Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

ISSN: 2821-0549

Research Article

Investigating and Comparing the Mechanical Resistance of Bacterial Self-healing Concretes

Abolfazl Noori Shahr Abadi [a], Gholamali Shafabakhsh [b*], Bita Bakhshi [C]

[a] PhD Candidate of Road and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.
[b] Professor, Department of Road and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.
[c] Professor, Department of Bacteriology, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-08-07
Revised: 2024-10-01
Accepted: 2024-10-15

Keywords:

Mechanical strength of concrete;
Bacillus subtilis;
Bacterial self-healing.

ABSTRACT

Cracks are one of the main causes of concrete failure, facilitating the penetration of chemical solutions and negatively impacting the characteristics of concrete structures. To address this problem, various methods such as coatings and adhesives have been used. However, due to the high costs and issues like peeling, attention has shifted toward alternative methods, including self-healing concrete. One of these methods involves the use of microorganisms to repair cracks. In this study, Bacillus subtilis bacteria were used, which, unlike other bacteria, do not require microcapsules or nanomaterials, making it less expensive to produce. The use of this bacteria has significantly improved the compressive, flexural, and tensile strength of the concrete. The RB10 and RB12 samples showed the highest strength increases, with RB10 exhibiting a 100% increase in flexural strength and 76.5% in compressive strength. Additionally, the tensile strength of the concrete increased by up to 15% with the use of this bacteria.

*** Corresponding author.**
E-mail address: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

How to cite this article: Noori Shahr Abadi, A., Shafabakhsh, G., & Bakhshi, B. (2024). Investigating and Comparing the Mechanical Resistance of Bacterial Self-healing Concretes. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, *10*(3), 37-51. https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34979.1682

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: **https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en**

شاپا: **2821-0549**

Semnan University

مقاله پژوهشی

بررسی و مقایسه مقاومت مکانیکی انواع بتن‌های خودترمیمی باکتریایی

ابوالفضل نوری شهرآبادی[۱]، غلامعلی شفابخش[۲*]، بی‌تا بخشی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

[۲] استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

[۳] استاد، گروه باکتری‌شناسی، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

واژگان کلیدی:

مقاومت مکانیکی بتن،

باسیلوس سوبتیلیس،

خودترمیمی باکتریایی.

چکیده

ترک‌ها از عوامل اصلی خرابی بتن هستند که نفوذ محلول‌های شیمیایی را تسهیل کرده و بر ویژگی‌های سازه‌های بتنی تأثیر منفی می‌گذارند. برای رفع این مشکل، روش‌های مختلفی مانند مواد پوششی و چسب‌ها استفاده شده است. اما به دلیل هزینه‌بر بودن و مشکلاتی مانند لایه‌برداری، توجه به روش‌های جایگزین از جمله بتن‌های خودترمیم‌شونده افزایش یافته است. یکی از این روش‌ها، استفاده از میکروارگانیسم‌ها برای ترمیم ترک‌ها است. در این پژوهش، از باکتری باسیلوس سوبتیلیس استفاده شده که برخلاف سایر باکتری‌ها نیازی به میکروکپسول یا نانومواد ندارد و هزینه تولید آن کمتر است. استفاده از این باکتری باعث بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن شده است. نمونه‌های RB10 و RB12 بیشترین افزایش مقاومت را نشان داده‌اند؛ به طوری که نمونه RB10 دارای ۱۰۰٪ افزایش در مقاومت خمشی و ۷۶/۵ درصد در مقاومت فشاری بوده است. همچنین، مقاومت کششی بتن با استفاده از این باکتری تا ۱۵٪ افزایش یافته است.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghshafabakhsh@semnan.ac.irr

استناد به این مقاله: نوری شهرآبادی, ابوالفضل, شفابخش, غلامعلی & ,بخشی, بی تا. (۱۴۰۳ .(بررسی و مقایسه مقاومت مکانیکی انواع بتن های خودترمیمی باکتریایی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل, ۱۰(۳), ۳۷-۵۱. https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34979.1682

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱. مقدمه

ترک‌خوردگی در بتن به دلیل ظرفیت کششی نسبتاً کم و تأثیر شرایط مختلف بارگذاری اجتناب‌ناپذیر است (زید و همکاران، ۲۰۲۱a؛ اسلم و همکاران، ۲۰۲۲؛ آلتوی و همکاران، ۲۰۲۲). علل ترک‌ها می‌تواند متنوع باشد؛ از جمله، انقباض خشک و پلاستیک، بارهای خارجی، تنش‌های حرارتی، زنگ‌زدگی تقویت‌های فولادی، یا تأثیر ترکیبی چندین عامل است (زید و همکاران، ۲۰۲۱ b؛ زید و همکاران، ۲۰۲۲a؛ زید و همکاران، ۲۰۲۲b). میکروترک‌ها می‌توانند به دلیل انقباض ایجاد شوند. اما در مرحله کاهش تنش و تحت تأثیر بارهای خارجی به ترک‌های بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند (زید و همکاران، ۲۰۲۱c؛ زید و همکاران، ۲۰۲۲c؛ زید و همکاران، d ۲۰۲۲). این زنجیره‌های ترک راهی آسان برای نفوذ آب و مایعات مضر به بتن فراهم می‌کنند و بتن را به صورت شیمیایی آسیب می‌زنند. مشکلات ترک‌خوردگی در مناطق با بارندگی و رطوبت زیاد بیشتر می‌شوند. ترک‌ها در بتن را می‌توان به صورت فیزیکی تعمیر کرد. اما مسائل مختلفی مرتبط با تعمیر و نگهداری فیزیکی بتن وجود دارد؛ از جمله تأثیر بر بودجه، هزینه و محیط‌زیست (مگلاد و همکاران، ۲۰۲۲؛ مارتینز گارسیا و همکاران، ۲۰۲۲؛ احمد و همکاران، ۲۰۲۲).

تولید سیمان تقریباً ۷٪ از انتشار دی‌اکسید کربن جهانی را به خود اختصاص می‌دهد (وورل و همکاران، ۲۰۰۱). مواد تعمیر مبتنی بر مواد شیمیایی مشکلات ناسازگاری با نگرانی‌های بهداشتی و مواد ایجاد می‌کنند (دی موینک و همکاران، ۲۰۰۹).

انجام فعالیت‌های تعمیراتی منظم روی ساختمان‌ها و سازه‌ها نیز هزینه‌بر است. بنابراین، نیاز به کشف روشی پایدار برای ترمیم ترک‌ها که هزینه کمتری داشته باشد و نیاز به مداخله فیزیکی را از بین ببرد، ضروری است.

یکی از ایده‌های جدید در این زمینه، توسعه بتن خودترمیم است. این روش، توجه زیادی از بخش ساخت‌وساز به خود جلب کرده است. مکانیزم خودترمیم می‌تواند هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به طور قابل توجهی کاهش دهد. خودترمیمی در بتن را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: ترمیم خودکار و ترمیم خودمختار. ترمیم خودکار به‌طور طبیعی توسط مواد اتصال‌دهنده ایجاد می‌شود، مانند هیدراتاسیون بیشتر سیمان پرتلند غیرهیدراته. در حالی که ترمیم خودمختار به یک محرک برای فعال‌سازی مکانیزم ترمیم نیاز دارد (ون تایتل‌بوم و دو بلی، ۲۰۱۳؛ تانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

ترک‌ها توسط ذرات معلق بتن به دلیل ترک‌خوردگی و ناخالصی‌های آب، گسترش ماتریکس هیدراته بتن در کناره‌های ترک‌ها، و هیدراتاسیون مستمر ذرات اتصال‌دهنده است (ژوتوفسکی و نیمن، ۲۰۲۲؛ ترمخاجورنکیت و همکاران، ۲۰۰۹). اثربخشی ترمیم خودکار می‌تواند با افزودن انواع مختلف الیاف، مواد سیمانی مکمل، پرکننده‌ها و سایر مواد پخت بهبود یابد. برخلاف ترمیم خودکار، ترمیم خودمختار به درج غیرسنتی متکی است تا اتصال‌دهنده غیرهیدراته و احتمالاً ترک‌های بزرگ را ترمیم کند. چندین روش برای ترمیم خودمختار با استفاده از باکتری‌ها، کپسول یا رگ‌های درون بتن، و تکنولوژی الکترودپوزیشن وجود دارد (دی رویج و همکاران، ۲۰۱۳).

۲. بتن خودترمیم

بتن‌های خودترمیم تحول بزرگی در تکنولوژی بتن ایجاد کرده‌اند. تحقیقات اولیه بیشتر بر سازه‌های نگهداری آب متمرکز بوده و روش‌های مختلفی برای بهبود ریزترک‌های بتن بررسی شده است (ویجی و همکاران، ۲۰۱۷). پیشرفت‌های اخیر در بیوتکنولوژی به رسوب کربنات کلسیم توسط برخی باکتری‌ها اشاره دارد (جوشی و همکاران، ۲۰۱۷). در شکل ۱ می‌توان شماتیک عملکرد خودترمیمی بتن با استفاده از باکتری را مشاهده کرد.

تحقیقات مختلف، نتایج متفاوتی در شناسایی

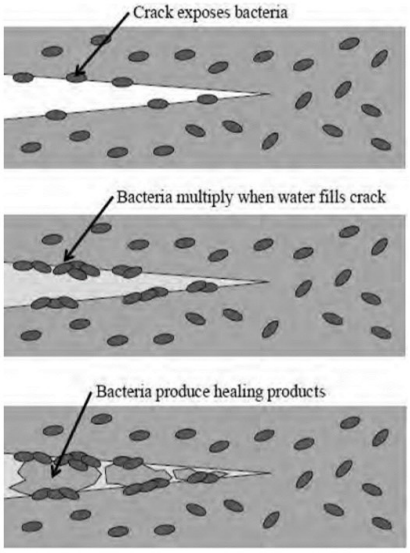
ترمیم‌پذیری بتن ارائه داده‌اند (هوانگ و همکاران، ۲۰۱٦). سه مکانیسم خودترمیمی شامل هیدراتاسیون مداوم سیمان، تبلور مجدد کلسیم هیدروکسید و تشکیل کربنات کلسیم را معرفی کرده‌اند (لی و همکاران، ۲۰۱۷). آنها نشان دادند که میزان ترمیم ترک‌ها به هیدراتاسیون سیمان و میزان کربنات کلسیم تشکیل‌شده بستگی دارد.

هنگامی‌که عرض ترک‌ها کمتر از ۰/۲ میلی‌متر باشد، بتن می‌تواند در طول زمان خودش را ترمیم کند (سینگ و همکاران، ۲۰۱۸). روش‌های مختلفی برای پر کردن ترک‌های عرضی بزرگتر از ۰/۱ میلی‌متر پیشنهاد شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

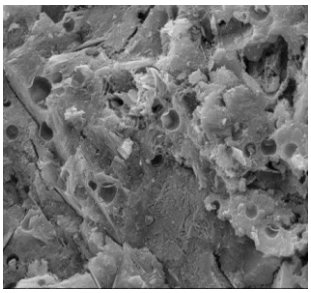
۲-۱. بتن باکتریایی

بتن باکتریایی زیرمجموعه‌ای از بتن میکروارگانیسم است که قادر به انجام واکنش‌های شیمیایی برای ترمیم بتن می‌باشد. این نوع بتن زیستی با افزودن باکتری‌های تولیدکننده رسوب کربنات کلسیم به بتن به دست می‌آید. این باکتری‌ها می‌توانند بدون آب و مواد مغذی برای مدت طولانی زنده بمانند. هنگام ایجاد ترک و نفوذ آب، این باکتری‌ها فعال شده و با تولید کربنات کلسیم، ترک‌ها را پر می‌کنند. این فرآیند به طور طبیعی و بدون ایجاد آلودگی انجام می‌شود (ایهینیچوکوو و همکاران، ۲۰۱۸).

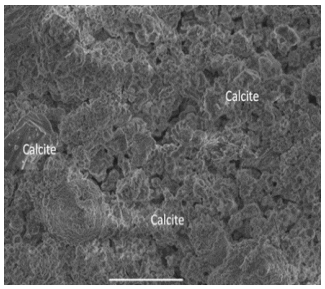
این پژوهش، مروری بر نتایج استفاده از انواع باکتری بر خودترمیمی ریزترک‌ها در بتن و تأثیر آنها بر مقاومت فشاری، خمشی و کششی می‌باشد. این باکتری‌ها شامل Bacillus sphaericus (وانگ و همکاران، ۲۰۱٤)، B. subtilis (خلیق و احسان، ۲۰۱٦)، Bacillus megaterium (کریشناپریا و همکاران، ۲۰۱۵)، Spore Bacillus (گوپتا و همکاران، ۲۰۱۸)، Sporosarcina pasteurii (چهال و همکاران، ۲۰۱۲) و Bacillus subtilis (نوری شهرآبادی و همکاران، ۲۰۲۱) نیز می‌باشد. همچنین، این پژوهش تکمیل‌کننده مقاله نوری شهرآبادی و همکاران (۲۰۲۱)، که باکتری به میزان 10^{12} سلول در میلی‌لیتر به آن اضافه گردیده و همچنین مقایسه با نتایج دیگر مقالات می‌باشد. در شکل ۲، نمونه‌هایی از باکتری و عملکرد آن در بتن خودترمیمی ارائه شده است.



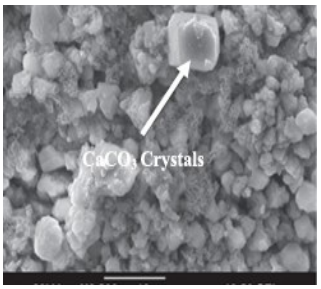
شکل ۱. عملکرد خودترمیمی با استفاده از باکتری‌ها



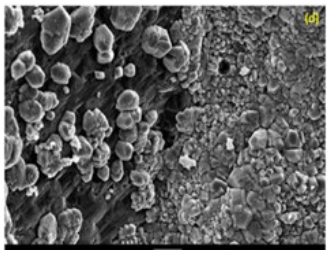
Wang et al. (2014)



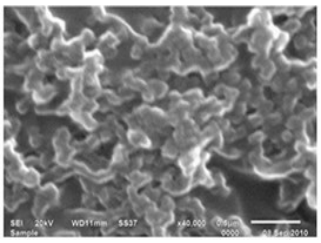
Khaliq and Ehsan (2016)



Krishnapriya et al. (2015)



Gupta et al. (2018)



Chahal et al. (2018)

شکل ۲. نمونه‌هایی از باکتری و عملکرد آن در بتن خودترمیمی

شکل ۳. مراحل انجام آزمایش‌ها شامل افزودن باکتری، قالب‌بندی و انجام آزمایش روی بتن

۲-۲. مکانیزم ترمیم

روند ترمیم ترک توسط باکتری‌ها به عوامل متعددی مانند مقدار کلسیم، pH بتن، و دسترسی به محل‌های تشکیل رسوب بستگی دارد (جوشی و همکاران، ۲۰۱۷). باکتری‌های مقاوم به محیط قلیایی بتن باید برای ترمیم موثر باشند (سینگ و همکاران، ۲۰۱۸).

۳. مصالح مصرفی

۳-۱. سنگ‌دانه‌ها

در این پژوهش، از سنگ‌دانه‌های شکسته کوهی به عنوان درشت‌دانه و از سنگ‌دانه‌های رودخانه‌ای به عنوان ریزدانه استفاده شد که در ادامه، خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده تشریح می‌گردد.

درشت‌دانه

جدول ۱. خصوصیات مصالح درشت‌دانه

ویژگی فیزیکی	مقدار
بزرگترین اندازه اسمی (میلی‌متر)	۱۹
چگالی ظاهری (کیلوگرم بر متر مکعب)	۲۹۰۰
چگالی متراکم (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۶۲۰
جذب آب (٪)	۱/۵
پولکی (٪)	٤/۷
رس (٪)	۰/۱

ریزدانه

جدول ۲. خصوصیات مصالح ریزدانه

ویژگی فیزیکی	مقدار
چگالی ظاهری (کیلوگرم بر متر مکعب)	۲۵۷۰
مدول نرمی	۲/۸۲
جذب آب (٪)	۲/۰
رس (٪)	۱/۷

۳-۲. آب

آب نقش بسیار اساسی و مهم در بتن دارد. به همین جهت استفاده از آب مناسب در بتن همواره باید مورد توجه قرار گیرد. به طور کلی آب به کار رفته در ساخت بتن باید پاک و عاری از هرگونه ناخالصی باشد یا به عبارت دیگر قابل شرب باشد.

۳-۳. سیمان

سیمان نقش چسبانندگی سنگ‌دانه‌ها در بتن را بر عهده دارد. در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲۲ دلیجان، تولیدی شرکت عمران انارک استفاده گردید. ویژگی‌های فیزیکی سیمان مورد استفاده در جدول ۳ آمده است. همچنین، ویژگی‌های شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول ٤ آمده است.

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی سیمان مورد استفاده

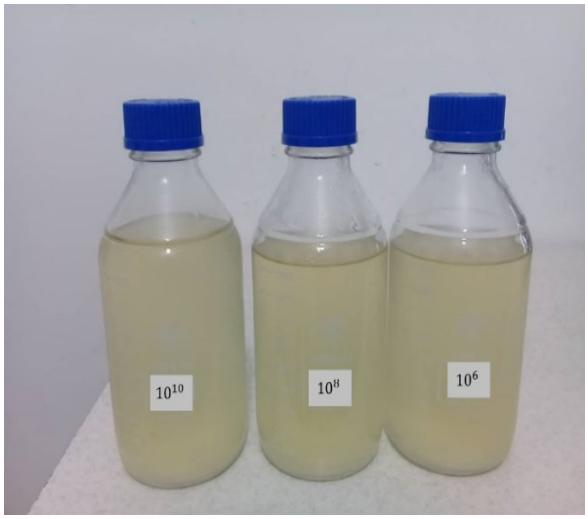
ویژگی فیزیکی	مقدار
چگالی (گرم بر متر مکعب)	۳/۱٦
سطح مخصوص (متر مربع بر کیلوگرم)	۳٤٥
گیرش نهایی(دقیقه)	۲۳۰
استحکام خمشی ۳ روزه (مگاپاسکال)	۸/٦
استحکام فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	٤۸/۱
روانی ملات (میلی‌متر)	۱۷۰

۳-٤. باکتری

در این پژوهش، در ابتدا از انواع باکتری‌هایی که درشرایط شبیه‌سازی شده بتن کشت میکروارگانیسم نگهداری می‌شوند استفاده گردید. تنها باکتری مقاوم که شرایط لازم رشد و تکثیر را به دست آورد باسیلوس-سوبتیلیس بود.

در این پژوهش، از باکتری باسیلوس، گونه سوبتیلیس، در غلظت‌های 10^{6}، 10^{8}، 10^{10} و 10^{12} سلول در میلی‌لیتر جهت تولید نمونه بتن باکتریایی استفاده گردید.

محلول براث باکتریایی یا نوترینت براث (محیط کشت میکروبی) شامل ۱۰ گرم بر لیتر عصاره گوشت گوساله، ۱۰ گرم بر لیتر پپتون و ۵ گرم بر لیتر کلرید سدیم است که محیطی را جهت کشت و نگهداری باکتری مورد استفاده فراهم می‌آورد. یکی از موارد مهم در تهیه بتن باکتریایی روش افزودن باکتری‌ها در خمیر بتن است. افزودن محلول براث باکتریایی منجر به تغییر نسبت آب به سیمان و در نهایت تغییر کارایی و خواص مقاومتی بتن باکتریایی می‌شود. به همین منظور، میزان آب مورد نیاز در طرح اختلاط بتن مجموع میزان آب مورد نیاز به همراه محلول باکتریایی است.



شکل ٤. محلول براث باکتری باسیلوس سوبتیلیس در غلظت‌های 10^{6}، 10^{8} و 10^{10} سلول در میلی‌لیتر (نوری شهرآبادی و همکاران، ۲۰۲۱)

۳-۵. طرح اختلاط

در این پژوهش، طرح‌های بسیاری با درصد مصالح مختلف بررسی گردید (جدول ٤) که در نهایت طرح نهایی مخلوط بتن مطابق جدول ٥ به عنوان بهترین نسبت شناسایی و به عنوان طرح منتخب در نظر گرفته شد.

جدول ٥. طرح نهایی مخلوط بتن

مصالح	مقدار (کیلوگرم بر متر مکعب)
ماسه	۸۰۰
درشت‌دانه	۸۰۰
ریزدانه	۳۵۰
سیمان	۲۲۷/۵
سرباره	۱۲۲/۵
آب	۱۷۵

جدول ٦. ویژگی طرح‌های اختلاط مورد مطالعه

طرح اختلاط	باکتری (سلول در میلی‌لیتر)
R	۰
RB6	10^6
RB8	10^8
RB10	10^{10}
RB12	10^{12}

در ادامه، مصالح مصرفی در بتن با دقت توزین شده و عمل اختلاط به ترتیب با افزودن مصالح سنگی، مواد سیمانی، آب و سرباره برای بتن معمولی و افزودن محلول باکتریایی برای بتن باکتریایی صورت گرفت. تفاوت نسبت اختلاط بتن معمولی متداول و بتن باکتریایی در تولید بتن تنها در جایگزین نمودن یک لیتر محلول باکتریایی به جای همان مقدار آب اختلاط برای غلظت-های باکتریایی مختلف است. اختلاط نمونه‌های مورد نیاز، توسط دستگاه میکسر انجام گرفت.

در این پژوهش از چهار غلظت 10^6، 10^8، 10^{10} و 10^{12} سلول در میلی‌لیتر به عنوان نمونه‌های شامل باکتری استفاده گردید. در جدول ٦، RB (بتن با باکتری) و R (بتن شاهد یا بتن بدون باکتری) می‌باشد.

جدول ٤. مواد مصرفی در تولید بتن در مقالات مختلف

باکتری	میکروکپسول (گرم)	فوق روان‌کننده (گرم)	مواد مغذی (کیلوگرم بر متر مکعب)	آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	سنگدانه درشت (کیلوگرم بر متر مکعب)	سنگدانه ریز (کیلوگرم بر متر مکعب)	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	نوع	طرح
خیر	۰	۰	۰	۲۲۵	۰	۱۳۵۰	٤٥۰	R	Wang et al. (2014)
بله	۳٤/۷	۰	۵۷/۸	۱۹۲/۸	۰	۱۳۵۰	٤٥۰	RB	
خیر	۰	۰	۰	۱٤۸	۹۹۰	۸٤۰	۳۷۰	R	Khaliq et al. (2016)
بله	۱	۱	۰	۱٤۸	۹۹۰	۸٤۰	۳۷۰	RB	
خیر	۰	۰	۰	۱۸٦	۱۲۹۰	٦۸۰	٤۱۳	R	Krishnapriya et al. (2015)
بله	۰	۰	۰	۱۸٦	۱۲۹۰	٦۸۰	٤۱۳	RB	
خیر	۰	۰	۰	٤۰۰	۰	۲۷۵۰	۱۰۰۰	R	Gupta et al. (2018)
بله	۱۲۸/۵	۰	۰	٤۰۰	۰	۲۷۵۰	۱۰۰۰	RB	
خیر	۰	۰	۰	۱۸۵	۱۱٦٤/۱۲	۵٦۸/۷	۳۹۰	R	Chahal et al. (2018)
بله	۰	۰	۰	۱۸۵	۱۱٦٤/۱۲	۵٦۸/۷	۳۷۰/۵	RB	

برای انتقال باکتری‌ها به بتن، به دلیل شرایط بسیار قلیایی محیط بتن که ممکن است برای بسیاری از باکتری‌ها زیان‌آور باشد، از تکنیک‌های مختلفی برای افزایش ماندگاری و توزیع یکنواخت آنها استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها، بهره‌گیری از میکروکپسول‌هاست که به‌عنوان محافظ باکتری عمل کرده و بسته به نوع باکتری، به افزایش پایداری آنها کمک می‌کند (ونگ و همکاران، ۲۰۱٤؛ گوپتا و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، استفاده از نانومواد و روان‌کننده‌ها از دیگر راهکارهای مؤثر برای این منظور است (خلیق و احسان، ۲۰۱٦). با این حال، در این پژوهش از گونه‌ای از باکتری به نام باسیلوس سوبتیلیس استفاده شده که برخلاف بسیاری از باکتری‌ها نیاز به میکروکپسول یا نانومواد ندارد.

٤. نتایج و بحث

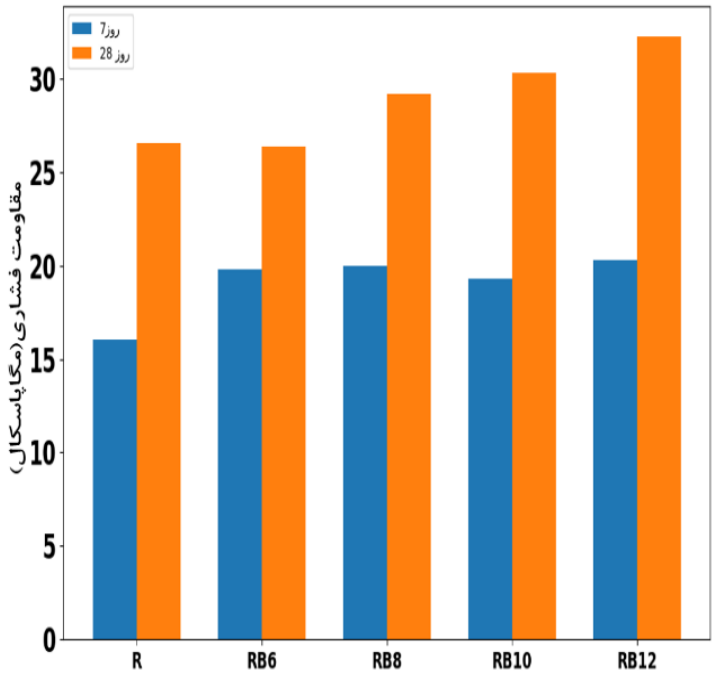
٤-۱. مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد BS 1881 P116 روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰× ۱۰۰ میلی‌متر و در سن ۷ و ۲۸ روز انجام گرفت. نتایج آن در جدول ۷ و شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۷. آزمایش مقاومت فشاری

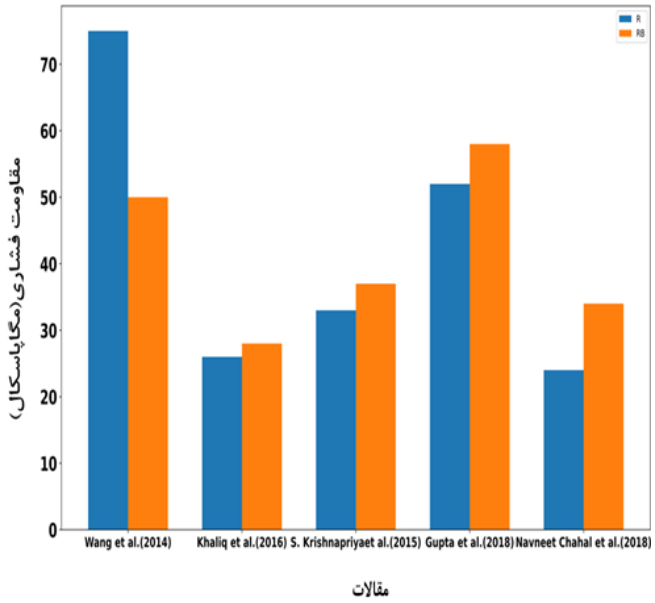
طرح اختلاط	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	
	۷ روز	۲۸ روز
R	۱۶/۰۶	۲۶/۵۵
RB6	۱۹/۷۷٤	۲۶/۳۳٤
RB8	۱۹/۹۵٦	۲۹/۱۷۵
RB10	۱۹/۳۱	۳۰/۳۱
RB12	۲۰/۲۸	۳۲/۲۵

همه بتن‌ها بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری طی ۲۸ روز نسبت به ۷ روز نشان داده‌اند. نمونه RB10 با ۷۶/۵ درصد افزایش مقاومت از ۷ روز تا ۲۸ روز بیشترین درصد رشد را دارد. نمونه‌های RB12 و RB8 نیز افزایش‌های قابل توجهی دارند (به ترتیب ۶۰٪ و ۵۰٪). نمونه مرجع (R) و RB6 با افزایش حدود ٤٦-٤٧ درصد، نسبتاً مشابه هستند.



شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در این پژوهش

طرح‌های اختلاط با باکتری به طور کلی عملکرد بهتری نسبت به طرح اختلاط شاهد در هر دو دوره زمانی دارند (شکل ۵).



شکل ٦. مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری در مقالات مختلف

جدول ٨. اختلاف درصد مقاومت فشاری برای بتن با باکتری نسبت به بتن بدون باکتری در مقالات مختلف نسبت به حالت شاهد

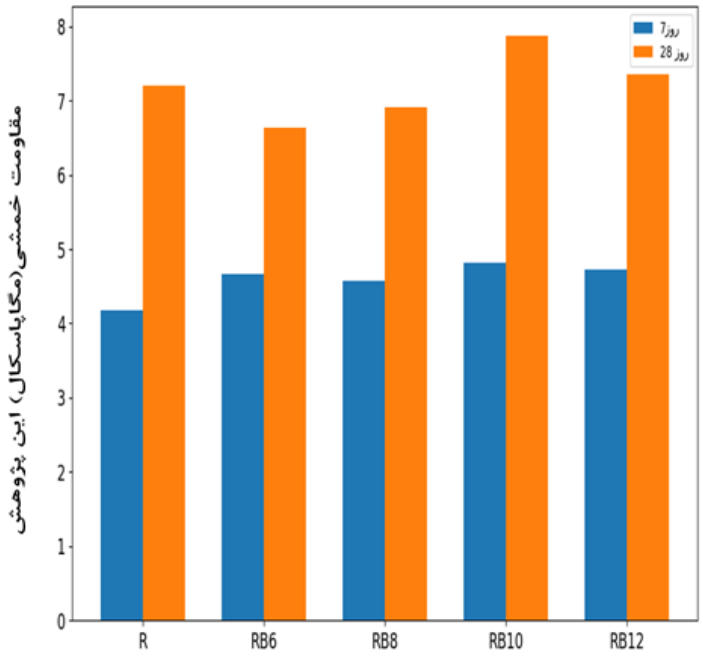
مقاله	اختلاف (٪)
Wang et al. (2014)	٣٣/٣٣
Khaliq et al. (2016)	٧/٦٩
Krishnapriyaet et al. (2015)	١٢/١٢
Gupta et al. (2018)	١١/٥٤
Chahal et al. (2018)	٤١/٦٧
نتایج این پژوهش	٢٦/٢٨

در مطالعه ونگ و همکاران (٢٠١٤)، ٣٣٪ تغییرات در مقاومت فشاری مشاهده شد (شکل ٦ و جدول ٨). در حالی که خلیق و همکاران (٢٠١٦) تنها ٧/٦٩٪ افزایش گزارش کردند. سایر مطالعات نیز به ترتیب افزایش‌های ١٢/١٢٪ (کریشناپریا)، ١١/٥٤٪ (گوپتا) و ٤١/٦٧٪ (چهال) را ثبت کرده‌اند. نتایج این پژوهش نیز افزایش ٢٦/٢٨٪ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این پژوهش هیچ گونه میکروکپسول و یا مواد نانو برای مقاوم‌سازی باکتری استفاده نشده است.

٤-٢. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

در طراحی روسازی‌های بتنی از آزمایش مقاومت خمشی برای در نظر گرفتن معیار خستگی که کنترل‌کننده ترک‌خوردگی بتن تحت بارگذاری‌های مکرر است، استفاده می‌شود. در این پژوهش، آزمایش مقاومت خمشی مطابق با استاندارد ASTM C78 روی نمونه‌های تیر به ابعاد ١٠٠×١٠٠×٥٠٠ میلی‌متر و در سن ٧ و ٢٨ روزه انجام گردید و برای هر نمونه سه تکرار انجام گرفت.

تمامی نمونه‌ها نشان‌دهنده بهبود قابل توجهی در مقاومت خمشی از روز ٧ به روز ٢٨ هستند (شکل ٧).



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت خمشی در این پژوهش

نمونه RB10 با ۱۰۰٪ افزایش مقاومت از ۷ روز تا ۲۸ روز بالاترین درصد رشد را نشان می‌دهد که بیانگر بهبود قابل توجه در طول زمان است.

نمونه مرجع R و RB12 هر دو ۵۰٪ افزایش دارند، در حالی که RB6 عملکرد قوی‌تری با ۷۵٪ افزایش داشته است. RB8 کمترین افزایش نسبی (٤۰٪) را دارد.

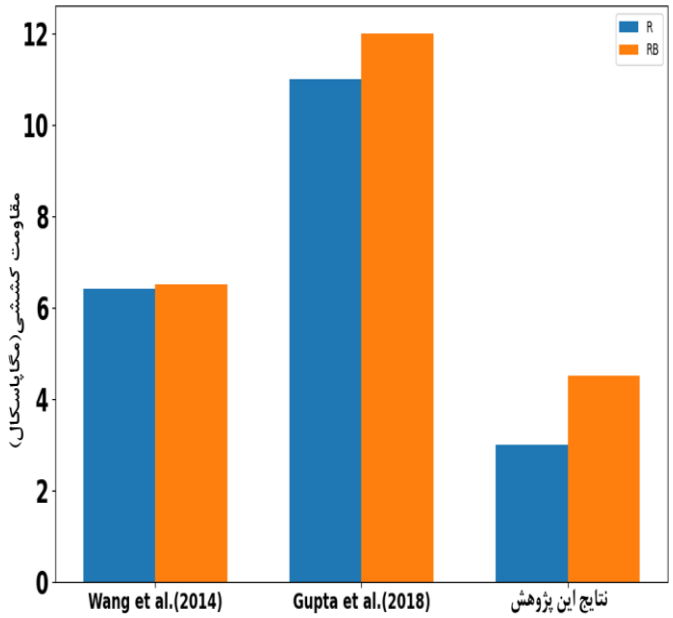
این نتایج نشان می‌دهند که افزودن باکتری به‌کار رفته در بتن‌های RB بهبود قابل توجهی در مقاومت خمشی بتن ایجاد کرده است؛ به‌خصوص نمونه‌های RB10 و RB12 که دارای میزان باکتری بیشتری نسبت به مابقی نمونه‌ها می‌باشند.

مقایسه نتایج مقاومت خمشی با دیگر مقالات نشان داد که با افزودن باکتری به بتن، مقاومت خمشی بهبود قابل توجه نسبت به حالت شاهد خود داشته است. به طور میانگین، در این پژوهش و همچنین مقاله گوپتا و همکاران (۲۰۱۸)، با گذشت ۷ روز، مقاومت خمشی ۹ درصد افزایش پیدا کرده است.

در مجموع، استفاده از باکتری‌ها برای بهبود مقاومت خمشی بتن یک روش مؤثر به نظر می‌رسد و نتایج هر دو پژوهش نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در مقاومت خمشی با افزودن باکتری‌ها هستند.

٤-۳. نتایج آزمایش مقاومت کششی

در این پژوهش، آزمایش مقاومت کششی مطابق استاندارد ASTM C496 روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر انجام گرفت. این آزمایش شامل اعمال نیروی فشاری قطری در طول نمونه بتن است. سرعت بارگذاری وارد بر نمونه باید به گونه‌ای باشد که تنش کششی با سرعتی بین ۷۰۰ تا ۱٤۰۰ کیلوپاسکال بر دقیقه در صفحه شکست افزایش یابد. سرعت بارگذاری وارد بر نمونه برابر ۱۲۰ کیلوگرم بر ثانیه انتخاب شد که معادل با افزایش تنش کششی به میزان ۱۰۰۰ کیلوپاسکال بر دقیقه در صفحه شکست است.



شکل ۸. مقایسه نتایج آزمایش مقاومت کششی

می‌توان نتیجه گرفت که در هر سه مطالعه، نمونه‌های RB مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های R دارند (شکل ۸).

در این پژوهش، مقاومت کششی ۱۵/۳۵٪ افزایش یافته است. مطالعه ونگ و همکاران (۲۰۱٤) افزایش ۱/۵٦٪ و گوپتا و همکاران (۲۰۱۸) افزایش ۹/۰۹٪ را گزارش کرده‌اند (جدول ۹).

جدول ۹. مقایسه نتایج مقاومت کششی مقالات نسبت به حالت شاهد

مقاومت کششی (٪)	مقاله
۱۵/۳۵	نتایج این پژوهش
۱/۵٦	Wang et al. (2014)
۹/۰۹	Gupta et al. (2018)

۵. نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از باکتری بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن خودترمیمی پرداخته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که افزودن باکتری به بتن دارای محلول براث، کلسیم موجود در محلول را مصرف کرده و با اکسیژن‌های موجود در بتن ترکیب شده و باعث تولید کربنات کلسیم ($CaCO_3$) گردیده و ترسیب آن در خلل و فرج بتن باعث افزایش خواص مکانیکی (فشاری، کششی و خمشی)، دوام بتن و کاهش تخریب آن مؤثر باشد.

تولید و استفاده از میکروکپسول‌ها و ذرات نانو برای انتقال باکتری به بتن یک فرآیند پیچیده و هزینه‌بر است که نیازمند تجهیزات و فناوری‌های پیشرفته می‌باشد. این تکنولوژی، به دلیل هزینه‌های زیاد تولید و نیاز به دقت زیاد، به صورت عمده قابل استفاده نیست.

در این پژوهش، از گونه‌ای از باکتری به نام باسیلوس سوبتیلیس استفاده شده که برخلاف بسیاری از باکتری‌ها، نیاز به میکروکپسول یا نانومواد ندارد و هزینه تولید آن نسبت به بقیه باکتری‌ها کمتر بوده و می‌توان به صورت عمده در ساخت بتن از آن استفاده کرد.

استفاده از باکتری در بتن‌های خودترمیمی موجب بهبود قابل توجه در مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن شده است. بتن‌های RB10 و RB12 با بیشترین میزان باکتری، بیشترین افزایش مقاومت را نشان داده‌اند. نمونه RB10 دارای ۱۰۰٪ افزایش در مقاومت خمشی و ۷۶/۵٪ در مقاومت فشاری بوده و نمونه RB12 نیز ۶۰٪ افزایش در مقاومت فشاری و ۵۰٪ در مقاومت خمشی داشته است. نمونه‌های دیگر همچون RB8 و RB6 نیز بهبودهای قابل توجهی را نشان داده‌اند. همچنین، استفاده از باکتری تا ۳۳٪ باعث افزایش مقاومت کششی بتن شده است.

در این پژوهش، مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن با افزودن باکتری بررسی شد. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری تا ۲۶/۲۸٪ افزایش یافته است، هر چند در برخی مطالعات گذشته این مقدار متفاوت گزارش شده است: ۳۳/۳۳٪ در ونگ و همکاران (۲۰۱۴) و ۷/۶۹٪ در خلیق و همکاران (۲۰۱۶). همچنین، مقاومت خمشی به‌طور میانگین پس از ۷ روز ۹٪ افزایش داشته است که با نتایج گوپتا و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد. مقاومت کششی نیز ۱۵/۳۵٪ افزایش یافته که بیشتر از نتایج برخی مطالعات دیگر بود: ۱/۵۶٪ در ونگ و همکاران (۲۰۱۴) و ۹/۰۹٪ در گوپتا و همکاران (۲۰۱۸). در این تحقیق، از هیچ ماده نانو یا میکروکپسول برای مقاوم‌سازی باکتری استفاده نشده است.

۶. مراجع

Ahmad, J., Zaid, O., P´erez, C. L. C., et al. 2022. "Experimental research on mechanical and permeability properties of nylon fiber reinforced recycled aggregate concrete with mineral admixture". Appl. Sci., https://doi.org /10.3390/app12020554

Althoey, F., Zaid, O., de-Prado-Gil, J., et al. 2022. "Impact of sulfate activation of rice husk ash on the performance of high strength steel fiber reinforced recycled aggregate concrete". J. Build. Eng., 54: 104610. https://doi.org/10.1 016/j.jobe.2022.104610

Aslam, F., Zaid, O., Althoey, F., et al. 2022. "Evaluating the influence of fly ash and waste glass on the characteristics of coconut fibers reinforced concrete". Struct. Concrete, 24(2): 2440-2459. https://doi.org/10.1002/suco.2022 00183

Chahal, N., Siddique, R. and Rajor, A. 2012. "Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume". Constr. Build. Mater., 37: 645-651.

De Muynck, W., De Belie, N. and Verstraete, W. 2009. "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review". Ecol. Eng., 36: 118-136, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng .2009.02.006

De Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N. and Schlangen, E. 2013. "Self-healing phenomena in cement-based materials". RILEM Technical Committee 221-SHC.

Gupta, S., Kua, H. W. and Pang, S. D. 2018. "Healing cement mortar by immobilization of bacteria in biochar: An integrated approach of self-healing and carbon sequestration". Cement Concrete Compos., 86: 238-254.

Huang, H., Ye, G., Qian, C. and Schlangen, E. 2016. "Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions". Mater. Design, 92: 499-511.

Iheanyichukwu, C. G., Umar, S. A. and Ekwueme, P. C. 2018. "A review on self-healing concerete using bacteria". Sustain. Struct. Mater., 1(2): 12-20.

Joshi, S., Goyal, S., Mukherjee, A. and Reddy, M. S. 2017. "Microbial healing of cracks in concrete: A review". J. Ind. Microbiol. Biotech., 44(11): 1511-1525.

Khaliq, W. and Ehsan, M. B. 2016. "Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques". Constr. Build. Mater., 102: 349-357.

Krishnapriya, S., D. L. Venkatesh Babu and P. A. G (2015). "Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete." Microbiol. Res., 174: 48-55.
Lee, Y. S., Kim, H. J. and Park, W. 2017. "Non-ureolytic calcium carbonate precipitation by Lysinibacillus sp. YS11 isolated from the rhizosphere of Miscanthus sacchariflorus". J. Microbiol., 55: 440-447.
Maglad, A. M., Zaid, O., Arbili, M. M., et al. 2022. "A study on the properties of geopolymer concrete modified with nano graphene oxide". Build., 12(8): 1066. https:// doi.org/10.3390/bu ildings12081066
Martínez-García, R., Jagadesh, P., Zaid, O., et al. 2022. "The present state of the use of waste wood ash as an eco-efficient construction material: A review". Mater., 15(15): 5349. https://doi.org/10.3390/ma15155349

Noori Shahrabadi, A., Hassani, A. and Bakhshi, B. 2021. "Effect of bacteria on self-healing of bio-concrete by increasing compressive strength". J. Transport. Infrastruct. Eng., 7(2): 41-50. [In Persian]
Singh, N., Ahmad, J. and Mir, S. S. 2018. "Assessment of ureolytic bacteria for self-healing concrete". Int. J. Recent Sci. Res., 9(3): 25350-25355.
Tang, W., Kardani, O. and Cui, H. 2015. "Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials- A review". Constr. Build. Mater., 81: 233-247. https://doi.org/10 .1016/j.conbuildmat..02.054
Termkhajornkit, P., Nawa, T., Yamashiro, Y. and Saito, T. 2009. "Self-healing ability of fly ash–cement systems". Cement Concrete Compos., 31: 195-203. https://doi.org//j.cemc oncomp. 2008.12.009
Van Tittelboom, K. and De Belie, N. 2013. "Self-healing in cementitious materials- a review". Mater., 6(6): 2182-2217. https://doi.org/10.33 90/ma6062182
Vijay, K., Murmu, M. and Deo, S. V. 2017. "Bacteria based self healing concrete- A review". Constr. Build. Mater., 152: 1008-1014.
Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W. and De Belie, N. 2014. "Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores". Cement Concrete Res., 56: 139-152.
Worrell, E., Price, L., Martin, N., et al. 2001. "Carbon dioxide emission from the global cement industry". Ann. Rev. Energy Environ., 26: 303-329, https://doi.org/10.1146/annurev. energy.26.1.303
Zaid, O., Ahmad, J., Siddique, M. S., et al. 2021a. "A step towards sustainable glass fiber reinforced concrete utilizing silica fume and waste coconut shell aggregate". Sci. Rep. 11282.
Zaid, O., Ahmad, J., Siddique, M. S. and Aslam, F. 2021b. "Effect of incorporation of rice husk ash instead of cement on the performance of steel fibers reinforced concrete". Front. Mater., 8: 665625. https://doi.org/10.3389 /fmats.2021 .665625
Zaid, O., Roshan, S., Hashmi, Z, Aslam, F. and Alabduljabbar, H. 2021c. "Experimental study on mechanical performance of recycled fine aggregate concrete reinforced with discarded carbon fibers". Front. Mater., 8. https://doi .org/10.3389/fmats.2021.771423
Zaid, O., Hashmi, S. R. Z., Aslam, F., et al. 2022a. "Experimental study on the properties improvement of hybrid graphene oxide fiber-reinforced composite concrete". Diam. Relat. Mater., 108883. https://doi.org/10.1016/j.diam ond.2022.108883
Zaid, O., Martínez-García, R. and Aslam, F. 2022b. "Influence of wheat straw ash as partial substitute of cement on properties of high-strength concrete incorporating graphene oxide". J. Mater. Civ. Eng., 34(11). https://doi .org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004415
Zaid, O., Mukhtar, F. M., Martinez García, R., et al. 2022c. "Characteristics of high-performance steel fiber reinforced recycled aggregate concrete utilizing mineral filler". Case Stud. Constr. Mater., e00939. https://doi.org/10.101 6/j.cscm.2022.e00939
Zaid, O., Martínez-García, R., Abadel, A. A., et al. 2022d. "To determine the performance of metakaolin-based fiber-reinforced geopolymer concrete with recycled aggregates". Arch. Civ. Mech. Eng., 22: 114. https://doi.org/10.1007/ s43452-022-00436-2
Zhang, J., Liu, Y., Feng, T., Zhou, M., Zhao, L., Zhou, A. and Li, Z. 2017. "Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete". Constr. Build. Mater., 148: 610-617.
Zhutovsky, S. and Nayman, S. 2022. "Modeling of crack-healing by hydration products of residual cement in concrete". Constr. Build. Mater., 340: 127682. https:// doi.org/10.1016/j.conbuil dmat.2022.127682