Modares Civil Engineering Journal

Volume 26, Issue 5, 2026, 97-109

DOI: 10.48311/mcej.2025.118286.82882

Tarbiat Modares University

Investigation on Self-Healing Concrete Using Bacillus Subtilis Bacteria

Komeil Momeni[1*], Tahereh Samary Masouleh[2], Sajad Gholamrezaei Sarvelat[3]

1. Department of Civil Engineering,Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
2. M.Sc of Civil Engineering student of Jihad University, Guilan, Iran.
3. Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering ,Technical and Vocational University(TVU), Tehran, Iran.

Abstract

Spontaneous healing involves the formation of self-healing compounds through the continuous hydration of unhydrated cementitious materials, which have limited ability to heal cracks. On the other hand, autohealing uses external agents such as superabsorbent polymers, biological agents, high pozzolanic materials, and chemical agents to seal cracks.In this study, the use of Bacillus subtilis bacteria was investigated to improve compressive strength and crack repair. Some researchers added Bacillus subtilis bacteria directly to concrete. The results of these studies showed that adding Bacillus subtilis bacteria directly significantly improves the compressive strength of bacterial concrete compared to control concrete. Bacillus subtilis bacteria also produce calcium deposits and fill cracks in concrete. However, some researchers investigated the indirect (encapsulated) addition of Bacillus subtilis bacteria with different carriers in concrete. The results showed that using a phenyl vinyl alcohol (PVA) carrier containing Bacillus subtilis bacteria in concrete increased the compressive strength of the samples compared to other samples containing bacterial carriers. Also, the concrete mixture containing Bacillus subtilis bacteria with 30% fly ash carrier showed higher healing compared to other mixtures. Overall, the results of this study showed that the use of bacteria with Bacillus subtilis plays a significant role in improving the compressive strength and self-healing capacity of concrete, which can significantly improve the durability of concrete structures.The results obtained on concrete samples containing Bacillus subtilis bacteria compared to control concrete, bacterial concrete had a maximum compressive strength of 18.20 MPa (3.59% increase), 54.29 MPa (15.61% increase), and 88.32 MPa (19.55% increase) after 14, 7, and 28 days, respectively. After 28 days of curing, the self-healing index showed that bacterial concrete had a higher normalized self-healing index of 1.12 compared to control concrete. The results of the research on bacterial concrete containing Bacillus subtilis bacteria showed higher compressive strength compared to normal concrete in all grades of concrete. Also, the compressive strength of concrete containing Bacillus subtilis bacteria with a bacterial concentration of 5^10 cells per ml with concrete grade M30 on day 28 was slightly higher than other samples. In this study, sediment was observed on the surface of concrete samples Cracked bacteria and filling of smooth cracks showed the effectiveness of crack repair.The compressive strength results obtained on concrete samples containing Bacillus subtilis bacteria with carriers of phenyl vinyl alcohol fibers, sisal fibers and expanded perlite and concrete samples containing phenyl vinyl alcohol fibers, sisal fibers that do not contain Bacillus bacteria and normal concrete. The self-healing concrete of Bacillus subtilis with polyvinyl alcohol (PVA) fibers added is stronger than the two carriers with bacteria and without bacteria and normal concrete. The reason is that polyvinyl alcohol (PVA) fibers have a binding role in concrete compared to the expanded perlite material.The repair effect in concrete with Bacillus subtilis bacterial solution added at a concentration of 2.5 oz with carrier is higher compared to the other two groups of self-healing concrete.For both normal concrete and self-healing concrete containing Bacillus subtilis bacteria, 100% natural aggregate provides the maximum strength Slow and in case of strength recovery after repair, concrete mix containing 30% fly ash aggregate showed good results. In this test, mix B2 with 30% fly ash aggregate showed high repair performance compared to other mixes.

Review History

Received: Aug 13, 2025

Revised: Oct 10, 2025

Accepted: May 30, 2026

Keywords

Bacterial concrete

Self-healing

Bacillus subtilis

* Corresponding Author Email: kmomeni@tvu.ac.ir - ORCID: 0009-0003-9238-8873

Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) 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.

مجله علمی مهندسی عمران مدرس

دوره ۲۶، شماره ۵، سال ۱۴۰۵ - صفحات ۹۷ تا ۱۰۹

DOI: 10.48311/mcej.2025.118286.82882

بررسی بتن خود ترمیم شونده با استفاده از باکتری باسیلیوس سوبتیلیس

کمیل مومنی[1*]، طاهره ثمری ماسوله[2]، سجاد غلامرضایی سرولات[3]

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، جهاد دانشگاهی رشت، رشت، ایران.

۳. گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ملی مهارت تهران، تهران، ایران.

چکیده

در این مطالعه به بررسی استفاده از باکتری با سیلیوس سوبتیلیس برای بهبود مقاومت فشاری و ترمیم ترک‌ها پرداخته شد . برخی از محققان استفاده از باکتری باسیلیوس سوبتیلیس را به روش مستقیم به بتن اضافه کردند . نتایج این مطالعات نشان داد که افزودن باکتری باسیلیوس سوبتیلیس به روش مستقیم مقاومت فشاری بتن باکتریایی را در مقایسه با بتن کنترلی به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. همچنین باکتری باسیلیوس سوبیتلیس باعث تولید رسوب کلسیم شده و ترک‌های بتن را پر می‌کند. اما برخی از محققان به بررسی افزودن باکتری باسیلیوس سوبتیلیس به روش غیر مستقیم (کپسوله) با حامل‌های مختلف در بتن پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از حامل پنیل ونیل الکل (PVA) حاوی باکتری باسیلیوس سوبتیلیس در بتن در مقایسه با دیگر نمونه‌های حاوی حامل‌های باکتریایی باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. همچنین مخلوط بتن حاوی باکتری باسیلیوس سوبتیلیس با حامل ۳۰ ٪ خاکستر بادی در مقایسه با سایر مخلوط‌ها ترمیم بالاتری مشاهده شد. در مجموع نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از باکتری با سیلیوس سوبتیلیس نقش چشم‌گیری در بهبود مقاومت فشاری و ظرفیت خودترمیمی بتن دارد که می‌تواند دوام سازه‌های بتنی را به میزان قابل توجهی ارتقاء بخشد.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹

کلمات کلیدی

بتن باکتریایی

خودترمیم شوندگی

کپسوله

باسیلوس سوبتیلیس

۱- مقدمه

بتن که به دلیل مقاومت فشاری بالا، سهولت شکل‌دهی، دوام و مقرون به صرفه بودنش مشهور است، پرکاربردترین مصالح ساختمانی در سطح جهان است [1-2]. باتوجه به افزایش استفاده از بتن، مواد تشکیل‌دهنده آن نیز روز به روز در حال افزایش هستند. خواص و رفتار بتن با توجه به مواد مورد استفاده در حال تغییر است. بتن ماده‌ای است که در کشش ضعیف است، بنابراین تشکیل ترک در ناحیه کشش یک مشکل شایع است [3-4]. با این حال، شکنندگی ذاتی آن، بتن را مستعد انتشار و ادغام ریزترک‌ها می‌کند که منجر به از دست دادن مقاومت می‌شود. علاوه بر این، قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی تهاجمی و آب می‌تواند منجر به تخریب بتن از طریق حمله شیمیایی و خوردگی آرماتور فولادی شود و یکپارچگی ساختاری و دوام طولانی‌مدت آن را به خطر بیندازد [5-6] در نتیجه، تلاش‌های گسترده‌ای برای تعمیر و نگهداری برای رسیدگی به این مسائل مورد نیازاست. روش‌های سنتی برای تعمیر ترک‌ها در مصالح پایه سیمانی شامل پوشش سطحی، دوغاب ریزی ،مسدود کردن، پر کردن، تقویت سازه و روش‌های جایگزینی بتن است که هر کدام کاستی‌های خاص خود را دارند [7]. تحقیقات

* رایانامه نویسنده مسئول: kmomeni@tvu.ac.ir – ORCID: 0009-0003-9238-8873

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

اخیر، ظهور بتن خودترمیم شونده با تأثیر زیستی را به عنوان یک روش بالقوه برای کاهش انتشار ترک برجسته کرده است [8-9].

۱-۱- خودترمیمی

ترمیم خودبه خودی، شامل ایجاد ترکیبات خودترمیمی از طریق هیدراتاسیون مداوم مواد سیمانی هیدراته نشده است که توانایی محدودی در ترمیم ترک‌ها دارد. از سوی دیگر، ترمیم خودکار، از عوامل خارجی مانند پلیمرهای سوپرجاذب، عوامل بیولوژیکی، مواد پوزولانی بالا و عوامل شیمیایی برای آب‌بندی ترک‌ها استفاده می‌کند [8-10, 11].

۱-۲- خودترمیمی بتن مبتنی بر باکتری

بیشتر تحقیقات در مورد بتن خودترمیم شونده بر شناسایی انواع باکتری‌های مناسب برای کانی سازی زیستی کارآمد و بی‌حرکت کردن عوامل ترمیم‌کننده شامل باکتری‌ها و منابع کلسیم متمرکز شده است [5-12]. یکی از این فناوری‌ها، بتن رسوب کلسیت ناشی از میکروب است که معمولاً به عنوان بتن باکتریایی شناخته می‌شود. برای حمایت از رشد و فعالیت باکتری‌ها در بتن، یک محیط مغذی مناسب ضروری است. لاکتات کلسیم و سایر ترکیبات مبتنی بر کلسیم معمولاً به عنوان یک منبع مغذی برای تقویت فعالیت باکتریایی و رسوب کربنات کلسیم استفاده می‌شوند [13]. وقتی ترک‌ها در بتن باکتریایی ایجاد می‌شوند، هوا و آب وارد سازه می‌شوند و از طریق فعالیت میکروبی، هاگ‌های باکتریایی را فعال می‌کنند. این فعالیت میکروبی منجر به تشکیل $CaCO_3$ (کربنات کلسیم)می- شود. کربنات کلسیم، در نتیجه منافذ را آب‌بندی و ترک‌ها را پر می‌کند. این فرآیند ویژگی‌های بتن را بهبود می‌بخشد و تا زمانی که ترک‌ها به طور کامل پر شوند، ادامه می‌یابد، پس از آن باکتری‌ها وارد مرحله خواب می‌شوند [14-17].

۱-۳- باکتری باسیلوس سوبتیلیس

انواع مختلفی از باکتری‌ها، مانند باسیلوس سوبتیلیس، باسیلوس اسفاریکوس، باسیلوس پاستوری، اسپوروسارسینا پاستوری، اشریشیا کلی، باسیلوس سودو فیرموس، وباسیلوس مگاتریومدر مطالعات قبلی استفاده شده‌اند. در میان آن‌ها، باسیلوس سوبتیلیس به دلیل در دسترس بودن در بازار و اثربخشی در ترمیم ترک‌ها، توصیه شده است [18]. باسیلوس سوبتیلیس به دلیل تحمل قلیاییت، توانایی تشکیل هاگ، راندمان بالای رسوب کلسیت، مشخصات ایمنی، سهولت کشت و اثربخشی گزارش شده در مطالعات قبلی، برای MICP در بتن توصیه می‌شود [19]. باسیلوس سوبتیلیس، باکتری‌های گرم مثبت، میله‌ای شکل و هوازی هستند که هاگ‌هایی با ظرفیت تحمل طولانی‌مدت در معرض دماهای شدید تولید می‌کنند [5, 20-21]. این هاگ‌های مقاوم، مقاومت در برابر فشار مکانیکی بالا و محیط قلیایی را ایجاد می‌کنند. گونه‌های باسیلوس در تولید هاگ‌های خفته‌ای که بیش از دو قرن زنده می‌مانند، مهارت دارند [1, 5, 20]. علارغم ویژگی‌های سازگار با محیط زیست و دسترسی تجاری، پذیرش آن‌ها در مهندسی عمران همچنان محدود است [22]. شکل (۱) نمونه‌ای از باکتری باسیلوس را نشان می‌دهد.

۱-۴- روش‌های اضافه کردن باکتری باسیلوس سوبتیلیس به بتن

الف-روش مستقیم

در این روش، باکتری‌های باسیلوس سوبتیلیس به همراه مواد مغذی مورد نیازشان (مانند لاکتات کلسیم) به صورت مستقیم و بدون هیچ محافظی، به مخلوط بتن تازه اضافه می‌شوند. هدف این است که باکتری‌ها در حین هیدراتاسیون سیمان، در داخل ریزترک‌ها جای بگیرند و در زمان مناسب فعال شوند [23].

ب-روش غیرمستقیم (کپسوله)

در این روش، باکتری‌ها و مواد مغذی آن‌ها ابتدا در یک حامل محافظ یا کپسول قرار داده می‌شوند و سپس این کپسول به مخلوط بتن اضافه می‌گردد. این حامل از باکتری‌ها در برابر محیط به شدت قلیایی بتن با pH حدود ۱۲تا ۱۳را محافظت می‌کند. با ایجاد ترک در بتن و نفوذ آب، کپسول‌ها شکسته شده و باکتری‌ها آزاد می‌شوند تا فرآیند خودترمیمی را آغاز کنند [23].

شکل ۱. باکتری باسیلوس سوبتیلیس [7]

Fig. 1. Bacterial Solution (Bacillus Subtilis) [7]

Rama chandran و همکارانش [24] در ابتدا مفهوم بتن خودترمیم شونده با استفاده از باکتری‌ها را بررسی کردند. آن‌ها تشکیل رسوبات CaCO3 (کربنات کلسیم) را در مکعب‌های ملات سیمان مشاهده کردند، زمانی که باسیلوس سوبتیلیس و باسیلوس پاستوری به همراه یک محیط مغذی حاوی منابع کلسیم مانند استات یا نیترات کلسیم اضافه شدند. این امر منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن و آب‌بندی ترک‌ها تا عرض ۰/۴۶میلی‌مترشد. آب‌بندی ترک در بتن خودترمیم شونده مبتنی بر باکتری، صرف نظر از اینکه بتن در معرض هوا یا آب قرار گرفته باشد، موفقیت آمیز بود. Wang و همکارانش [25] مطالعه‌ای بر روی تیرهای بتنی با استفاده از هاگ‌های باسیلوس اسپریوس وباسیلوس سوبتیلیس و لاکتات کلسیم محصور شده در ذرات رس منبسط شده انجام دادند. آن‌ها پس از خودترمیمی ترک‌ها، بهبودی ۲۷٪ تا ۷۳٪ در مقاومت بتن مشاهده کردند.

Choi و همکاران [12] در تحقیقشان تأثیر باکتری‌ها را بر مقاومت فشاری، جذب آب و نفوذپذیری سریع کلرید بتن، حاوی خاکستر بادی را بررسی کردند و دریافتند که مقاومت فشاری بتن باکتریایی در مقایسه با بتن معمولی به تدریج افزایش می‌یابد. Jun Jun Feng و همکاران [26] تحقیقاتی را برای توسعه بتن خودترمیم شونده جدید مبتنی بر باکتری با استفاده از مکانیسم رسوب کربنات کلسیم ناشی از میکروب، به کارگیری باسیلوس سوبتیلیس به عنوان عامل ترمیم‌کننده و افزودن الیاف پلی وینیل الکل برای تهیه نمونه‌های تیر بتنی خودترمیم شونده انجام داد. Hasan و همکاران [27] تأیید کرد که تثبیت باسیلوس سوبتیلیس روی الیاف سیزال می‌تواند خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشد و باعث خودترمیمی قوی در آسیب‌های مکرر شود. Elzy's و همکاران [28] سنجی استفاده از پرلیت منبسط شونده به عنوان یک حامل میکروبی را تأیید کرد. این سه محقق از حامل‌های مختلفی برای تطبیق با باکتری‌های خودترمیمی استفاده کردند. آن‌ها بتنی با قابلیت ترمیم خوب ساختند، اما در نظر نگرفتند که آیا خواص مکانیکی نمونه تحت تأثیر عملکرد ترکیبی حامل و باکتری تغییر می‌کند یا خیر.

۲- مروری بر تحقیقات

۲-۱- نمونه‌های حاوی باسیلوس سوبتیلیس به روش مستقیم

Zamba Dubale Duresa و همکاران [29] در مطالعه تجربی‌شان، محلول باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس را مستقیماً در طول فرآیند اختلاط با استفاده از یک میکسر، به عنوان یک افزودنی، به بتن اضافه کردند. در مجموع ۴۸ نمونه مکعبی، بتن معمولی و بتن باکترایی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر برای آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، خودترمیمی و... در سه لایه در هر قالب ریخته شد. پس از۲۴ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۲۸،۱۴،۷و۵۶ روز تحت عمل‌آوری قرار گرفتند.

Akula Visha و همکاران [30] در مطالعه تجربی‌شان سه نوع بتن برای بتن باکتریایی خودترمیم شونده با درجهای (M25، M20 و M30) و ۱۰٪ باکتری باسیلوس سوبتیلیس که به‌صورت مستقیم به بتن اضافه شد استفاده کردند. همچنین یک مخلوط کنترلی که فقط شامل مواد معمولی (سیمان ،آب و سنگ‌دانه) بود، به طور هم‌زمان برای هدف مقایسه طراحی شد. مخلوط‌های بتن در مکعب‌هایی با ابعاد۱۵×۱۵×۱۵سانتی‌متر قالب‌گیری شد.

۲-۲- نمونه‌های حاوی باسیلوس سوبتیلیس به روش غیرمستقیم (کپسوله)

Yuanyuan Tie و همکاران [31] در مطالعه تجربی‌شان به بررسی سه حامل شامل الیاف سیزال ،الیاف پلی وینیل الکل وپرلیت منبسط شده پرداختند. در این آزمایش هر حامل سه غلظت باکتریایی مختلف داشت. محلول‌های باکتریایی با غلظت ۲، ۲/۵و۳ اونس برای مقایسه غلظت‌های مختلف باکتری تهیه شد. هر سه الیاف سیزال و الیاف پلی وینیل الکل وپرلیت منبسط شده به طور جداگانه با محلول باسیلوس سوبتیلیس مخلوط شدند و به مدت۲ دقیقه به حال خود رها شدند تا الیاف سیزال و الیاف پلی وینیل الکل وپرلیت منبسط شده بتوانند هاگ‌های کافی را جذب و حمل کنند. مواد اولیه بتن مخلوط شدند. سپس، الیاف‌های حاوی هاگ را در قالب‌های۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر قرار داده و با نوار چسب بستند تا از جمع شدن الیاف جلوگیری شود. بتن تازه به داخل قالب ریخته شد. سپس، مخلوط پرلیت منبسط شده با هاگ به طور کامل با بتن مخلوط شده و برای شکل‌دهی در قالب قرار داده شد. پس از سه روز نمونه‌ها از قالب خارج شدند، به مدت ۲۸ روز در آب خیسانده شد. همچنین نمونه‌های بتنی از حامل‌های که بدون باکتری بودن و نمونه‌های از بتن معمولی برای هدف مقایسه تهیه شد.

در مطالعه تجربی که توسط Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] انجام شد دو مجموعه قالب مکعبی و سه مجموعه قالب استوانه‌ای برای هر مخلوط طراحی کردند. برای بتن معمولی با درجه M25، طرح اختلاط طبق استاندارد IS10262:2619 [32] انجام شد. برای بتن کپسوله حامل سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی، ابتدا سیمان و خاکستر بادی و آب را مخلوط کردند تا یک مخلوط چسباننده تهیه شود. سپس در داخل دستگاه گلوله ساز مقداری خاکستر بادی ریختند و مواد حل‌شده را به طور یکنواخت به خاکستر بادی اضافه کردند تا اینکه توپ‌های کوچکی تشکیل شود تجهیزات گلوله ساز در شکل (۲) نشان داده شده است.

در ادامه توپ‌های کوچک را الک کردند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قراردادند. سپس سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی را در فربه مدت ۷ روز در دمای ۱۰۰درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. به کل آب مورد نیاز برای بتن، مقدار معینی باکتری باسیلوس سوبتیلیس اضافه کردند. برای انجام روش کپسوله کردن، سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی را به مدت یک ساعت در آب حاوی باکتری خیسانده شد شکل (۳). پس از آن سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس در مخلوط بتن استفاده شدند.

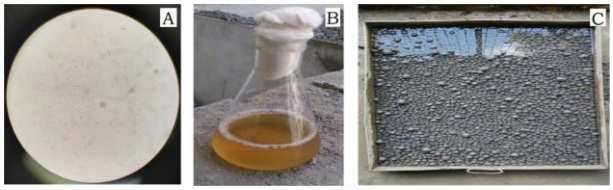
۲-۳- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به روش مستقیم

Duresa Dubale Zamba و همکاران [29] در مطالعه تجربی‌شان، برای ارزیابی خواص مکانیکی و دوام، در طول مرحله آزمایش، گنجاندن باکتری باسیلوس سوبتیلیس در مخلوط بتن منجر به افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های بتن معمولی شد. نمونه‌های بتن باکتریایی حاوی باسیلوس سوبتیلیس حداکثر مقاومت فشاری ۲۰/۱۸مگاپاسکال ۲۹/۴۵مگاپاسکال و۳۲/۸۸ مگاپاسکال را به ترتیب در ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشان دادند. در مقایسه با نمونه‌های بتنی معمولی، بتن باکتریایی در ۷، ۱۴و ۲۸ روز به ترتیب بهبود ۳/۵۹٪ ، ۱۵/۶۱٪ و ۱۹/۵۵٪ را نشان داد. نتایج مقاومت فشاری در شکل (۴) ارائه شده است.

Akula Vishal و همکاران [30] در مطالعه تجربی‌شان دریافتند مخلوط معمولی برای بتن‌های با درجهای (M20، M25 و M30) مقاومتی کمتر از بتن باکتریایی با هر درجه‌ای دارد. همچنین مخلوط با تعداد سلول ۱۰^{5} سلول در میلی‌لیتر، در مقایسه با مخلوط با تعداد سلول ۱۰^{6} سلول در میلی‌لیتر، مقاومت بالاتری برای تمام درجه‌های بتن مشاهده شد. برای مخلوط‌هایی با تعداد سلول ۱۰^{6} سلول در میلی‌لیتر، مقاومت فشاری در مقایسه با مخلوط با تعداد سلول ۱۰^{5} سلول در میلی‌لیتر، برای تمام درجه‌های بتن کمی کاهش یافته است. نتایج به دست آمده از مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول (۱) ذکر شده است.

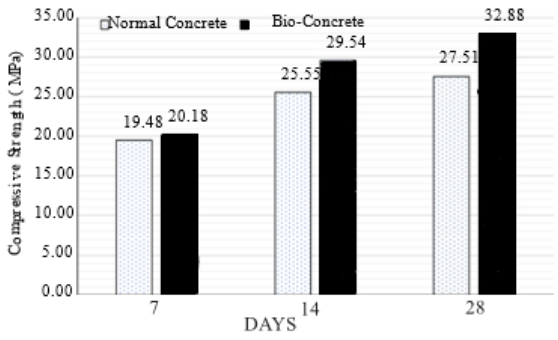
شکل ۲. دستگاه گلوله ساز [7]

Fig. 2. Pelletizer [7]



شکل ۳. کپسوله کردن (A- هاگ باسیلوس B- باکتری‌های کشت شده C- سنگ‌دانه‌های FA خیسانده شده در محلول باکتری) [7]

Fig.3. Encapsulation (A-Bacillus spores, B-cultivated bacteria, C-FA Aggregates soaking in bacteria solution) [7]



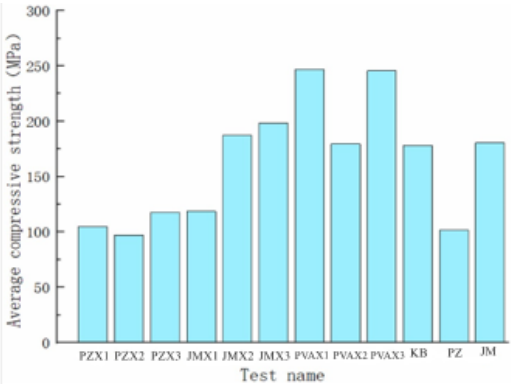
شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۱۴ و۲۸ روز [29]

Fig.4. Compressive strength of concrete specimens at 7, 14, and 28 days [29]

جدول ۱. مقاومت فشاری (مگاپاسکال) برای تعداد سلول‌های مختلف از 10^0 تا 10^8 [30]

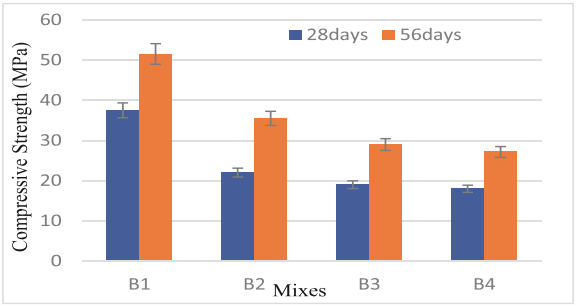
Table 1. Compressive strengths (MPa) of different cell counts from 10^0 to 10^8 [30]

Cell count (cells/ml)	Grade		
	M20 (MPa)	M25 (MPa)	M30 (MPa)
CC-10^0	26.46	31.12	36.61
10^1	27.29	32.78	37.45
10^2	27.78	35.61	37.90
10^3	28.10	36.66	38.78
10^4	30.07	37.42	40.60
10^5	33.41	38.9	45.02
10^6	30.11	36.29	41.93
10^7	29.25	34.16	39.70
10^8	28.01	32.89	38.84



شکل ۵. نمودار میانگین مقاومت فشاری [31]

Fig. 5. Mean compressive strength graph [31]



شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری [7]

Fig. 6. Compressive strength test results [7]

۲-۴- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به روش غیرمستقیم

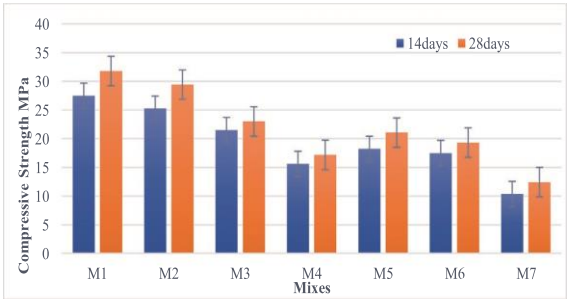
Yuanyuan Tie و همکاران [31] به بررسی مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های حاوی حامل‌های با باکتری و بدون باکتری پرداختند.نتایج به دست آمده در نمودار میانگین مقاومت فشاری در شکل (۵) نشان داده شده است.

در نمودار شکل (۵)، PZ نشان‌دهنده یک نمونه مکعبی با پریلت منبسط شده و JM نشان‌دهنده یک نمونه مکعبی با الیاف سیزال و PVA نشان‌دهنده یک نمونه مکعبی با الیاف پنیل ونیل الکل و x1، x2، x3 به ترتیب محتوای ۲، ۲/۵ و ۳ اونس باکتری باسیلوس سوبتیلیس در نمونه‌های حاوی حامل است به عنوان مثال PZX1 نشان‌دهنده نمونه با پرلیت منبسط شونده به عنوان حامل با محتوای ۲ اونس باکتری باسیلیوس سوبتیلیس است. نمونه KB، مخفف عبارت "Blank control group" است این نمونه صرفاً بتن معمولی است که هیچ‌گونه افزودنی (باکتری و حامل) ندارد.

با توجه به نمودار، مقاومت فشاری نمونه‌های با حامل‌های الیاف پلی وینیل الکل و الیاف سیزال با باکتری مقادیر بالاتری نسبت به دیگر نمونه‌ها نشان داد. همچنین نمونه‌های با حامل الیاف پلی ونیل الکل با غلظت باکتری ۲/۵ به طور قابل توجهی کمتر از نمونه‌های با غلظت ۲ و۳ است. نمونه‌های حاوی حامل پرلیت منبسط شده چه با باکتری اضافه شده و چه بدون آن مقاومت فشاری کمتری نسبت به دیگر نمونه‌ها حامل و همچنین نمونه بتن معمولی (KB) نشان داد.

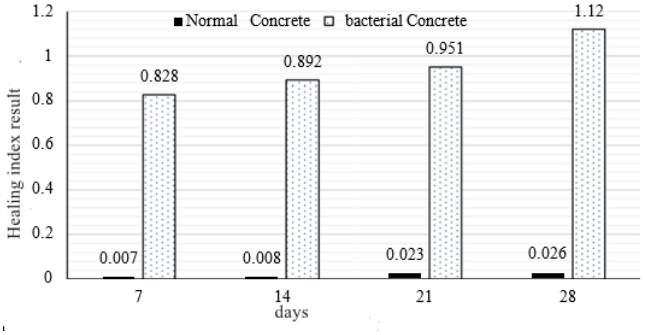
نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری که توسط Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] انجام شد نشان داد سنگ‌دانه خاکستر بادی (Fly ash aggregate) به عنوان جایگزین سنگ‌دانه‌های درشت، به‌ویژه هنگامی که با باکتری‌ها ترکیب شود، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. این آزمایش برای دو گروه بتن انجام شده، گروهی بدون باکتری (M1 تا M7) و گروهی حاوی باکتری (B1 تا B4) در ادامه، نتایج گروه حاوی باکتری و بدون باکتری به ترتیب در شکل (۶) و (۷) آورده شده است.

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتن خودترمیم‌شونده نمونه‌های (B1, B2, B3, B4) در دو زمان (۲۸ و ۵۶) روز انجام شده است. نتایج نشان داد که در تمام نمونه‌های حاوی باکتری، مقاومت فشاری افزایش یافته است. نمونه (B2)با جایگزینی ۳۰٪ سنگ‌دانه خاکستر بادی، این نمونه بیشترین افزایش مقاومت را نشان داده است. به طوری که مقاومت فشاری آن از روز ۲۸ تا روز ۵۶ به میزان ۶۱/۳۷٪ افزایش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که ترکیب باکتری‌ها با این نسبت خاص از خاکستر بادی، بهترین عملکرد را در افزایش مقاومت دارد. نمونه (B3)با جایگزینی ۵۰٪ سنگ‌دانه خاکستر بادی، این نمونه نیز افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری نشان داده است که میزان آن ۵۲/۶۴٪ بوده است. نمونه (B4) با جایگزینی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه خاکستر بادی، افزایش مقاومت در این نمونه ۵۰/۸۳٪ بوده است.



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت فشاری [7]

Fig.7. Compressive strength test results [7]



شکل ۸. نتیجه شاخص نمونه‌های بتنی از میکروسکوپ نوری در (۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸) روز [29]

Fig.8. healing index microscope optical result of concrete specimens in (7،14،21،28) days[29]

نمونه (M1) بدون جایگزینی خاکستر بادی، این نمونه که بتن معمولی است، در سن ۲۸ روزگی بالاترین مقاومت فشاری را در بین تمام نمونه‌های این گروه (بدون باکتری) به دست آورده است. این نتیجه نشان می‌دهد که سنگ‌دانه‌های طبیعی به علت خاصیت قفل شدن سنگ‌دانه‌ها، در سنین اولیه، مقاومت بالاتری ایجاد می‌کنند. نمونه‌های حاوی خاکستر بادی دلیل ویژگی‌های (M2 تا M7) در این نمونه‌ها، با افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کاهش یافته است. این امر به دلیل خاصیت پوزولانی خاکستر بادی است که فرآیند هیدراتاسیون آن کندتر از سیمان است و در سنین اولیه تأثیر چندانی بر مقاومت ندارد.

بر اساس نتایج به دست آمده از چهارمقاله ذکر شده، نمونه‌ای که بالاترین مقاومت فشاری را دارد، بتن گرید M30 است که در مقاله Akula Vishal و همکاران [30] بررسی شده.

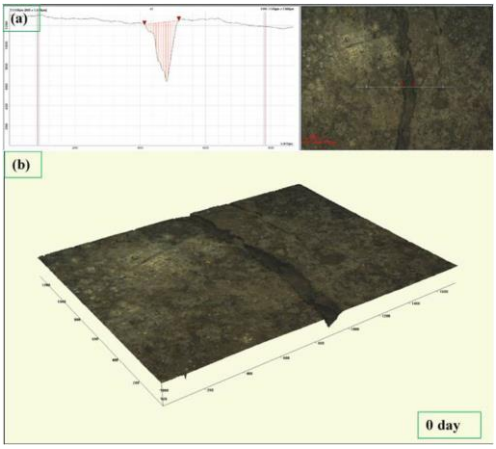
علت برتری: مقاومت پایه بالابتنM30 است که به طور ذاتی دارای بالاترین مقاومت فشاری در میان تمام گریدهای مورد بررسی (M20، M25، و C30) است. همچنین طبق مقاله Akula Vishal و همکاران [30]، افزودن باکتری باعث افزایش۲۵ تا ۴۰ درصدی مقاومت این گرید شده است. این افزایش، مقاومت نهایی آن را به میزان قابل توجهی بالاتر از نمونه‌های دیگر (حتی نمونه‌های بهینه‌سازی شده در مقالات دیگر) قرار می‌دهد. نمونه‌ای که پایین‌ترین مقاومت فشاری را در مقالات فوق ذکر دارد، در بین نمونه‌های کنترل (بدون باکتری) قرار دارد. به صورت خاص، نمونه‌های بدون باکتری و با درصد بالای خاکستر بادی از مقاله Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] در سنین اولیه (۲۸ روز) پایین‌ترین مقاومت را دارند.

علت ضعف: نبود فعالیت باکتریایی در نمونه‌های فاقد باکتری می‌باشد. بنابراین فرآیند خودترمیمی (MICP) که ریزترک‌ها را پر کرده و مقاومت را افزایش می‌دهد، در آن‌ها وجود ندارد. همچنین خاصیت پوزولانی خاکستر بادی به زمان بیشتری (معمولاً پس از ۲۸ روز) نیاز دارد تا به صورت کامل فعال شود. بنابراین، در سنین اولیه، جایگزینی سیمان با خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود.

۲-۵- مشاهده خودترمیمی به روش مستقیم

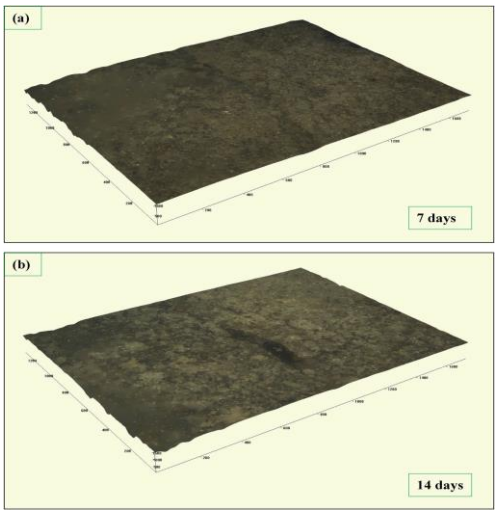
Duresa Dubale Zamba و همکاران [29] برای مشاهده خودترمیمی بر روی نمونه‌ها، پس از یک هفته عمل‌آوری نمونه‌ها، ترک‌هایی به صورت عمدی روی شش نمونه بتن معمولی و بتنی باکتریایی ایجاد شد. نمونه‌ها از پیش ترک‌خورده در فواصل زمانی مشخص ۰ ، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز پس از ترک‌خوردگی بررسی شدند، تا اثربخشی فرآیند خودترمیمی با استفاده از یک دستگاه اندازه‌گیری سطح، به‌ویژه یک میکروسکوپ نوری سه‌بعدی ارزیابی شد. شکل (۸) نتیجه شاخص ترمیم نمونه‌های بتنی از میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد.

در شکل (۸) نتایج شاخص بازده ترمیم برای ترک‌های سطحی غوطه‌ور در آب تا ۲۸ روز را با مقایسه نمونه‌های بتن کنترلی و بتنی باکتریایی ارائه می‌دهد. باکتری‌های موجود در بتن توانایی تولید آنزیم اوره آز را دارند.آنزیم اوره آز هیدرولیز اوره موجود در بتن را کاتالیز می‌کند. این تشکیل ترکیبات ترمیم‌کننده، که ناشی از تبدیل باکتریایی کلرید کلسیم به کربنات کلسیم است، نیز مشاهده شده است. نتایج نمونه‌های بتنی باکتریایی پس از ۲۸روز عمل‌آوری، بالاترین شاخص ترمیم نرمال شده (۱/۱۲) را نشان می‌دهند. تصاویر میکروسکوپی سه بعدی برای پیشرفت ترک بتن حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس برای روزهای ۰، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ در شکل‌های (۹، ۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی نوری سه بعدی برای پیشرفت ترمیم ترک بتن باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس (a و b) در صفر روز [29]

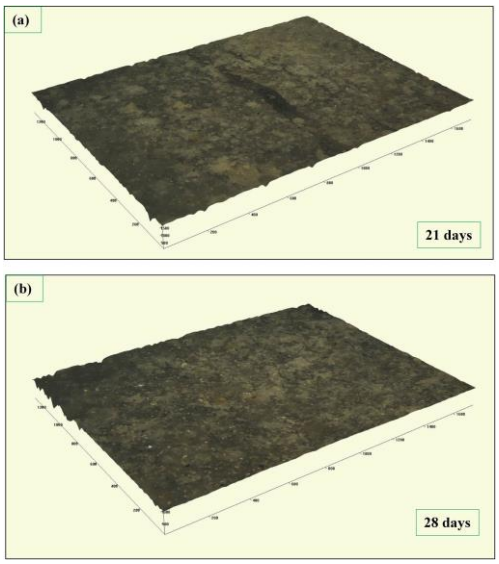
Fig. 9. 3D optical microscope images for the progress of crack healing of bacterial concrete with B. subtilis during (a) and (b) at 0-day [29]



شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپی نوری سه بعدی برای پیشرفت ترمیم ترک بتن باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس (a) ۷ روز و (b) ۱۴ روز [29]

Fig. 10. 3D optical microscope images for the progress of crack healing of bacterial concrete with B. subtilis during (a) 7 days, and (b) 14 days [29]

خودترمیمی قابل توجهی در این نمونه‌های ترک‌خورده مشاهده شد، به طوری که مقادیر قابل توجهی از رسوبات کریستالی سفید تولید شده و سطوح ترک را پر کردند. علاوه بر این، تعداد زیادی از محصولات ترمیمی اضافی روی سطوح ترک مشاهده شد که نشان‌دهنده پتانسیل ترمیم داخلی ترک نیز می‌باشد. وجود این کریستال‌های سفید روی سطح نمونه‌های بتن باکتریایی خودترمیمی به وضوح در شکل‌ها (۱۱، ۱۲ و ۱۳) قابل مشاهده است. تشکیل کریستال‌های سفید روی سطح بتن باکتریایی خودترمیم شونده به دلیل فرآیند رسوب کربنات کلسیم است.



شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپی نوری سه بعدی برای پیشرفت ترمیم ترک بتن باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس (a) ۲۱ روز و (b) ۲۸ روز [29]

Fig. 11. 3D optical microscope images for the progress of crack healing of bacterial concrete with B. subtilis during (a) 21 days, and (b) 28 days [29]

شکل ۱۲. ترمیم ترک بتن باکتریایی خودترمیم شونده برای روز اول و روز هفتم [33]

Fig. 12. Crack healing capacity of self-healing bacterial concrete for day 1 and day 7 [33]

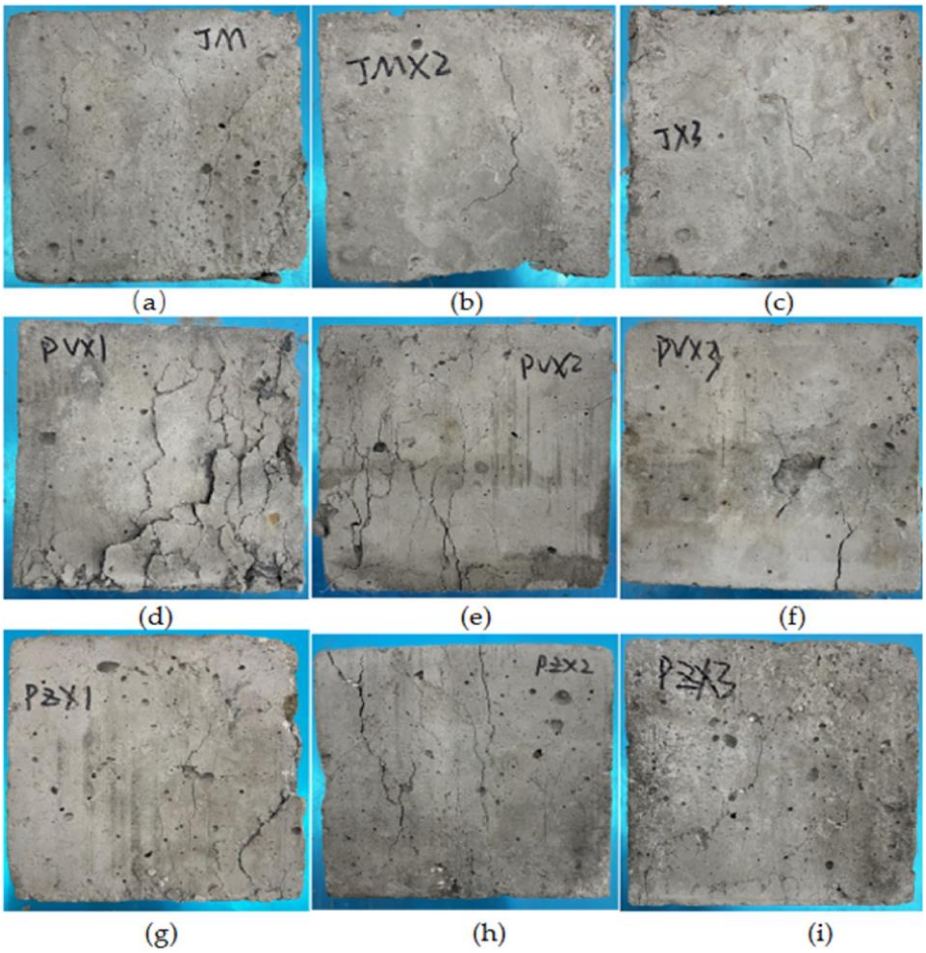
Akula Vishal و همکاران [30] برای مشاهده ترمیم بتن میکروبی، نمونه‌های باکتریایی با غلظت‌های مختلف باکتری مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در دستگاه آزمایش فشار قرار داده شدند. به محض ظهور ترک‌های قابل توجه، بارگذاری متوقف شد. طبق آزمایش XRF انجام شده، کلسیم حدود ۹۱ تا ۹۲٪، در رسوبات تشکیل شده روی نمونه‌ها وجود داشت که تأیید می‌کند عامل ترمیم، جزء اصلی کلسیم (Ca) است که می‌تواند CaCO3 باشد. کلسیت اضافی تشکیل شده روی قسمت ترک‌خورده برای نمونه مکعبی در روز اول و هفتم در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

نفوذ میکروبی باسیلوس سوبتیلیس باعث رسوب کربنات کلسیم

می‌شود. باکتری‌ها به‌صورت آنزیمی، تبدیل یون‌های کلسیم و کربنات‌ها را به کریستال‌های کربنات تسهیل می‌کنند که به ترمیم ترک‌ها و کاهش تخلخل کمک می‌کند. ترک‌های قابل مشاهده و لبه‌های ناهموار در شکل (۱۲) روز اول نشان‌دهنده آسیب روی سطح هستند، در حالی که ترک‌های صاف و پرشده در روز هفتم شکل (۱۲) نشان‌دهنده اثر بخشی خودترمیمی بتن باکتریایی هستند.

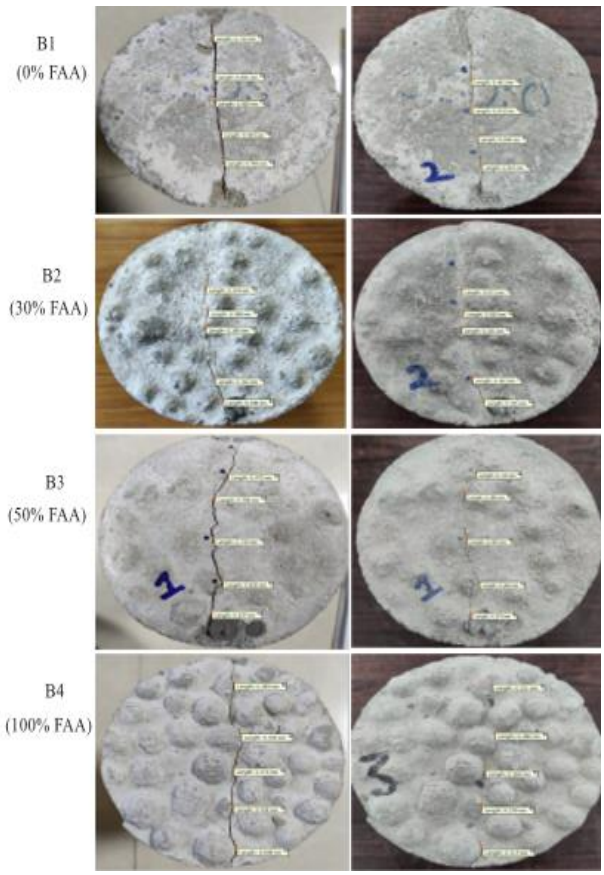
۲-۶- مشاهده خودترمیمی به روش غیر مستقیم

Yuanyuan Tie و همکاران [31] با بررسی تأثیر حامل‌ها برترمیم ترک‌ها دریافتند که استفاده از حامل‌ها، توانایی باکتری‌ها را برای ترمیم ترک‌ها به صورت قابل توجهی بهبود می‌بخشد اثرترمیم در بتن با محلول باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس اضافه‌شده با غلظت ۲/۵ اونس در مقایسه با دو گروه دیگر از بتن‌های خودترمیم شونده با غلظت‌های مختلف، قابل توجه تر است. دلیل این امر این است که خواص فیزیکی نمونه‌های اضافه شده با مایع باکتریایی ۲/۵ اونس، بهتر از نمونه‌هایی با دو غلظت دیگر است، که نشان می‌دهد در غلظت باکتریایی۲/۵ اونس، ترک‌های ریز داخلی و خارجی بتن ترمیم می‌شوند. نمونه‌های ترمیم‌شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳. (a) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲ اونس به همراه الیاف سیزال به عنوان حامل (b) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲/۵ و الیاف سیزال به عنوان حامل (c) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۳ اونس به همراه الیاف سیزال به عنوان حامل (d) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲ به همراه الیاف PVA به عنوان حامل (e) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲/۵ اونس به همراه الیاف PVA به عنوان حامل (f) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۳ اونس همراه الیاف PVA به عنوان حامل (g) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲ اونس همراه پرلیت منبسط شده به عنوان حامل (h) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲/۵ اونس به همراه پرلیت منبسط شده به عنوان حامل (i) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۳ اونس همراه پرلیت منبسط شده به عنوان حامل [31]

Fig. 13. Comparison of crushing conditions (a) 2od Bacillus subtilis concrete cube specimen with sisal fiber as the carrier (b) 2.5 od Bacillus subtilis concrete cube specimen with sisal fiber as the carrier (c) 3od Bacillus subtilis concrete cube specimen with sisal fiber as the carrier (d) 2od Bacillus subtilis concrete cube specimen with PVA fiber as the carrier (e) 2.5od Bacillus subtilis concrete cube specimen with PVA fiber as the carrier (f) 3od Bacillus subtilis concrete cube specimen with PVA fiber as the carrier (g) 2od Bacillus subtilis concrete cube specimen with expanded perlite as the carrier (h) 2.5od Bacillus subtilis concrete cube specimen with expanded perlite as the carrier (i) 3od Bacillus subtilis concrete [31]



شکل ۱۴. مشاهده بهبود ترک در ۵۶ روز با استفاده از دیجی مایزر [7]
FAA: سنگ‌دانه خاکستر بادی (B1، B2، B3 و B4).
نمونه‌های باکتری باسیلیوس سوبتیلیس

Fig.14. Observation of crack healing in 56 days using Digimizer-[7]

در آزمایش تجربی Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] مشاهده ترک به دو روش انجام شد. یکی با استفاده از میکروسکوپ دستی (Elcometer) و دیگری با نرم‌افزار دیجی مایزر (Digimizer). بهبود ترک‌های نمونه‌های بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس همراه با سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی به‌عنوان حامل در شکل(۱۴) نشان داده شده است.

در این مشاهده، مشخص شد که ترک‌های مخلوط B1 حداکثر ۰/۸۴۳ میلی‌متر بهبود یافته‌اند. که ۶۲/۱۴۳٪ از عرض واقعی ترک و میانگین بهبود.۲۹/۷۴۲٪ از عرض ترک است. مخلوط‌های B2 و B3 میانگین بهبود خوبی به ترتیب معادل ۵۱/۲۱۴٪ و ۵۰/۲۶۷٪ نشان دادند، اما وقتی به سراغ بهبود رفتیم، مخلوط B2 حداکثر بهبود۰/۲۷۳میلی‌متر (برای عرض اولیه۰/۳۴۴میلی‌متر) و مخلوط B3 حداکثر بهبود۰/۵۶۹میلی‌متر(برای عرض اولیه۰/۸۲۹میلی‌متر) را نشان داد. همچنین در مخلوط B4 حداکثر بهبود ۰/ ۳۲۱ میلی‌متر مشاهده شد. مخلوط B2 با ۳۰٪ سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی، عملکرد ترمیم بالایی را در مقایسه با سایر مخلوط‌ها نشان داد.

با مقایسه خودترمیمی روش‌های مستقیم و غیر مستقیم مقالات ذکر شده، مقاله Akula Vishal همکاران [30] نه تنها به ترمیم ترک‌ها اشاره می‌کند، بلکه این فرآیند را با تحلیل XRF تأیید کرده و میزان کلسیم موجود در رسوبات را به صورت کمی (بیش از۹۱٪) مشخص کرده است که بهترین عملکرد خودترمیمی را از خود نشان می‌دهد.

از بین نمونه‌های مورد بررسی در مقالات بالا، نمونه‌های بدون باکتری و حاوی درصد بالای خاکستر بادی از مقاله، Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] پایین‌ترین توانایی خودترمیمی را دارند.

دلیل ضعف: این نمونه‌ها فاقد عامل اصلی خودترمیمی، یعنی باکتری‌ها، هستند. بنابراین، فرآیند MICP که مسئول ترمیم فعال ترک‌هاست، در آن‌ها وجود ندارد. هرگونه ترمیم مشاهده شده در این نمونه‌ها صرفاً به دلیل پدیده خودترمیمی طبیعی بتن (هیدراتاسیون مجدد سیمان) است که کارایی و اثربخشی بسیار محدودی دارد و با ترمیم فعال زیستی قابل مقایسه نیست.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده بر اساس آزمایش انجام شده توسط محققان Duresa Dubale Zamba و همکارن [29] بر روی نمونه‌های بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس در مقایسه با بتن کنترلی، بتن باکتریایی حداکثر مقاومت فشاری ۲۰/۱۸ مگاپاسکال (۳٪/۵۹ افزایش)و ۲۹/۵۴ مگاپاسکال (۱۵/۶۱٪ افزایش) و ۳۲/۸۸ مگاپاسکال (۱۹٪/۵۵افزایش) به ترتیب پس از۱۴،۷و۲۸روز داشت. پس از ۲۸روز عمل‌آوری، شاخص خودترمیمی نشان داد که بتن باکتریایی در مقایسه با بتن کنترلی، شاخص خودترمیمی نرمال شده بالاتری معادل ۱/۱۲دارد.

نتایج مقاومت فشاری به دست آمده توسط Akula Vishal همکاران [30] بر روی بتن باکتریایی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس در مقایسه با بتن معمولی در تمام درجات بتن، مقاوت فشاری بالاتری را از خود نشان داد. همچنین مقاومت فشاری بتن حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت باکتری ۱۰^۵ سلول در میلی‌لیتر با درجه بتن M30 در روز۲۸ کمی بیشتر از نمونه‌های

دیگر بود. در این مطالعه مشاهده رسوب روی سطح نمونه‌های بتن باکتریایی ترک‌خورده و پر شدن ترک‌های صاف اثربخشی ترمیم ترک را نشان داد.

نتایج مقاومت فشاری به دست آمده از Yuanyuan Tie و همکاران [31]، بر روی نمونه‌های بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با حامل‌های الیاف پنیل ونیل الکل، الیاف سیزال وپرلیت منبسط شده و نمونه‌های بتنی حاوی الیاف پنیل ونیل الکل، الیاف سیزال که فاقد باکتری باسیلوس بودن و بتن معمولی بتن خودترمیم شونده باسیلوس سوبتیلیس با الیاف پلی ونیل الکل (PVA) اضافه‌شده، نسبت به دو حامل با باکتری و بدون باکتری و بتن معمولی، قوی‌تر است. دلیل آن این است که الیاف پلی ونیل الکل (PVA) در مقایسه با ماده پرلیت منبسط شده، نقش اتصال‌دهنده در بتن را دارد. اثرترمیم در بتن با محلول باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس اضافه‌شده با غلظت ۲/۵ اونس با حامل در مقایسه با دو گروه دیگر از بتن‌های خودترمیم شونده بیشتر است.

در آزمایش تجربی Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] برای هر دو بتن معمولی و بتن خودترمیم شونده حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس، ۱۰۰٪ سنگ‌دانه طبیعی حداکثر مقاومت را فراهم می‌کند و در صورت بازیابی مقاومت پس از ترمیم، مخلوط بتن حاوی ۳۰٪ سنگ‌دانه خاکستر بادی نتایج خوبی را نشان داد. در این آزمایش مخلوط B2 با ۳۰٪ سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی، عملکرد ترمیم بالایی را در مقایسه با سایر مخلوط‌ها نشان داد.

قدردانی نویسندگان

از داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نقطه نظرات سازنده تشکر می گردد.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافعی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

منابع مالی

این تحقیق بدون پشتیبانی منابع مالی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

[1] Abdulkareem, M., Ayeronfe, F., Abd Majid, M.Z., Sam, A.R.M. and Kim, J.H.J., 2019. Evaluation of effects of multi-varied atmospheric curing conditions on compressive strength of bacterial (Bacillus subtilis) cement mortar. *Construction and Building Materials*, 218, pp.1–7. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.119.

[2] Hussein, Z.M., Abedali, A.H. and Ahmead, A.S., 2019. Improvement properties of self-healing concrete by using bacteria. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 584(1), p.012034. doi: 10.1088/1757-899X/584/1/012034.

[3] Bogas, J.A., Ahmed, H.H. and Diniz, T., 2021. Influence of cracking on the durability of reinforced concrete with carbon nanotubes. *Applied Sciences*, 11(4), pp.1–17. doi: 10.3390/app11041672.

[4] Angst, U.M., 2019. Durable concrete structures: cracks & corrosion and corrosion & cracks. In: Pijaudier-Cabot, G., Grassl, P. and La Borderie, C. (eds.), *10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-X)*, pp.233307. doi: 10.21012/FC10.233307.

[5] Feng, J., Chen, B., Sun, W. and Wang, Y., 2021. Microbial-induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 280, p.122460. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122460.

[6] Zhao, G., Shi, M., Fan, H., Cui, J. and Xie, F., 2020. The influence of multiple combined chemical attack on cast-in-situ concrete: deformation, mechanical development and mechanisms. *Construction and Building Materials*, 251, p.118988. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118988.

[7] Pannem, R.M.R., Bashaveni, B. and Kalaiselvan, S., 2024. The effect of fly ash aggregates on the self-healing capacity of bacterial concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1), p.102261. doi: 10.1016/j.asej.2023.102261.

[8] Algaifi, H.A., Bakar, S.A., Sam, A.R.M., Ismail, M., Abidin, A.R.Z., Shahir, S. and Altowayti, W.A.H., 2020. Insight into the role of microbial calcium carbonate and the factors involved in self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 254, p.119258. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119258.

[9] Aspiotis, K., Sotiriadis, K., Ntaska, A., Mácová, P., Badogiannis, E. and Tsivilis, S., 2021. Durability

assessment of self-healing in ordinary Portland cement concrete containing chemical additives. *Construction and Building Materials*, 305, p.124754. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124754.

[10] Bhaskar, S., Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Wolfaardt, G. and Kroukamp, M.O., 2017. Effect of self-healing on strength and durability of zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 82, pp.23–33. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.05.013.

[11] Gupta, S., Pang, S.D. and Kua, H.W., 2017. Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents: a review. *Construction and Building Materials*, 146, pp.419–428. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.111.

[12] Choi, S.-G., Wang, K., Wen, Z. and Chu, J., 2017. Mortar crack repair using microbial-induced calcite precipitation method. *Cement and Concrete Composites*, 83, pp.209–221. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.013.

[13] Muthukumar, P., et al., 2020. Effect of nutrient medium on the healing efficiency of bacterial concrete. *Journal of Applied Microbiology*, 128(2), pp.462–473. doi: 10.1111/jam.14578.

[14] Feng, J., Chen, B., Sun, W. and Wang, Y., 2021. Microbial-induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 280, p.122460. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122460.

[15] Mondal, S. and Ghosh, A.D., 2021. Spore-forming *Bacillus subtilis* vis-à-vis non-spore-forming *Deinococcus radiodurans*, a novel bacterium for self-healing of concrete structures: a comparative study. *Construction and Building Materials*, 266, Part B, p.121122. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121122.

[16] Qian, C., Zheng, T., Zhang, X. and Su, Y., 2021. Application of microbial self-healing concrete: case study. *Construction and Building Materials*, 290, p.123226. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123226.

[17] Song, Y., Chetty, K., Garbe, U., Wei, J., Bu, H., O'Moore, L., Li, X., Yuan, Z., McCarthy, T. and Jiang, G., 2021. A novel granular sludge-based and highly corrosion-resistant bio-concrete in sewers. *Science of the Total Environment*, 791, p.148270. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148270.

[18] Abdellatief, M., Alanazi, H., Radwan, M.K.H. and Tahwia, A.M., 2022. Multiscale characterization at early ages of ultra-high performance geopolymer concrete. *Polymers*, 14(24), p.5504. doi: 10.3390/polym14245504.

[19] Jonkers, H.M., 2007. Self-healing concrete: a biological approach. In: van der Zwaag, S. (ed.), *Self-Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, pp.195–204. Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-1-4020-6250-6_9.

[20] Mondal, S. and Ghosh, A.D., 2021. Spore-forming *Bacillus subtilis* vis-à-vis non-spore-forming *Deinococcus radiodurans*, a novel bacterium for self-healing of concrete structures: a comparative study. *Construction and Building Materials*, 266, Part B, p.121122. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121122.

[21] Akindahunsi, A.A., Adeyemo, S.M. and Adeoye, A., 2021. The use of bacteria (*Bacillus subtilis*) in improving the mechanical properties of concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1), pp.1–8. doi: 10.1007/s41024-021-00112-7.

[22] Nguyen, T.H., Ghorbel, E., Fares, H. and Cousture, A., 2019. Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. *Cement and Concrete Composites*, 104, p.103340. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103340.

[23] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., 2014. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education.

[24] Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V. and Bang, S.S., 2001. Remediation of concrete using microorganisms. *ACI Materials Journal*, 98(1), pp.3–9. doi: 10.14359/10154.

[25] Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N. and Verstraete, W., 2012. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 26(1), pp.532–540. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054.

[26] Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V. and Bang, S.S., 2001. Remediation of concrete using microorganisms. *ACI Materials Journal*, 98(1), pp.3–9. doi: 10.14359/10154.

[27] Feng, J., Chen, B., Sun, W. and Wang, Y., 2021. Microbial-induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 280, p.122460. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122460.

[28] Amjad, H., Arsalan Khushnood, R. and Ali Memon, S., 2023. Biomimetic robust self-healing of *Bacillus subtilis* immobilized through sisal fiber for next-generation concrete infrastructure. *Construction and Building Materials*, 368, p.130299. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130299.

[29] Zamba, D.D. and Mohammed, T.A., 2024. Self-healing performance of normal strength concrete with *Bacillus subtilis* bacteria. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9(1), p.4. doi: 10.1007/s41024-023-00356-5.

[30] Akula, V., Chepuri, A. and Chandana, N., 2025. Assessment of bacteria-based self-healing concrete through experimental investigations—a sustainable approach. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20(1), pp.1–16. doi: 10.1186/s40712-

[31] Tie, Y., et al., 2024. Investigation on the mechanical properties of *Bacillus subtilis* self-healing concrete. *Heliyon*, 10(14), p.e34131. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e34131.

025-00215-w.

[32] Bureau of Indian Standards, 1992. *Non-destructive testing of concrete—Methods of test, Part 1: Ultrasonic pulse velocity*. IS 13311 (Part 1):1992. New Delhi: Bureau of Indian Standards.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Momeni, K., Samary Masouleh, T. and Gholamrezaei Sarvelat, S., 2026. Investigation on Self-Healing Concrete Using Bacillus Subtilis Bacteria. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.97-109.