Aksaray University
Journal of Science and Engineering

e-ISSN: 2587-1277
http://asujse.aksaray.edu.tr

Aksaray J. Sci. Eng.
Volume **10**, Issue **1**, pp. **1-10.**

Available online at DergiPark AKADEMİK

Research Article

Aksaray Yöresine Ait Volkanik Tüf Taşının Onarımında Biyomineralizasyon Yönteminin Etkisinin İncelenmesi

Mehtap Sancar Kayabaşı[1*], Ali Ural[1], Derya Önal Darılmaz[2]

[1] *Aksaray University, Department of Civil Engineering, Türkiye*
[2] *Aksaray University, Department of Molecular Biology and Genetics, Türkiye*

Anahtar Kelimeler
Bakteriyel Biyomineralizasyon, Kalsiyum Karbonat Çökelimi, Çatlak Onarımı, Mikro-Çatlaklar, Kendi Kendine İyileşme

Makale bilgileri
Gönderim: Mar 3, 2026
Revizyon: Mar 17, 2026
Kabul: Mar 25, 2026
Online: Nis 2, 2026

İz: **izlik.org/JA27JR52BA**
doi: **10.29002/asujse.1900740**

Özet

Tarihi yapılar, geçmişten günümüze ulaşan kültürel ve mimari birikimin önemli bir parçasını oluşturmakta ve toplumların tarihsel sürekliliğini yansıtmaktadır. Bu yapıların korunması ve özgün nitelikleriyle gelecek kuşaklara aktarılması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Aksaray ve çevre illerde tarihi yapılarda yaygın olarak kullanılan volkanik tüf taşı üzerinde oluşturulan çatlakların, biyomineralizasyon yöntemi kullanılarak onarılabilirliği incelenmiştir. Çalışma kapsamında biyomineralizasyon potansiyeline sahip *Bacillus cereus* RSKK 683 ve *Bacillus subtilis* ATCC 6633 bakterileri kullanılarak, mikroorganizma kaynaklı kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) oluşumu yoluyla çatlak kapatma davranışları değerlendirilmiştir. Uygulama sonrası elde edilen veriler; optik mikroskop görüntüleri ile birlikte taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDAX) kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, her iki bakteri türünün de $CaCO_3$ oluşumu yoluyla çatlakların doldurulmasına katkı sağladığını ve biyomineralizasyon yönteminin volkanik tüf taşı gibi doğal yapı malzemelerinin korunmasında uygulanabilir bir onarım yaklaşımı sunduğunu göstermektedir.

Effect of the Biomineralization Method on the Repair of Volcanic Tuff Stone from the Aksaray Region

Keywords
Bacterial Biomineralization, Calcium Carbonate Precipitation, Crack Repair, Micro Cracks, Self Healing

Article information
Received: Mar3, 2026
Revised: Mar 17, 2026
Accepted: Mar 25, 2026
Online: Apr 2, 2026

İz: **izlik.org/JA27JR52BA**
doi: **10.29002/asujse.1900740**

Abstract

Historical structures represent an important part of cultural and architectural heritage that has been transferred from the past to the present, reflecting the historical continuity of societies. The conservation of these structures and their transmission to future generations while preserving their original characteristics is therefore of great importance. In this study, the applicability of a biomineralization-based repair approach for sealing cracks formed on volcanic tuff stone, which is widely used in historical structures in Aksaray and surrounding regions, was investigated. Within the scope of the study, *Bacillus cereus*RSKK 683 and *Bacillus subtilis*ATCC 6633, known for their biomineralization potential, were used to evaluate crack-healing behavior through microbially induced calcium carbonate ($CaCO_3$) precipitation. The results were examined using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray analysis (EDAX). The findings indicate that both bacterial strains contributed to crack filling through $CaCO_3$ formation, demonstrating that biomineralization is a feasible and environmentally friendly repair approach for the conservation of natural building stones such as volcanic tuff.

1. Giriş

Biyomineralizasyon temelli onarım uygulamaları, doğal yapı taşlarının gözenek yapısı ve mineralojik bileşimi ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle yüksek poroziteye sahip tüf taşları, bakteriyel çözelti ve besin ortamının taş bünyesine nüfuz etmesine olanak sağlayarak kalsiyum karbonat çökelmesi açısından avantajlı bir ortam sunmaktadır [1,2]. Bununla birlikte, biyomineralizasyonun etkinliği; kullanılan bakteri türü, besin çözeltisinin bileşimi, çevresel koşullar ve uygulama yöntemi gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir [3,4]. Literatürde, mikroorganizmalar aracılığıyla çökeltilen kalsiyum karbonatın, yapı malzemelerinin basınç dayanımını artırdığı ve su geçirgenliğini

[*] ***Mehtap Sancar Kayabaşı:*** msancar6155@gmail.com 0000-0003-1614-1310

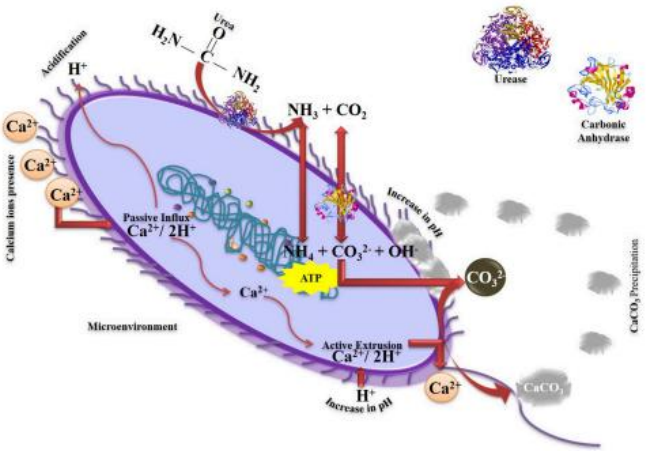
Articles in this journal is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

azalttığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir [5,6]. Ayrıca, bu yöntemin çevre dostu olması ve yapı malzemeleriyle kimyasal uyumluluk göstermesi, geleneksel onarım tekniklerine kıyasla önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir [7,8].

Doğal taşların korunması ve onarımı konusunda yapılan çalışmalar, taşın mineralojik ve petrografik özelliklerinin bozulma süreçleri üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır [9,10]. Özellikle volkanik kökenli tüf taşları, atmosferik koşullar ve çevresel etkilere karşı hassas yapıları nedeniyle zamanla mekanik ve fiziksel özelliklerini kaybedebilmektedir [11]. Bu bağlamda, biyomineralizasyon yönteminin, tüf taşlarının gözenekli yapısını doldurarak dayanım kaybını azaltabileceği ve uzun vadeli koruma sağlayabileceği düşünülmektedir [12,13]. Ancak, doğal taşlar üzerinde gerçekleştirilen biyomineralizasyon uygulamaları, beton ve zemin uygulamalarına kıyasla sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır. Numune boyutunun artması; bakteri penetrasyonu, besin taşınımı, mineral çökelme derinliği ve çökelmenin homojenliği gibi parametreleri etkileyebilmektedir [14].

Biyomineralizasyon, mikroorganizmaların metabolik faaliyetleri sonucunda mineral fazların oluşmasını sağlayan doğal bir süreç olup, özellikle kalsiyum karbonat temelli çökelmeler üzerinden tanımlanmaktadır [15]. Yapı malzemeleri ve zemin iyileştirme uygulamalarında bu süreç çoğunlukla mikrobiyal indüklenmiş kalsiyum karbonat çökelmesi (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) mekanizması kapsamında ele alınmaktadır.

Şematik olarak Şekil 1'de gösterilen MICP mekanizmasının temelini, üreaz enzimi üreten bakterilerin üre hidrolizi yoluyla ortam pH'ını yükseltmesi ve karbonat iyonlarının oluşumunu hızlandırması oluşturmaktadır. Artan pH koşulları altında karbonat iyonlarının kalsiyum iyonları ile reaksiyona girmesi sonucu kalsiyum karbonat çökelmesi gerçekleşmektedir [16].



Şekil1. Üreaz ve karbonik anhidraz aracılığıyla MICP oluşumunun şematik diyagramı[17].

Mikrobiyal indüklenmiş kalsiyum karbonat çökelmesi (MICP) süreci, üreaz enzimi üreten bakterilerin üreyi hidrolize etmesi sonucu ortam pH'ının yükselmesi ve karbonat iyonlarının oluşması esasına dayanmaktadır. Denklem 1-6'da bu süreçte gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar literatürde denklemler aracılığıyla ayrıntılı olarak tanımlanmıştır [18].

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow NH_2COOH + NH_3 \quad (1)$$

$$NH_2COOH + H_2O \leftrightarrow NH_3 + H_2CO_3 \quad (2)$$

$$H_2CO_3 \leftrightarrow HO_3^- + H^+ \quad (3)$$

$$2NH_3 + 2H_2O \leftrightarrow 2NH_4^+ + 2OH^- \quad (4)$$

$$Ca^{2+} + \text{Hücre} \rightarrow \text{Hücre - } Ca^{2+} \quad (5)$$

$$\text{Hücre - } Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow \text{Hücre - } CaCO_3 \quad (6)$$

Oluşan kalsiyum karbonat kristallerinin gözenekli yapıların iç yüzeylerine tutunarak boşluk hacmini azalttığı, bu durumun ise malzemenin su geçirgenliğini düşürdüğü ve mekanik dayanım özelliklerini iyileştirdiği literatürde vurgulanmaktadır [19]. Bu etkinin büyüklüğü; doğal taşın gözenek dağılımı, mineralojik bileşimi ve mikroyapısal özelliklerine bağlı olarak değişmekte olup, özellikle gözenekli doğal yapı taşlarında biyomineralizasyonun daha belirgin sonuçlar verdiği belirtilmektedir [20].

Ayrıca biyomineralizasyon uygulamalarında kullanılan numune boyutu, uygulama süresi ve besin çözeltisinin taş içindeki taşınım davranışı, çökelmenin homojenliği üzerinde doğrudan etkili parametreler arasında yer almaktadır [21].

2. Materyal ve Metod

2.1. Taş Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada Aksaray yöresine ait volkanik tüf taşı kullanılmıştır. Tüf taşının fiziksel özellikleri incelendiğinde, %22,78 porozite ve %15,00 su emme değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir [22]. Bu yüksek gözeneklilik, taşın hafiflik ve ısı

yalıtımı gibi avantajlı özellikler kazanmasını sağlarken, aynı zamanda su tutma kapasitesini artırmaktadır. Nitekim yüksek su emme oranı, özellikle donma-çözülme döngülerine karşı malzemenin dayanımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Buna bağlı olarak, tüf taşının ortalama 6,5 MPa basınç dayanımına sahip olması, malzemenin mekanik açıdan düşük-orta dayanım sınıfında yer aldığını göstermektedir. Bu özellikler birlikte değerlendirildiğinde, tüf taşının yüksek gözenekliliği ve nispeten düşük mekanik dayanımı nedeniyle çevresel etkilere karşı hassas bir doğal taş türü olup, taşıyıcı elemanlardan ziyade hafif yapı elemanları ve kaplama malzemesi olarak kullanımının daha uygun olduğu anlaşılmaktadır.

Numuneler Aksaray Üniversitesi Yapı Laboratuvarında 3x3x1,5 cm boyutlarında hazırlanmış ve taşlar üzerinde basınçla çatlaklar oluşturulmuştur.

2.2. Bakteri Kültürü

Biyomineralizasyon uygulamalarında kullanılan bakteri türü, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) çökelme mekanizması ve onarım etkinliği üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır. Literatürde özellikle *Bacillus* cinsine ait bakterilerin, yüksek üreaz aktivitesi ve alkali koşullara adaptasyon yetenekleri sayesinde mikroorganizma kaynaklı kalsiyum karbonat çökelmesi (MICP) süreçlerinde yaygın olarak tercih edildiği bildirilmektedir [23]. *Bacillus subtilis*'in yapı malzemelerinde çatlak onarımı ve mikro yapı iyileştirilmesi açısından etkili olduğu, çatlak yüzeylerinde $CaCO_3$ birikimi sağlayarak sürekliliği artırdığı çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur [24–26]. Benzer şekilde, *Bacillus cereus*'un biyomineralizasyon yoluyla gözenek doldurma kapasitesine sahip olduğu ve bu sayede yapı malzemelerinin mekanik özelliklerine olumlu katkı sağladığı, özellikle basınç dayanımı ve mikro yapı üzerinde belirgin iyileşmeler oluşturduğu rapor edilmiştir [27–29]. Bu doğrultuda, farklı *Bacillus* türlerinin doğal taşlar üzerindeki biyomineralizasyon performanslarının deneysel olarak değerlendirilmesi, ön araştırma niteliğindeki çalışmalar açısından önemli bir temel oluşturmaktadır.

Çalışmada kullanılan *Bacillus cereus* RSKK 683 ile *Bacillus subtilis* ATCC 6633 suşu, Aksaray Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü laboratuvar stoklarından temin edilmiştir. Biyomineralizasyon deneylerinde kullanılan kalsiyum içerikli besiyeri, 333 mM üre, 25 mM $CaCl_2$, 25 mM $NaHCO_3$ ve 3 g/L Nutrient Broth (NB)'nin 1 L distile su içerisinde çözündürülmesiyle hazırlanmıştır. Besiyeri hazırlanırken üre dışındaki tüm bileşenler distile su içerisinde çözüldükten sonra 121 °C'de 15 dakika süreyle otoklavlanarak steril edilmiştir. Üre çözeltisi ise 0.22 µm membran filtreden geçirilerek sterilize edilmiş ve otoklav sonrası soğuyan ortama aseptik koşullar altında ilave edilmiştir.

2.3. Uygulama Prosedürü

Her bir bakteri türü için üç adet paralel numune hazırlanmış olup, böylece toplam altı numuneden oluşan bir deney grubu oluşturulmuştur. Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deneylerde, taş numunelere kontrollü şekilde yük uygulanarak yaklaşık 0,2–0,5 cm aralığında değişen çatlak açıklıkları oluşturulmuştur. Uygulamalara geçilmeden önce, taş yüzeylerinde meydana gelen çatlakların başlangıç durumları optik mikroskop yardımıyla görüntülenerek kayıt altına alınmıştır.

Taş bünyesinde doğal olarak bulunabilecek mikroorganizmaların kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) oluşumuna olası etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla, tüf taşı numuneleri 170 °C sıcaklıkta 3 saat boyunca pastör fırınında steril edilmiştir. Sterilizasyon işlemine ilişkin aşamalar Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil2. Taş numunelerin pastör fırında steril edilmesine ait görüntü

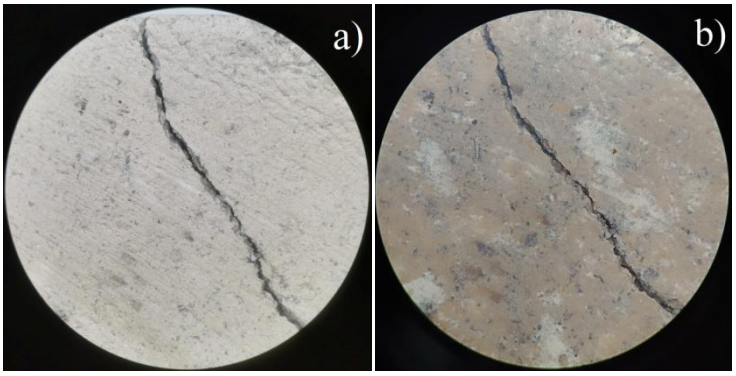
3. Bulgular ve Tartışma

Biyomineralizasyon yöntemi, ıslat–kurut döngüsü esas alınarak uygulanmış ve iki farklı bakteri kültürü kullanılarak deneysel bir set oluşturulmuştur. Her bir bakteri kültürü için üçer paralel numune hazırlanmış olup, toplamda altı adet numune, uygulamanın pratikte de hızlı sonuç alınmasının amaçlanmasıyla literatürde uygulanan minimum süre olan 28 gün süreyle işleme tabi tutulmuştur [30-32]. Uygulama sürecinin tamamlanmasının ardından numuneler mikroskop görüntüleri ile değerlendirilmiş; ayrıca oluşan çökeltilerin morfolojik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla SEM ve EDAX analizleri gerçekleştirilmiştir.

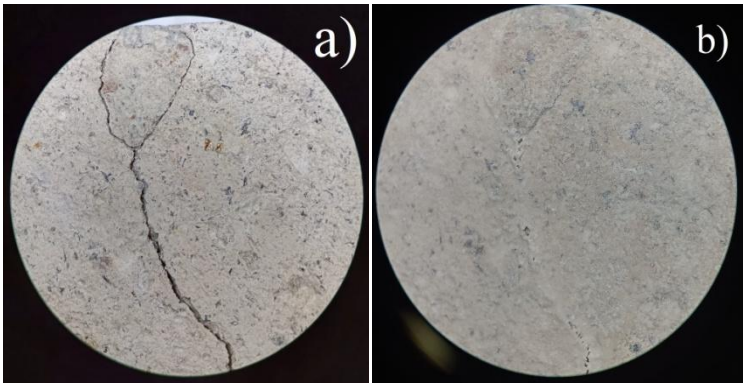
3.1. Mikroskop Görüntüleri

Yapı malzemelerinde biyomineralizasyon sürecinin değerlendirilmesinde, çatlakların uygulama öncesi ve sonrası mikroskop altında incelenmesi, $CaCO_3$ oluşumunun ve çatlak dolum mekanizmasının anlaşılmasında yaygın olarak başvurulan bir yöntemdir. Özellikle mikrobiyal kaynaklı kalsiyum karbonat çökelmesinin hedeflendiği çalışmalarda, mikroskop görüntüleri kristal oluşumunun çatlak yüzeylerine tutunma biçimini ve boşluklar boyunca ilerleme karakterini ortaya koymaktadır. Bakteriyel biyomineralizasyon uygulanan numunelerde mikroskobik incelemelerin, $CaCO_3$ birikiminin sürekliliğini ve çatlak içindeki dağılımını değerlendirmede etkili olduğunu bildirmiştir [33]. Benzer şekilde, Wang vd. [34], mikroskop görüntülerinin çatlak onarım sürecinin görsel olarak doğrulanmasını sağladığını ve bu gözlemlerin onarım performansının yorumlanmasında önemli bir destekleyici veri sunduğunu belirtmiştir.

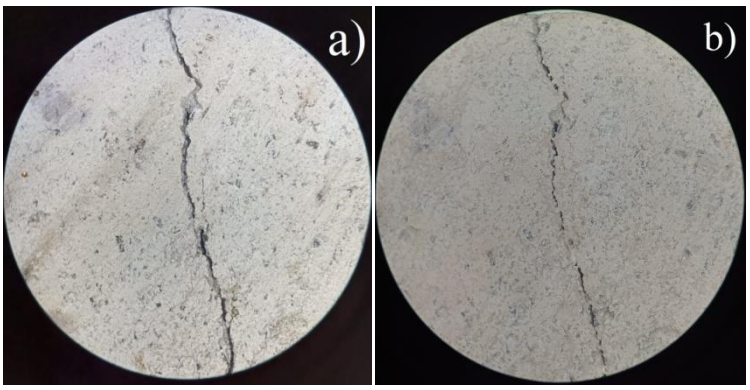
Bu çalışma kapsamında *Bacillus cereus* RSKK 683ile *Bacillus subtilis* ATCC 6633 karşılaştırılarak çatlak kapatma performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen mikroskop görüntüleri de, biyomineralizasyon uygulaması sonrası çatlak boşluklarının $CaCO_3$ birikimi ile büyük ölçüde doldurulduğunu ortaya koymuştur. Kontrol numuneye ait mikroskop görüntüleri Şekil 3'te, *B. cereus* RSKK 683'e ait mikroskop görüntüleri Şekil 4, 5 ve 6'da *B. subtilis* ATCC 6633'le ilgili mikroskop görüntüleri Şekil 7,8 ve 9'da sunulmaktadır.



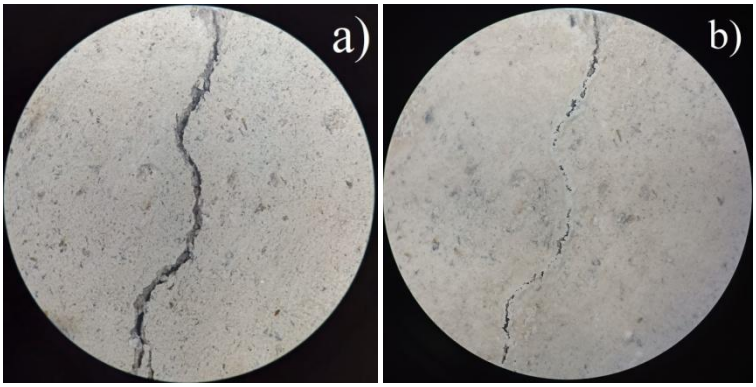
Şekil 3. Kontrol numune; a) öncesi, b) bakterisiz inkübasyon sonrası çatlak görünümü



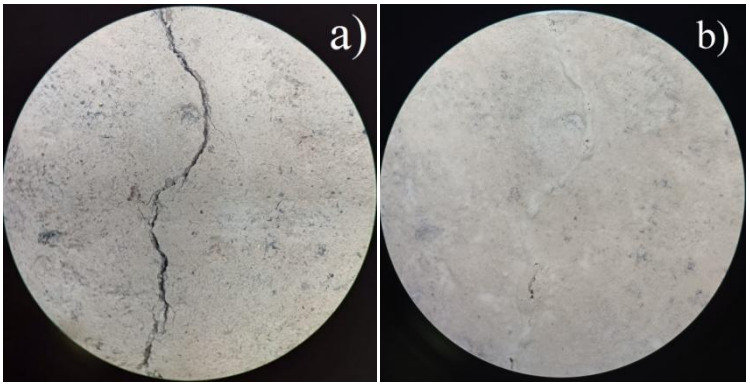
Şekil 4. S56 numaralı numune; a) öncesi, b) *B. cereus* RSKK 683bakterisi ile inkübasyon sonrası çatlak görünümü



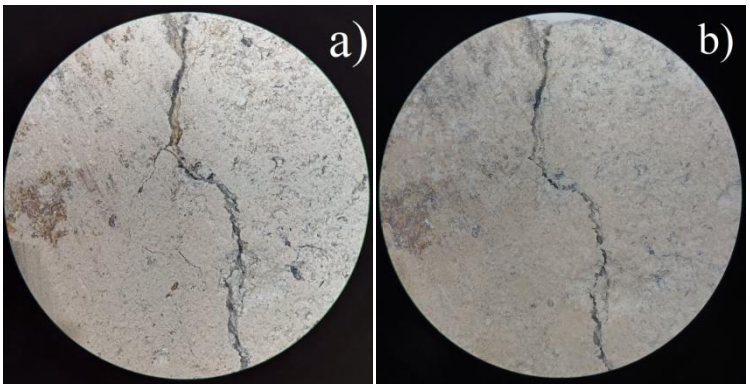
Şekil 5. S57 numaralı numune; a) öncesi, b) *B. cereus* RSKK 683bakterisi ile inkübasyon sonrası çatlak görünümü



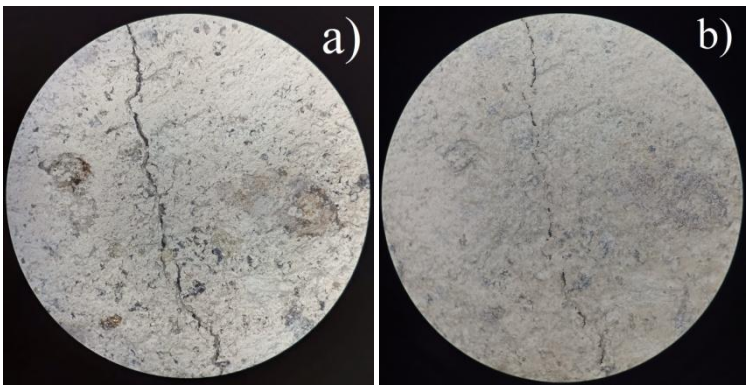
Şekil 6. S58 numaralı numune; a) öncesi, b) *B. cereus* RSKK 683bakterisi ile inkübasyon sonrası çatlak görünümü



Şekil 7. S59 numaralı numune; a) öncesi, b) *B. subtilis* ATCC 6633 bakterisi ile inkübasyon sonrası çatlak görünümü



Şekil 8. S60 numaralı numune; a) öncesi, b) *B. subtilis* ATCC 6633 bakterisi ile inkübasyon sonrası çatlak görünümü



Şekil 9. S61 numaralı numune; a) öncesi, b) *B. subtilis* ATCC 6633 bakterisi ile inkübasyon sonrası çatlak görünümü

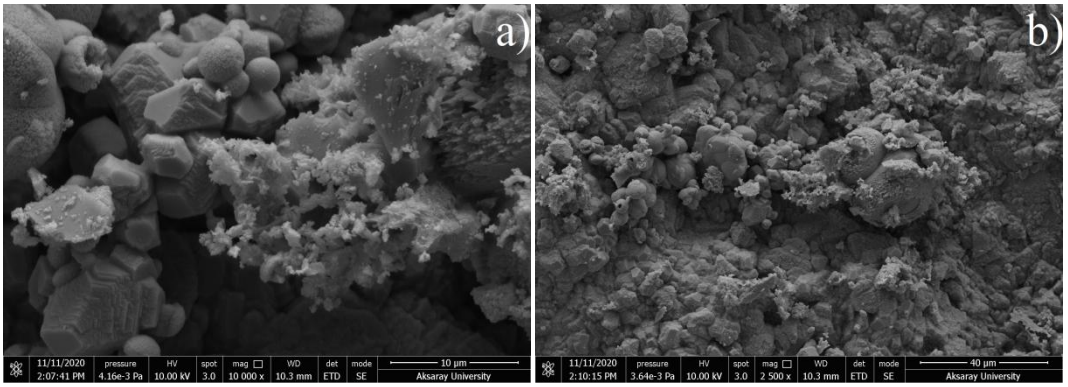
3.2.SEM-EDAX Analizleri

Biyomineralizasyon süreçlerinin değerlendirilmesinde, oluşan mineral çökeltilerinin morfolojik ve kimyasal olarak doğrulanması amacıyla SEM ve EDAX analizleri sıklıkla başvurulan karakterizasyon yöntemleridir. SEM incelemeleri, çatlak yüzeylerinde ve gözenekli matris içerisinde meydana gelen kristal oluşumlarının şekil, boyut ve dağılım özelliklerini ortaya koyarken; EDAX analizleri bu oluşumların elementel bileşimini belirleyerek $CaCO_3$ varlığının doğrulanmasına imkân tanımaktadır. Literatürde, özellikle *Bacillus subtilis* ve *Bacillus cereus* gibi üreaz aktivitesi yüksek bakterilerle gerçekleştirilen çalışmalarda, SEM görüntülerinde çatlak boşluklarının kalsiyum karbonat kristalleri ile doldurulduğu ve matris yapısının daha kompakt hale geldiği rapor edilmiştir [35]. Aynı çalışmalarda EDAX spektrumlarında Ca, C ve O elementlerine ait karakteristik piklerin baskın olarak gözlemlendiği ve bunun biyomineralizasyon kaynaklı kalsit oluşumunu desteklediği belirtilmiştir [36]. Bu nedenle SEM ve EDAX analizleri, biyomineralizasyonun yapı malzemesi üzerindeki etkisinin hem görsel hem de kimyasal düzeyde doğrulanmasında temel araçlar olarak kabul edilmektedir.

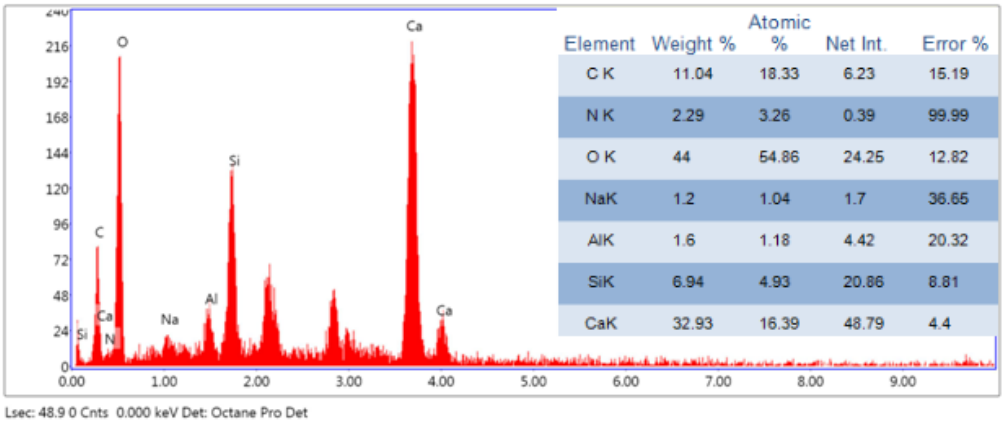
Mikroskop görüntülerinde, *Bacillus cereus* RSKK 683 *ve Bacillus subtilis* ATCC 6633 uygulanan tüf taşı numunelerinde çatlak bölgelerinde belirgin bir kapatma gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Her iki bakteri türünün de tüf taşı matrisiyle uyumlu bir etkileşim sergilediği ve çatlak boşluklarının mineral birikimleriyle büyük ölçüde doldurulduğu tespit edilmiştir.

Bu gözlemleri destekler nitelikte, SEM incelemelerinde çatlak yüzeyleri boyunca kalsiyum karbonat oluşumunu işaret eden kristal morfolojileri belirlenmiştir. Mineral çökeltilerinin çatlak içi boşlukları doldurarak daha kompakt bir yapı oluşturduğu görülmüştür. EDAX analizlerinde ise $CaCO_3$ varlığını doğrulayan kalsiyum (Ca), karbon (C) ve oksijen (O) elementlerine ait karakteristik pikler her iki bakteri uygulamasında da belirgin şekilde tespit edilmiştir.

Elde edilen bulgular, *B. cereus* RSKK 683 *ve B. subtilis* ATCC 6633 türlerinin tüf taşı üzerinde biyomineralizasyon yoluyla çatlak onarımına katkı sağladığını göstermektedir. İlgili SEM ve EDAX görüntüleri Şekil 10,11,12 ve 13'te sunulmuştur.

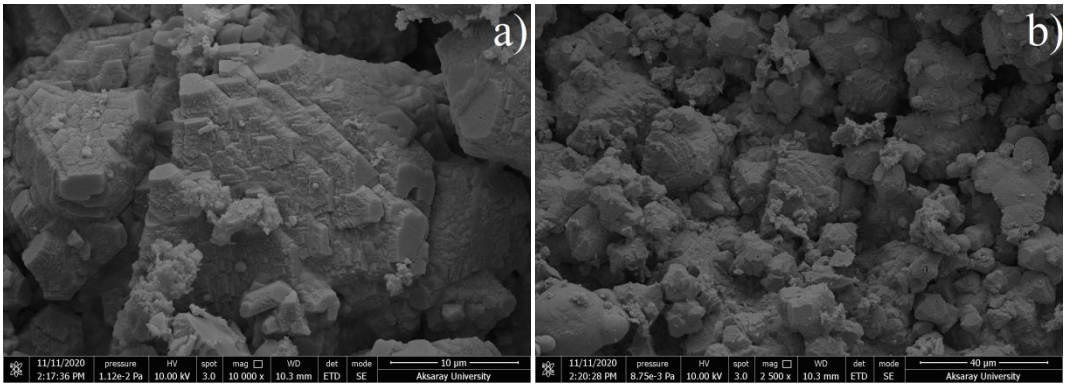


Şekil 10.*B. cereus* RSKK 683'eait SEM görüntüleri (a)10.000x büyütme (b)2500x büyütme

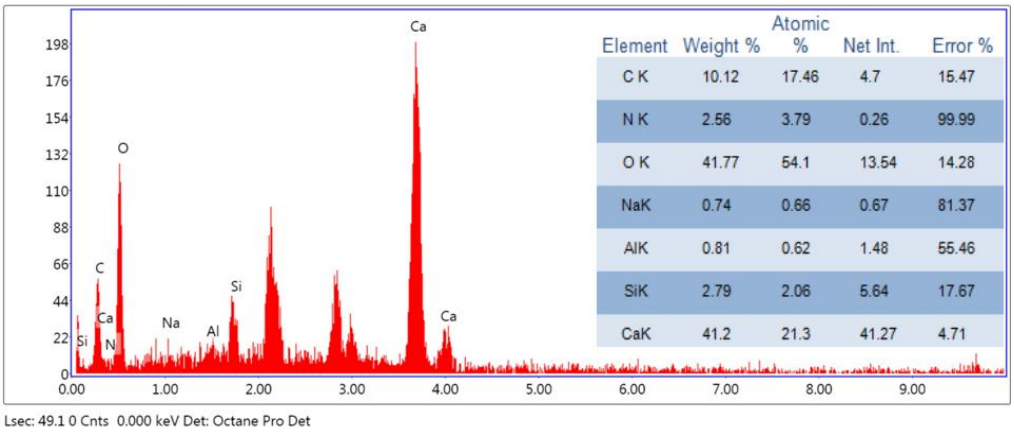


Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
C K	11.04	18.33	6.23	15.19
N K	2.29	3.26	0.39	99.99
O K	44	54.86	24.25	12.82
NaK	1.2	1.04	1.7	36.65
AlK	1.6	1.18	4.42	20.32
SiK	6.94	4.93	20.86	8.81
CaK	32.93	16.39	48.79	4.4

Şekil 11.*B. cereus* RSKK 683'eait EDAX analizi



Şekil 12. *B. subtilis* ATCC 6633'e ait SEM görüntüleri (a)10.000x büyütme (b)2500x büyütme



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
C K	10.12	17.46	4.7	15.47
N K	2.56	3.79	0.26	99.99
O K	41.77	54.1	13.54	14.28
NaK	0.74	0.66	0.67	81.37
AlK	0.81	0.62	1.48	55.46
SiK	2.79	2.06	5.64	17.67
CaK	41.2	21.3	41.27	4.71

Şekil 13.*B. subtilis* ATCC 6633'e ait EDAX analizi

4. Tartışma

Elde edilen bulgular, tüf taşı üzerinde uygulanan biyomineralizasyon sürecinin hem *Bacillus cereus* RSKK 683 hem de *Bacillus subtilis* ATCC 6633 tarafından etkin biçimde gerçekleştirilebildiğini göstermektedir. Her iki bakteri türünün çatlak boşluklarında $CaCO_3$ temelli mineral birikimi oluşturması, tüf taşının gözenekli yapısının mikrobiyal çökelim açısından elverişli bir ortam sunduğunu düşündürmektedir. Gözenekli matris yapısı, bakteri hücrelerinin ve besin çözeltisinin çatlak içerisine difüzyonunu kolaylaştırarak karbonat oluşumunun çatlak iç yüzeylerinde gerçekleşmesine olanak sağlamış olabilir.

Islat–kurut döngüsüne dayalı uygulama yaklaşımının, biyomineralizasyon verimini artırıcı bir rol üstlenmiş olabileceği değerlendirilmektedir. Periyodik nem değişimleri, çözünmüş iyonların taşınımını ve kristal çekirdeklenmesini desteklemiş; bu durum karbonat çökeliminin sürekliliğini olumlu yönde etkilemiş olabilir. Literatürde çevresel nem koşullarının ve döngüsel ıslanma süreçlerinin mikrobiyal karbonat oluşumu üzerinde belirleyici olduğu bildirilmektedir. Bu bağlamda, deneysel tasarımda tercih edilen döngüsel uygulamanın çatlak kapatma performansına katkı sağladığı düşünülmektedir.

SEM görüntülerinde gözlenen kristal morfolojileri ve EDAX analizlerinde belirlenen Ca, C ve O elementlerine ait karakteristik pikler, çatlak dolgusunun biyokimyasal kökenli bir mineralizasyon süreci sonucunda oluştuğunu doğrulamaktadır. Bu durum, yalnızca yüzeysel bir dolgu mekanizmasının değil, yapı malzemesi ile kimyasal uyumlu bir karbonat oluşumunun gerçekleştiğini göstermektedir.

EDAX analiz sonuçları incelendiğinde, *B. subtilis* ATCC 6633'e ait grafikte kalsiyum (Ca) elementine ait ağırlık yüzdesinin (≈%41.2) *B. cereus* RSKK 683'e(≈%32.93) kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, *B. subtilis* ATCC 6633 uygulanan numunede Ca pikinin daha belirgin ve baskın olması, yüzeyde kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) oluşumunun daha yoğun gerçekleştiğine işaret etmektedir.

Buna karşılık, *B. cereus* RSKK 683 uygulanan numunede silisyum (Si) ve alüminyum (Al) gibi tüf taşının doğal mineral bileşenlerine ait elementlerin daha yüksek oranlarda bulunması, yüzeyin biyomineral çökelim ile tamamen kaplanmadığını düşündürmektedir. *B. subtilis* ATCC 6633 uygulanan numunede ise bu elementlerin göreceli olarak daha düşük seviyede olması, oluşan $CaCO_3$ çökeliminin yüzey üzerinde daha yaygın ve baskın hale geldiğini göstermektedir.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, *B. subtilis* ATCC 6633'te biyomineralizasyon sürecinin daha etkin gerçekleştiği ve $CaCO_3$ çökeliminin daha yüksek oranda oluştuğu söylenebilir. Ancak bu değerlendirme, EDAX analizine dayalı yarı nicel bir yorum olup, bakteriler arası performans farkının kesin olarak ortaya konulabilmesi için daha kapsamlı nicel analizlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Her iki bakteri türünün benzer düzeyde çatlak kapatma performansı göstermesi, tüf taşının mineralojik ve kimyasal özelliklerinin *Bacillus* türleri için uygun bir yetişme ortamı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, biyomineralizasyon uygulamalarında tek bir mikroorganizma türüne bağımlı kalınmaksızın, uygun çevresel koşullar sağlandığında farklı bakteri türlerinin de etkin biçimde kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Bununla birlikte, çalışmanın kontrollü laboratuvar koşullarında yürütülmüş olması, saha uygulamalarında karşılaşılabilecek çevresel değişkenlerin (sıcaklık dalgalanmaları, yağış, biyolojik rekabet ve kirleticiler gibi) etkisinin ayrıca değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmaların uzun dönem dayanım performansı ve çevresel stabilite üzerine odaklanması, yöntemin restorasyon uygulamalarına aktarılabilirliği açısından önem taşımaktadır.

5. Sonuçlar

Tüf taşı üzerinde gerçekleştirilen biyomineralizasyon uygulamaları, hem *Bacillus cereus* RSKK 683 hem de *Bacillus subtilis* ATCC 6633 türlerinin çatlak onarımında etkin rol üstlenebildiğini ortaya koymuştur. 28 günlük uygulama süreci sonunda, her iki bakteri türüyle işlem gören numunelerde çatlak boşluklarının $CaCO_3$ temelli mineral birikimi ile büyük ölçüde doldurulduğu belirlenmiştir.

Mikroskobik incelemeler ile SEM ve EDAX analizleri, oluşan çökelimin kalsiyum karbonat karakterinde olduğunu doğrulamış ve biyomineral oluşumunun tüf taşının gözenekli matrisiyle bütünleşerek geliştiğini göstermiştir. Elde edilen bulgular, biyomineralizasyon temelli çatlak onarımının tüf taşı gibi gözenekli yapı malzemelerinde uygulanabilir bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, uygun çevresel koşullar sağlandığında farklı *Bacillus* türlerinin tarihi yapı taşlarının korunmasına yönelik biyoteknolojik onarım uygulamalarında etkili biçimde kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinatörlüğü tarafından 2023-038 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

1. Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2011). Microbial concrete: Way to enhance the durability of building structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *23*(6), 730–734. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000159

2. De Muynck, W., De Belie, N., & Verstraete, W. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*, *36*(2), 118–136. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006

3. Ivanov, V., & Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil insitu. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *7*(2), 139–153. https://doi.org/10.1007/s11157-007-9126-3

4. Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of $CaCO_3$. *Soil Biology and Biochemistry*, *31*(11), 1563–1571. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6

5. Qabany, A. Al, & Soga, K. (2013). Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of

cemented soils. *Géotechnique*, *63*(4), 331–339. https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.022

6. Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., & Shahin, M. A. (2013). Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Canadian Geotechnical Journal*, *50*(1), 81–90. https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0023

7. Seifan, M., Samani, A. K., & Berenjian, A. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *100*(6), 2591–2602. https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z

8. De Belie, N., & Wang, J. (2016). Bacteria-based repair and self-healing of concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, *5*(1–2), 35–56. https://doi.org/10.1080/21650373.2015.1077754

9. Henry, A. (2015). *Stone conservation: Principles and practice*. Routledge, New York, USA.

10. Doehne, E., & Price, C. A. (2011). *Stone conservation: An overview of current research*. Getty Publications, Los Angeles, California.

11. Grossi, C. M., & Brimblecombe, P. (2007). Effect of long-term changes in air pollution and climate on the decay and blackening of European stone buildings. *Geological Society, London, Special Publications*, *271*(1), 117–130. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2007.271.01.13

12. Siegesmund, S., & Snethlage, R. (2014). *Stone in architecture: Properties, durability* (S. Siegesmund & R. Snethlage, Eds.). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45155-3

13. Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E. M., Gomez-Heras, M., Jose Varas-Muriel, M., & Freire, D. M. (2013). Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *46*(4), 421–429. https://doi.org/10.1144/qjegh2012-041

14. Topal, T., & Doyuran, V. (1997). Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff. *Engineering Geology*, *47*(1–2), 175–187. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00017-3

15. Rodriguez-Navarro, C., Rodriguez-Gallego, M., Ben Chekroun, K., & Gonzalez-Muñoz, M. T. (2003). Conservation of ornamental stone by Myxococcus xanthus- induced carbonate biomineralization. *Applied and Environmental Microbiology*, *69*(4), 2182–2193. https://doi.org/10.1128/AEM.69.4.2182-2193.2003

16. Jimenez-Lopez, C., Jroundi, F., Pascolini, C., Rodriguez-Navarro, C., Piñar-Larrubia, G., Rodriguez-Gallego, M., & González-Muñoz, M. T. (2008). Consolidation of quarry calcarenite by calcium carbonate precipitation induced by bacteria activated among the microbiota inhabiting the stone. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *62*(4), 352–363. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.03.002

17. Castro-Alonso, M. J., Montañez-Hernandez, L. E., Sanchez-Muñoz, M. A., Macias Franco, M. R., Narayanasamy, R., & Balagurusamy, N. (2019). Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and its potential in bioconcrete: Microbiological and molecular concepts. *Frontiers in Materials*, *6*, 126. https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00126

18. Tiano, P., Biagiotti, L., & Mastromei, G. (1999). Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: Methods of evaluation. *Journal of Microbiological Methods*, *36*(1–2), 139–145. https://doi.org/10.1016/S0167-7012(99)00019-6

19. Le Métayer-Levrel, G., Castanier, S., Orial, G., Loubière, J.-F., & Perthuisot, J.-P. (1999). Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sedimentary Geology*, *126*(1–4), 25–34. https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00029-9

20. Dupraz, C., Reid, R. P., Braissant, O., Decho, A. W., Norman, R. S., & Visscher, P. T. (2009). Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, *96*(3), 141–162. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.005

21. Zhu, T., & Dittrich, M. (2016). Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *4*, 4. https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00004

22. Sancar, M. (2018). Yüksek Lisans Tezi, *Gergi çubuk bağlantı tiplerinin taş kemerler üzerindeki etkisinin incelenmesi*. Aksaray Üniversitesi Fen ve Uygulama Bilimleri Enstitüsü, Aksaray

23. Warscheid, T., & Braams, J. (2000). Biodeterioration of stone: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *46*(4), 343–368. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00109-8

24. Jonkers, H. M., & Schlangen, E. (2007). Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach. In *High-Performance Concrete, Brick-Masonry and Environmental Aspects* (pp. 1821–1826). CRC Press, London.

25. Wang, J. Y., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, *68*, 110–119. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018

26. Scheerer, S., Ortega-Morales, O., & Gaylarde, C. (2009). Chapter 5 Microbial deterioration of stone monuments—An updated overview. In *Advances in Applied Microbiology* (pp. 97–139). https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)00805-8

27. Sohail, M. G., Disi, Z. Al, Zouari, N., Nuaimi, N. Al, Kahraman, R., Gencturk, B., Rodrigues, D. F., & Yildirim, Y. (2022). Bio self-healing concrete using MICP by an indigenous *Bacillus cereus* strain isolated from Qatari soil. *Construction and Building Materials*, *328*, 126943. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126943

28. Ghosh, S., Biswas, M., Chattopadhyay, B. D., & Mandal, S. (2009). Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar. *Cement and Concrete Composites*, *31*(2), 93–98. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001

29. Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2013). Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: A review. *Frontiers in Microbiology*, *4*, 314. https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00314

30. Achal, V., Pan, X., & Özyurt, N. (2011). Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation. *Ecological Engineering*, *37*(4), 554–559. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.009

31. De Belie, N., Wang, J., Bundur, Z. B., & Paine, K. (2018). Bacteria-based concrete. In *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures* (pp. 531–567). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00019-8

32. Tezer, M. M., & Başaran Bundur, Z. (2021). Development of a 2-phase bio-additive for self-healing cement-based materials. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *36*(3), 1171–1184. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.695637

33. Reyad, A. M., & Mokhtar, G. (2023). Impact of the immobilized *Bacillus cereus* MG708176 on the characteristics of the bio-based self-healing concrete. *Scientific Reports*, *13*(1), 500. https://doi.org/10.1038/s41598-023-27640-1

34. Wang, J. Y., De Belie, N., & Verstraete, W. (2012). Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *39*(4), 567–577. https://doi.org/10.1007/s10295-011-1037-1

35. Chahal, N., Siddique, R., & Rajor, A. (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume. *Construction and Building Materials*, *37*, 645–651. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.029

36. Achal, V., Mukherjee, A., Basu, P. C., & Reddy, M. S. (2009). Strain improvement of *Sporosarcina pasteurii* for enhanced urease and calcite production. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, *36*(7), 981–988. https://doi.org/10.1007/s10295-009-0578-z