Archive of SID

ISSN: 2476-6917; Modares Journal of Biotechnology. 2019;10(3):381-390

Investigate of the Potential Use of Microbial Precipitation for Repair of Concrete and Carbon Sequestration

ARTICLE INFO

Article Type
Analytical Review

Authors
Emami S.[1] *PhD,*
Alikhani H.A.*[1] *PhD*

How to cite this article
Emami S, Alikhani H.A. Investigate of the Potential Use of Microbial Precipitation for Repair of Concrete and Carbon Sequestration. Modares Journal of Biotechnology. 2019;-10(3):381-390.

[1]Soil Science Engineering Department, Agricultural Engineering & Technology Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Soil Science Engineering Department, Agricultural Engineering & Technology Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran. Postal Code: 3158777871
Phone: +98 (26) 32231787
Fax: +98 (26) 32231787
halikhan@ut.ac.ir

Article History
Received: August 9, 2017
Accepted: March 3, 2018
ePublished: September 21, 2019

ABSTRACT

With urbanization expansion, application of concrete and construction materials is widely increasing throughout the world. Therefore, the use of a mechanism that can effectively extend the life of concrete structures is essential. Durable reinforced concrete structures are generally affected by the crack. Cracks in concrete are caused due to various reasons such as an environmental attack, overloading or accidental damage. Surface cracks in concrete facilitate the penetration of chemicals and corrosive chlorine, so as a result of these factors steel rebars corroded and caused the destruction of concrete structures. Calcium carbonate precipitates have proved their ability as a microbial sealant to fill the cracks and the gaps in Granites and sand. In this method, urea is hydrolyzed by the urease secreting bacteria and calcium carbonate is formed in the presence of calcium ion, which improves the stability and properties of concrete in the long term. Therefore, the use of microbial precipitation in concrete restoration can be considered as a natural and environmentally friendly strategy. This paper reviews current progress and potential of this technology.

Keywords Biocement; Strength; Durability; Carbon sequestration

CITATION LINKS

[1] Sustainable cement production - present ... [2] Behaviour of cement concrete ... [3] Study on the expansion of concrete ... [4] Chemo-mechanical analysis of ... [5] Behavior of air-entrained concrete under ... [6] Corrosion monitoring of reinforced concrete structures ... [7] The use of thermodynamic analysis in assessing ... [8] Carbonation in concrete infrastructure in the context ... [9] A study on the performance of the bacterial ... [10] Repair evaluation of concrete cracks using ... [11] Longitudinal waves for evaluation of large ... [12] Biological materials: functional adaptations ... [13] Characterization of microbe cementitious ... [14] Bioremediation of Pb-contaminated soil based ... [15] Microbial carbonate precipitation as a soil ... [16] Conservation of ornamental stone by Myxococcus xanthusinduced ... [17] Molecular biochemical and ecological characterisation of a bio- ... [18] Strain improvement of Sporosarcina pasteurii for enhanced ... [19] Remediation of concrete using ... [20] Bacterial carbonate precipitation as an alternative ... [21] Bacterial ureases in infectitious ... [22] State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite ... [23] Biomineralization and evolutionary ... [24] Microbial ureases: significance, regulation, and molecular ... [25] HMicrobial healing of cracks in concrete: a ... [26] Cementation of sand soil by microbially induced calcite ... [27] Bacterial calcification for enhancing performance of low ... [28] Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental ... [29] Microbially mediated plugging of porous media and the impact of ... [30] Effect of calcifying bacteria on permeation properties ... [31] Potential CO2 leakage reduction through biofilm ... [32] Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded ... [33] Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of ... [34] Bacterial carbonate precipitation improves the ... [35] Carbonate stone: chemical behaviour, durability, and ... [36] Bioremediation of weathered-building stone ... [37] Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for ... [38] Bacteria protect and heal concrete and ... [39] SEM investigation of microbial calcite precipitation in ... [40] Use of microorganism to improve the strength of cement ... [41] Crack repair by concrete immobilized ... [42] Development of a bacteria-based self-healing ... [43] Properties of ... [44] Application of bacteria as self-healing agent ... [45] Non-ureolytic bacterial carbonate precipitation as a surface treatment ... [46] Influence of calcium sources on microbially induced ... [47] CO2 disposal by means of ... [48] A Bacillus subtilis cell fraction (BCF) inducing ... [49] Bio-mediated ground improvement: from ... [50] Nuisance foam events and Phaeocystis ...

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی پتانسیل استفاده از رسوبات میکروبی در بازسازی بتن و ترسیب کربن

سمیه امامی* PhD
گروه بیولوژی و بیوتکنولوژی علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
حسینعلی علیخانی PhD
گروه بیولوژی و بیوتکنولوژی علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده
با گسترش شهرنشینی، کاربرد بتن و مصالح ساختمانی به‌صورت گسترده در سراسر دنیا در حال افزایش است. بنابراین استفاده از مکانیزمی که بتواند در افزایش طول عمر سازه‌های بتنی موثر باشد، ضروری است. دوام سازه‌های بتن آرمه عموماً تحت تاثیر ترک قرار دارد. ترک در بتن به علت‌های مختلف مثل حملات زیست محیطی، اضافه بار، دوره‌های یخ ذوب، یا آسیب‌های تصادفی ایجاد می‌شود. ترک‌های سطحی بتن، ورود مواد شیمیایی و خورنده مثل کلر را فراهم کرده که در اثر این عوامل، آرماتورهای داخل سازه‌های بتن‌آرمه خورده شده و موجب ازبین‌رفتن سازه‌های بتنی می‌شود. رسوبات آهکی میکروبی به‌عنوان یک درزگیر، توانمندی بالایی در پرکردن ترک‌ها و شکاف‌های ریز در گرانیت، سنگ و ماسه دارد. در این روش اوره توسط آنزیم اوره‌آز ترشح‌شده از باکتری، هیدرولیز شده و کربنات‌کلسیم در حضور یون کلسیم تشکیل می‌شود و موجب بهبود پایداری و خواص بتن در طولانی‌مدت می‌شود. بنابراین مبحث استفاده از رسوبات زیستی در ترمیم ترک بتن می‌تواند به‌عنوان یک روش طبیعی و سازگار با محیط زیست مورد توجه قرار گیرد. این مقاله به بررسی پیشرفت‌های اخیر و پتانسیل بالقوه این فناوری پرداخته است.

کلیدواژه‌ها: سیمان زیستی، مقاومت کششی، پایداری، ترسیب کربن

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۲
*نویسنده مسئول: halikhan@ut.ac.ir

مقدمه

زیرساخت‌هایی مانند جاده‌ها، پل‌ها و ساختمان‌ها که در طول صد سال گذشته ساخته شده‌اند، نقش عمده‌ای در افزایش رونق اقتصادی جهان بازی می‌کنند. چنین ساخت‌وسازهایی که در اواسط قرن گذشته شکل گرفته‌اند، اکنون با چالش نگهداری و بازسازی روبه‌رو هستند. از سوی دیگر، اقتصادهای در حال ظهور، به‌سرعت در حال پایه‌ریزی زیرساخت‌های خود هستند که منجر به افزایش مصرف مصالح ساختمانی می‌شود که پیش‌بینی می‌شود همچنان به رشد در آینده ادامه دهد[1]. صنعت سیمان با چالش‌هایی مانند کاهش مواد خام اولیه، ذخایر سوختی و نگرانی‌های زیست‌محیطی روزافزون مواجه است. تولید سیمان مسئول حدود ٦% از انتشار گاز CO_2 ناشی از فعالیت انسانی در جهان است. برای ایجاد پایداری در صنعت ساخت‌وساز باید اثرات زیست‌محیطی (استفاده از منابع و انرژی)، نگرانی‌های اجتماعی (سلامتی و تندرستی) و بدهی‌های اقتصادی (هزینه ساخت‌وساز) در حد مطلوب مدیریت شود. بنابراین، تغییر و تحول در فرآیند تولید مصالح ساختمانی برای دستیابی به پایداری ضروری است. مصالح ساختمانی همواره در معرض نفوذ نمک‌ها[2]، حملات کلریدی[3]، حملات سولفاتی[4]، عمل یخ‌زدگی[5]، نمک‌های حاصل از ذوب یخ[6]، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها[7] و کربناسیون[8] قرار می‌گیرند که همه این حملات باعث ایجاد ترک در سازه‌ها و کاهش عمر مفید آنها می‌شوند. ترک‌های با پهنای کمتر از ۰/۲میلی‌متر اگر چه روی خواص استحکامی سازه تاثیرگذار نیستند اما می‌توانند منجر به افزایش تخلخل و نفوذپذیری کلریدها، سولفات‌ها، اسیدها و عوامل خورنده‌شده که در طولانی‌مدت باعث تخریب بنا شوند[9]. سازه‌های بتنی یک ظرفیت مشخص برای ترمیم این نوع از ترک‌ها دارند که به ترکیب شیمیایی بتن وابسته است[10]. به‌ویژه مخلوط‌های با درصد سیمان بالا خواص خودترمیمی قابل ملاحظه‌ای دارند که ناشی از باقی‌ماندن مقداری از سیمان اولیه به‌صورت واکنش نکرده (آبگیری‌نشده) در بتن است که با نفوذ آب، این سیمان آبگیری‌نشده واکنش داده و ترک‌ها را پر می‌کند. این فرآیند در مورد همه بتن‌های سنتی اتفاق افتاده ولی توان خودترمیمی آن محدود به ترک‌های با عرض کمتر از ۰/۲میلی‌متر است. همچنین برای انجام این فرآیند شرایطی نیاز است که ایجاد این شرایط در بتن، در هنگام ایجاد ترک دشوار است، به‌عنوان مثال ذرات ریز سیمان باید در سطح ترک در مواجهه با آب قرار بگیرند که احتمال رخداد آن اندک است یا مخلوط بتن باید حاوی مقادیر بالای سیمان باشد که این موضوع به‌دلیل قیمت بالای سیمان و کاهش استحکام بتن، کمتر استفاده می‌شود[11]. بنابراین برای افزایش مقاومت و طول عمر سازه‌ها بایستی به‌دنبال ایجاد روش‌های جایگزین مثل بتن زیستی بود. در سال‌های اخیر، معدنی‌شدن زیستی به موفقیت‌هایی در ساخت مصالح ساختمانی دست یافته است. این مقاله به بررسی پتانسیل بتن زیستی به‌عنوان یک ترکیب ساختمانی پایدار و کاربرد این تکنولوژی در بهبود ویژگی‌های مواد ساختمانی مختلف از نظر قدرت، نفوذپذیری و دوام می‌پردازد.

معدنی‌شدن زیستی

معدنی‌شدن اغلب در مهندسی عمران استفاده می‌شده که نشان‌دهنده تولیدات معدنی، عمدتاً کربنات‌ها است. در معدنی‌شدن زیستی، موجودات زنده در روند معدنی‌شدن شرکت می‌کنند. موجودات زنده ترکیبات معدنی همراه با پلیمرهای زیستی تولید می‌کنند که به سیمانی‌شدن انتخابی کمک می‌کند[12]. این ترکیبات معدنی‌شده به‌عنوان مواد سیمانی به کار گرفته می‌شوند و گاهی اوقات به‌عنوان سیمان زیستی نامیده می‌شوند. سیمان زیستی شامل یک میکروب قلیادوست، محلول بستره و محلول یون کلسیم است که توجه زیادی به‌عنوان یک ماده سبز را به خود جلب کرده است[13]. استفاده از رسوب کربنات‌کلسیم میکروبی در پالایش فلزات سنگین[14]، تقویت و بهبود خاک[15]، بازسازی مواد سنگی[16]، تصفیه فاضلاب‌های خانگی[17]، تثبیت شن و ماسه[18]، استحکام بتن[19] و دوام مصالح ساختمانی[20] کاربرد دارد. سیمان

www.SID.ir

Archive of SID

زیستی در واکنش‌های بیوشیمیایی پیچیده توسط دو آنزیم مهم، یعنی اوره‌آز و کربنیک‌انهیدراز، شرکت می‌کند که توسط میکروب‌ها تولید شده و از اوره به‌عنوان بستره و منبع کلسیم برای معدنی‌شدن بهره می‌گیرد. در طول فعالیت اوره‌آز، یک‌مول اوره مصرف‌شده تا یک‌مول آمونیاک و یک‌مول از کاربامات تشکیل شود (معادله ۱)، که کاربامات با هیدرولیز خودبه‌خودی به شکل یک‌مول آمونیاک اضافی و کربنیک‌اسید در می‌آید (معادله ۲)، که به‌عنوان فعالیت اوره‌لیتیک شناخته شده است[21, 22]. این محصولات، بی‌کربنات و دومول آمونیوم و یون‌های هیدروکسید را تشکیل می‌دهند (معادله‌های ۳ و ٤). پس از ایجاد تعادل در محیط آبی که موجب افزایش pH و درنهایت تعادل دوره‌ای بی‌کربنات می‌شود، یون‌های کربنات تولید می‌شود (معادله ٥). با توجه به افزایش pH در سلول، غلظت زیاد یون کلسیم و کم پروتون در خارج از سلول برای ترشح یون‌های کربنات مورد نیاز است. شرایط pH بالا به نفع تشکیل CO_3^{2-} از HCO_3^- است[23]. درنهایت، افزایش غلظت کربنات در سطح فوق اشباع منجر به افزایش رسوب کربنات‌کلسیم در اطراف سلول و در حضور یون‌های کلسیم محلول می‌شود (معادله‌های ٦ و ۷):

(۱)
$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow NH_2COOH + NH_3$$

(۲)
$$NH_2COOH + H_2O \rightarrow NH_3 + H_2CO_3$$

(۳)
$$H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$$

(٤)
$$2NH_3 + 2H_2O \leftrightarrow 2NH_4^+ + 2OH^-$$

(٥)
$$HCO_3^- + H^+ + 2NH_4^+ + 2OH^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + 2NH_4^+ + 2H_2O$$

(٦)
$$Ca^{2+} + Cell \rightarrow Cell\text{-}Ca^{2+}$$

(۷)
$$Cell\text{-}Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow Cell\text{-}CaC$$

آنزیم دیگری که تبادل بین CO_3^{2-} و HCO_3^- را تسهیل کرده و رسوب کربنات را شدت می‌بخشد کربنیک‌انهیدراز است. این آنزیم نقش مهمی در تعیین غلظت CO_2 بازی می‌کند. اگر HCO_3^- منبع کربن غیرآلی محلول باشد، کربنیک‌انهیدراز ممکن است تبدیل آن به CO_2 را کاتالیز کند، و معادله واکنش کلی به‌صورت زیر است[24]:

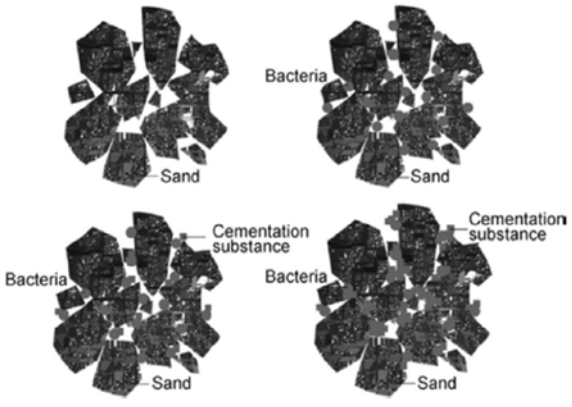
(۸)
$$HCO_3^- \xrightarrow{CA} H_2O + CO_2$$

(۹)
$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + H^+ + HCO_3^-$$
$$\rightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O + CO_2$$

به‌طور خلاصه، فرآیند تولید سیمان زیستی بستگی به شش عامل کلیدی شامل فعالیت آنزیم اوره‌آز، کربنیک‌انهیدراز، غلظت کلسیم، غلظت کربن محلول غیرآلی، pH و دردسترس‌بودن مکان‌های هسته‌ای (آغازگر) دارد.

سیمان زیستی

سیمان زیستی توسط رسوبات آهکی میکروبی در فضاهای بین ذرات دانه‌ای از طریق تخلیه سوسپانسیون حاوی باکتری‌های قلیادوست، اوره (به‌عنوان بستره) و یون کلسیم تولید می‌شود[13, 22, 25]. آنزیم اوره‌آز توسط باکتری تولید شده و از هیدرولیز اوره و کلسیم به شکل سیمان زیستی به‌عنوان منبع انرژی استفاده می‌کند. پیوندهای سیمانی دانه‌ها با یکدیگر یک توده جامد ایجاد می‌کنند. این فرآیندها برای برنامه‌های کاربردی مانند تثبیت خاک[26]، ساخت‌وساز زمین[27]، بازسازی سنگ‌های مصنوعی[28]، آب‌بندی کانال آب[29] و پالایش آلاینده‌ها[14] مناسب است. در این فرآیند، کربنات بایستی به‌صورت یکنواخت در فضاهای داخلی گرانوله‌ای برای یک اتصال مناسب ته‌نشین شود. نقش اصلی ریزسازواره‌ها در رسوب کربنات عمدتاً به توانایی آنها در ایجاد یک محیط قلیایی (pH بالا و افزایش کربن آلی محلول) از طریق فعالیت‌های فیزیولوژیکی آنها بر می‌گردد. در چنین برنامه‌های کاربردی بایستی میکروب‌هایی متحمل به pH قلیایی استفاده شوند. سیمانی‌شدن زیستی در اتصال دانه‌های ماسه (شکل ۱) برای ساخت ماسه سنگ زیستی با مقاومت فشاری کافی موثر نشان داده است. *آچل* و همکاران از سیمانی‌شدن زیستی همراه با سیمان معمولی برای ساخت ملات استفاده کرده‌اند. سلول‌های باکتریایی رشدیافته در محیط مایع به مخلوط ماسه و سیمان، که در آن نسبت کشت باکتریایی ۰/٤۷ برای ۷۰/٦میلی‌متر مکعب سیمان بود، اضافه شدند و فرمول مشابه برای ساخت نمونه‌های بتن با دانه‌بندی درشت به دست آمد. در این نمونه، مقاومت فشاری ۱۷ تا ۳٦% و مقاومت در برابر نفوذ آب چهار برابر بهبود یافت[18, 30]. به‌طور کلی سیمانی‌شدن زیستی به سویه باکتری (فعالیت بالاتر اوره‌آز و ظرفیت بالای کلسیت) و ترکیب محیط کشت (مشخصات تغذیه‌ای با ارزش به نفع رسوب بالای کلسیت) بستگی دارد. سیمانی‌شدن زیستی منجر به رسوب کلسیت در سطح سلول و همچنین در ماتریس ملات سیمان، و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری می‌شود.



شکل ۱) کلونیزه‌شدن باکتری‌ها روی دانه‌های مجزای شن و تولید رسوبات میکروبی که منجر به اتصال ذرات به هم می‌شود[13]

www.SID.ir

Archive of SID

رسوب زیستی

در رسوب زیستی یک لایه از کربنات با منشا زیستی روی یک بستر متخلخل مانند آجر، سیمان یا ملات رسوب می‌کند. رسوب کربنات میکروبی می‌تواند در داخل خلل و فرج سطحی کریستال ته‌نشین شده و از ورود مواد مضر به بستر جلوگیری کند. بنابراین، سطح مواد متخلخل، مانند سنگ آهک، بتن یا آجر را می‌توان از نفوذ آب یا مواد شیمیایی محافظت کرد[31]. *دیک* و همکاران تیمار رسوب زیستی را به‌منظور تعمیر و محافظت از تخریب سنگ آهک به کار برده بودند[32]. در آزمایش‌های آنها، مکعب سنگ آهک با ابعاد ۳۰میلی‌متر درون شیشه استریل با محیط مایع حاوی نیترات‌براث، سدیم‌بیکربنات، اوره و کلسیم‌کلرید، تلقیح‌شده با ۱٪ از سویه‌های مختلف باکتری باسیلوس (پنج گونه از *باسیلوس اسفاریکوس* (*Bacillus sphaericus*) مختلف و یک سویه از باکتری *باسیلوس لانتوس*؛ *Bacillus lentus*) انکوبه شدند. لایه‌های متعددی از کلسیت، روی سنگ آهک تخریب‌یافته در طی چهار هفته نهشته شده بود. آنها نتیجه گرفتند که بهترین و همگن‌ترین رسوب زیستی کلسیت در مکعب سنگ آهک توسط باکتری اوره لیتیک با راندمان بالاتر، یعنی، *باسیلوس اسفاریکوس* ایجاد می‌شود. در مطالعه *دیمونک* و همکاران نیز از طریق بهینه‌سازی پارامترهای شیمیایی مانند غلظت نمک‌های کلسیم و اوره، بهره‌وری فرآیند تولید رسوب زیستی بهبود داده شد[33]. غلظت بهینه کلسیم در حدود ٤/۱۳میلی‌گرم کلسیم در سانتی‌متر مربع (تیمار رسوب زیستی ۲۰گرم بر لیتر اوره و ۵۰گرم بر لیتر کلسیم‌کلرید) تخمین زده شد. افزایش غلظت اوره و کلسیم در یک سطح خاص و تکرار تیمارها مقاومت سنگ آهک به جذب آب را به‌علت رسوب کربنات میکروبی بهبود داد. *دیمونک* و همکاران به این نتیجه رسیدند که رسوب یک لایه از کلسیت در سطح نمونه‌ها منجر به کاهش مکش مویرگی و کاهش نفوذ گاز می‌شود[20]. علاوه بر این، اثربخشی تیمار رسوب زیستی با کشت‌های میکروبی خالص، به‌منظور ارزیابی مقاومت نمونه‌های ملات و بتن در حال تخریب مورد بررسی قرار گرفت[34]. کریستال‌های کربنات‌کلسیم حاصل از *باسیلوس اسفاریکوس* جذب آب را از ٦۵٪ تا ۹۰٪ بسته به تخلخل نمونه‌ها کاهش دادند. تیمار رسوب زیستی می‌تواند به‌عنوان یک سیستم پوشش دو جزئی با ویژگی مسدودکردن منافذ در نظر گرفته شود که نتیجه آن مسدودکردن منافذ و تشکیل بیوفیلم روی سطح نمونه‌ها است. این بیوفیلم به‌عنوان یک پرایمر برای پوشش کربنات عمل می‌کند. باکتری‌ها در داخل بیوفیلم جذب یون‌های فلزی با بار مثبت موجود در محیط اطراف خود می‌شوند و به‌عنوان مکان‌های هسته‌ای به‌علت بار منفی دیواره سلولی خود عمل می‌کنند[34].

بازسازی زیستی

سازه‌های خراب به دلایل مختلف مانند حملات زیست محیطی، اضافه بار یا آسیب‌های تصادفی برای ادامه حیات به بازسازی نیاز دارند. استفاده از عوامل مصنوعی مانند پلیمرها برای اصلاح این ساختارها رایج است. با این حال، سازه‌ها یک سیستم متشکل از مواد مختلف با عملکرد بلندمدت هستند و ممکن است استفاده از پلیمر منجر به ایجاد مشکلات پیچیده‌ای شود. رسوب کربنات زیستی می‌تواند یک ابزار موثر به‌منظور اصلاح سازه‌های تخریب‌یافته باشد. در چنین شرایطی التیام خودبه‌خودی ساختار می‌تواند یک مزیت بزرگ محسوب شود. تحقیقات اولیه توانایی این روش را در بازسازی سازه‌های تخریب‌یافته و بازسازی شکاف‌ها در مواد سیمانی نشان داده است. رسوب کربنات زیستی همچنین در تمیزکردن و ازبین‌بردن سولفات از آثار تاریخی پوشیده از سنگ مرمر استفاده شده است. یک باکتری بی‌هوازی *دسولفوویبریو دسولفوریکنس* (*Desulfovibrio desulfuricans*)، برای تبدیل سولفات به کلسیت به‌عنوان محصول سیمان زیستی مورد استفاده قرار گرفته که معادله آن در زیر نشان داده شده است[35]:

(۱۰)

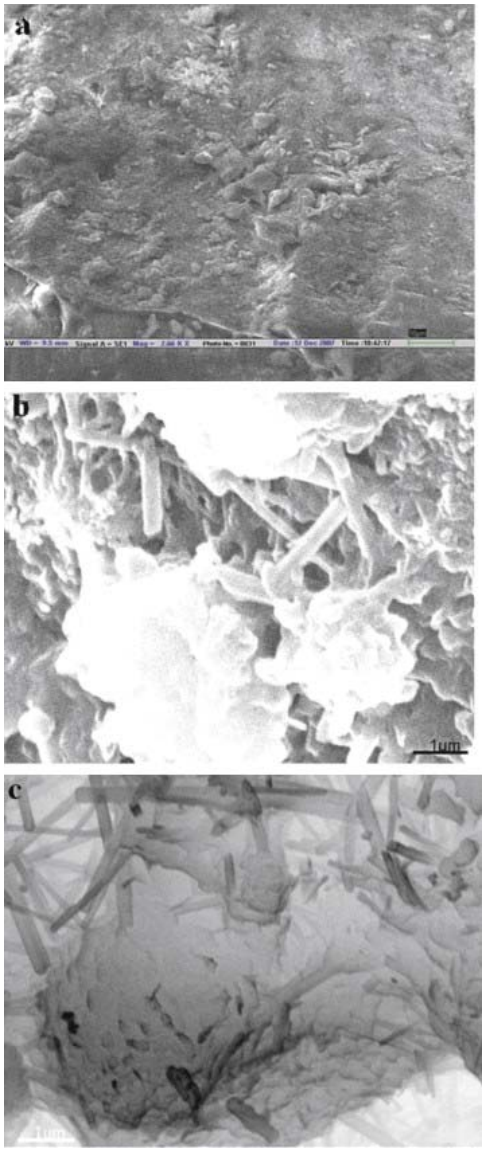
$$6CaSO_4+4H_2O+6CO_2\rightarrow 6CaCO_3+4H_2S+2S+10_2$$

استفاده از باکتری‌های مولد کربنات زیستی در تعمیر و بازسازی بناهای تاریخی موفقیت‌آمیز بوده است. لایه کلسیت در سطح سنگ بناهای تاریخی به‌عنوان پوشش محافظ عمل می‌کند و در عین حال تقریباً ماهیت سنگ را شبیه‌سازی می‌کند. اما به‌طور کامل منافذ طبیعی ساختار را مسدود نمی‌کند، بنابراین نمک‌های محلول می‌توانند از سنگ انتقال یابند[36]. دو راه برای انجام اصلاح زیستی در نمونه‌های بتنی وجود دارد. روش اول استفاده از سلول‌های باکتریایی (همراه با منبع اوره و کلسیم) در ماتریس بتن طی فرآیند ریخته‌گری است؛ و روش دوم کاربرد سطحی رسوبات زیستی بعد از ایجاد شکاف است[37]. بازسازی براساس رسوب کربنات میکروبی در نمونه‌های بتن توسط *رماچندران* و همکاران آغاز شد[19]. زمانی که شن با سلول‌های *اسپوروسارسینا پاستوری* (*Sporosarcina pasteurii*) مخلوط و در محل شکاف استفاده شد، مقاومت فشاری ٦۱% بهبود یافت. در آزمایش دیگری آنها سلول‌های باکتریایی پلی‌اورتان کپسول‌دار را به‌منظور حفاظت آنها در برابر pH بالای سیمان استفاده نمودند. مقاومت فشاری بتن اصلاح‌شده به میزان ۱۲٪ در ۷ روز افزایش یافت؛ با این حال، در انتهای ۲۸ روز تنها ۳% افزایش داشت. *ونگ* و همکاران کارآیی بازسازی زیستی را در بهبود استحکام بازیابی‌شده در منشور ملات (تا ٦۰%) و کاهش نفوذ آب (10^{-10} تا 10^{-11}متر بر ثانیه) در سیلندر بتن گزارش کرده‌اند[37]. هنگامی که سلول‌های باکتریایی به شکاف اضافه می‌شوند، آنها می‌توانند در حضور رطوبت، آب و اکسیژن رشد کرده و به‌دنبال آن با تولید اوره‌آز و درنهایت رسوب کلسیت شکاف را پر کنند (شکل ۲).

یکی از موانع در طول بستن شکاف نمونه سیمانی، مواجهه با pH بالای بتن است که برای غلبه بر این مشکل، میکروکپسول به‌عنوان حامل باکتری استفاده می‌شود. میکروکپسول‌ها در مسیر شکاف شکسته شده و باکتری‌ها در حضور آب شروع به جوانه‌زدن کرده و کربنات‌کلسیم رسوب می‌کند. رشد باکتری، فعالیت اوره‌آز و منبع یون کلسیم سه عامل مهم برای اصلاح زیستی شکاف در بتن است.

www.SID.ir

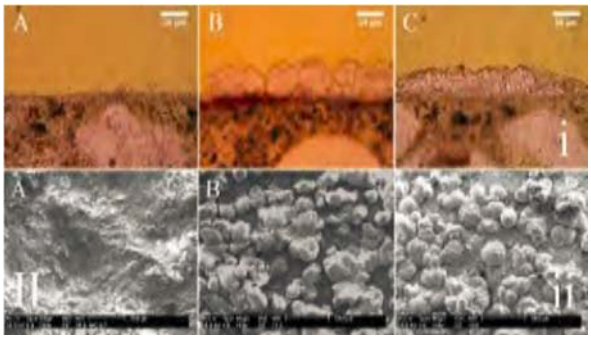
Archive of SID



شکل ۲) تصویری از رسوب کلسیت زیستی در محل ترک‌خوردگی بتن؛ (a) ماتریکس ملات سیمان بدون باکتری، (b) تصویری از سطح ترک اصلاح‌شده، که نشانگر کریستال‌های کلسیت همراه با باکتری میله‌شکل باسیلوس است و (c) تصویری از قسمت‌های درونی ترک، که نشان‌دهنده رسوب کلسیت همراه با چند حفره میله‌ای‌شکل است که احتمالاً توسط سلول‌های باکتریایی پر می‌شود[25].

آزمایش مقایسه بتن باکتریایی با روش‌های رایج ترمیم ترک

با ایجاد ترک در بتن، باقی‌مانده سیمان واکنش نداده، هیدراته شده و هیدروکسیدکلسیم تولید می‌کند. این هیدروکسیدکلسیم با کربن‌دی‌اکسید محلول در آب و گاز نفوذ کرده به بتن واکنش داده و رسوب کربنات‌کلسیم تولید می‌کند. با ادامه فرآیند، این هیدروکسیدکلسیم از درون بتن (از طریق ترک) به بیرون تراوش نموده و رسوب کربنات‌کلسیم تولید می‌کند. اگر ترک‌ها ریز باشند بتن می‌تواند خود را ترمیم کند. در صورتی که ابعاد ترک‌ها از حد مشخصی بزرگ‌تر باشد، دیگر بتن توانایی ترمیم خود را ندارد و هیدروکسیدکلسیم ارزشمند که مشخصه منحصربه‌فرد بتن است به درون آب نفوذ می‌کند و با کاهش قلیای بتن خواص آن از دست می‌رود. در صورت وجود آرماتورهای فولادی در بتن، این آرماتورها به‌وسیله قلیای بتن محافظت می‌شوند. با کاهش قلیای بتن این حفاظت از بین رفته و آرماتورها دچار خوردگی می‌شوند. خوردگی آرماتورها با افزایش حجم همراه بوده و این خود موجب ایجاد ترک‌های جدید در بتن و تخریب شدیدتر آن می‌شود. در شکل ۳ ایجاد این رسوب‌ها در دهانه ترک نمایش داده شده است[38]. وجود باکتری‌ها و ایجاد کربنات‌کلسیم به‌دلیل این که این رسوب در داخل ترک ایجاد شده و کلسیم موجود در قلیای بتن را مصرف نمی‌کند، بسیار ارزشمند و کارآمد است. در این فرآیند لاکتات‌کلسیم یا سایر منابع کلسیم در حضور اکسیژن توسط باکتری‌ها به کلسیم‌کربنات تبدیل می‌شود. این ماده (لاکتات‌کلسیم) به‌عنوان منبع تغذیه باکتری به بتن اضافه می‌شود. کربن‌دی‌اکسید تولیدشده توسط باکتری‌ها نیز در فرآیند بستن مجدد ترک وارد می‌شود. این کربن‌دی‌اکسید با ذرات سیمان واکنش‌نکرده، واکنش داده و کربنات‌کلسیم در سطوح داخلی ترک تولید رسوب می‌کند که منجر به ترمیم ترک می‌شود. وجود این رسوب باعث تشدید و تقویت رسوب‌گذاری کربنات‌کلسیم از طریق باکتری‌ها می‌شود. ادامه تحقیقات با اعمال کلریدکلسیم به‌عنوان منبع کلسیم انجام شده است. با توجه به طبیعت مخرب یون کلر برای دوام و پایداری آرماتورهای فولادی در محیط بتن انتخاب مواد جایگزین نظیر استات‌کلسیم نیز مورد توجه قرار گرفته است. در صورت استفاده از کلریدکلسیم مورفولوژی بلورهای تشکیل‌شده به‌صورت رومبو هدرال است، در حالی که استفاده از استات‌کلسیم به‌عنوان منبع کلسیم بلورهای کروی را به وجود می‌آورد ولی در مجموع از نظر ترمیم ترک هیچ‌گونه تفاوتی در استفاده از منابع متفاوت کلسیم (کلریدکلسیم و استات‌کلسیم) وجود ندارد. بنابراین به نظر محققین با توجه به این موضوع و سازگاری بهتر استات‌کلسیم با محیط بتن و آرماتورهای فولادی بهتر است از استات‌کلسیم به‌عنوان منبع کلسیم در محیط بتن استفاده شود (شکل ۳).



شکل ۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی مقاطع نمایش‌دهنده لایه‌های کریستال‌های کربنات روی نمونه تیمارشده با باکتری و کلریدکلسیم (B)، با باکتری و استات‌کلسیم (C) و نمونه تیمارنشده (A)

در آزمایشی دیگر[38] روش ترمیم متداول بتن با روش رسوب باکتریایی مقایسه شده است (شکل ٤). تعدادی از نمونه‌های ترک‌دار برای مقایسه با رزین‌اپوکسی و تعدادی نیز با باکتری *باسیلوس اسفریکوس* ترمیم شدند. عملیات باکتریایی گوناگونی به‌منظور

www.SID.ir

Archive of SID

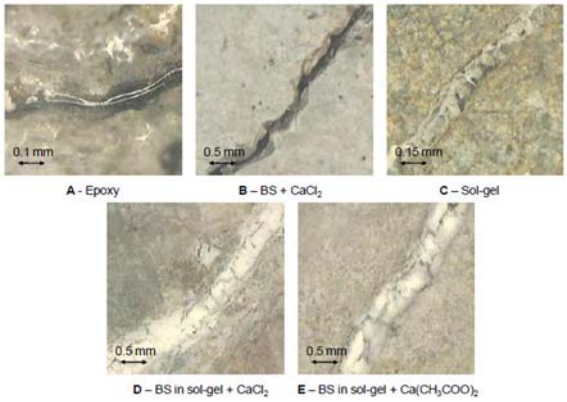
ترمیم ترک روی نمونه انجام شد. بزرگ‌ترین عامل بازدارنده در موقع استفاده از باکتری برای ترمیم بتن مقدار قلیای بالای بتن بود که مانع رشد باکتری می‌شد. بنابراین از ژل سیلیکا در این پژوهش به‌منظور حفاظت باکتری از اثر قلیایی بتن استفاده شد. پس از آن نمونه‌ها در یک محلول حاوی کلسیم و اوره قرار گرفتند. هدف از این کار تامین مواد اولیه برای فعالیت باکتری‌ها و ایجاد رسوب کلسیم‌کربنات بود. در تعدادی از نمونه‌ها کلسیم‌استات به‌عنوان منبع تامین کلسیم استفاده شد. نمونه‌ها در این پژوهش با دو روش باکتری زنده فعال و با باکتری مرده اتوکلاوی ساخته شدند. این روش برای حصول اطمینان از این که ترک‌ها فقط به‌وسیله سیلیکاژل و جرم زیستی ترمیم نمی‌شوند و اثبات این که ترمیم ترک ناشی از فعالیت باکتری‌ها است، انجام شد. کارآیی هر یک از روش‌ها به‌وسیله اندازه‌گیری میزان نفوذ آب سنجیده شد. تمام نمونه‌ها به‌جز نمونه ($Bs+CaCl_2$) باعث کاهش نفوذپذیری آب در مقایسه با نمونه اصلاح‌نشده شدند. در حالتی که باکتری‌ها در برابر قلیای بتن محافظت نشده بودند، قادر به تولید رسوب کافی کربنات‌کلسیم برای ترمیم و بستن ترک‌ها نبودند. این موضوع تاییدکننده ضرورت حفاظت باکتری‌ها در برابر قلیای بتن با ژل سیلیکا است. اصلاح بتن با Sol-Gel نتایج متوسطی در بر داشت. در حالت استفاده از باکتری در حضور ($CaCl_2$=Sol-gel) یا کلسیم‌استات مقدار کمی آب نفوذ کرد و نتایجی برابر با ترمیم بتن با اپوکسی مشاهده شد. با توجه به خورنده‌بودن یون کلر و یکسان‌بودن اثر کلسیم‌کلرید و کلسیم‌استات، استفاده از کلسیم‌استات منطقی‌تر است. در حالت استفاده از باکتری غیرفعال (باکتری مرده) اتوکلاوی با سیلیکا ژل مشاهده شد که نفوذپذیری به مقدار زیادی کاهش یافته است که ناشی از ترمیم و پرکردن ترک توسط ژل سیلیکا است. در حالت استفاده از باکتری زنده و فعال مقدار نفوذپذیری آب به شدت کاهش یافته که نمایانگر تاثیر باکتری است. در حالتی که فقط از سول- ژل استفاده می‌شود مقدار کاهش نفوذپذیری اندکی مشاهده می‌شود. در این حالت وقتی سول- ژل به داخل ترک تزریق می‌شود به‌دلیل انقباض ژل در حین خشک‌شدن ترک‌هایی در زمینه ژل ایجاد شده و نفوذ آب افزایش می‌یابد. در صورت استفاده از سیلیکاژل باکتری غیرفعال، به‌دلیل غوطه‌وری مجدد مخلوط در محلول کلسیم و اوره این ترک‌ها ایجاد نمی‌شوند. کارآیی سیلیکاژل در مقایسه با سول- ژل بدون باکتری بیشتر است. باکتری زنده و سیلیکاژل به‌دلیل ایجاد کلسیم‌کربنات و بستن ترک‌ها، کارآیی بسیار زیادی دارند و نفوذ آب را به‌شدت کاهش می‌دهند[38].

مکانیزم خودترمیمی، مکانیزمی است که در صورت ایجاد هر گونه ترک در بتن، به‌صورت خودبه‌خود بدون دخالت عامل خارجی تعمیر و مرمت شود. بنابراین برای داشتن چنین سیستمی لازم است که عامل ترمیم‌کننده در ماتریس بتن وجود داشته باشد و در زمان نیاز آزاد شود. در این تحقیق از شیشه بورو سیلیکات با قطر داخلی ۳میلی‌متر و طول ۳۰میلی‌متر به‌عنوان یک محفظه برای نگهداری مواد خودترمیم‌کننده استفاده شد. زمانی که به باکتری‌ها مواد مغذی نرسد، آنها از بین می‌روند و بنابراین هیچ‌گونه رسوبی در صورت ایجاد ترک تشکیل نخواهد شد. در یک تحقیق برای حل این مشکل از اسپور به جای میکروارگانیزم زنده استفاده شد. اسپورها زنده بوده اما به‌صورت سلول نهفته هستند و می‌توانند در این حالت برای سالیان متمادی تا ۵۰ سال حتی در شرایط نامناسب به حیات خود ادامه دهند. این موضوع به‌دلیل دیواره‌های ضخیم خارجی آنها است. به‌منظور بررسی این که رسوب کربنات‌کلسیم توسط اسپور زنده انجام می‌شود از اسپور مرده اتوکلاوی نیز استفاده شد. علاوه بر این به‌منظور بررسی این که آیا سیلیکاژل نیز می‌تواند به‌صورت دائم باعث پایداری و ترمیم خودبه‌خود ترک شود یا نه آزمایشاتی با این ماده نیز انجام شد. علاوه بر سیلیکاژل از فوم پلی‌یورتان نیز به‌عنوان پرکننده ترک استفاده شد. این فوم علاوه بر نقش حفاظت اسپور در برابر محیط قلیایی بتن نقش پرکننده را نیز بر عهده دارد. سیلیکاژل به‌عنوان ماده تثبیت‌کننده و نگهدارنده باکتری از لوله شیشه‌ای دو بخشی تشکیل شده بود. یک بخش با اسپورهای *باسیلوس اسفریکوس* همراه با لواسیل (Levasil) و بخش دوم با محلول اوره، مخمر و نیترات کلسیم، مانند شکل ۵- A پر شد. هنگام ایجاد یک ترک، لوله مذکور شکسته شده و لواسیل در مجاورت نیترات‌کلسیم شروع به تشکیل ژل می‌کند. اسپورها در ژل پخش و در تماس با اوره و مخمر قرار می‌گیرند این تماس باعث فعال‌شدن اسپور شده و نقش تامین غذای باکتری را این مواد به عهده دارند، نیترات‌کلسیم دو نقش اساسی را بازی می‌کند اول به‌عنوان منبع تامین کلسیم و دوم به‌عنوان یک پذیرنده الکترون (به‌دلیل نبودن اکسیژن و غلظت کم آن در ترک). بنابراین بعد از تماس، فرآیند به‌صورت خودبه‌خود شروع می‌شود. در صورت استفاده از فوم پلی‌یورتان به‌عنوان ماده نگهدارنده باکتری، سه لوله شیشه‌ای تهیه می‌شود. لوله اول با محلول اسپورهای *باسیلوس اسفریکوس*، لوله دوم با ترکیب PU-B از پلی‌یورتان و لوله سوم با ترکیب PU-A اوره، مخمر و نیترات‌کلسیم پر می‌شود. با شکست لوله‌ها و تماس مواد با هم فوم پلی‌یورتان تشکیل می‌شود. با تشکیل این فوم و طبیعت گسترش‌یابنده همراه با افزایش حجم آن، باعث می‌شود که ترک‌ها پر شده و مواد نیز از لوله‌ها بیرون کشیده شوند. باکتری‌های خارج‌شده از لوله منتشرشده در فوم با مواد مغذی و منبع کلسیم تماس پیدا کرده و می‌توانند رسوب کربنات‌کلسیم را تشکیل دهند. پس از این که مواد ذکرشده در بالا در لوله‌ها قرار گرفتند انتهای لوله به‌وسیله چسب بسته و آماده اضافه‌شدن به محیط بتن شد. نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان برابر نیم و ابعاد ۱۲۰×۶۰×۶۰ میلی‌متر تهیه شد. برای پرکردن قالب ابتدا یک لایه به ضخامت ۱۰میلی‌متر از بتن داخل قالب ریخته شده و سپس کپسول‌های لوله‌ای‌شکل به‌صورت دوتایی تا سه‌تایی (بسته به ترکیب) درون این لایه قرار گرفتند. در مراحل بعد نیز لایه‌هایی مشابه مراحل اول قرار گرفت تا قالب پر شود. بعد از ایجاد ترک، نمونه‌ها در شرایط محیط و رطوبت نسبتاً زیاد نگهداری شدند. بعد از یک هفته با فعال‌شدن

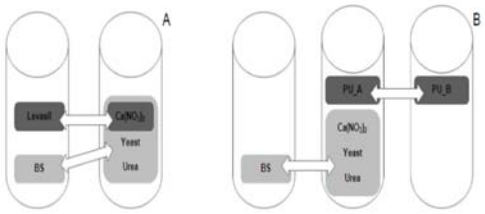
www.SID.ir

Archive of SID

اسپورها، نمونه‌ها مجدداً تحت آزمایش خمش سه نقطه قرار گرفتند[38].

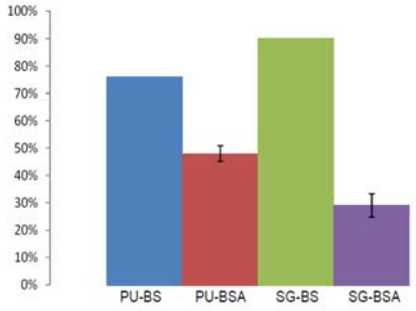


شکل ۴) A: یک ترک ترمیم‌شده با اپوکسی را نشان می‌دهد که با اپوکسی کاملا پر شده است، B یک ترک با $Bs+Cacl_2$ ترمیم‌شده را نشان می‌دهد، در این حالت چون باکتری در برابر قلیای بالای بتن محافظت نشده‌اند، رسوبات کلسیم‌کربنات باکتریایی تولید نشده است. در شکل D-۴ و E-۴ باکتری همراه با سیلیکاژل استفاده شده و ترک‌ها ترمیم و پرشده‌اند. در شکل C-۴ حالتی که فقط سولژل استفاده شود در حین خشک‌شدن ترک‌هایی ایجاد می‌شود که حفاظت کامل نمی‌تواند ایجاد کند. در شکل D-۴ و E-۴ که سول ژل و کلسیم‌کربنات یا کلسیم‌استات استفاده شود و در محلول اوره- کلسیم بعد از پرکردن ترک‌ها توسط ژل و باکتری غوطه‌ور شود، در این حالت رسوب کلسیم‌کربنات به‌وسیله باکتری ایجاد شده و ترک‌ها کاملاً پر می‌شوند.



شکل ۵) کپسول‌های حاوی مواد متفاوت (A) سیلیکاژل، (B) فوم پلی‌یورتان استفاده‌شده برای غیرمتحرک‌کردن مواد باکتریایی پرکننده ترک

به‌منظور ارزیابی کارآیی و راندمان هر کدام از فرآیندهای بالا، تغییرات استحکام به‌عنوان پارامتر سنجش در نظر گرفته شد. استحکام نمونه‌ها قبل و بعد از خودترمیمی با هم مقایسه شد. نمودار ۱ نشان می‌دهد که یک تفاوت فاحش در تغییرات استحکام خمشی بین نمونه‌های حاوی اسپور زنده و مرده وجود دارد. در حالی که اگر از اسپور مرده همراه با فوم پلی‌یورتان استفاده شود، بازگشت استحکام خمشی به میزان ۵۰% حالت اولیه مشاهده می‌شود، اما اگر از اسپور زنده در همین شرایط استفاده شود، بازگشت استحکامی در حد ۷۶% استحکام اولیه به دست می‌آید که این ناشی از رسوب کربنات‌کلسیم و بنابراین ترمیم ترک‌ها است که موجب افزایش ۳۲% در استحکام خمشی می‌شود. این فناوری بسیار برتر از کاربرد باکتری تنها یا ژل است. در صورت استفاده از باکتری بدون تثبیت در ژل سیلیکا، تشکیل رسوب کربنات‌کلسیم بسیار محدود و اندک بود و در عمل نیز تشکیل رسوب مشاهده نشد. در صورت استفاده از ژل سیلیکا به‌تنهایی نیز این ژل ترک‌خورده و قابلیت ترمیم مناسب و حفاظت بتن را نداشت[38].



نمودار ۱) تغییرات استحکام ناشی از فرآیند خودترمیمی بتن با پلی‌یورتان سیلیکا ژل، *باسیلوس اسفریکوس* و *باسیلوس اسفریکوس* مرده (اتوکلاوی)

انواع باکتری‌های استفاده‌شده در بازسازی بتن

انواع باکتری‌هایی که تاکنون در زمینه کاربرد آنها در بتن باکتریایی تحقیق‌شده، شامل *باسیلوس پاستوری*، *باسیلوس اسفریکوس*، *اشریشیا کلی*، *باسیلوس سوبتیلیس* هستند. از این باکتری‌ها، در ساخت بتن باکتریایی استفاده شده است. اکثر آنها در فرآیندی که تولید رسوبات کلسیتی می‌کنند وارد شده و باعث بهبود خواص بتن می‌شوند[6].

خصوصیات مصالح ساختمانی

مقاومت فشاری: سیمانی‌شدن زیستی منجر به تشکیل بتن در مقاومت فشاری بالاتر نسبت به بتن معمولی می‌شود[39]. *گوش* و همکاران افزایش ۱۷ و ۲۵% در مقاومت فشاری به‌ترتیب پس از ۷ و ۲۸ روز، در ملات بیولوژیک جنس شوانلا (Shewanella SP) اندازه‌گیری کردند[40]. *جونکر* و اسکلوگن از باکتری *اسپوروسارسینا پاستوری* برای سیمانی‌شدن زیستی نمونه‌های بتن آرماتوربندی‌شده استفاده کردند که تفاوت معنی‌داری در مقاومت کششی بین نمونه شاهد (۷۸/۷نیوتن بر میلی‌متر مربع) و نمونه‌های باکتریایی (۴۵/۷نیوتن بر میلی‌متر مربع) وجود نداشت در حالی که مقاومت فشاری تا حدودی بالاتر بود[41]. علاوه بر این، آنها افزایش ۱۰% در مقاومت فشاری بتن در مدت ۲۸ روز با استفاده از یک کنسرسیوم *باسیلوس سودوفیرموس* (*Bacillus pseudofirmus*) و *باسیلوس کهنی* (*Bacillus cohnii*) به دست آوردند[42]. هنگامی که سلول‌های باکتریایی به مواد سیمانی اضافه می‌شوند، آنها پس از کسب غذای خود از منافذ مواد سیمانی و اطراف آن شروع به رشد می‌کنند و کربنات‌کلسیم را در سطح سلول و همچنین در ماتریس ملات سیمان رسوب می‌دهند. هنگامی که منافذ در ماتریس بسته می‌شوند جریان انتقال مواد مغذی و اکسیژن به سلول‌های باکتریایی محدود می‌شود. درنهایت، سلول‌ها از بین رفته یا به حالت اندوسپور تبدیل می‌شوند و به‌عنوان الیاف آلی عمل می‌کنند. بنابراین، علاوه بر رسوب کربنات میکروبی افزایش نهایی مقاومت در ماتریس ناشی از زیست‌توده میکروبی نیز است.

نفوذپذیری آب: به‌عنوان یکی از پارامترهای اساسی برای توصیف

www.SID.ir

Archive of SID

دوام طولانی‌مدت بتن، مقاومت در برابر نفوذ آب بسیار مهم است و تعیین‌کننده میزان نفوذ مواد خورنده مخرب در بتن است. سیمان زیستی توانایی کاهش قابل توجه نفوذپذیری آب در مواد سیمانی و سایر مصالح ساختمانی را نشان داده است. در سال ۱۹۹۳، کلیسای سنت مدارد در تهوارس با استفاده از کربنات‌کلسیم با منشا میکروبی بازسازی شد که جذب آب از سنگ پنج مرتبه بدون آن که تاثیری بر زیبایی ظاهر آن داشته باشد، کاهش یافت. *دی‌مووینک* و همکاران کاهش ٦٥ تا ۹۰٪ در جذب آب در نمونه‌های ملات، به‌علت رسوب یک لایه از کلسیت در سطح گزارش نموده‌اند[20]. حضور کریستال‌های کربناتی و زیست‌توده در سطح و همچنین در داخل ماتریس متخلخل بتن منجر به کاهش نفوذپذیری می‌شود.

یون کلرید: انتشار یون کلرید در بتن‌های آرماتوربندی‌شده می‌تواند به آرماتور آسیب برساند. خوردگی ناشی از کلرید یکی از مکانیزم‌های عمده موثر بر تخریب بلندمدت سازه‌های ساختمانی است. فولاد تعبیه‌شده در بتن در مقابل خوردگی ذاتاً به‌وسیله سطح غیرفعال فولاد که ناشی از قلیاییت بالای بتن است، محافظت می‌شود. با این حال، قلیاییت بتن می‌تواند به‌علت اثرات زیست‌محیطی خنثی شود. در چنین وضعیتی اگر کلریدها به آرماتور فولادی برسند، خطر خوردگی افزایش می‌یابد. هنگامی که سیمان زیستی منافذ را پر می‌کند، پیشرفت یون‌های کلرید مختل می‌شود. با این حال، نمک کلریدکلسیم که به‌عنوان منبع کلسیم در تولید سیمان زیستی استفاده می‌شود، حاوی یون کلرید است که بایستی تاثیر حضور یون‌های کلرید در خوردگی میله‌های فولادی مورد بررسی قرار گیرد. برای جلوگیری از این معضل برخی از محققان جایگزین‌های کلریدکلسیم به‌عنوان منبع کلسیم را ارزیابی کرده‌اند. علاوه بر این، کلریدکلسیم منجر به تولید حجم انبوهی از آمونیاک می‌شود که خطر خوردگی آرماتور را افزایش می‌دهد. *نویل* استفاده از لاکتات‌کلسیم را که به‌علت تبدیلات متابولیکی حجم زیادی از آمونیاک ایجاد نمی‌کند را پیشنهاد داده است[43]. لاکتات‌کلسیم توسط *باسیلوس کهنی* مصرف شده که منجر به تولید مقدار فراوان از رسوب کربنات‌کلسیم به مقدار ۲۰-۸۰میکرومتر روی سطوح شکاف‌ها می‌شود[44]. *ژو* و همکاران توانایی لاکتات‌کلسیم و گلوتامات‌کلسیم برای رسوب‌دادن کربنات‌کلسیم توسط *باسیلوس کهنی* را مقایسه کردند و مشاهده نمودند که ضخامت لایه رسوب‌یافته توسط گلوتامات‌کلسیم بیشتر از ضخامت لایه رسوب‌یافته توسط لاکتات‌کلسیم است[45]. اخیراً، *اچل* و *پان*[46] تاثیر منابع مختلف کلسیم، شامل کلریدکلسیم، اکسیدکلسیم، استات‌کلسیم و نیترات‌کلسیم در رسوب‌دادن کلسیت را بررسی نموده و اوره‌آز تولیدشده توسط جنس باسیلوس را اندازه‌گیری نمودند. میزان CR2 با کلریدکلسیم ۱۴۳۲واحد بر میلی‌لیتر در مقایسه با ۱۴۱۸واحد بر میلی‌لیتر در نیترات‌کلسیم، ۱۴۰۱واحد بر میلی‌لیتر در استات‌کلسیم و ۱۳۸۹واحد بر میلی‌لیتر در اکسیدکلسیم بود. آنها به حداکثر عملکرد رسوب کلسیت در کاربرد کلریدکلسیم رسیدند[46]. *دمووینک* و همکاران رسوب یک لایه از کلسیت باکتریایی در سطح نمونه ملات که منجر به کاهش جذب آب کاپیلاری و نفوذپذیری نسبت به گاز می‌شود را گزارش نمودند، آنها کار خود را به مطالعه دیگر خواص نفوذپذیری گسترش داده‌اند. حضور زیست‌توده تا حد زیادی به کاهش کلی نفوذپذیری گاز در ملات سیمان کمک می‌کند، که منجر به افزایش مقاومت در جهت کربناتی‌شدن می‌شود. بهبود استحکام کربنات به‌علت لایه ضخیم کربنات (۳۰-۵۰میکرومتر) است. آنها پیشنهاد کردند که اثر حفاظتی تیمار رسوب زیستی در جهت کربناتی‌شدن می‌تواند با تیمارهای افزودنی با باکتری‌ها و یک منبع کلسیم یا افزایش غلظت یون‌های کلسیم بهبود یابد. *دمووینک* و همکاران مقاومت نمونه‌های تیمارشده با رسوبات زیستی را نسبت به نفوذ کلرید با استفاده از تست تحرک شتاب‌دهنده اندازه‌گیری کردند که تیمار رسوبات زیستی تاثیر معنی‌داری در کاهش ضریب تحرک کلرید (۱۰ تا ۴۰%) نسبت به نمونه شاهد داشت[20].

ترسیب دی‌اکسیدکربن: سیمان زیستی یک تکنولوژی بالقوه برای ذخیره‌سازی طولانی‌مدت دی‌اکسیدکربن اتمسفری در قالب مواد معدنی کربناتی مانند کلسیت، مگنزیت، دولومیت و غیره است[47]. برای تبدیل دی‌اکسیدکربن به کربنات‌ها، مرحله آبگیری دی‌اکسیدکربن محدودکننده سرعت است، که دارای یک ثابت واکنش پیش‌رونده $۲/٦\times۱۰^{-۳}$ثانیه در $۲۵^{\circ}C$ است. اما، کاتالیزور زیستی کربنیک‌انهیدراز با نقش اصلی خود در کلسیفیکاسیون مهرداران دریایی (نرم‌تنان)، ماهی اتولیت، مرجان‌ها و بافت‌های سخت مهره‌داران توجه محققان را جلب کرده است. این آنزیم آبگیری دی‌اکسیدکربن و آبگیری بی‌کربنات را به‌صورت زیر تسریع می‌کند:

(۱۱)

$$CO_2+H_2O\leftrightarrow HCO_3^-+H^+$$

درنهایت رسوب کربنات‌کلسیم به شکل زیر حاصل می‌شود:

(۱۲)

$$Ca^{2+}+HCO_3^-\rightarrow CaCO_3+H^+$$

رسوب کربنات میکروبی از طریق کربنیک‌انهیدراز امکان به دام‌انداختن دی‌اکسیدکربن در مخازن کربناته ایمن، پایدار و سازگار با محیط زیست را فراهم کرده و یک روش دائمی برای دفع‌کردن دی‌اکسیدکربن ارایه نموده است.

کاربردهای میدانی

تاکنون مطالعه همه‌جانبه‌ای در زمینه سیمانی‌شدن از طریق رسوب میکروبی کلسیت در ایران صورت نگرفته است؛ البته استفاده از رسوب میکروبی کلسیت در مقیاس بزرگ در چندین کشور انجام شده و نتایج خوبی نیز گزارش شده است. از جمله در حفظ آثار باستانی در کلیسای سانتا ماریا دی آنجلی در ایتالیا[48]، کاهش جریان آب زیرزمینی آلوده در سازند دولوستونی با درزهای فراوان در انتاریوی جنوبی در کانادا، به‌منظور ارزیابی توانایی هم‌رسوبی فلزات سنگین (استرونتیوم- ۹۰) با کربنات‌کلسیم و با راهبرد تحریک زیستی رسوب میکروبی کلسیت در آزمایشگاه ملی ایداهو در آمریکا و به‌دنبال آن در کلرادو آمریکا[49]، همچنین در هلند و اتریش

www.SID.ir

Archive of SID

به‌منظور انسداد زیستی و کاهش تراوش آب از سازه نگهدارنده آب[50] از رسوب میکروبی کلسیت استفاده شده است.

چالش‌های پیشرو

فناوری تولید سیمان زیستی دارای پتانسیل زیادی برای بهبود کیفیت مصالح ساختمانی است. با این حال، تا زمانی که برنامه‌های کاربردی در مقیاس صنعتی شروع نشود تاثیرات کامل تکنولوژی نمی‌تواند ارزیابی شود. بزرگ‌ترین چالش تمایل کمتر جامعه مهندسین برای استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی به‌علت تصور اشتباه خطرناک‌بودن تمام باکتری‌ها برای سلامتی است. بنابراین، مقاومت اصلی، بحث روانی است. در این رابطه تعلیم‌دادن جامعه مهندسین در مورد بیماری‌زایی میکروب‌ها بسیار سودمند است. علاوه بر این، محصولات و عملکرد سیمان زیستی می‌تواند به‌طور گسترده‌ای با توجه به تغییرات جغرافیایی و زیست‌محیطی متغیر باشد. بنابراین، نیاز است که فرآیند تولید سیمان زیستی متناسب با شرایط محلی باشد. برخی نگرانی‌ها نیز در مورد بقای باکتری‌ها در محیط با pH بالا وجود دارد که در این ارتباط نیز برخی سویه‌های باکتری مقاوم به pHهای بالا جدا شده است. همچنین تکنیک کپسول‌دارشدن باکتری هم امیدبخش است. علاوه بر این جامعه مهندسین ممکن است نگرانی‌هایی در مورد استفاده از کلریدکلسیم در تولید سیمان زیستی داشته باشند. چند پیشنهاد در رابطه با کلریدکلسیم گزارش شده است. با این حال، هنوز هم ممکن است با توجه به بحث هزینه‌ها استفاده از کلریدکلسیم ضروری باشد.

استفاده از سویه‌های بومی در محیط طبیعی به‌دلیل سازگاری سویه‌ها با شرایط محیطی می‌تواند تولید سیمان زیستی را افزایش دهد. از این رو ارزیابی پتانسل کاربردی باکتری‌های بومی تولیدکننده سیمان زیستی برای افزایش مقاومت و طول عمر سازه‌ها و همچنین ترمیم آثار باستانی پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

این مقاله، استفاده از سیمان زیستی را برای ساخت مصالح ساختمانی بررسی می‌کند. در این تحقیقات تعداد زیادی باکتری‌های مفید و مقاوم به محیط قلیایی بتن شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که از این میان سویه‌های باسیلوس از ارزش و اهمیت بالاتری برخوردار هستند. عمده‌ترین مشکل در زمینه کاربرد باکتری برای حفاظت بتن مرتبط با نگهداری باکتری در قلیای بتن است که در این بین استفاده از میکروکپسول‌های حاوی باکتری که حاوی اسپورها و ترکیبات مغذی برای فعالیت مجدد باکتری است، اهمیت بیشتری دارد. سیمان زیستی دارای پتانسیل زیادی به‌عنوان یک تکنولوژی است که شامل استفاده با صرفه از انرژی، ترسیب دی‌اکسیدکربن و پتانسیل بازیافتی است. با این حال، این تحقیقات ابتدایی بوده و برنامه‌ریزی به‌منظور محاسبه هزینه‌ها و سودمندی آن در مرحله ساخت‌وساز نیاز به تحقیقات بیشتر دارد و برای رسیدن به مقیاس صنعتی از مقیاس تکنولوژی نیاز به روش‌های استاندارد است.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تاییدیه‌اخلاقی: این مقاله توسط همه نویسندگان تایید شده است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ‌گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: سمیه امامی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۵۰%)؛ حسینعلی علیخانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی /نگارنده بحث (۵۰%)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1- Schneider M, Romer M, Tschudin M, Bolio H. Sustainable cement production - present and future. Cem Concr Res. 2011;41(7):642-50.

2- Kawadkar KG, Krishnamoorthy S. Behaviour of cement concrete under common salt solution both under hydrostatic and atmospheric pressures. Cem Concr Res. 1981;11(1):103-13.

3- Zhang M, Chen J, Lv Y, Wang D, Ye J. Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate–chloride ions. Constr Build Mater. 2013;39:26-32.

4- Idiart AE, López CM, Carol I. Chemo-mechanical analysis of concrete cracking and degradation due to external sulfate attack: A meso-scale model. Cem Concr Comp. 2011;33(3):411-23.

5- Shang HS, Songa Y. Behavior of air-entrained concrete under the compression with constant confined stress after freeze–thaw cycles. Cem Concr Comp. 2008;30(9):854-60.

6- Song HW, Saraswathy V. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-a review. Int J Electrochem Sci. 2007;2:1-28.

7- Wang Y, Yu G, Deng M, Tang M, Lu D. The use of thermodynamic analysis in assessing alkali contribution by alkaline minerals in concrete. Cem Concr Comp. 2008;30(4):353-9.

8- Talukdar S, Banthia N, Grace JR. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change – Part 1: Experimental results and model development. Cem Concr Comp. 2012;34(8):924-30.

9- Sunil Pratap Reddy S. A study on the performance of the bacterial concrete embeded with bacillis subtilis [Dissertation]. Kukatpally, Hydarabad, India: Jawaher lal Nehru Technology University; 2010.

10- Aggelis DG, Shiotani T. Repair evaluation of concrete cracks using surface and through transmission wave measurements. Cem Concr Comp. 2007;29(9):700-11.

11- Aggilis DG, Hadjiyiangou S, Chaic HK, Momokic S, Shiotanid T. Longitudinal waves for evaluation of large concrete blocks after repair. NDT E Int. 2011;44(1):61-6.

12- Chen PY, McKittrick J, Meyers MA. Biological materials: functional adaptations and bio inspired designs. Prog Mater Sci. 2012;57(8):1492-704.

13- Rong H, Qian CX. Characterization of microbe cementitious materials. Chin Sci Bull. 2012;57(11):1333-8.

14- Achal V, Pan X, Zhang D, Fu Q. Bioremediation of Pb-contaminated soil based on microbially induced calcite precipitation. J Microbiol Biotechnol. 2012;22(2):244-7.

15- Whiffin VS, Van Paassen LA, Harkes MP. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. Geomicrobiol J. 2007;24(5):417-23.

16- Rodriguez-Navarro C, Rodriguez-Gallego M, Ben

www.SID.ir

Archive of SID

34- De Muynck W, Debrouwer D, De Belie N, Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. Cem Concr Res. 2008;38(7):1005-14.
35- Gauri KL, Bandyopadhyay JK. Carbonate stone: chemical behaviour, durability, and conservation. New York: Wiley; 1999.
36- Webster A, May E. Bioremediation of weathered-building stone surfaces. Trends Biotechnol. 2006;24(6):255-60.
37- Wang JY, Van Tittelboom K, De Belie N, Verstratete W. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. Constr Build Mater. 2012;26(1):532-40.
38- Van Tittelboom K, De Muynck W, De Belie N, Verstraete W. Bacteria protect and heal concrete and stone. WTA Schriftenreihe. 2009;33:439-57.
39- Ramakrishnan V, Deo KS, Duke EF, Bang SS. SEM investigation of microbial calcite precipitation in cement. In: Proc 21st International Conference on Cement Microscopy. Las Vegas, NV; 1999. 406-14.
40- Ghosh P, Mandal S, Chattopadhyay BD, Pal S. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. Cem Concr Res. 2005;35(10):1980-3.
41- Jonkers HM, Schlangen E. Crack repair by concrete immobilized bacteria. In: Schmetz AJM, van der Zwaag S, editors. Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials; 2007 Apr 18-20; Delft University of Technology. Noordwijk Aan Zee, Netherlands. Berline: Springer; 2007. p. 1-7.
42- Jonkers HM, Schlangen E. Development of a bacteria-based self-healing concrete. In: Walraven JC, Stoelhorst D, editors. Tailor made concrete structures. London: CRC Press; 2008. p. 425-30.
43- Neville AM. Properties of concrete. 4th Edition. New York: John Wiley & Sons; 1996.
44- Jonkers HM, Thijssen A, Muyzer G, Copuroglu O, Schlangen E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecol Eng. 2010;36(2):230-5.
45- Xu J, Yao W, Jiang Z. Non-ureolytic bacterial carbonate precipitation as a surface treatment strategy on cementitious materials. J Mater Civil Eng. 2014;26(5):983-91.
46- Achal V, Pan X. Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by Bacillus sp. CR2. Appl Biochem Biotechnol. 2014;174(1):307-17.
47- Seifritz W. CO2 disposal by means of silicates. Nature. 1990;345-486.
48- Perito B, Marvasi M, Barabesi C, Mastromei G, Bracci S, Vendrell M, Tiano P. A Bacillus subtilis cell fraction (BCF) inducing calcium carbonate precipitation: biotechnological perspectives for monumental stone reinforcement. J Cult Heritage. 2014;15(4):345-51.
49- Van Paassen LA. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications. In: Han J, Alzamora DA, editors. Proceeding of Geo-Frontiers; Advances in Geotechnical Engineering; 2011 May 13- Nov 16; Dallas, USA-Reston. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE); 2011. p. 4099-108.
50- Blauw AN, Los FJ, Huisman J, Peperzak L. Nuisance foam events and Phaeocystis globosa blooms in Dutch coastal waters analyzed with fuzzy logic. J Mar Syst. 2010;83(3-4):115-26.
Chekroun K, Gonzalez- Muñoz MT. Conservation of ornamental stone by Myxococcus xanthusinduced carbonate biomineralization. Appl Environ Microbiol. 2003;69(4):2182-93.
17- Hammes F, Boon N, Clement G, de Villiers J, Siciliano SD, Verstraete W. Molecular biochemical and ecological characterisation of a bio-catalytic calcification reactor. Appl Microbiol Biotechnol. 2003;62(2-3):191-201.
18- Achal V, Mukherjee A, Basu PC, Reddy MS. Strain improvement of Sporosarcina pasteurii for enhanced urease and calcite production. J Ind Microbiol Biotechnol. 2009;36(7):981-8.
19- Ramachandran SK, Ramakrishnan V, Bang SS. Remediation of concrete using microorganisms. ACI Mater J. 2001;98(1):3-9.
20- De Muynck W, Cox K, De Belie N, Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. Constr Build Mater. 2008;22(5):875-85.
21- Burne RA, Chen YY. Bacterial ureases in infectitious diseases. Microbes Infect. 2000;2(5):533-42.
22- Mujah D, Shahin MA, Cheng L. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization. Geomicrobiol J. 2017;34(6): 524-37.
23- Knoll AH. Biomineralization and evolutionary history. Rev Mineral Geochem. 2003;54(1):329-56.
24- Mobley HL, Hausinger RP. Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization. Microbiol Rev. 1989;53(1):85-108.
25- Joshi S, Goyal S, Mukherjee A, Reddy MS. Microbial healing of cracks in concrete: a review. J Ind Microbiol Biotech. 2017;44(11):1511-25.
26- Cheng L, Cord-Ruwisch R, Shahin MA. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. Can Geotech J. 2013;50(1):81-90.
27- Mukherjee A, Dhami NK, Reddy BVV, Reddy MS. Bacterial calcification for enhancing performance of low embodied energy soil-cement bricks. In: Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT3); 2013 Aug 18-21; Kyoto Research Park, Kyoto, Japan.
28- Tiano P, Biagiotti L, Mastromei G. Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. J Microbiol Methods. 1999;36(1-2):139-45.
29- Tobler DJ, Maclachlan E, Phoenix VR. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies. Ecol Eng. 2012;42:270-8.
30- Achal V, Mukherjee A, Reddy MS. Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures. J Ind Microbiol Biotechnol. 2011;38(9):1229-34.
31- Phillips AJ, Lauchnor E, Eldring J, Esposito R, Mitchell AC, Gerlach R, et al. Potential CO2 leakage reduction through biofilm-induced calcium carbonate precipitation. Environ Sci Technol. 2013;47(1):142-9.
32- Dick J, De Windt W, De Graef B, Saveyn H, Van der Meeren P, De Belie N, et al. Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by Bacillus species. Biodegradation. 2006;17(4):357-67.
33- De Muynck W, Verbeken K, De Belie N, Verstraete W. Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone. Ecol Eng. 2009;36(2):99-111.

www.SID.ir