



IJEASED

INTERNATIONAL JOURNAL OF EASTERN ANATOLIA
SCIENCE ENGINEERING AND DESIGN

Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi

ISSN: 2667-8764 , 5(2), 299-312, 2023

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijeased>




Derleme Makalesi / Review Article

Doi: [10.47898/ijeased.1394897](https://doi.org/10.47898/ijeased.1394897)

Kültür Varlıklarının Korunmasında Biyoteknolojik Bir Yaklaşım: Karbonatlı Taşların Sağlamaştırılması

Özge BOSO HANYALI*

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Yüksekokulu, İstanbul, 34380, Türkiye.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
*Sorumlu Yazar / Corresponding author : ozge.boso@msgsu.edu.tr  https://orcid.org/0000-0003-0440-3213 , Ö. Boso Hanyalı	Geliş Tarihi / Received Date : 23.11.2023 Revizyon Tarihi / Revision Date : 15.12.2023 Kabul Tarihi / Accepted Date : 25.12.2023 Yayın Tarihi / Published Date : 25.12.2023

Alıntı / Cite : Boso Hanyalı, Ö. (2023). Kültür Varlıklarının Korunmasında Biyoteknolojik Bir Yaklaşım: Karbonatlı Taşların Sağlamaştırılması, Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi, 5(2), 299-312.

Özet

Doğal taşlar, çok eski dönemlerden beri tarihi yapı ve eserlerde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Zaman içinde bu taşlar fiziksel, kimyasal ve mekanik etkilerin sonucunda yavaş yavaş bozunmakta ve dayanımlarını kaybetmektedirler. Bugüne kadar tarihi yapı ve eserlerde kullanılan doğal taşların durabilitesinin/dayanımının artırılmasında kullanılan organik ve inorganik sağlamaştırıcılar kısa vadede taşlardaki bozunma sorunlarına çözüm üretmiş olsa da uzun vadede atmosferik koşulların etkisiyle bozunma sürecinin devam etmesine engel olamamışlardır. Bu durum, tarihi yapı ve eserlerde kullanılan taşlarda gözlemlenen bozunmaların ilerlemesini durdurmak için taş malzeme ile uyumlu ekolojik, ekonomik, yeni bir teknolojiye sahip yöntemlerin gelişimine yol açmıştır. Mikrobiyal sağlamaştırma yöntemi bir başka deyişle Biyo-sağlamaştırma, kalsiyum karbonat üretebilen mikroorganizmaların taşların boşluklarına nüfuz etmeleri ile gerçekleşmektedir. Bu çalışmada mikrobiyal kalsiyum karbonat oluşum mekanizmalarından ve bu mekanizmaları etkileyen süreçlerden bahsedilmiş, kültürel mirasımızın korunmasında geleneksel kimyasal sağlamaştırıcılara alternatif oluşturma potansiyeli yüksek olan biyoteknoloji alanındaki yeni uygulamalar ve gelişmeler anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kültürel Miras, Taş Konservasyonu, Biyo-sağlamaştırma, Biyo-çimentolanma, Mikrobiyal Kalsiyum Karbonat Çökelimi, Karbonatlı Taşlar.

A Biotechnological Approach to the Conservation of Cultural Heritage: Consolidation of Carbonate Stones

Abstract

Natural stones have been mostly used in historical buildings and artifacts since ancient times. Over time, these stones gradually degrade and lose their strength as a result of physical, chemical and mechanical effects. To date, organic and inorganic consolidants used to increase the durability of carbonate stones have produced short-term solutions to the degradation problems in the stones, but in the long term, they could not prevent the continuation of the degradation process under the influence of atmospheric conditions. This has led to the development of ecological, economical, new technological methods compatible with the stone material in order to stop the progression of deterioration observed in the stones used in historical buildings and monuments. Microbial consolidation method, in other words Bio-consolidation, is realized by the penetration of microorganisms capable of producing calcium carbonate into the cavities of stone. In this study, the mechanisms of microbial calcium carbonate formation and the processes which affect these mechanisms are explained. New researches and applications in the field of biotechnology, which have the potential to provide an alternative to traditional chemical consolidants in the conservation of our cultural heritage, are described.

Keywords: *Cultural Heritage, Stone Conservation, Bio-concolidation, Bio-cementation, Microbial Calcium Carbonate Precipitation, Carbonated Stones.*

1. Giriş

Çeşitli medeniyetlere ev sahipliği yapmış olan ülkemizde, günümüze dek ulaşan ve tarihi izler taşıyan çok sayıda yapı ve eserler bulunmaktadır. Günümüze dek ulaşan bu yapı ve eserlerin korunması ve onarılması, gelecek nesillere aktarılması kültürel mirasın ve mimarı mirasın korunması açısından son derece önemlidir. Bir çok kültürel, sanatsal ve tarihi yapı ile objeler doğal taşlardan yapılmıştır. Özellikle kireçtaşı gibi karbonatlı taşlar miras yapılarında oldukça yaygın olarak kullanılan malzeme grubunu oluşturur. Bu taşlar tarihi eser ve yapıların kemerlerinde, sütunlarında, beden duvarlarında, kubbe yapımında, zemin döşemelerinde ve dış bahçe duvarlarında sıklıkla kullanılmıştır. Hava kirliliği, sıcaklık değişimleri, donma-çözünme ve suda çözünebilir tuzların (sülfat, nitrat vb.) kristallenme-çözünmeleri gibi etkenler kireçtaşlarının zaman içerisinde bozunmalarına neden olmaktadır. Gözenekli malzemelerin nem hareketi ve nem taşıma kapasitesi, ıslanma ve kuruma özellikleriyle doğrudan ilişkilidir (Hall ve ark, 2010; Richardson ve ark, 2014). Gözenek boyutu ve gözenek dağılımı, malzemenin neme bağlı bozunmaya karşı direnç gösterme yeteneğinde önemli bir rol oynar. Özellikle kireçtaşı gibi karbonatlı taşlar mikro boşluklara ve birbiri ile ilişkili mikro çatlaklara sahip olmaları nedeniyle diğer doğal taşlara göre atmosferik şartlardan daha kolay etkilenirler. Bunlara ilaveten ülkemizde yaşanan depremler, diğer doğal afetler ve hızlı kentleşme ile tarihi yapılar ve bu yapıların dış cephelerinde kullanılan taşlar bu olumsuz koşulların karşısında büyük tehdit altındadır. Karbonatlı taşlar arasında özellikle tarihi yapı ve eserlerde sıklıkla kullanılmış olan Küfeki taşının kaynak alanına olan erişim sıkıntısı ve taş işçiliğinin günümüzde yok

olmaya başlaması gibi faktörler göz önünde bulundurulduğunda bu taşların kendisi ile uyumlu yeni teknolojiye sahip bir onarım malzemesi ile yerinde sağlamaştırılma ihtiyacı doğmuştur. Bu durum kültürel miras niteliği taşıyan tarihi yapı ve eserlerin özgün ve estetik değerlerinin korunması, aynı zamanda sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından önemlidir.

Sağlamaştırma; doğal taşın ayrışmış ya da yüzey erozyonu ile zayıflamış bağlayıcı çimentosunu onarabilecek, taşın mineral bileşimindeki kohezyonu iyileştirecek ve ayrışan yüzeyi taşın sağlam kısmına bağlayacak şekilde olmalıdır. (Torraca, 1982; G. Wessel ve Searles, 2001, Henry, 2006; Ersen, 2011; İpekoğlu, 1998).

Geçmişten günümüze tarihi yapı ve eserlerde kullanılan doğal taşların sağlamaştırılmasında organik ve inorganik sağlamaştırıcılar kullanılmıştır. İnorganik sağlamaştırıcılardan kireç suyu (Ca(OH)_2 çözeltisi) ve Barita (Ba(OH)_2) çözeltisi taşlarda 19.yy sonlarından itibaren uygulanmış, ancak derin penetrasyon sağlayamaması (etkili nüfuz edememesi) nedeniyle tercih edilmemiştir. Taşlara uygulanan organik kimyasal sağlamaştırıcılar ise, alkoksi silanlar, epoksi reçineler ve akrilik monomerleri, pre-polimerleri ve kopolimerlerdir. Taşların sağlamaştırılmasında en çok tercih edilen kimyasallar metil trimetoksisilan (MTMOS) ve tetraetoksisilan (TEOS) olarak bilinen alkoksi silanlardır (Ersen, 2011). Alkoksi silanlar taş içinde biriktiği zaman, taşın gözenekleri içindeki koloidal silikayı başlatmakta ve süreç sonunda dayanım etkisi sağlayan siloksan (Si-O-Si) bağları oluşturmaktadır. Silika molekülleri kimyasal bileşim bakımından silikat minerallerine benzediği için, bu tür kimyasallar silikat esaslı taşlarda daha etkin bir sağlamaştırma yaparken, kalsit bileşimli karbonatlı taşlarda aynı etkinliği göstermezler (Danehey ve ark, 1992; Goins ve ark, 1996). Buna rağmen etil silikatlar, karbonatlı malzemelerinin sağlamaştırıcı kimyasalları olarak sıklıkla kullanılmıştır (Delgado Rodrigues ve ark, 1998; Castro ve ark, 1990; Delgado Rodrigues ve ark, 1997; Ziyaettin, 2010). Taşın bileşimi ile taşa uygulanan kimyasallar arasındaki bu uyumsuzluk, taş sağlamaştırma uygulamalarının en temel sorunlarından birisidir.

Sağlamaştırıcı kimyasallardan biri de epoksilerdir. Ancak Ersen, 2011 yılında yapmış olduğu çalışmada epoksi kullanımının taşlarda derin penetrasyon sağlayamaması, taş yüzeylerde kabuk oluşturması ve çok yüksek genleşme katsayılarına sahip olmaları sebebiyle tercih edilmediklerini ifade etmiştir.

Taşların sağlamaştırılmasında ve taş yüzeylerin korunmasında yaygın bir şekilde kullanılan kimyasallardan biri de akrilik kopolimerler ve özellikle Paraloid B72'dir. Ancak Delgado-Rodrigues ve ark, 2010 yılında yapmış oldukları çalışmalarında; Paraloid B72'nin kullanılmasının, yüksek poroziteye sahip biyomikritik kireçtaşlarında düşük penetre olma özelliği gösterdiği ve kullanılan

kimyasalın taş yüzeylerinde kopmalara yol açtığı bu sebeple de bu kimyasalların dış mekânlarda iyi bir sağlamlaştırıcı olmadığını belirtmiştir.

Ksinopoulou ve ark, 2012 yılında yapmış oldukları çalışmalarında, titanyum oksit (TiO₂) silikat bağlayıcı içeren silikon bazlı bir solüsyonu Yunanistan'daki tarihi bir yapıda kullanılan iki farklı gözenekli taşlara uygulayarak, kullanılan sağlamlaştırıcının taşlar üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda; taşların Vp dalga hızı değerlerinin arttığı, su emme oranlarının azaldığı, renk özelliklerinde sınırlar dışında bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Boşluk oranı az olan taşlarda yüzey koruma imkânı yaratan TiO₂ nanoteknolojik yüzey kaplamaları ile ilgili yapılan çalışmalar hâlen devam etmektedir (Ersen, 2011).

Yapılan araştırmalar sonucunda taşların sağlamlaştırılmasında beklenen performans kriterleri şu şekilde olmalıdır.

- Uygulanan sağlamlaştırma yöntemi taşların gözeneklerini bloke etmemelidir. Taşın nefes almasına engel olmamalıdır. Yöntem taşın gözeneklerinde etkin penetrasyon sağlamalıdır.
- Sağlamlaştırma yöntemi, uygulandığı taş ile uyumlu olmalıdır.
- Uygulanan sağlamlaştırma yöntemi taşların mikro boşluklarını arttırmamalıdır.
- Düşük ısıl genleşme katsayısına sahip olmalıdır.
- Taşın renk ve dokusunda estetik problemler yaratmamalıdır.
- Taşın porozitesinde ve taş yüzeylerde suyun emilmesini önlemeli, ancak kuruma durumunda su buharı geçirimsizliğini azaltmamalıdır.
- Atmosferik koşullar altında gerçekleşen bozunmalara engel olmalıdır.
- Ekonomik olmalıdır
- Ekolojik olmalıdır (Ziyaettin, 2010; Ersen, 2011).

Venedik Tüzüğü ile belirtilmiş olan koruma uygulamalarının en az müdahale ile yapılması, geri dönüşümlü ve yeniden uygulanabilir özellikte olması gibi ilkeler de göz önünde bulundurulduğunda, doğal taşların geleneksel kimyasal yöntemler ile sağlamlaştırılması, tüm bu ihtiyaçları karşılayamamaktadır (Barbabetola ve ark, 2012). Son yıllarda kültürel miras alanında inovatif yeşil teknolojilere olan ilginin artması, biyo-sağlamlaştırma gibi yeni yöntemlerin gelişmesine yol açmış, tarihi yapıların korunması üzerine çalışan araştırmacıların ilgisinin bu yönde yoğunlaşmasına sebep olmuştur.

2. Biyomineralizasyon ve Mikrobiyal Kalsiyum Karbonat Çökeli (MICP)

Biyomineralizasyon, prokaryotlar tarafından oluşturulan mineralleşme olarak tanımlanmaktadır (Yıldırım ve ark, 2016). Biyomineralizasyon sürecinde oluşan biyopolimerler özellikle kalsiyum iyonu (Ca^{+2}) ile oluşturulan kalsiyum sülfat ($CaSO_4$), kalsiyum fosfat ($Ca_3(PO_4)_2$), kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) gibi mineralli bileşiklerdir (Knoll, 2003, Yıldırım ve ark, 2016). Le Metayer-Levrel ve ark, 1999 yılında yapmış oldukları çalışmasında, kalsiyum karbonat üreten bakteriler ile kireçtaşı yüzeylerinde koruyucu bir tabaka oluşturulabileceğini ifade etmişlerdir. Aynı zamanda bu teknik ile, teorik olarak kireçtaşının doğal oluşum sürecinin benzeri kullanıldığından, uygulandığı tarihi kireçtaşı yüzeyleri ile uyumlu malzeme üretilmektedir (Le Metayer-Levrel ve ark, 1999; Şahin Güçhan ve ark, 2019).

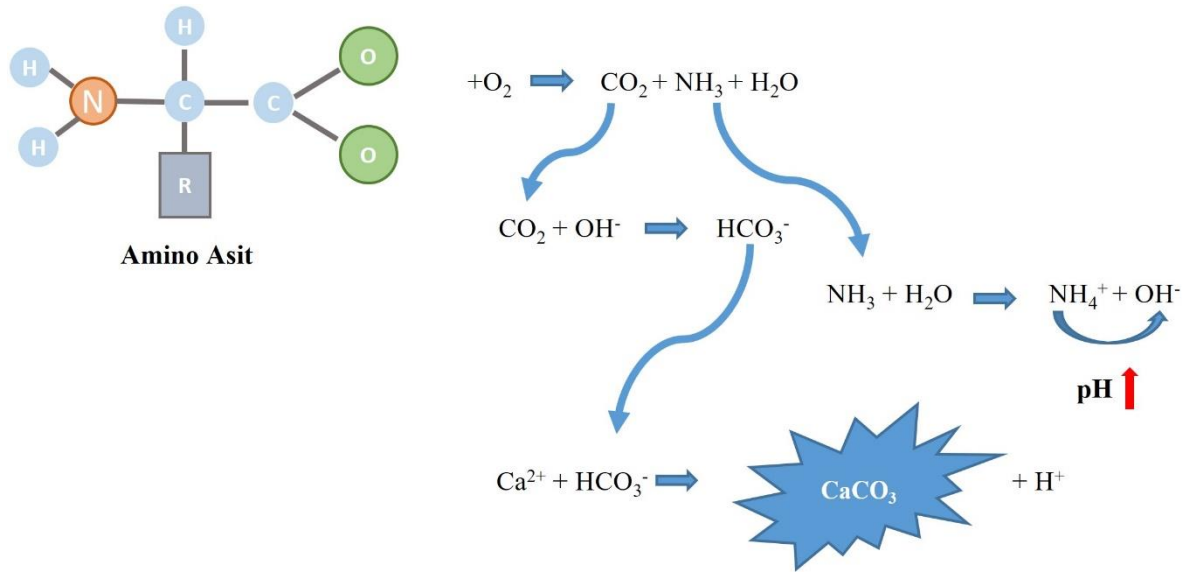
Yaygın olarak toprak, su ve deniz çökeltilerinde görülen mikrobiyal kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) oluşumu, mikro biyolojik kaynaklı karbonat çökeli (MICP) olarak ifade edilmektedir. Başka bir ifade ile biyo-çökeli, yüzey iyileştirme işlemi olarak da bilinmektedir (Canaveras ve ark, 2001). Bu süreçte ortamda çözülmüş inorganik karbon konsantrasyonu ve ortamın pH'ı artmaktadır (De Muynck ve ark, 2010).

Mikroorganizmalar kültür besiyerlerinde büyüme sağlamaktadır. Kültür ortamlarının kullanılmasının sebebi kalsiyum karbonat çökeli için uygun şartların sağlanmasında mikroorganizmaların kültür ortamını alkalinize etmesidir (Lopez ve ark, 2007). Rodriguez-Navarro ve ark, 2003 yılında yapmış oldukları çalışmalarında, kültür ortamının bileşiminin, kültür koşullarının, bakteri türünün, hücre dışı ekstraselüler madde (EPS) oluşum kontrolünün, yeni oluşan karbonat çimentosunun konsolidasyon ve koruma etkilerini arttırmak için, ana faktör olduğunu belirtmiştir. Mikroorganizmaların ve bunların ürettiği hücre dışı polimerik maddeler (EPS) ile başlayarak oluşan biyofilmler, çözeltideki iyonları bağlar ve mineral birikimi için heterojen çekirdeklenme yüzeyi olarak işlev görür.

Mikrobiyal kalsiyum karbonat çökelinin gerçekleşmesi için, üreaz enzimi, amonifikasyon, nitrat ve sülfat indirgeme şeklinde mikrobiyal süreçler vardır. Literatürde kireçtaşlarının biyolojik sağlamlaştırılmasında üreaz enzimi ve amonifikasyon yaygın olarak kullanılan proseslerdir.

Amonifikasyon

Al-Thawadi, 2011 yılında yapmış olduğu çalışmasında amonifikasyonu, çeşitli organik atıkların, ölü bitki ve hayvan kalıntılarının proteinlerinin parçalanmasıyla nitrojen'in (NH₃) ortaya çıkması olayı olarak tanımlamaktadır. Bu süreçte oluşan NH₃ ortamın pH'ını arttırırken, karbonat (CO₃⁻) iyonları ile kalsiyum (Ca⁺²) iyonları birleşerek kristal halinde çökelmektedir (Şekil 1).



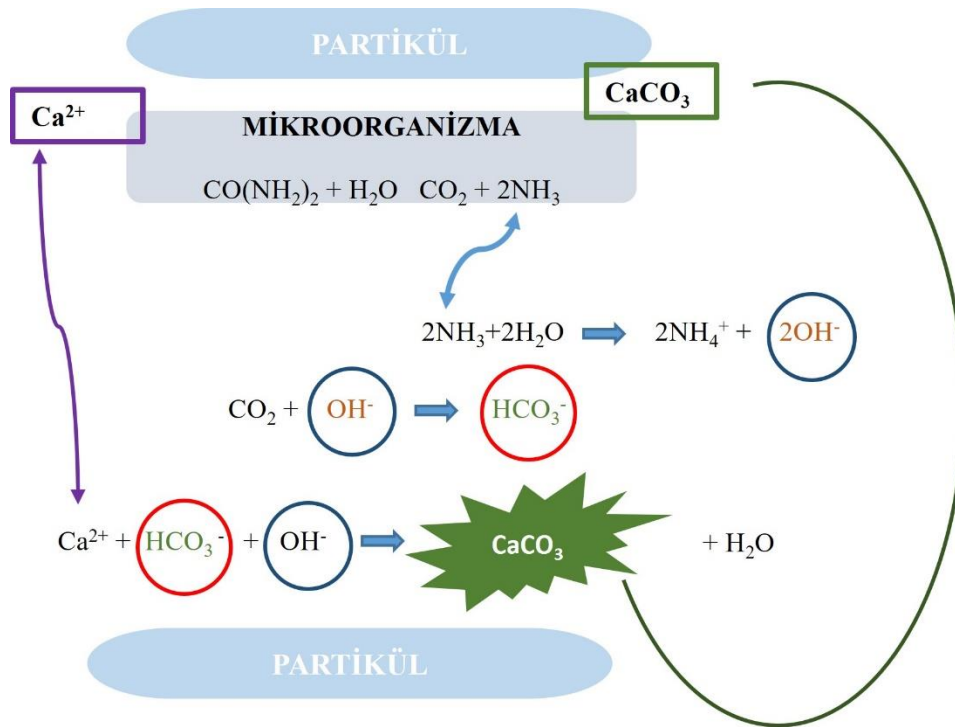
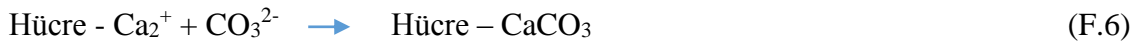
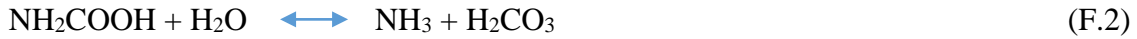
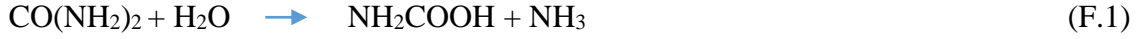
Şekil 1. Amonifikasyon bakterileri aracılığı ile CaCO₃ oluşumu (Yıldırım ve ark, 2016'dan derlenerek alınmıştır).

Literatürde, kireçtaşlarının sağlamlaştırılmasına yönelik mikrobiyal kalsiyum karbonat (CaCO₃) oluşturma yeteneği yüksek *M. xanthus* bakteri türü kullanılarak yapılmış birçok çalışma yer almaktadır (Jimenez Lopez ve ark, 2007; 2008; Rodriguez-Navarro ve ark, 2003; Jroundi ve ark, 2010).

Üre Hidrolizi

Üre, alkalofilik mikroorganizma tarafından üretilen üreaz enzimi ile biyokimyasal reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon sonucunda; 1 mol amonyak (NH₃) ve 1 mol karbamik asit (NH₂COOH) oluşmaktadır (F.1). Oluşan bu maddeler, kendiliğinden 1 mol amonyum (NH₄)⁺ ve 1 mol karbonik asite (H₂CO₃) dönüşmektedir (F.2). Çıkan ürünler, kolay ayrışabilmekte ve H₂CO₃, HCO₃⁻ ve H⁺ iyonlarına dönüşmektedir (F.3). Amonyak (NH₃) ise su (H₂O) ile birleşerek, 2 mol amonyum (NH₄)⁺

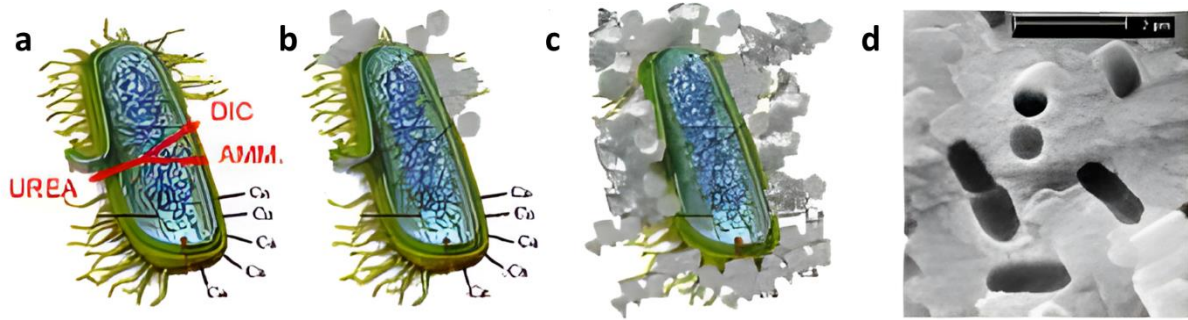
iyonuna ve 2 mol hidroksit (OH⁻) iyonlarına ayrılmaktadır (F.4). Bu süreçler sonunda ortamın pH'ı artmakta ve ortamdaki Ca²⁺ iyonları, negatif yüklü bakteri hücresi ile birleşmektedir. Alkali ortamda ayrılmış HCO₃⁻ iyonları da oluşan yapıyla birleşerek çökelmektedir (Hall-Stoodley ve ark, 2004; Patro ve ark, 2015; Yıldırım ve ark, 2016). (F.5,6), (Şekil 2).



Şekil 2. Ürolitik bakteriler aracılığı ile CaCO₃ oluşumu (Yıldırım ve ark, 2016'dan derlenerek alınmıştır).

Şekil-3'te ürolitik bakteriler ile mikrobiyal kalsiyum karbonat oluşum süreçleri anlatılmıştır. Solüsyonda bulunan kalsiyum iyonları negatif yüklü oldukları için mikroorganizma, hücre duvarına çekilmektedir. Üre, sisteme eklendikten sonra mikroorganizma üreyi çözülmüş inorganik karbona ve

amonyuma dönüştürmekte ve bunu çevreye salmaktadır (3a). Ortamdaki kalsiyum iyon varlığı, mikroorganizma hücre duvarında süper doyma durumuna ve kalsiyum karbonatın çökmesine neden olur (3b). Bir süre sonra tüm hücre kalsiyum karbonat çökeltisiyle kapsülendir. Tüm hücre kapsüllendiğinde besin aktarımı sınırlanır ve hücreler ölür (3c). Şekil-3d’de karbonat çökmesine katılan mikroorganizma hücrelerinin izleri görülmektedir.



Şekil 3. Ürolitik bakteriler tarafından gerçekleştirilen kalsiyum karbonat çökeltimi sürecinin gelişimi (Marjadi, 2016).

Üre hidrolizi ile kireçtaşlarının sağlamlaştırılmasına yönelik literatürde yaygınca kullanılan mikroorganizmalar *Bacillus* cinsi bakteriler olarak yer almaktadır.

De Muynck ve ark, 2011 yılında yaptıkları çalışmada ürolitik bakteriler ile çalışmışlardır ve ürenin hidrolizinin kolay kontrol edilebileceğini, karbonatın yüksek konsantrasyonundaki üretimine izin verdiğini, bakterilerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kristal çekirdeklenme bölgelerini etkilediğini ifade etmişlerdir.

Belirtilen reaksiyonlar göz önüne alındığında; CaCO_3 çökeltimini etkileyen faktörleri aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz.

- Çözünmüş inorganik karbon konsantrasyonu
- Ortamın pH’ı;

pH, karbonat özelliklerini ve kalsiyum karbonat çözünürlüğünü kontrol etmektedir. Ortamın pH’ı bakterilerin karbonatlaşma hızı, CaCO_3 ’ün ortam içindeki çökeltimi ve oluşan kristallerin türü üzerinde olumlu ve olumsuz bir etkiye sahiptir.

- Ortamdaki Ca^{+2} iyonlarının konsantrasyonu
- Kullanılan mikroorganizmanın türü
- Çekirdeklenme

Ortamin tuzluluğu ve bileşimi gibi faktörler de kalsiyum karbonat çökelişini etkilemektedir (Knorre ve Krumbein, 2000; Rivadeneyra ve ark, 2004). Yukarıda belirtilen çökeltme koşullarının herhangi birinin ayrı ayrı kalsiyum karbonat çökelişini etkilediğini, ancak birincil ön koşulun, mikroorganizmaların çeşitli fizyolojik aktiviteler doğrultusunda alkali bir çevre yaratma becerileri olduğu ifade edilmiştir (Hammes ve Verstraete, 2002; De Muynck, 2010).

3. Biyoçimentolanma

Biyoçimento kalsiyum iyonu bakımından zengin sistemdeki mikroorganizma aktivitesinden dolayı oluşan bir CaCO₃ birikintisine karşılık gelmektedir. Mikroorganizmanın tutunumu ve taşın gözeneklerinin (por) yapısı biyoçimentolanmayı etkileyen önemli parametredir (Marjadi, 2016).

Son biyoteknolojik gelişmelerde anıtların ve taş eserlerin restorasyonunda ve korunmasında mikroorganizmaların rolü çok önemlidir. Bu mikroorganizmaların en önemli özelliği kalsiyum karbonatı hücre dışı çökeltme yetenekleridir. Kalsiyum karbonat üretebilme yeteneği olan mikroorganizmalar karbonatlı taş malzemeleri sağlamlaştırarak, yapı ve eserleri bozunmalara karşı korumaktadır.

Mikrobiyal kalsiyum karbonat çökelişimiyle gerçekleşen biyo-sağlamlaştırma yöntemi ile ilgili uluslararası düzeyde birçok çalışma bulunmaktadır. Mikroorganizmaların oluşturdukları biyoçimento ürünleri (biyo-kalsiyum karbonat) sayesinde karbonatlı taşların mikro yapısal özelliklerinin iyileştirilmesiyle dayanıklılığı artırılması sağlanmaktadır. Bu kapsamda; Tiano ve ark, 1999 yılında yapmış oldukları çalışmalarında, Lecce taşları (biyoklastik kireçtaşı) üzerinde kalsinojenik bakterileri kullanarak, deneysel çalışmalar yürütmüş, çalışma sonucunda kalsinojenetik bakterilerin, taşların su emme değerlerini %60 oranında azalttığını tespit etmiştir. Rodriguez-Navarro ve ark, 2003 yılında yaptıkları çalışmada, *M. xanthus* bakterisi türünün aşılacağı iki farklı kültür ortamına daldırılmış kireçtaşları üzerinde biyomineralizasyon testleri yapmıştır. Çalışmanın sonunda taramalı elektron mikroskopu (SEM) gözlemleri ile gözenek yüzeyine Kalsit ve Vaterit kristallerinin oluştuğu, *M. xanthus* bakterisi türünün güçlü bir karbonat çimentosu ürettiği tespit edilmiştir. Jimenez Lopez ve ark, 2008 yılında yapmış oldukları çalışmada; üç farklı kültür ortamı kullanarak, gözenekli kireçtaşlarında bulunan mikrobiyal topluluğun içindeki kalsiyum karbonat üreten bakterilerin aktivitesini test etmiştir. Çalışmada önerilen mikrobiyal yöntem, taşların mekanik direncini arttırmış, taşları basınç ve erozyona karşı daha dayanıklı yapmıştır. Li ve Qu, 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada, karbonat mineralizasyonuna neden olan *S. pasteurii* bakterisi türünün mermer örnekleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda mikrobiyal sağlamlaştırma yönteminin uygulanma

sonrasında örneklerin, porozite değerlerinde % 22 oranında bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Perito ve ark, 2013 yılında yaptıkları çalışmalarında, *B subtilis* hücre farksiyonu (BCF) ve kalsiyum bi karbonat solüsyonu (REF) ile CaCO₃ çökelyimini sağlayarak, Angera Kilisesi'ndeki dolomitik türü taşın, yerinde ve laboratuvar ortamında sağlamlaştırılmasını amaçlamıştır. Çalışmalar sonucunda hem laboratuvar da hem de yerinde test edilen taşların su emme değerlerinin % 6,8 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Jroundi ve ark, 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada, yerli bir karbonatojenik bakteri topluluğunun tuzdan zarar görmüş taştan izole edilmesini ve ardından tekrar aynı taşın üzerine yeniden uygulanmasını temel alarak, taşın korunmasına yönelik yeni, çevre dostu, bir yöntem uygulamıştır. Bu kapsamda; İspanya'nın Granada kentinde bulunan San Jeronimo Manastırı'ndaki biyoklastik kireçtaşları mikrobiyal yöntem ile yerinde sağlamlaştırılmıştır. Çalışma alanı için üç bölge seçilmiştir (S1, S2, S3). S1 bölgesinde sadece saf su, S2 bölgesinde *M. xanthus* bakteri türünün aşılacağı M3P kültür ortamı ile hazırlanan solüsyon, S3 bölgesine ise, sadece steril M3P kültür ortamının olduğu solüsyon uygulanmıştır. Çalışma sonucunda renk ölçümleri sonucunda taşların renginde önemli bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonucunda ise, bakterilerin taşın gözeneklerine yerleştiği ve burada kalsiyum karbonat çökelyimini gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca konsolidasyon seviyesi ve uygulanan yöntemin etkinliği, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile değerlendirilmiş, sağlamlaştırma yöntemi sonrasında üç yıla kadar taş üzerinde uzun süre etkili bir sağlamlaştırma/konsolidasyon gözlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. San Jeronimo Manastırı'nda yerinde yapılan biyo-sağlamlaştırma; a: Şapel, b: Avlu Kapısı (Jroundi ve ark, 2010)

Ülkemizde de bu konuda yapılmış çalışmalar yer almaktadır. Şahin Güçhan ve ark, 2019 yılında yapmış oldukları Tübitak (1001) proje çalışmasında kalsiyum karbonat üretme yeteneği olan *B. cereus* bakteri türünü kullanarak, taş malzeme ile uyumlu, biyolojik harç geliştirmiş, geliştirdikleri biyolojik harcı, traverten taşlarında bulunan mikro-çatlakları onarmak için uygulamışlardır. Yapılan SEM-EDX analizi sonucunda *B. cereus* bakteri suşu ile kalsiyum karbonat çökeliminin sağlandığı, *B. cereus* 'un, biyolojik harç içerisindeki agregaları birbirine bağladığı tespit edilmiştir. Boso Hanyalı, 2023 yılında yapmış olduğu doktora tez çalışmasında üç farklı jeolojik özelliklere sahip kireçtaşlarını *M. xanthus* bakteri türünün aşılacağı kültür besiyerinde 27 gün bekleterek, taşların mikrobiyal yöntemle sağlamlaştırılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda, *M. xanthus* bakteri türünün kalsiyum karbonat çökelimini sağlayarak, taşların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirdiğini tespit etmiştir.

4. Biyo-Sağlamlaştırmanın Avantajları ve Dezavantajları

Biyo-sağlamlaştırma yönteminin, yeni üretilen malzeme ile uyumlu olması, taşın gözeneklerini tıkamaması, taşta herhangi bir renk problemi oluşturmaması, çevre dostu olması, ekolojik olması, ekonomik olması ve etkin bir koruma stratejisi yaratması bu yöntemin avantajları arasındadır. Rodriguez-Navarro ve ark, 2003 yaptıkları çalışmada *M. xanthus* bakteri türünün oluşturduğu yeni Kalsit ve Vatarit kristallerinin taşın gözeneklerine yapışarak birikmesinin taş üzerinde sağlamlaştırıcı ve koruyucu bir etki yarattığını ifade etmiştir. Yine aynı çalışmada karbonat çökeliminin deneysel çalışmalarda kullanılan taşların ağırlıklarına bakıldığında 5-10 gün içinde gerçekleştiğini tespit etmiştir. Bu durumun koruma önerileri bağlamında ekonomik ve lojistik açıdan avantaj olduğu söylemek mümkündür.

Ülkemizde doğal alanlardan izole edilebilen ve Kalsit kristallerini üretme yeteneği yüksek olan mikroorganizmaların, karbonatlı taşların sağlamlaştırılmasında kullanılması kültür varlıklarının sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından önemli bir avantajdır.

Mikrobiyal yöntemin dezavantajlarından biri de mikrobiyal aktivite sıcaklık, pH vb. çevresel faktörlere bağlı olduğu için kimyasallara göre daha karmaşık olduğudur (Ivanov ve Chu, 2008; Marjadi, 2016).

5. Sonuç ve Öneriler

Mikroorganizmalar boyutsal olarak çok küçük canlılar oldukları için karbonatlı taşların gözenekleri (porları) arasında kolaylıkla yerleşip burada kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşumunu sağlamaktadır. Bu sayede taşların mikro yapısında iyileşme sağlayabilmektedirler. Üstelik mikroorganizmalar taşın kendi doğal mikrobiyal topluluğu ile uyumlu bir onarım malzemesi üretmektedir. Ancak biyo-sağlamlaştırma yöntemini uygularken iki önemli noktaya dikkat etmek gerekir. Birincisi, aktive edilen mikroorganizmaların doğal metabolik aktivitesi nedeniyle oluşabilecek asit üretimin önlenmesi (Jimenez Lopez ve ark, 2008), ikincisi, kontrolsüz biyofilm oluşumu ile taşların gözenekliliğinin yok olma ihtimalidir (Roldán Molina, 2008; Şahin Güçhan ve ark, 2019). Ayrıca biyo-sağlamlaştırma yönteminde yeni oluşan çimento, taşın porozitesini korumak zorundadır. Taş iyileştirme yöntemleri, taşların porozitesini olumsuz yönde değiştirebilir. Bu sebeple bu süreçlerde çok dikkatli olunmalıdır (Jimenez- Lopez ve ark, 2008).

Ülkemiz için yeni gelişmekte olan biyo-sağlamlaştırma yöntemi, etkinlik ve uyumluluk kavramlarının eş zamanlı uygulanabilirliğini tartışmak için bir fırsat olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yeni süreç, taş koruma pratiğine yeni bir yön açmakta ve koruma uygulaması için bir çerçeve oluşturmaktadır. Yapılan araştırmalar, bakterilerin kalsiyum karbonat üretme özelliğinin bozunmaya uğrayan tarihi taşların sağlamlaştırılmasında kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak tarihi yapı ve eserlerde büyük ölçekli uygulamalar yapılmadan önce, karbonatlı taşlar üzerinde yapılan AR-GE çalışmaları arttırılmalıdır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Al-Thawadi, S. M. J. (2011). *Adv. Sci. Eng. Res*, 1(1), 98-114.
- Barbabetola, N., Tasso, F., Grimaldi, M., Alisi C., Chiavarini, S., Marconi, P., Perito, B., Sprocati, R.A. (2012). *Microbe-Based Technology for a Novel Approach to Conservation and Restoration, EAI Speciale II-2012*, İtalya.
- Boso Hanyalı, Ö. (2023). İstanbul'daki Tarihi Yapılarda Kullanılan Farklı Kireçtaşlarının Mikrobiyal Yöntemle Sağlamlaştırılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Cañveras, J. C., Sanchez-Moral, S., Sloer, V., Saiz-Jimenez, C. (2001). *Microorganisms and Microbially Induced Fabrics in Cave Walls, Geomicrobiology Journal* Volume 18, Issue 3, pages 223-240.

- Danehey, C., Wheeler, G., Su, S. H. (1992). The influence of quartz and calcite on the polymerization of methyltrimethoxysilane, *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lisbon, 1043-1052.
- De Muynck, W., Leuridan, S., Loo, D. V., Verbeken, K., Veerle, Cnudde, V., Belie, N. D. (2011). Verstraete, W., Influence of Pore Structure on the Effectiveness of a Biogenic Carbonate Surface Treatment for Limestone Conservation, *Applied And Environmental Microbiology*, Vol. 77, No. 19, 6808–6820, doi:10.1128/AEM.00219-11159-167.
- De Muynck W., De Belie N., Verstraete, W. (2010). Microbial Carbonate Precipitation in Construction Materials: a review. *Ecol Eng* 36:118–36.
- Ersen, A. (2011). Taş Korumada Son 20 Yıldaki Çalışmalar ve Yenilikler, *Restorasyon ve Konservasyon Dergisi*.
- Goins, E. S., Wheeler, G. S., Griffiths, D., Price, C. A. (1996). The Effect of the Sandstone, Limestone, Marble and Sodium Chloride on the Polymerization of MTMOS Solutions, *Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Berlin, 1243-1254.
- Hall-Stoodley, L., Costerton, J.W, Stoodley, P. (2004). Bacterial Biofilms: From the Natural Environment to Infectious Diseases, *Nat Rev Microbiol.*, 2(2):95-108.
- Hall, C., Hamilton, A., Hoff, W.D., Viles, H.A., Eklund, J.A. (2010) Moisture Dynamics in Walls Response to Micro-Environment and Climate Change, *Proc R Soc, A8*, Vol. 467 No. 2125, 194-211.
- Hammes, F., Verstraete, W. (2002). *Reviews in environmental science and biotechnology*, 1(1), 3-7.
- Henry, A. (2006). *Stone Conservation*, (ed. A. Henry), Donhead, London.
- Ivanov, V., & Chu, J. (2008). *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2), 139-153.
- İpekoğlu, B. (1998). Theoretical And Technical Principles of Stone Conservation in Historic Monuments Pamukkale University, Engineering College Journal of Engineering, Cilt:4, Sayı:3, Sayfa:787-795.
- Jimenez-Lopez, C., Rodriguez-Navarro, C., Pin˘ar, G., Carrillo-Rosu'a, F.J., Rodriguez-Gallego, M., Gonza'lez-Mun˘oz, M.T. (2007). Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone. *Chemosphere* 68 (10), 1929–1936.
- Jimenez-Lopez, C., Jroundi, F., Chiara Pascolini, C., Rodriguez-Navarro, C., Pinar-Larrubia, G., Rodriguez-Gallego, M., Gonzalez-Munoz, 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, 352–363.
- Jroundi F., Bedmar E.J., Rodriguez-Navarro., Gonzalez-Mu˘noz M.T. (2010). Consolidation of Ornamental Stone By Microbial Carbonatogenesis, *Global Stone Congress*, 1-5.
- Knorre, H., Krumbein W. (2000). Bacterial calcification. In: Riding RE, Awramik SM (eds) *Microbial Sediments*. Springer Berlin Heidelberg, 25–31. doi:10.1007/978-3-662-04036-2-4.
- Ksinopoulou, E., Bakolas, A., Kartsonakis, I., Charitidis, C., Moropoulou, A. (2012). Particle Modified Consolidants In The Consolidation of Porous Stones, *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone Columbia University, New York*.
- Knoll, A. H. (2003). Biomineralization and evolutionary history. *Rev. Mineral. Geochem.* 54, 329-356.
- Le Metayer-Levrel, G., Castanier, S., Oriol, G., Loubiere, JF., Perthuisot, JP., (1999). Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sediment Geol*, 126:25-34.
- Li, P., & Qu, W. (2011). Bioremediation of Historic Architectural Heritages by *Sporosarcina pasteurii*, 1084-1087.
- Lim, M., Han, G. C., Ahn, J. W., You, K. S. (2010). *International journal of environmental research and public health*, 7(1), 203-228.
- Marjadi, D. S. (2016). Conservation and restoration of cultural heritage: A biotechnological approach, *Pelagia Research Library, Advances in Applied Science Research*, 7(4): 159-167.
- Patro Sanjaya, K., Chandra K.S., Sugandha S., Chand, S., Sahu, S.K., Manimaran, S. (2015). Effect of bacteria on the properties of concrete using Portland Slag Cement, *Proceedings of the National Conference on Recent Advances and Future Prospects in Civil Engineering (RAFPCE-15)*, 89-98.

- Perito, B., Marvasi, M., Barabesi, C., Mastromei, G., Bracci, S., Vendrell, M., Tiano, P. (2013). A *Bacillus subtilis* cell fraction (BCF) Inducing calcium carbonate precipitation: Biotechnological perspectives for monumental stone reinforcement”, *Journal of Cultural Heritage*, 15 , 345–351.
- Richardson, A., Coventry, A. K., Jamison, C. (2014). Surface consolidation of natural stone materials using microbial induced calcite precipitation, *Structural Survey*, Vol. 32 No. 3, 265-278, DOI 10.1108/SS-07-2013-0028.
- Rivadeneira, M. A., Párraga, J., Delgado, R., Ramos-Cormenzana, A., & Delgado, G. (2004). *FEMS Microbiology Ecology*, 48 (1), 39-46.
- Rodriguez-Navarro, C., Rodriguez-Gallego, M., Chekroun, K. B., & Gonzalez-Munoz, M. T. (2003). Conservation of Ornamental Stone by *Myxococcus xanthus* Induced Carbonate Biomineralization. *Applied and Environmental Microbiology*, 2182-2193.
- Roldán Molina, M. (2008). Caracterització de biofilms fototròfics d’ambients hipogeu.
- Şahin Güçhan, N., Warscheid, T., Topal, T., Son, Ç., Çıplak, E. S., Ersöz, T., Kaya, Y., Öztürk, M. (2019). Tarihi Kireçtaşlarını Koruma Müdahalelerinde Uygulamak Üzere Kalsit Üreten Bakterilerle Biyolojik Harç Geliştirilmesi Program Kodu: 1001 Proje No: 115M188 (p. 110).
- Tiano, P., Biagiotti, L., & Mastromei, G. (1999). Bacterial Bio-Mediated Calcite Precipitation for Monumental Stones Conservation: Methods of Evaluation. *Journal Of Microbiological Methods*, 139-145.
- Torraca, G. (1988). *Porous Building Materials, Materials Science for Architectural Conservation*, ICCROM Publication, Rome.
- Ziyaettin, N. (2010). Kimyasal Uygulamalarının Kuzey Kıbrıs Yapı Taşlarının Durabilitesi Üzerine Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilimleri Programı.
- Yıldırım, N., Gürtuğ, Y., Sesalı, C. (2016). Mikrobiyal Kalsiyum Karbonat Oluşum Mekanizmaları ve Uygulama Alanları, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 2, 70-80.