyonu incelenmiştir. Farklı yoğunluklarda hazırlanan sodyum aljinat kalsiyum klorürle birlikte zemine enjekte edilmiş ve uygulama süresince takip edilmiştir. Gıda boyası ile renklendirilen sodyum

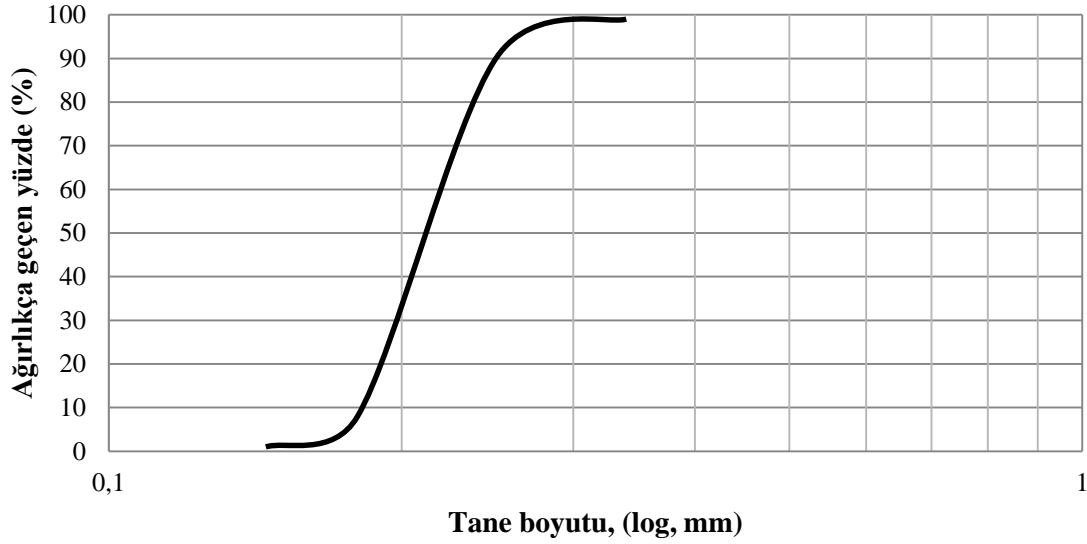
Aljinatın zemin içerisinde dağılımı ve permeabilite sonuçları değerlendirilmiş ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile oluşan yapı mikro ölçekte gözlemlenmiştir.

## **II. MATERYAL METOT**

### **A. MATERYAL**

#### **A.1. Zemin**

Çalışmada kullanılan silis kum zeminin ASTM E 11 [17] standardına göre yapılan tane çapı dağılım eğrisi Şekil 1'de ve elek analizi sonuçları Tablo 1 'de verilmiştir. Elek analizi deneyi sonuçlarına göre zemin sınıfı SP (kötü derecelenmiş kum zemin) olarak belirlenmiştir. Zeminler 38 mm çapındaki PVC kalıba 90 mm yükseklikte ve yaklaşık %50 rölaf sıkılıkta konulmuştur.



*Şekil 1. Silis kum zemine ait granülometri eğrisi*

*Tablo 1. Deneylerde kullanılan kum zeminin indeks özellikleri*

Özellik	Birim	Değer
D <sub>10</sub> <sup>a</sup>	mm	0.18
D <sub>30</sub> <sup>a</sup>	mm	0.20
D <sub>60</sub> <sup>a</sup>	mm	0.22
C <sub>u</sub> <sup>a</sup>	-	1.22
C <sub>c</sub> <sup>a</sup>	-	1.01
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)	-	SP

<sup>a</sup>ASTM D2487-11 [18]

#### **A.2. Kalsiyum Klorür ve Sodyum Aljinat**

Çalışmada kalsiyum klorür 0,75 M (molar) olarak kullanılmıştır [7]. Sodyum aljinat ise yoğunluğun etkisinin belirlenmesi amacıyla 0,1 g/l, 0,3 g/l ve 0,6 g/l olarak kullanılmıştır. Sodyum aljinat solüsyonu, zemin içerisinde kalsiyum klorürle reaksiyona girdiğinde oluşan jel dağılımının görsel

olarak daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla uygulanmadan önce gıda boyası (kırmızı) ile renklendirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Sodyum aljinat solüsyonu hazırlanması (gıda boyası ile renklendirme işlemi)

### A.3. Permeabilite Deneyi

Zeminin iyileştirme öncesinde ve sonrasında permeabilite katsayıları sabit düzeyli permeabilite deneyi prensibinde yürütülmüştür. Uygulama öncesi silis kum zeminin permeabilite katsayısı  $8,98 \times 10^{-2}$  cm/s olarak belirlenmiştir. İyileştirme sonrasında zemin örnekleri suya doymun hale getirilmiş ve alttan süzülen su debisi sabitlendiğinde kapta biriken su miktarı ve hidrolik eğim dikkate alınarak permeabilite hesaplanmıştır.

### A.4. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi

Zeminlerin iyileştirme sonrasında oluşan yapıların mikro ölçekte değerlendirilebilmesi amacıyla SEM analizi yapılmıştır. SEM analizi Quanta 450 FEG cihazı ile yapılmıştır. Analizde kullanılan örnekler zemin numunesinin orta bölgesinden alınmış ve görüntüler kaplama yapılmadan 20 kV voltaj seviyesinde elde edilmiştir.

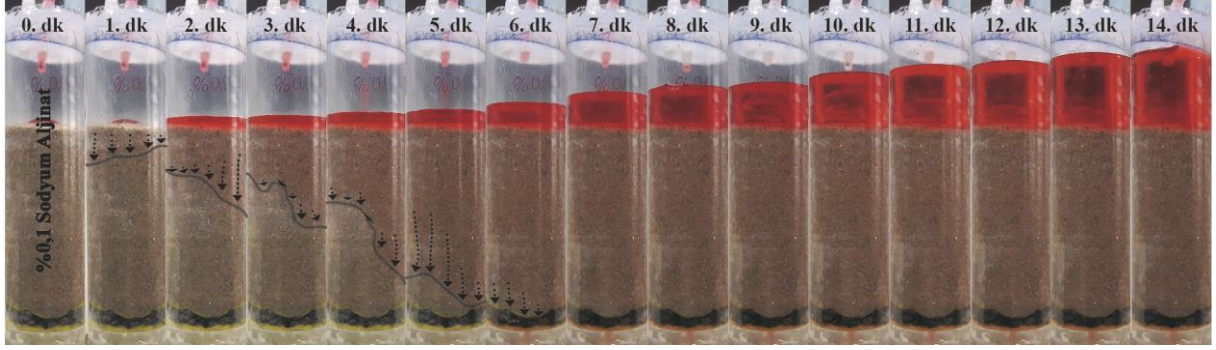
## B. METOT

Zeminlerin bulunduğu kalıbın alt kısmına zemin tanelerinin süzülmemesi amacıyla çakıl filtre ve sünger yerleştirilmiştir. Kalsiyum klorür ve sodyum aljinat solüsyonları kalıbın üst kısmından peristaltik pompalar vasıtasıyla verilmiştir. Öncelikle 0,75 M kalsiyum klorür yaklaşık 30 dk. süresince alttan süzülen solüsyonun üstten tekrar verilmesi ile çevrim şeklinde uygulanmıştır. Böylece zemin kalsiyum klorür solüsyonu açısından doymun hale getirilmiştir. Sonrasında üç farklı yoğunlukta sodyum aljinat (0,1 g/l, 0,3 g/l ve 0,6 g/l) uygulanmıştır. Sodyum aljinat solüsyonu uygulanırken enjeksiyon basıncı 2 bara ulaştığında deney durdurulmuştur. Deney tamamlandıktan sonra zeminlerin geçirimsizlikleri belirlenmiştir. Geçirimsizlik deneyi sonrasında zemin örneklerinin SEM analizi yapılmıştır.

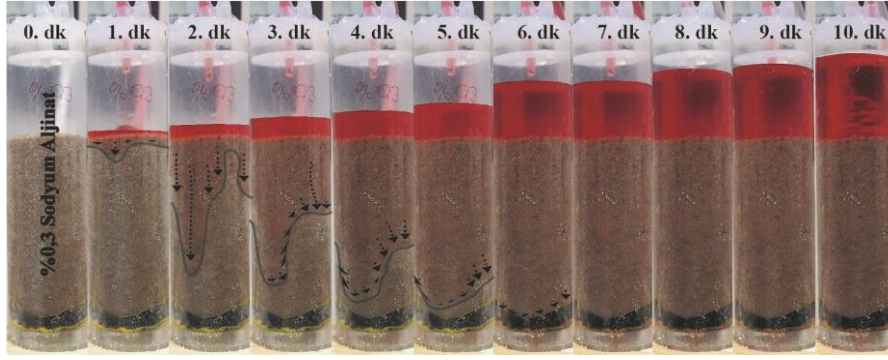
## III. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Uygulama yapılan zeminlerin 1 dk ara ile alınan görselleri Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Farklı yoğunluklarda hazırlanan sodyum aljinatın zeminlerin içerisinden süzülerek çıkış bölgesine gelmesi tüm numunelerde benzer sürelerde (yaklaşık 6 dk.) gerçekleşmiştir. MICP tekniğiyle çimentolama solüsyonunun 2 bar basınca kadar verildiği belirtildiğinden [19] her bir sodyum aljinat

yoğunluğu için yaklaşık 2 bar basınca ulaşıldığında uygulama durdurulmuştur. Uygulamanın durdurulması her bir yoğunluk için farklı sürelerde gerçekleşmiştir. En uzun süre 0,1 g/l (14 dk.) ve en kısa süre 0,6 g/l (8 dk.) yoğunlukta sodyum aljinat uygulanan örneklerde gerçekleşmiştir.



Şekil 3. 0,1 g/l Sodyum aljinat enjeksiyonunun zamana bağlı dağılımı



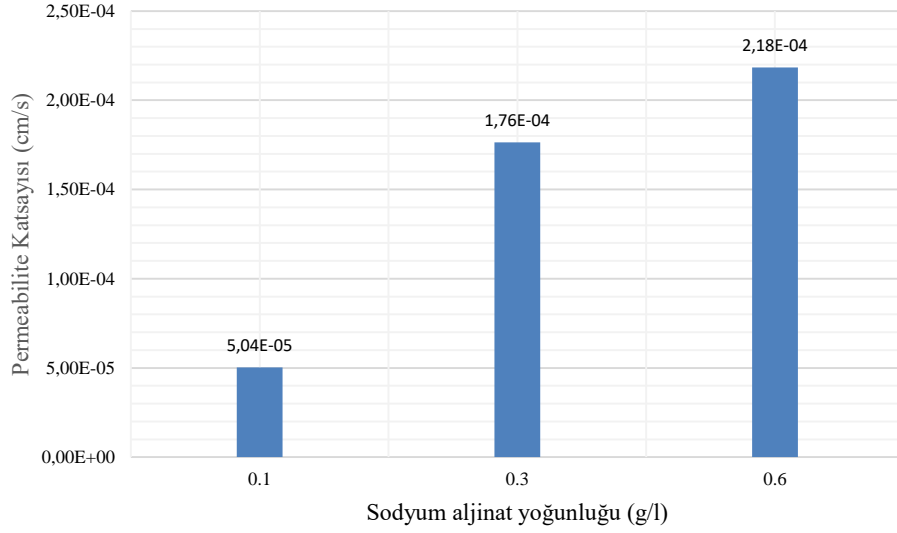
Şekil 4. 0,3 g/l Sodyum aljinat enjeksiyonunun zamana bağlı dağılımı



Şekil 5. 0,6 g/l Sodyum aljinat enjeksiyonunun zamana bağlı dağılımı

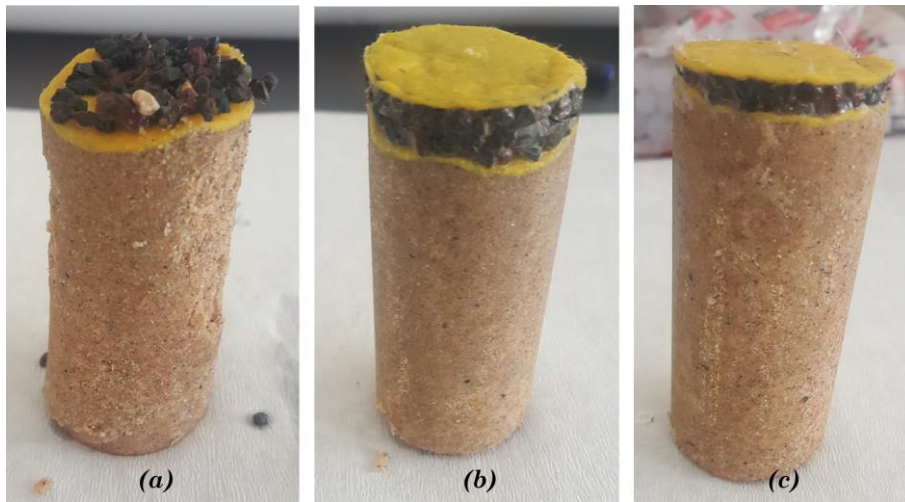
Uygulama yapılan zeminlerin permeabilite deney sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre uygulama yapılan tüm zeminlerde permeabilitede düşüş elde edilmiştir. Şekil 5'te 0,6 g/l uygulanan numunede diğer yoğunluklara göre zamana bağlı olarak daha homojen bir ilerleme görülse de daha düşük yoğunluklardan daha iyi sonuçlar elde edilebilmiştir. 0,1 g/l sodyum aljinat uygulanan zemin örneğinde enjeksiyon basıncının 2 bar olması için gereken süre diğer yoğunluklara göre daha uzun sürse de geçirimsizlik açısından daha iyi sonuçlar elde edilebilmiştir. Zhao et al., [20] çalışmalarında kil zemin üzerinde sodyum aljinat etkisini araştırmış ve sodyum aljinat yoğunluğu arttıkça permeabilitenin daha düşük değerlere sahip olduğunu belirtmiştir. Çalışmamızda ise genel olarak sodyum aljinat yoğunluğu azaldıkça permeabilitenin daha düşük değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Buradan farklı zeminlerde farklı uygulamalara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Düşük

yoğunluklarda enjeksiyon basıncının daha uzun sürede artması ve yoğunluk azaldıkça zemin örneklerinin daha düşük permeabiliteye sahip olmalarının zeminde oluşan yapının daha homojen gerçekleştiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. MICP tekniğiyle yapılan uygulamalarda en büyük sorunlardan birinin homojen kalsit dağılımı [21] olduğu göz önüne alınırsa sodyum aljinat yoğunluğunun uygulamada kritik öneme sahip olduğu söylenebilir. MICP uygulamalarında uygulama sürelerinin azaltılmasında sodyum aljinat biyopolimerinin oluşturduğu jel yapının uygulama süresinin kısaltılmasında etkili olabileceği ve sodyum aljinat yoğunluğunun düşürülmesinin sonuçlar üzerinde olumlu etki gösterebileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 6. Permeabilite deney sonuçları

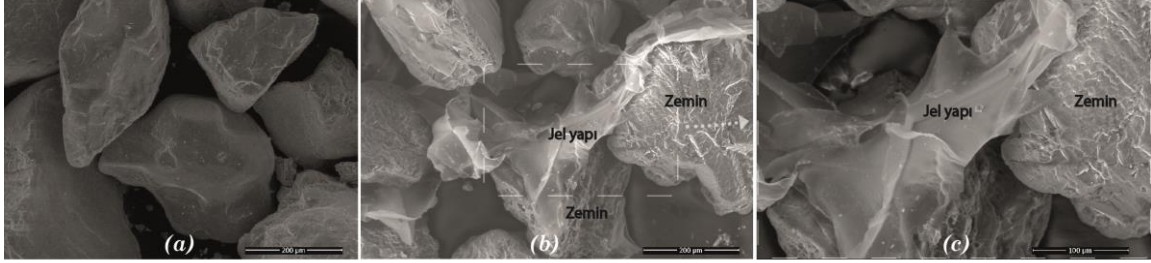
Zemin örneklerinin kalıplardan çıkarıldıktan sonraki görselleri Şekil 7’de sunulmuştur. Zemin örnekleri kalıptan çıkarıldığında dağılmamış ancak mukavemet (serbest basınç deneyi) elde edilememiştir. Sadece kalsiyum klorür ve sodyum aljinat kullanımının permeabilite üzerinde daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. MICP tekniği ile birlikte sodyum aljinat ve kalsiyum klorür kullanılmasıyla zemin taneleri arasındaki bağların artacağı böylece mukavemet açısından da daha iyi sonuçlar elde edilebileceği değerlendirilmektedir.



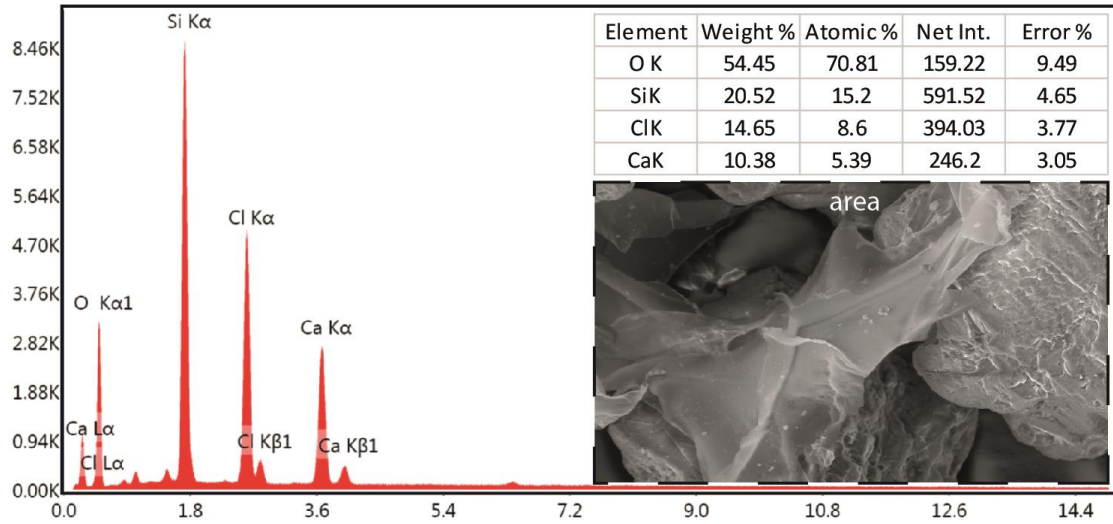
Şekil 7. İyileştirme sonrası zemin örneklerine ait görseller

Şekil 8’de iyileştirilmeyen zemin numunesi ile iyileştirilen zemin numunesi karşılaştırıldığında 0,1 g/l uygulanan zeminin SEM analizinde oluşan jel yapının zemin taneleri arasında bağ oluşturduğu ve

boşlukları doldurduğu anlaşılmaktadır. Şekil 9'de jel yapının olduğu bölgede yapılan EDS (Enerji dispersiv spektrum) analizi sonuçlarında Si elementi silis kum zeminden kaynaklanmaktadır. Cl ise kalsiyum klorürün suda çözünmesi sonucunda oluştuğundan pik vermiştir. Ca elementi de yine benzer şekilde kalsiyum klorürün suda çözünmesi sonucunda pik göstermiştir.



Şekil 8. SEM analiz sonuçları (a) İyileştirilmeyen numune (b) İyileştirilen numune 500x (c) İyileştirilen numune 1000x



Şekil 9. EDS analiz sonuçları

## IV. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada farklı yoğunluklarda hazırlanan sodyum aljinat solüsyonu ile MICP tekniğinde çimentolama solüsyonunda bulunan kalsiyum klorürün oluşturduğu jel yapının enjeksiyon özellikleri incelenmiştir. Çevrim şeklinde yapılan uygulamada bir süre sonra oluşan jel yapı zemin içerisinde enjeksiyon basıncını artırmış ve her bir yoğunluk için uygulama sonucunda zemin örneklerinin permeabilitesinde düşüşler elde edilebilmiştir. Sodyum aljinat yoğunluğu azaldıkça enjeksiyon uygulaması sonucunda belirlenen permeabilite katsayıları da azalmıştır. İki bar enjeksiyon basıncına en uzun sürede ulaşan 0,1 g/l sodyum aljinat solüsyonu ile en düşük permeabilite sonucu elde edilmiştir. Sodyum aljinat ve kalsiyum klorürün birlikte kullanılacağı MICP tekniği ile yapılan zemin iyileştirme uygulamalarında, düşük yoğunluklarda (en fazla 0,1 g/l) sodyum aljinat kullanımının daha homojen bir yapı oluşturacağı ve jel haline gelen bu karışımın daha kısa sürede başarılı sonuçlar verebileceği değerlendirilmektedir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] N. Bozkurt ve N. Sayın, “Günümüz Teknolojileri Çerçevesinde Çimento Dünyasındaki Gelişmelerin Araştırılması,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9, s. 4, ss. 1159–1173, 2021.
- [2] A. Sharma and R. R., “Study on effect of Microbial Induced Calcite Precipitates on strength of fine grained soils,” *Perspect Sci (Neth)*, vol. 8, pp. 198–202, 2016.
- [3] L. Cheng, M. A. Shahin, R. Cord-Ruwisch, M. Addis, T. Hartanto, and C. Elms, “Soil stabilisation by microbial-induced calcite precipitation (MICP): investigation into some physical and environmental aspects,” presented at *7th international congress on environmental geotechnics*, Melbourne, Australia, 2014.
- [4] L. Cheng, R. Cord-Ruwisch, and M. A. Shahin, “Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 50, no. 1, pp. 81–90, 2013.
- [5] M. Dagliya, N. Satyam, and A. Garg, “Experimental Study on Optimization of Cementation Solution for Wind-Erosion Resistance Using the MICP Method,” *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1770, 2022.
- [6] M. Sharma, N. Satyam, and K. R. Reddy, “Investigation of various gram-positive bacteria for MICP in Narmada Sand, India,” *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 220–234, 2021.
- [7] H. Akoğuz, “Mikrobiyal aracılı kalsit çökelmesi ile zeminlerin biyolojik iyileştirilmesinde bazı değişkenlerin etkisinin araştırılması,” Doktora, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2019.
- [8] M. G. Arab, R. A. Mousa, A. R. Gabr, A. M. Azam, S. M. El-Badawy, and A. F. Hassan, “Resilient Behavior of Sodium Alginate–Treated Cohesive Soils for Pavement Applications,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, no. 1, p. 04018361, 2019.
- [9] K. Wen, Y. Li, W. Huang, C. Armwood, F. Amini, and L. Li, “Mechanical behaviors of hydrogel-impregnated sand,” *Constr Build Mater*, vol. 207, pp. 174–180, 2019.
- [10] L. Cheng, Y. Yang, and J. Chu, “In-situ microbially induced Ca<sup>2+</sup>-alginate polymeric sealant for seepage control in porous materials,” *Microb Biotechnol*, vol. 12, no. 2, pp. 324–333, 2019.
- [11] A. Almajed, K. Lemboye, M. G. Arab, and A. Alnuaim, “Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique,” *Soils and Foundations*, vol. 60, no. 2, pp. 356–371, 2020.
- [12] N.-J. Jiang and K. Soga, “Erosional behavior of gravel-sand mixtures stabilized by microbially induced calcite precipitation (MICP),” *Soils and Foundations*, vol. 59, no. 3, pp. 699–709, 2019.
- [13] F. Teng, Y.-C. Sie, and C. Ouedraogo, “Strength improvement in silty clay by microbial-induced calcite precipitation,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 80, no. 8, pp. 6359–6371, 2021.



- [14] B. M. Mortensen, M. J. Haber, J. T. DeJong, L. F. Caslake, and D. C. Nelson, "Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation," *J Appl Microbiol*, vol. 111, no. 2, pp. 338–349, 2011.
- [15] Z. Wang, N. Zhang, J. Ding, Q. Li, and J. Xu, "Thermal conductivity of sands treated with microbially induced calcite precipitation (MICP) and model prediction," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 147, p. 118899, 2020.
- [16] K. A. Gebru, T. G. Kidanemariam, and H. K. Gebretinsae, "Bio-cement production using microbially induced calcite precipitation (MICP) method: A review," *Chem Eng Sci*, vol. 238, p. 116610, 2021.
- [17] Standard specification for woven wire test sieve cloth and test sieves, ASTM E11, 2013.
- [18] Standard practice for classification of soils for engineering purposes, ASTM D2487-11, 2011.
- [19] S. N. Wei, L. L. Min, K. T. Chew, and L. H. Siew, "Factors Affecting Improvement in Engineering Properties of Residual Soil through Microbial-Induced Calcite Precipitation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 140, no. 5, p. 04014006, 2014.
- [20] Y. Zhao, J. Zhuang, Y. Wang, Y. Jia, P. Niu, and K. Jia, "Improvement of loess characteristics using sodium alginate," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 79, no. 4, pp. 1879–1891, 2020.
- [21] CS. Tang, Ly. Yin, Nj. Jiang, C. Zhu, H. Zeng, B. Shi, "Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review," *Environ Earth Sci*, vol. 79, no. 5, p. 94, 2020.