



مقاله

فصلنامه مواد و فناوری های پیشرفته

کامل پژوهشی مروری

Journal Homepage: www.jamt.ir

مروری بر انواع روش های ساخت بتن خودترمیم

ستاره مهرآور^۱، مزگان حیدری^{۱*}، حسین نورانیان^۲^۱ پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، استان البرز، ایران^۲ پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، استان البرز، ایران

تاریخچه مقاله:	چکیده
ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴	بتن به دلیل استحکام، دوام و هزینه نسبتاً پایین، بیشترین ماده مورد استفاده در ساخت و ساز در جهان است. با این حال به وجود آمدن ترک و تخریب بتن حتی در زمان آغازین عمر آن نیز اجتناب ناپذیر است. از این رو نیاز به تعمیر و ترمیم آن حتمی می باشد. با توجه به این که بتن در بیشتر موارد بدون پوشش در محیط استفاده می شود و شرایط محیطی در طول عمر آن بسیار مؤثر است، استفاده از روش هایی برای افزایش دوام و طول عمر بتن الزامی به نظر می رسد. طبق آمار به دست آمده از مقاله ها و پژوهش ها و آزمایشات انجام شده و مشاهدات عینی گاهی هزینه تعمیر و ترمیم سازه از هزینه ساخت آن هم بیشتر است. ترک های بتنی دلیل اصلی کاهش عمر سازه های بتنی اند، بنابراین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه تر است که رشد ترک های کوچک در لحظه ظهورشان محدود شوند تا مجبور به ترمیم آن ها پس از ایجاد ترک های بزرگ نشد. بهترین راه برای رسیدن به این مهم، این است که مواد ترمیم کننده برای بهبود ترک های زودرس از قبل به بتن اضافه شوند که اصطلاحاً به این روش خودترمیمی گفته می شود. از این رو بتن خودترمیم در جهان به ویژه در سال های اخیر جایگاه ویژه ای در صنعت ساخت و ساز پیدا کرده است. در مقاله حاضر به تعدادی از این روش ها و مقایسه آن ها و این که کدام روش بیشتر قابلیت صنعتی شدن را داراست، پرداخته می شود.
دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴	
پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴	
کلیدواژه ها:	
بتن خودترمیم	
میکروکپسوله کردن	
بتن باکتریایی	
افزودنی های معدنی نانو ذرات	

https://doi.org/10.30501/jamt.2021.?????.????

URL: http://www.jamt.ir/?????????.html

Original Research Article

JAMT: Vol. ?, No. ?, (Season 2021), ??-??

An Overview of Different Types of Self-Healing Concrete Construction Methods

Setareh Mehravar¹, Mojgan Heydari^{1*}, Hossein Nouranian²¹ Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center, Karaj, Alborz, Iran² Department of Ceramics, Materials and Energy Research Center, Karaj, Alborz, Iran

Paper History:

Received: 2021-??-??

Revised in revised form: 2021-??-??

Accepted: 2021-??-??

Keywords:

Self-Healing Concrete

Microencapsulation

Bacterial Concrete

Mineral Admixtures

Abstract Concrete is the most widely used construction material in the world due to its relatively high strength, durability and relatively low cost. However, cracks and deterioration in concrete are inevitable; even in its early life, it needs to be repaired. Considering that concrete in most cases appears uncoated in the environment and environmental conditions are very effective during its life, the use of methods to increase the durability and longevity of concrete seems necessary. According to statistics and researches and personal experiences, sometimes the cost of repairing a structure is higher than the cost of construction itself. Concrete cracks are the main reason for reducing the life of concrete structures. Therefore, it is more economical to limit the growth of small cracks at the time of their emergence so that they do not have to be repaired after the formation of large cracks. The best way to achieve this is to add repair materials to the concrete beforehand to

*مزگان حیدری

نشانی: استان البرز، شهر کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، تلفن: ۰۲۶ - ۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶ - ۳۶۲۰۱۸۸۸

پیام نگار: M.Heydari@merc.ac.ir

Please cite this article as: First Author Name, Second Author Name, Third Author Name, "English Title (Times New Roman, Bold 14)", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. ?, No. ?, (2021), ??-??. (https://doi.org/10.30501/jamt.2020.?????.????).

2008-4277/© 2021 The Author(s). Published by MERC. This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



۱- مقدمه

بوده است که سال‌ها است در اروپا، آمریکا و ژاپن مورد استفاده قرار گرفته و روز به روز کاربرد خویش را بین مهندسين پيدا می‌کند [۱۶-۱۸]. این بتن از مزایایی مانند سیالیت بالا، عدم بروز جدایی سنگدانه‌ها و پدیده آب‌انداختگی در مقایسه با بتن معمول برخوردار است. بتن خودتراکم‌شونده نه تنها توانایی خوبی برای عبور از فضای میان میل‌گردهای فلزی را دارد، بلکه توانایی این را دارد که بدون عمل ویبره کردن زیر وزن خود متراکم شود [۱۹-۲۰]. بتن خودتراکم‌شونده، شامل بازه گسترده‌ای از طرح‌های اختلاط می‌باشد که خواص بتن تازه و سخت شده لازم برای کاربری‌های خاص دارا می‌باشند [۲۱-۲۲]. اگرچه مقاومت هم‌چنان معیار اصلی موفقیت این بتن می‌باشند، اما ویژگی‌های بتن تازه آن، بسیار گسترده‌تر از بتن معمولی و متراکم‌شده توسط لرزاننده‌ها می‌باشد. این خواص مطلوب باید در زمان، محل و بتن ریزی حفظ شوند.

بعضی از بتن‌ها دارای نفوذپذیری بالایی هستند و یون‌های نفوذی در بتن اساساً روی آرماتور تأثیر می‌گذارند و از این رو دوام سازه بتنی را کاهش می‌دهند. بارگذاری بیش از حد، مکانیزم‌های زوال، تغییرات حجمی ناشی از دمای بالا، خزش، جمع‌شوندگی، طراحی نادرست، روش‌های ساخت و ساز نامناسب از جمله عوامل ایجاد ترک و کاهش عمر و استحکام بتن می‌باشند. برای رفع مجموعه مشکلات نامبرده امروزه بتن‌های خودترمیم (Self Healing Concrete) مطرح شده‌اند که اصطلاح خودترمیم‌شوندگی در علم مواد به معنای توانایی ترک برای جلوگیری از رشد خود در طول زمان و تولید بتنی هوشمند با قابلیت ترمیم ترک به وسیله فعل و انفعالات شیمیایی و فیزیکی بدون دخالت نیروی انسانی است [۲۳-۲۴].

مهرآور و همکاران در یک پژوهش، با استفاده از فناوری نانو، نانوسولفات آلومینیوم را توسط گوگرد به صورت میکروکپسول سنتز کردند و در ادامه بتن خودتراکم‌شونده با طرح اختلاط مشخص تهیه شد و در نهایت خواص خودترمیمی و مکانیکی نانوکامپوزیت میکروکپسول سولفات آلومینیوم در بتن خودتراکم‌شونده مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۵-۲۶]. فعل و انفعالات شیمیایی شامل واکنش ترکیباتی است که در معرض

بتن به دلیل مقاومت در برابر فشارهای فشرده و سنگین جزء مصالح اصلی در ساخت و ساز است، اما درعین حال استحکام کششی پایینی دارد که این امر باعث ایجاد ترک در بتن و کوتاه شدن عمر و کاهش دوام آن می‌شود [۳-۱].

موادی که خاصیت سیمانی شدن دارند به طور گسترده‌ای به عنوان اجزای تشکیل‌دهنده سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴-۵]. در این میان پدیده تخریب و زوال در این سازه‌ها به عنوان یک عامل اجتناب‌ناپذیر همیشه باعث کاهش سرویس-پذیری این سازه‌ها می‌شود. بنابراین نگهداری و تعمیر ساختمان‌ها که یکی از پرهزینه‌ترین و سخت‌ترین کارها می‌باشد، همیشه باید مدنظر قرار گیرد [۶-۷]. اغلب مواد با پیشرفت میکروتکرهای ساختاری دچار شکست می‌شوند. نوک هر ترک مانند یک چاقو مواد را برش می‌دهد و در قطعه پیش می‌رود که با گذشت زمان باعث کاهش استحکام و تخریب مکانیکی قطعه می‌گردد [۸-۱۱].

همچنین ترک در بتن باعث نفوذ آب‌های اسیدی و خورنده شده که باعث زنگ زدگی میل‌گردها و به دلیل حجم بیشتر اکسید آهن نسبت به آهن باعث تخریب بتن می‌گردد. به همین منظور مواد سیمانی خودترمیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند و از سال‌ها پیش پدیده خودترمیمی مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است [۱۲-۱۳]. به منظور ایجاد یا بهبود عملکرد مواد خودترمیم، در دهه اخیر راهکارهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است و الگوهای جدید گسترش یافته است [۱۴-۱۵]. خودترمیم‌شوندگی یکی از ارزشمندترین پدیده‌هایی است که برای غلبه بر مشکل کاهش یکپارچگی عملکردی که بر اثر آسیب دیدن مواد رخ می‌دهد به کار می‌آید. بدین سان، فرآیند خودترمیم‌کنندگی، باید بلافاصله پس از وقوع آسیب، به طور خودکار انجام شود و محدوده‌ی آسیب‌دیده، یکپارچگی خود را شبیه آنچه پیش از آسیب دیدن داشت، به دست آورد.

بتن خودتراکم‌شونده (Self Compacting Concrete=SCC) یکی از دستاوردهای نوین تکنولوژی بتن



شکل ۱. دیاگرام انواع روش‌های خودترمیمی بتن

۲-۱- خودترمیمی ذاتی (Autogenous Healing)

اولین و طبیعی‌ترین روش خودترمیمی بتن که بدون هیچ‌گونه دخالت خارجی انجام می‌شود، خودترمیمی ذاتی بتن بر اساس وقوع واکنش طبیعی شیمیایی و حضور آب است. در سال ۱۸۳۶، آکادمی علوم فرانسه برای اولین بار خودترمیمی ذاتی بتن را بر اساس ساختارهای نگهدارنده آب بررسی کرد، زیرا مشاهده شد که لایه‌های بلوری سفید بر روی ترک‌ها به دلیل کرناسیون بین هیدروکسید کلسیم از بتن و قرار گرفتن در معرض جو یا واکنش بین کلسیم ایجاد شده است. چرا که مشاهده شده است که برخی ترک‌ها در سازه‌های بتنی قدیمی با مواد بلورین سفید رنگی پوشانده شده‌اند که اشاره به قابلیت بتن در ترمیم خود به خود ترک‌ها با تولید مواد شیمیایی توسط خودش دارد. ترمیم ترک‌ها در مواد سیمانی منجر به کاهش تدریجی نفوذپذیری تحت گرادیان هیدرولیکی (جریان آب از میان یک محیط متخلخل) در طول زمان می‌شود و در بعضی موارد، ترک‌ها می‌توانند به‌طور کامل بسته شوند [۲۹-۳۰]. مکانیزم‌های زیر در مورد ترمیم خودبه‌خود بتن در حالت خودترمیمی ذاتی ذکر شده است:

- الف) تشکیل کلسیم کرنات یا هیدروکسید کلسیم
- ب) بسته شدن ترک با ناخالصی موجود در آب
- ج) بسته شدن ترک با هیدراته شدن سیمان هیدراته نشده
- د) بسته شدن ترک با افزایش حجم مواد سیمانی در کنار ترک‌ها

مکانیزم‌های نام‌برده در شکل ۲ به ترتیب نشان داده شده است

سطوح ترک قرار دارند و در صورت وجود آب و رطوبت لازم رخ می‌دهند و مواد بلورین تولید می‌کنند که رشد پیوسته آن‌ها باعث کاهش طول و عمق ترک و برقراری دوباره پیوستگی بتن می‌شود.

در مقاله حاضر، سعی بر این است با مروری بر تحقیقات گذشته، شناخت واقعی‌تری از انواع روش‌های ساخت بتن خودترمیم و همچنین نحوه ترمیم آن‌ها ارائه شود. همچنین از آنجایی که قابلیت صنعتی شدن آن‌ها تاکنون کمتر مورد بحث قرار گرفته است، در این مقاله با نگاهی علمی و صنعتی، امکان صنعتی شدن روش مورد نظر بیشتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۲- بتن خودترمیم و انواع روش‌های ترمیم بتن

همانطور که در قسمت مقدمه اشاره شد ترک‌خوردگی یک مشکل بزرگ برای بسیاری از سازه‌های بتنی است که به علت استحکام کششی کم در بتن‌ها ایجاد می‌شود. در واقع تغییرات داخلی و خارجی به شکل فرآیندهایی باعث شکل‌گیری هزاران ترک ریز در نواحی داخلی بتن می‌شوند. جابجایی مواد مضر از بین فضاهای کوچک بتن باعث زوال سازه بتنی و خوردگی آرماتورها که در جریان آب و اکسیژن قرار می‌گیرند، می‌شود. دوام بتن نیز با این ترک‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد، زیرا این ترک‌ها مسیر ساده‌ای جهت انتقال مایع و گازهایی که خود شامل مواد مضر هستند، ایجاد می‌کنند [۲۷-۲۸]. از این رو نیاز به ترمیم ترک‌ها در سازه‌های بتنی امری اجتناب‌ناپذیر است و برای ترمیم ترک‌های بتن روش‌های مختلفی شامل خودترمیمی ذاتی، الیاف توخالی، میکروکپسول و نانوذرات، عناصر منبسط-شونده و افزودنی‌های معدنی نظیر سولفات آلومینیوم و باکتری‌ها نیز وجود دارد که بصورت نمادین در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه به معرفی و بررسی هر یک از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

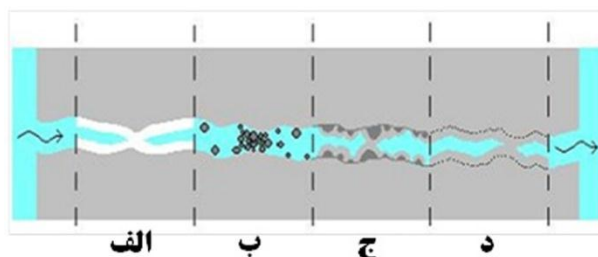
[۳۱]

را جهت استفاده در بتن ارتقاء داد. این ایده بر اساس استفاده از مواد ترمیم‌گر در مویرگ‌های که در قطعات بتنی قرار گرفته‌اند، استوار است که در اثر صدمه مویرگ‌ها پاره شده و باعث آزاد شدن مواد ترمیم‌گر می‌شوند. متیل متاکریلات (Poly (methyl methacrylate) (PMMA)) مایع در الیاف پلی‌پروپیلن لوله‌ای در بتن مورد استفاده قرار گرفته است و در اثر پاره شدن در ترک منتشر شده و موجب نفوذناپذیری بتن می‌شود [۳۵].

۲-۳- میکروکپسول و نانوذرات

رویکردهای نوین برای تولید مواد و مصالح هوشمند خودترمیم‌کننده، قراردادن کپسول‌های کوچکی در ساختار مواد (به شکل ذره، لوله و ورقه) است که به هنگام بروز ترک در ماده، بدنه سلول خراش برداشته یا گسیخته می‌شود و به این ترتیب، محتویات درون کپسول‌ها آزاد شده و سخت می‌شوند تا ترک را بسته و فرآیند خودترمیم‌کنندگی را القاء کنند یا دست کم از گسترش ترک در ساختار بتن جلوگیری کنند [۱۴، ۲۵، ۳۶]. این نگرش بر پایه روش خودترمیم مستقل (Autonomous Self Healing) شامل مواد افزودنی طراحی شده به مخلوط زمینه (matrix) سیمانی برای اهداف ترمیم و همچنین از تکنیک‌هایی خاص برای انتقال چنین مواد افزودنی می‌باشد [۳۷-۳۸]. این تحقیقات توسط درای در اوایل دهه ۱۹۹۰ گسترش یافته است [۳۵، ۳۹]. وی در روش خود، از رزین برای بستن ترک‌های ایجاد شده در درون بتن غیرمسلح بهره برد. امروزه، از این راهکار در مواد کامپوزیت دارای زمینه پلیمری استفاده می‌شود که البته بیشتر در مقیاس میکرون هستند تا نانو، اما دانشمندان در تلاش برای حرکت به سوی عوامل‌های هوشمند نانومقیاس هستند [۴۰-۴۱].

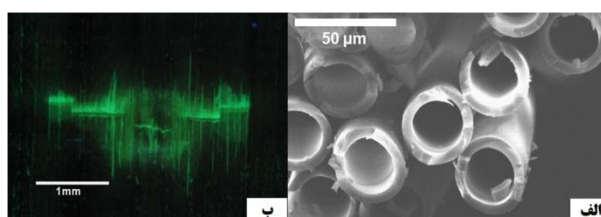
در این روش میکروکپسول غنی‌سازی می‌شود که هدف از آن، قراردادن اجزایی در حد میکرون از جنس جامد یا قطرات کوچک مایع یا گاز درون غلافی هستند که از این مواد در برابر شرایط نامناسب یا واکنش‌های نامطلوب محیط‌های خارجی محافظت و آنها را ایزوله می‌نماید [۴۲]. کاربرد استفاده از روش میکروکپسول در فرآیند خودترمیمی توسط وایت (White) و همکاران شرح داده شده است [۴۳]. در شکل ۴ چگونگی عملکرد روش میکروکپسول نشان داده شده است. ابتدا گسترش ترک در ساختار بتن صورت می‌گیرد. سپس ترک باعث تخریب



شکل ۲. مکانیزم‌های ممکن برای خودترمیمی ذاتی مواد سیمانی (الف) تشکیل کلسیم کربنات یا کلسیم هیدروکسید (ب) بسته شدن ترک با ناخالصی موجود در آب (ج) بسته شدن ترک با هیدراته شدن سیمان هیدراته نشده و (د) بسته شدن ترک با افزایش حجم مواد سیمانی در کنار ترک‌ها [۳۲].

۲-۲- الیاف توخالی

این ایده بر اساس استفاده از الیاف توخالی به منظور نگهداری بعضی از عناصر در داخل لوله‌هایی که در ساختار بتن به صورت مرکب نگهداری می‌شود، استوار است. در صورت وقوع خسارت یا ترک در هر بخش از بتن، مواد موجود در لوله‌ها که عناصر ترمیم‌گر هستند، آزاد شده و ترک را ترمیم می‌نمایند. خودترمیمی با استفاده از الیاف توخالی در سازه‌های مهندسی مانند مویرگ‌ها در بدن انسان، در شرایط و مواد متفاوت و توسط افراد مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۳۳]. به منظور مشاهده سریع و آسان صدمات داخلی در مواد کامپوزیت، یک روش ارتقاء یافته مشاهده خرابی توسط پنگو بوند (Pengo Bond) طراحی شد [۳۲، ۳۴]. در این روش، الیاف با مواد ترمیم‌کننده دارای ترکیب فلئوئورسنت ترکیب شده‌اند تا فرآیند ترمیم رصد گردد. در شکل ۳ استفاده از فلئوئورسنت و میکروالیاف نشان داده شده است [۳۲].

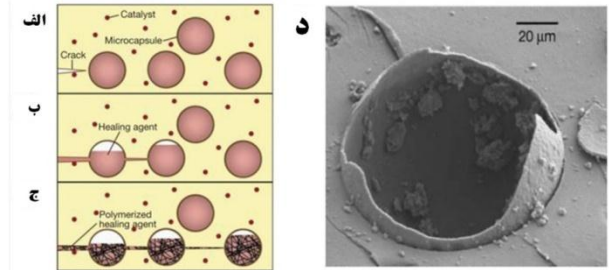


شکل ۳. (الف) الیاف توخالی و (ب) نمایش الیاف‌های مویرگی آسیب‌دیده بتن با استفاده از ویژگی فلئوئورسنت [۳۲].

درای (Dry) ایده استفاده از الگوی خودترمیمی بیولوژیک

فرم‌هایی از مواد سیمانی مانند هگزاکلسیم آلومینات تری‌سولفات هیدرات (AFt) و مونوسولفات آلومینات (AFm) و کربنات کلسیم (CaCO_3) در ترک‌ها و کریستال‌های هیدروکسید کلسیم در فضاهای خالی ناشی از حباب‌های هوا مشاهده شده است [۴۳، ۳۱، ۱۰]. فرض شد که این محصولات هیدراتاسیون، در ترک شسته شده و در مجاورت آبی که در ترک جریان یافته است تبلور مجدد یافته‌اند. این نگرش برپایه روش خودترمیم مستقل (Autonomous Self Healing) شامل مواد افزودنی طراحی شده به مخلوط زمینه سیمانی برای اهداف ترمیم و همچنین از تکنیک‌هایی خاص برای انتقال چنین مواد افزودنی می‌باشد [۳۰-۲۹]. با عنایت به گسترش فناوری خودترمیمی در بتن، کیشی (Kishi) و همکاران، تحقیقاتی را بر روی تأثیر عناصر مختلف خودترمیم بر رفتار خودترمیمی بتن انجام دادند [۴۶-۴۵]. نمونه‌هایی که مورد بررسی قرار گرفت، شامل مواد منبسط‌شونده، کانی‌ها و افزودنی‌های شیمیایی و همچنین چندین ترکیب مختلف از این مواد بوده است. در یک مقایسه تجربی که بین نمونه مرجع و نمونه‌هایی که ۱۰٪ از سیمان آن با ترکیب منبسط‌شونده مرکب از عناصر $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ و CaSO_4 و خاکستر CaO ساخته شده است، نتایج در نمونه نشان داده است که ترک با عرض ۰/۲۲ میلی‌متر بعد از یک ماه به طور کامل ترمیم شده است. در این فرآیند محصولات تبلور مجدد، در بین لایه‌های ترک مشاهده شده است. باید توجه نمود که در زمان مشابه در نمونه‌های بتنی معمولی مقدار اندکی از ترک ترمیم می‌یابد و شکاف هنوز باقی خواهد ماند. به طور کلی تبلور مجدد عناصر منبسط‌شونده در حفرات هوای جهت خودترمیمی بسیار مناسب‌تر از وضعیتی می‌باشد که در بتن‌های معمولی اتفاق می‌افتد [۴۷، ۱۰]. در شکل ۵ فرآیند خودترمیم به وسیله مواد منبسط‌شونده نشان داده شده است [۴۵].

میکروکپسول شده و مواد ترمیم‌گر به داخل ترک آزاد می‌گردد و در نهایت مواد ترمیم‌گر با کاتالیزور تماس می‌یابد، پلیمریزاسیون آغاز شده و ترک بسته می‌شود [۴۳].

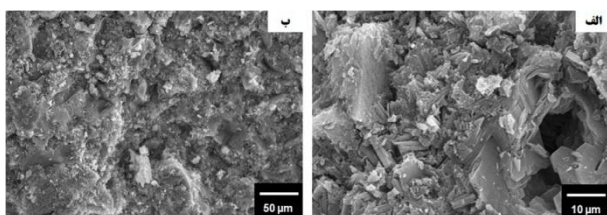


شکل ۴. اساس کاربرد روش میکروکپسول در فرآیند ترمیم بتن: (الف) گسترش ترک در ساختار بتن (ب) ترک باعث تخریب میکروکپسول شده و مواد ترمیم‌گر به داخل ترک آزاد می‌گردد (ج) مواد ترمیم‌گر با کاتالیزور تماس می‌یابد، پلیمریزاسیون آغاز شده و ترک بسته می‌شود. (د) تصویر الکترونی از یک میکروکپسول تخریب شده [۴۳].

در تحقیقی که توسط وی جی (Vijay) و همکاران انجام گرفت، نشان داده شد که روش کپسوله‌سازی نتایج بهتری نسبت به روش کاربرد مستقیم خواهد داشت و همچنین نشان می‌دهد که استفاده از باکتری می‌تواند باعث افزایش مقاومت و دوام بتن شود. اهمیت این کار استفاده از ایزوله‌های باکتری تولید آنزیم اوره‌آز (Urease) مانند باسیلوس سوبتیلیس (Bacillus subtilis) و باسیل پاستوری (Bacillus pasteurii) در ترمیم ترک‌های بتن است. در این مطالعه انواع مختلف باکتری‌هایی که می‌توانند برای بهبود ترک‌ها مورد استفاده قرار گیرند، بررسی شده‌اند. این مطالعه همچنین مشخص کرده است که باکتری‌ها تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری مکعب‌ها و بتن ملات سیمان پرتلند دارند. مزیت استفاده از باکتری‌ها، کاهش نفوذ آب و نفوذپذیری یون کلرید می‌شود. نتایج مطالعه حاضر توصیه می‌کند که استفاده از بتن باکتریائی می‌تواند یک پرکننده بتن با کیفیت بالا دارای اثربخشی بی‌نظیر و سازگار با محیط زیست باشد و در نهایت منجر به بهبود دوام مصالح ساختمانی شود [۴۴].

۲-۴- عناصر منبسط‌شونده و افزودنی‌های معدنی نظیر

سولفات آلومینیوم

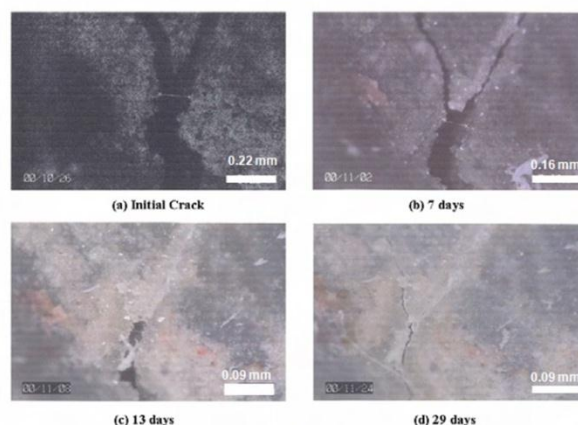


شکل ۷. تصویر SEM سیمان با ۱۰٪ سولفات آلومینیوم پس از یک روز در مقیاس (الف) ۱۰ میکرومتر و (ب) ۵۰ میکرومتر [۳۹].

این فرم‌ها در بعضی محل‌هایی تشکیل می‌شوند، که برای شروع هیدراتاسیون از آب پر شده‌اند. شکل‌گیری اترینگایت عمدتاً تابعی از غلظت هیدروکسید کلسیم است. یعنی غلظت کلسیم در مایع و pH از عوامل اصلی هستند. هنگامی که یک سولفات آلومینیوم کم به سیمان اضافه می‌شود، غلظت کلسیم در جامد و pH کمی تغییر می‌کند. در این مورد، سرعت بلورینگی اترینگایت نسبتاً کوچک است. اترینگایت عمدتاً در خوشه‌ها و اندازه‌های کوچک تشکیل می‌شوند. هنگامی که میزان سولفات آلومینیوم بالا است، کلسیم به یک غلظت کوچکی مصرف می‌شود و کاهش اندک در pH محلول رخ می‌دهد. سپس اترینگایت در اندازه بزرگ رشد می‌کند و به طور گسترده‌ای پراکنده می‌شود. در مجموع، از یک سو، اضافه کردن سولفات آلومینیوم یون کلسیم را در محلول مصرف می‌کند و از سوی دیگر یون آلومینیوم و یون سولفات را فراهم می‌کند، که اترینگایت را تشکیل دهند. این دو جنبه برای تشکیل اترینگایت مفید است. به این معنا است که افزودن سولفات آلومینیوم بر غلظت هیدراتاسیون کلسیم تأثیر می‌گذارد و پس از آن شکل‌گیری اترینگایت را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

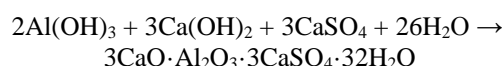
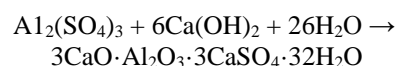
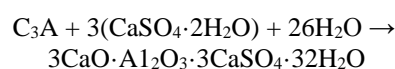
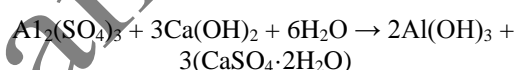
۲-۵- باکتری

خود ترمیمی با استفاده از باکتری، ترک‌ها را در سنین اولیه پوشش داده و با ساختار داخلی بتن سازگاری دارد. تاکنون در عمده تحقیقات جهت رسیدن به استحکام از مواردی نظیر خاکستر، سرباره کوره بلند، دوده سیلیس، متاکائولین (Metakaolin) و مواد مشابه به عنوان افزودنی به بتن استفاده شده است. این مواد از ویژگی‌های خوبی مانند استحکام فشاری بالا، میزان انقباض کم، زمان گیرش مناسب، مقاومت در برابر اسید، آتش و حرارت مناسب، هدایت حرارتی کم سیمان برخوردار است [۱۵، ۴۹]. در تحقیقی که اخیراً توسط شربت‌دار

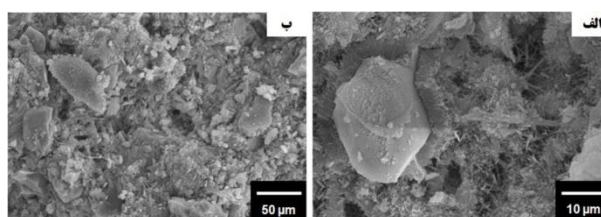


شکل ۵. فرآیند خودترمیم به وسیله مواد منبسط‌شونده [۴۸].

به طور خلاصه، بر اساس نتایج حاصل از مقالات مرجع، ساز و کار عمل سولفات آلومینیوم در سیمان در زیر آمده است [۴۸]. در خمیر سیمان، واکنش شیمیایی مربوط به تشکیل اترینگایت (Ettringite) رخ می‌دهد:



دو نوع اترینگایت وجود دارد که کاملاً از نظر مورفولوژی و موقعیت با هم متفاوت هستند. نوع اول، اترینگایت سوزنی شکل باریک هستند و به طور غیریکنواخت کنار هم در شکاف‌ها تجمع می‌کنند (شکل ۶). اما دومین نوع، سوزنی کوتاه است که به طور گسترده و یکنواخت در خمیر سیمان توزیع می‌شوند (شکل ۷).



شکل ۶. تصویر SEM سیمان بدون سولفات آلومینیوم پس از یک روز در مقیاس (الف) ۱۰ میکرومتر و (ب) ۵۰ میکرومتر [۳۹].

[۵۳-۵۴]. روش MICP روشی است که از یک شاخه بزرگتر از علم بنام بیومینرالیزیشن (Biom mineralization) یا زیست معدنی می‌آید [۵۵-۵۷].

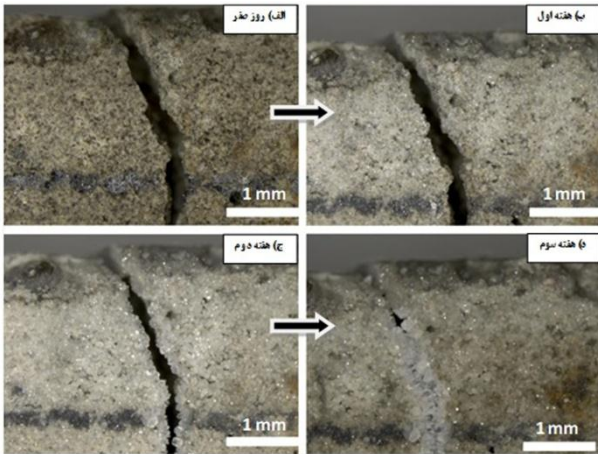
MICP شامل یک سری واکنش‌های پیچیده بیوشیمیایی بوده و کارآیی آن می‌تواند به مقدار زیادی توسط عواملی نظیر تخلخل محیط و تعداد سلول‌های موجود و حجم مواد مغذی اضافه شده تحت تأثیر قرار بگیرد. بافر فسفات یا اوره و ماده حاوی کلسیم مانند کلرید کلسیم می‌تواند به عنوان مواد مغذی خیلی خوب و مناسب استفاده شوند. باکتری در حضور این مواد مغذی رسوب کلسیت را ایجاد می‌کند. اسیدیته یا pH عامل مهمی در فعالیت یا عدم فعالیت باکتری‌ها در محیط بتن می‌باشد به عنوان مثال، مقدار بهینه pH یا اسیدیته محیط برای رشد باسیلوس پاستوری (*Bacillus pasteurii*) در حدود ۹ است که کاملاً قلیایی است. اسیدیته بالای محیط بتن با pH حدود ۲-۵ بزرگترین عامل تأخیرانداز در رشد باکتری است. اما به هر حال باکتری باسیلوس پاستوری این توانایی را دارد که یک اندوسپور (Endospore) ایجاد کند که در مقابل شرایط سخت مقاومت کند [۵۳، ۵۸-۵۹].

در پاره‌ای از تحقیقات، از باکتری‌ها به صورت افزودنی به بتن استفاده شده است. یکی از روش‌های افزایش دوام بتن و ترمیم ترک‌های موجود در آن، استفاده از روش‌های بیولوژیکی اضافه کردن باکتری به آب اختلاط بتن است. در یک تحقیق که اخیراً توسط پرستگاری و همکاران انجام گرفته است، نشان داده شد که بتن‌های حاوی باکتری، دارای pH بالا، منافذ با اندازه نسبتاً کوچک (کمتر از ۱/۱ میکرومتر) و محیطی تقریباً خشک هستند؛ بنابراین اگر محیط کشت حفاظت نشده باشد، در بلند مدت باکتری دوامی در بتن نخواهد داشت. یکی از این راه-کارهای محافظت از باکتری در بتن، ایجاد حباب‌های هوا است که برای اولین بار توسط پرستگاری و همکاران انجام گرفته است. باکتری‌ها وارد منافذ هوا می‌شوند و در آن جا به فعالیت خود ادامه می‌دهند. در این تحقیق با در نظر گرفتن درصد‌های متفاوت هوا، میزان تأثیر هوادار بودن بتن در فعالیت باکتری‌ها، مورد سنجش قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که حباب-های هوای ایجاد شده در بتن، کارآیی باکتری را بالاتر برده و با کاربرد باکتری در بتن هوادار و قرار دادن آن در کنار منبع کلسیم، عمق کربناسیون کاهش یافت [۶۰].

و همکاران انجام گرفته است، به نقش ویسکوزیته با استفاده از مواد پوزولان (pozzolan) مانند متاکائولین و بخار سیلیکا روی خاصیت اصلی بتن خودتراکم‌شونده پرداخته شده است. اثر جایگزینی همزمان متاکائولین و بخار سیلیکا به جای سیمان بر خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم‌شونده با درصد‌های وزنی مختلف در این مقاله بررسی شد. تمام مخلوط-ها از نظر استحکام فشاری، کششی و آزمون جذب آب با سیالیت مناسب، بدون داشتن علائم تفکیک یا بی‌ثباتی بررسی شد و نتایج آزمون نشان داد که مخلوط‌های بتن خودتراکم‌شونده حاوی متاکائولین و بخار سیلیکا استحکام فشاری و کششی بیشتری در مقایسه با بتن بدون پوزولان دارند [۵۰].

اخیراً فناوری جدیدی با عنوان رسوب معدنی باکتریایی ابداع شده است که این رسوب از فعالیت‌های متابولیکی میکروارگانیسم‌های خاص در بتن منشاء شده و باعث بهبود دوام و پایداری و خواص بتن در طولانی مدت می‌شود. این فرآیند می‌تواند در داخل یا خارج سلول میکروبی یا حتی با فاصله از آن در داخل زمینه بتنی اتفاق افتد. اغلب فعالیت این نوع از باکتری‌ها مبتنی بر تغییر در شیمی محلول موجود در محیط فعالیت باکتری جهت ایجاد فوق اشباع و رسوب مواد معدنی می‌باشد. استفاده از این فناوری (زیست معدنی) در بتن منجر به ایجاد پتانسیل جدیدی برای انجام ابداعات در زمینه تولید نوع جدیدی از بتن به عنوان بتن باکتریایی شده است.

بتن باکتریایی بر اساس قابلیت رسوب‌دهی کلسیت بوسيله باکتری‌ها طراحی و ساخته می‌شود. این پدیده رسوب کلسیت تحریک شده با باکتری یا به اختصار (MICP Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation) نامیده می‌شود. رسوبات کربنات کلسیم به عنوان یک درزگیر میکروبی، توانمندی بالای خود را در پر کردن ترک‌ها و شکاف‌های ریز در گرانیت‌ها، سنگ‌ها و ماسه اثبات کرده‌اند [۵۱-۵۲]. فناوری رسوب کلسیت با استفاده از باکتری یک فرآیند جذاب و ارزشمند محسوب می‌شود. عمده این جذابیت ناشی از عدم ایجاد آلودگی زیست محیطی و طبیعی بودن این فناوری می‌باشد. این فناوری می‌تواند برای بهبود استحکام فشاری و سختی نمونه‌های بتنی ترک‌دار یا سازه‌های بتنی تحت تنش ترک‌دار استفاده شود. نخستین تحقیق در زمینه تعمیر بتن با MICP به-وسیله گروه راماکریشنان (Ramakrishnan) انجام شده است



شکل ۸ افزودن باکتری به مخلوط بتن به عنوان عامل خودترمیمی ترک (اندازه ترک اولیه ۰/۰۵ الی ۱ میلی متر) قبل از ترمیم، (ب) هفته اول، (ج) هفته دوم، (د) بعد از ۲۸ روز ترمیم شده [۶۲].

متاسفانه زمانی که این باکتری‌ها مستقیم به بتن اضافه می‌شوند، عمر آنها محدود به یک یا دو ماه می‌باشد. کاهش در عمر اسپورهای باکتری‌ها از چند دهه (محیط خشک) به چند ماه (در بتن) می‌تواند ناشی از هیدراتاسیون مداوم سیمان بتن باشد که نتیجه این هیدراتاسیون تشکیل حفرات با اندازه کمتر از یک میکرومتر در زمینه بتن و کوچک‌تر از اندازه اسپور باکتری‌ها است. نکته مهم دیگر این است که افزودن مواد آغازگر زیست آلی- معدنی به بتن موجب کاهش خواص بتن نگردد. در تحقیقات گذشته مشخص شده است که این مواد نظیر عصاره مخمرها، پپتون (peptone) و استات کلسیم موجب کاهش شدید استحکام فشاری بتن می‌شوند. تنها نکته استثناء مربوط به لاکتات کلسیم است که موجب ۵۰ درصد افزایش استحکام نسبت به نمونه اولیه می‌شود [۶۶-۶۵، ۵۸].

۲-۵-۱- انواع باکتری‌های استفاده شده در بتن

تاکنون انواع باکتری‌هایی که تاکنون در زمینه کاربرد آنها در بتن باکتریایی تحقیق شده است، شامل موارد زیر می‌باشد:

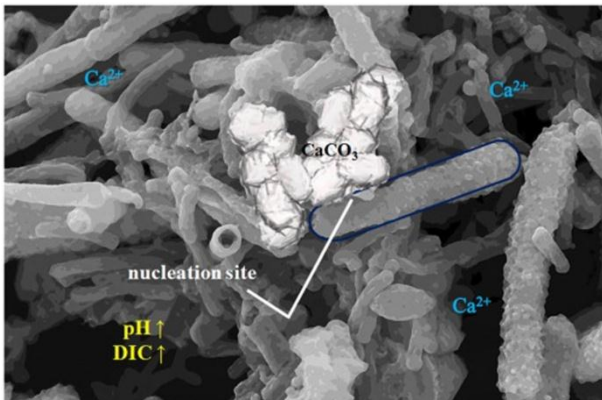
- ✓ باسیلوس پاستوری (*Bacillus pasteurii*)
- ✓ باسیلوس اسفریکوس (*Bacillus sphaericus*)
- ✓ اشریشیا کلی (*Escherichia coli*)
- ✓ باسیلوس سوبتیلیس (*Bacillus subtilis*)

از باکتری‌های قید شده در بالا در ساخت بتن باکتریایی استفاده شده است و اکثر آنها در فرآیندی که تولید رسوبات

در تحقیقی دیگر که توسط دهقانی و حمزه انجام گرفته است، خواص مکانیکی بتن خودترمیم‌شونده حاوی میکروارگانیسم را مورد ارزیابی قرار دادند. بتن حاوی میکروارگانیسم در دو غلظت مختلف باکتری باسیلوس پاستوری و ماده مغذی کلسیم لاکتات ساخته شد و با بتن حاوی میکروسیلیس، بتن حاوی لاتکس و بتن کنترل مقایسه نمودند. در هر چهار دسته از طرح مخلوط مشابه با نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ و حاوی میکروسیلیس، پلیمر لاتکس و کلسیم لاکتات که در درصدهای مختلف جایگزین سیمان شده‌اند، استفاده شده است. نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه از عمل‌آوری تحت سنجش استحکام فشاری، خمشی و کششی قرار گرفتند و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد در میان نمونه‌ها، مربوط به بتن حاوی میکروسیلیس است و عامل خودترمیمی (باکتری و ماده مغذی) موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش مقاومت‌های کششی و خمشی نسبت به نمونه کنترل شده است [۶۱].

در یک مطالعه، یک باکتری مقاوم به محیط قلیایی از گونه باسیلوس به یک مخلوط بتن به عنوان عامل خودترمیمی اضافه شده است (شکل ۸) [۶۲]. ساز و کار اساسی ترمیم ترک باکتری بر این پایه است که باکتری‌ها بعنوان یک کاتالیزور عمل می‌کنند. مواد اولیه آغازگر را به یک پرکننده مناسب تبدیل می‌کنند. مواد تولید شده جدید نظیر مواد معدنی بر پایه کربنات کلسیم که رسوب می‌کنند. باید به عنوان یک نوع سیمان زیستی عمل کرده و به طور مؤثری ترک‌های ایجاد شده را ببندند [۶۳]. بنابراین برای یک قابلیت خودترمیم‌کننده مناسب هم باکتری‌ها و هم ماده آغازگر بایستی در زمینه بتن موجود باشند. وجود این مواد اضافه شده به بتن نباید خواص مورد نظر بتن را عوض کند. باکتری‌هایی که بتوانند شرایط محیط بتن را تحمل کنند، در طبیعت موجود و مربوط به یک دسته ویژه از باکتری‌های تشکیل دهنده اسپور مقاوم به قلیا می‌باشند. مشخصه جالب این نوع باکتری‌ها، تولید سلول‌هایی با دیواره‌های ضخیم کروی مشابه بذر گیاهان است. این اسپورها به صورت سلول‌های نهفته در بتن قابلیت زیست داشته و می‌توانند تنش‌های شیمیایی و مکانیکی محیط بتن را تحمل کنند. در محیط خشک، این باکتری‌ها می‌توانند برای بیش از ۱۰ سال زنده بمانند [۶۴].

باکتری‌ها در فرآیند معدنی‌شدن کلسیم هنوز قابل بحث است [۷۴].



شکل ۹. رسوب کربنات کلسیم بر روی سطح خارجی سلول باکتری [۷۴].

کاربردهای مطرح شده رسوب کربنات کلسیم به‌وسیله باکتری شامل زمینه‌های مواد، تصفیه خاک، حذف آلودگی‌های جامد معدنی خاک و درزبندی و حذف ترک‌ها در سنگ‌ها و سایر مواد متخلخل سنگی است. تولید کربنات کلسیم معدنی به‌وسیله باکتری همچنین به عنوان یک ابزار جدید در حفاظت ستون‌های آهکی مطرح شده است [۷۶-۷۵،۵۵]. در تعدادی از تحقیقات انجام شده به منظور بررسی افزایش طول عمر باکتری در محیط بتن و تأثیر عوامل، اثر اسپور باکتری و ترکیب ماده اولیه معدنی بیواگلیک در این افزایش عمر بررسی شده است (شکل ۱۰) [۷۷].



شکل ۱۰. تصویر به‌دست آمده پس از ۶۳ روز ترمیم [۷۷].

کلسیتی می‌کند وارد شده و باعث بهبود خواص بتن شده است [۶۷،۶۲،۵۸]. هرچند در اکثر تحقیقات صورت‌گرفته روی اثر خودترمیمی از خانواده‌های باکتری باسیلوس برای تولید کلسیم کربنات استفاده شده است. این خانواده از باکتری‌ها با اوره، آمونیوم و دی‌اکسیدکربن تغذیه می‌شوند و کلسیم کربنات تولید می‌کنند [۶۸-۷۰].

۲-۵-۲- ساز و کار عمل باکتری‌ها

ظرفیت زیست‌معدنی شدن پروکاریوت‌ها (prokaryotes) و یوکاریوت‌ها (Eukaryotes) متفاوت بوده و مانند سایر فرآیندهای زیست‌معدنی شدن، زیست‌معدنی شدن کلسیم کربنات می‌تواند با دو ساز و کار متفاوت انجام پذیرد:

- ✓ معدنی‌شدن کنترل‌شده زیستی
- ✓ معدنی‌شدن الفاء‌شده زیستی

در معدنی‌شدن کنترل‌شده زیستی، موجود زنده فرآیند هسته‌ای شدن و رشد ذرات معدنی را تا مراحل آخر کنترل می‌کند.

ذرات معدنی تشکیل‌شده ترکیب و یا داخل زمینه آلی یا در مکان‌های مشخص وابسته به سلول و معمولاً درون سلولی رسوب می‌کنند [۷۱]. بر اساس تحقیقات انجام‌شده در این زمینه می‌توان گفت که این فعالیت باکتری‌ها می‌تواند تحت تأثیر پارامترهای شیمیایی- فیزیکی محیطی قرار بگیرد و نیز می‌تواند وابسته به فعالیت متابولیک و ساختار سطحی سلول باشد. فعالیت‌های متابولیک باکتری‌های هتروتروفیک (Heterotrophic bacteria) توسط بعضی از محققین به عنوان سازوکار غالب در ایجاد رسوبات کربنات کلسیم مطرح شده است [۷۲-۷۳]. سطوح باکتریایی نیز نقش مهمی را در ایجاد رسوب کلسیم بازی می‌کنند. به علت حضور چندین گروه باردار منفی در سطح باکتری، در یک محیط با pH خنثی یون‌های فلزی باردار مثبت می‌توانند به سطوح باکتری متصل شوند. این موضوع می‌تواند شرایط جوانه‌زنی ناهمگن (هتروژن) را تشدید کند (شکل ۸). عمدتاً رسوب کربنات روی سطح خارجی سلول باکتری با لایه-بندی پی در پی توسعه یافته و باکتری در نهایت در بلورهای کربنات در حال رشد گیر می‌افتد. به هر حال نقش واقعی

۳- مقایسه راهبردهای مختلف خودترمیمی

برای مقایسه، راهبردهای مختلف خودترمیمی در جدول ۱ (که پیش تر نیز بصورت نمادین در شکل ۱ نشان داده شده بود) نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود، هر یک از این روش های خودترمیمی بتن، مزایا و معایبی دارند. برای مثال روش خودترمیمی ذاتی از آنجایی که روش طبیعی است، بسیار فرآیند زمانبری است و فقط برای ترک های کوچک قابل استفاده می باشد. همچنین کنترل پارامترهای فرآیند در این پدیده دشوار می باشد. در مقابل روش الیاف توخالی، عامل ترمیم کننده در هنگام ضرورت و در مقدار متوسط آزاد می شود. همچنین اثربخشی تحت شرایط مختلف آسیب را دارد. در روش میکروکپسول و نانوذرات امکان پاسخ همزمان به بسیاری از مکان های آسیب دیده وجود دارد. در روش عناصر منبسط شونده و افزودنی های معدنی، راندمان نسبتاً مناسبی و همچنین سازگاری مناسب بین محصولات ترمیمی تولید شده با زمینه سیمانی دارد. و بالاخره یکی از روش های طبیعی ترمیم تحت عنوان ترمیم باکتریایی، مزیت طبیعی بودن و عاری از آلودگی های زیست محیطی را دارد، هرچند نیاز به تجهیزات خاص و همچنین محافظت از باکتری دارد.

جدول ۱. مقایسه بین راهبردهای مختلف خودترمیمی [۷۸،۳۱].

ردیف	راهبرد	مزایا	معایب
۱	خودترمیمی ذاتی	۱- روش طبیعی ۲- رسوب طبیعی کربنات کلسیم	۱- ترمیم زمان بر و ضعیف ۲- مناسب برای ترک های کوچک (۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر) ۳- عدم امکان کنترل فرآیند ترمیم
۲	الیاف توخالی	۱- آزاد شدن عامل ترمیم کننده در هنگام ضرورت ۲- نیاز به مقدار متوسط از ماده ترمیم کننده ۳- اثربخشی احتمالی تحت حوادث متعدد آسیب	۱- مشکل در ریخته گری و یا قالب گیری ۲- اثر منفی بر روی خواص مکانیکی زمینه سیمانی اگر تعداد زیادی از الیاف توخالی بکار گرفته شود
۳	میکروکپسول و نانوذرات	۱- آزاد شدن عامل ترمیم کننده در هنگام ضرورت	۱- مشکل بودن میکروکپسول

۲- پاسخ همزمان به بسیاری از نقاط آسیب دیده ۳- اثربخشی احتمالی تحت حوادث متعدد آسیب	۲- مقدار محدود عامل ترمیم کننده ۳- نگرانی از پیوند بین کپسول و زمینه سیمانی ۳- اثر منفی بر روی خواص مکانیکی زمینه سیمانی اگر تعداد زیادی کپسول بکار گرفته شود		
عناصر منبسط شونده و افزودنی های معدنی نظیر سولفات آلومینیوم	۱- بازدهی مناسب و خوب ترمیم ۲- سازگاری مناسب بین محصولات ترمیمی تولید شده با زمینه سیمانی	۴	
باکتری ها	۱- روش طبیعی، عاری از آلودگی و فعالیت های زیستی	۵	

۴- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، با مروری بر تحقیقات گذشته و نتایج آنها به عنوان عامل اساسی و دوام سازه، شناخت واقعی تری از بتن های خودترمیم حاصل شد. سالیان بسیاری است که در جهان هزینه بسیار زیادی جهت ترمیم سازه ها می شود که گاهی از هزینه ساخت آن سازه هم فراتر می رود. به همین خاطر برای کاهش این هزینه ها تاکنون محققان، پژوهش های بسیاری در زمینه دوام و طول عمر بتن داشته اند که بیشترین آن در زمینه خودترمیمی بوده و البته شایان ذکر است که تاکنون بیشتر این تحقیقات صرفاً جنبه مطالعاتی داشته و تست های آزمایشگاهی و بر روی خمیر سیمان صورت گرفته، در بین روش های فوق فقط روش ترمیم توسط باکتری در بتن تست شده ولی آن روش نیز به دلیل اقتصادی نبودن، صنعتی نشده است. روش عناصر منبسط شونده و افزودنی های معدنی به دلیل اقتصادی بودن، یکی از روش های صنعتی تاکنون می باشد. این ماده انقلابی بزرگ در حوزه ISSC (Intrinsic Self-Sensing Concrete)، منابع و انرژی و غیره مصالح بتن معمولی ایجاد کرده و تأثیر مفیدی بر اقتصاد، جامعه و محیط خواهد داشت.

- Concrete Types – A Review”, *Sustainable Structures and Materials*, Vol. 2, No. 1, (2019), 76-87. <https://doi.org/10.26392/SSM.2019.02.01.076>
13. Ghaleh Barkhordari, M., (Supervisor: Nouranian, H.), “Synthesis of Lightweight Composite Based on Super Sulfate and Perlite Sand Cement”, Master Thesis, Materials and Energy Research Center, (2013), Available at: <http://lib.merc.ac.ir/main>, (In Persian), SISEHT 332, 1392, 414P: (Accessed 5 May 2019)
14. Emami, S., (Supervisor: Nouranian, H.), “Development and Investigation of The Aluminate Cement and Nanostructured Phenolic Resin Composite Properties”, Master Thesis, Materials and Energy Research Center, (2007), Available at: <http://lib.merc.ac.ir/main>, (In Persian), SISEHT 117, 1386, 176P: (Accessed 07 May 2019)
15. Kamaloo, A., (Supervisor: Nouranian, H.), “Characteristics and Analysis The Specificity of Nanocomposite Based on The Geopolymeric Cement”, Master Thesis, Materials and Energy Research Center, (2007), Available at: <http://lib.merc.ac.ir/main>, (In Persian), SISEHT 125, 1386, 185P: (Accessed 27 May 2019)
16. Okamura, H., Ouchi, M., “Self-Compacting Concrete”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, (2003), Vol. 1, No. 1, 5-15. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>
17. Aydin, A. C., Nasl, V. J., Kotan, T., “The Synergic Influence of Nano-Silica and Carbon Nano Tube on Self-Compacting Concrete”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 20, (2018), 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.08.013>
18. Ouchi, M., Nakamura, S. A., Osterberg, T., Hallberg, S., Myint Lwin, M., “Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and The United States”, *Kochi University of Technology*, Kochi, Japan (2003) ISHPC.
19. Domone, P. L., “A Review of the Hardened Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 1, (2007), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.010>
20. Najim, K. B., Hall, M. R., “A Review of the Fresh/Hardened Properties and Applications for Plain- (PRC) and Self-Compacting Rubberized Concrete (SCRC)”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 11, (2010), 2043-2051. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.056>
21. Banea, M. D., da Silva, L. E., Campilho, R. D., Sato, C., “Smart Adhesive Joints: An Overview of Recent Developments”, *The Journal of Adhesion*, Vol. 90, No. 1, (2014), 16-40. <http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2013.785916>
22. Han, B., Zhang, L., Ou, J., “Self-Healing Concrete”, In *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures* (2017), 117-155, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9_7
23. Shah, K. W., Huseien, G. F., “Biomimetic Self-Healing Cementitious Construction Materials for Smart Buildings”, *Biomimetics*, Vol. 5, No. 4, (2020), 47. <https://doi.org/10.3390/biomimetics504004>
24. Aïssa, B., Therriault, D., Haddad, E., Jamroz, W., “Self-Healing Materials Systems: Overview of Major Approaches and Recent Developed Technologies”, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2012, No. 854203, (2012), Article ID 854203, 17 Pages. <https://doi.org/10.1155/2012/854203>
25. Bayat, B., (Supervisor: Nouranian, H., Keshavarzi, A.), “Investigation of Self-Healing Properties of Portland Cement Mortar Containing Aluminum Sulfate Sealed by Encapsulation”, Master Thesis, Materials and Energy Research Center, (2018), Available at: <http://lib.merc.ac.ir/main>, (In Persian), SISEHT 603, بدینوسیله از حمایت مالی پژوهشگاه مواد و انرژی در انجام این پروژه تحقیقاتی دانشجویی مصوب معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی با کد ۷۷۱۳۹۷۰۵۳ تشکر و قدردانی می‌گردد.
- مراجع**
1. Song, H. W., Saraswathy, V., “Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures-A”, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 2, No. 1, (2007), 1-28.
2. Berrocal, C. G., Fernandez, I., Rempling, R., “Crack Monitoring in Reinforced Concrete Beams By Distributed Optical Fiber Sensors”, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 17, No. 1, (2020), 1-16. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1731558>
3. Guo, Sh., Chidiac, S., “Self-Healing Concrete: A Critical Review”, In *Proceedings of the 2019 CSCE Annual Conference, Laval, QC, Canada*, (2019), 12-15.
4. da Costa, V. C., Aboelkheir, M. G., Pal K., Toledo Filho, R. D., Gomes F., “Smart Polymer Systems as Concrete Self-Healing Agents”, In *Nanofabrication for Smart Nanosensor Applications*, Elsevier, (2020), 399-413. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820702-4.00016-7>
5. Esmaily, H., Nouranian, H., “Production of Non-Autoclaved Pre-Fabricated Sponge Concrete Using Alkali-Activated Slag Cements”, *The 2nd International Conference on Seismic Resilience*, ICSR02-090, Tabriz-Iran, (1388), (11 January 2010), (In Persian), <https://civilica.com/doc/844737/>
6. Esmaily, H., Nouranian, H., “The Effect of Setting Temperature on the Properties of Slag-Activated Slag Cements”, *The 7th Iranian Ceramic Congress: ICC07*, Shiraz-Iran, (28-29 April 2009), (1388), 1-6, (In Persian). <https://civilica.com/doc/69887/>
7. Shams, A., (Supervisor: Nouranian, H., Youzbashi, A.), “The Effects of Nanoparticles on The Healing Properties of Engineered Cement Matrix Composites”, Master Thesis, Materials and Energy Research Center, (2012), Available at: <http://lib.merc.ac.ir/main>, (In Persian), SISEHT 301, 1391, 383P: (Accessed 2 May 2019)
8. Esmaily, H., Nouranian, H., “Non-autoclaved High Strength Cellular Concrete from Alkali Activated Slag”, *Construction and Building Materials*, Vol. 26, No. 1, (2012), 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.010>
9. Ahmadi, S., Nouranian, H., “Alkali Activated Slag Cement”, *Journal of Iranian Ceramic Society*, Vol. 19, No. 20, (1388), (2009), 29-60, (In Persian). magiran.com/p710669
10. Ghaleh Barkhordari, M., Nouranian, H., “Preparation of Super Sulfate Green Cement Using Iron Slag and Phosphate Residue”, *The 1st International Conference and Exhibition of Cement Industry, Energy and Environment*, CIEE01-015, Tehran-Iran, (1391), (20 January 2013), (In Persian), <https://civilica.com/doc/211434/>
11. Ghaleh Barkhordari, M., Nouranian, H., “Improving The Hardening Behavior of Super Sulfate Cement Containing Slag With Low Reactivity by Phosphate Residue”, *The 9th Iranian Ceramic Congress*, ICC09-005, Tehran-Iran, (1392), (16 September 2013), (In Persian), <https://civilica.com/doc/222089/>
12. Khattab, I. M., Shekha, H., Abdi, M. A., “Study on Self-Healing

39. Kan, C. Y., Lan, M. Z., Kong, L. M., Yang, J. B., "Effect of Aluminium Sulfate on Cement Properties", in: *Materials Science Forum, Trans Tech Publications*, Switzerland, (2013), 285–291. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.743-744.285>
40. Souradeep, G., Kua, H. W., "Encapsulation Technology and Techniques in Self-healing Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 12 (2016): 4016165. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001)
41. Huseien, G. F., Shah, K. W., Sam, A. R. M., "Sustainability of Nanomaterials Based Self-Healing Concrete: An All-Inclusive Insight", *Journal of Building Engineering*, Vol. 23, No. 1, (2019), 155-171. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2019.01.032>
42. Lucas, S. S., von Tapavicza, M., Schmidt A. M., Bertling, J., Nellesen, A., "Study of Quantification Methods In Self-Healing Ceramics, Polymers and Concrete: A Route Towards Standardization", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 27, No. 19, (2016), 2577-2598. <https://doi.org/10.1177/10453389X16641205>
43. White, S., Sottos, N., Geubelle, P., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N., Viswanathan, S., "Autonomic Healing of Polymer Composites", *Nature*, Vol. 409, (2001), 794–797. <https://doi.org/10.1038/35057232>
44. Vijay, K., Murmu, M., V. Deo, Sh., "Bacteria Based Self Healing Concrete – A Review", *Construction and Building Materials*, Vol. 152, No. 1, (2017), 1008-1014, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>
45. Ahn, T. H., Kishi, T., "Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 8, No. 2, (2010) 171–186. <https://doi.org/10.3151/JACT.8.171>
46. Wang, X., Xing, F., Zhang, M., Han, N., Qian, Z., "Experimental Study on Cementitious Composites Embedded with Organic Microcapsules", *Materials (Basel)*, Vol. 6, No. 9, (2013), 4064–4081. <https://doi.org/10.3390/ma6094064>
47. Nouranian, H., (Supervisor: Moztafzadeh, F.), "Pre-curing of Autoclaved Aerated Concrete (AAC)", Master Thesis, Materials and Energy Research Center, (1997), Available at: <http://lib.merc.ac.ir/main>, (In Persian), SISEHT 5, 1375, 8P: (Accessed 5 April 2019)
48. Kishi, T., Ahn, T. H., Hosoda, A., Suzuki, Sh., Takaoka, H., "Self-healing Behavior by Cementitious Recrystallization of Cracked Concrete Incorporating Expansive Agent", *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*, The Netherlands, 18-20 April 2007, (2007)
49. Kamaloo, A., Ganjkanlou, Y., Aboutalebi, S. H., Nouranian, H., "Modeling of Compressive Strength of Metakaolin Based Geopolymers by the Use of Artificial Neural Network", *IJE Transactions A: Basics*, Vol. 23, No. 2, (April 2010), 145-152. http://www.ije.ir/article_71847.html
50. Sharbatdar, M. K., Abbasi, M., Fakharian, P. "Improving the Properties of Self-compacted Concrete with Using Combined Silica Fume and Metakaolin", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol. 64, No. 2, (2020), 535-544. <https://doi.org/10.3311/PPci.11463>
51. De Muynck, W., De Belie, N., Verstraete, W., "Microbial Carbonate Precipitation in Construction Materials: A Review", *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, (2010) 118–136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
52. Chuo, S. C., Mohamed, S. F., Setapar, S. H. M., Ahmad, A., Jawaid, M., Wani, W. A., Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., 1397, 687P: (Accessed 21 May 2019)
26. Mehravar, S., (Supervisors: Heydari, M., Nouranian, H.), "Investigation of Self-Healing Properties by Sulfur-encapsulated Aluminum Sulfate Nanocomposite in Self-compacting Concrete", Master Thesis, Materials and Energy Research Center, (2020), Available at: <http://lib.merc.ac.ir/main>, (In Persian), SISEHT 756, 1399, 842P: (Accessed 17 May 2020)
27. Zhang, W., Zheng, Q., Ashour, A., Han, B., "Self-Healing Cement Concrete Composites for Resilient Infrastructures: A Review", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 189, No. 1, (2020), 107892-107920. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107892>
28. Seifan, M., Samani, A.K., Berenjian, A., "Bioconcrete: Next Generation of Self-Healing Concrete", *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 100, No. 6, (2016), 2591–2602. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>
29. Hearn, N., "Self-Sealing, Autogenous Healing and Continued Hydration: What is the Difference?", *Materials and Structures*, Vol. 31, No. 8, (1998), 563–567. <https://doi.org/10.1007/BF02481539>
30. Rajczakowska, M., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., Cwirzen, A., "Autogenous Self-Healing: A Better Solution for Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 31, No. 9, (2019), 03119001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002764](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002764)
31. Wu, M., Johannesson, B., Geiker, M., "A Review: Self-healing in Cementitious Materials and Engineered Cementitious Composite as a Self-healing Material", *Construction and Building Materials*, Vol. 28, No. 1, (2012), 571–583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086>
32. Pang, J. W. C., Bond, I. P., "A Hollow Fiber Reinforced Polymer Composite Encompassing Self-healing and Enhanced Damage Visibility". *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 11-12, (2005), 1791–1799. <http://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.03.0>
33. Emami, S., Nouranian, H., Kamallo, A., "Flexural Strength and Microstructure of Alkali Resistant Glass Fiber Reinforced Calcium Aluminates Phenolic Resin Composite", *Advances in Cement Research*, Vol. 23, No. 1, (2011), 11-15. <https://doi.org/10.1680/adcr.9.00002>
34. Trask, R. S., Williams, G. J., Bond, I. P., "Bioinspired Self-Healing of Advanced Composite Structures Using Hollow Glass Fibres", *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 4, No. 13, (2007), 363-371. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0194>
35. Dry, C., "Procedures developed for Self-repair of Polymer Matrix Composite Materials", *Composite Structures*, Vol. 35, No. 3, (1996), 263–269. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(96\)00033-5](https://doi.org/10.1016/0263-8223(96)00033-5)
36. Khorasani, AS, Nouranian, H., Yuzbashi, AA, Moghaddas, Sh., Raz, M., Tahriri, M., "The Effects of Nanoparticles of Silica and Alumina on Flow Ability and Compressive Strength of Cementitious Composites", In *Key Engineering Materials*, Vol. 631, pp. 119-127. Trans Tech Publications Ltd, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.631.119>
37. Guo, Sh., Chidiac, S., "Self-Healing Concrete: A Critical Review", In *Proceedings of the 2019 CSCE Annual Conference, Laval, QC, Canada*, (2019), 12-15.
38. Sidiq, A., Gravina, R., Giustozzi, F., "Is Concrete Healing Really Efficient? A Review", *Construction and Building Materials*, Vol. 205, No. 1, (2019), 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002>

66. Fahimizadeh, M., Abeyratne, A. D., Mae, L. S., R. K. Raman Singh, R. K. R., Pasbakhsh, P., "Biological Self-healing of Cement Paste and Mortar by Non-Ureolytic Bacteria Encapsulated in Alginate Hydrogel Capsules", *Materials*, Vol. 13, No. 3711, (2020), 1-28. <https://doi.org/10.3390/ma13173711>
67. Wang, J. Y., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W. H., De Belie, N., "Application of Hydrogel Encapsulated Carbonate Precipitating Bacteria for Approaching a Realistic Self-Healing in Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 68, No. 1, (2014), 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018>
68. Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., Schlangen, E., "Application of Bacteria as Self-Healing Agent for The Development of Sustainable Concrete", *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, (2010), 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>
69. Sierra-Beltran, M. G., Jonkers, H., Schlangen, E., "Characterization of Sustainable Bio-Based Mortar For Concrete Repair", *Construction and Building Materials*, Vol. 67, No. C, (2014), 344-352. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.012>
70. Xu, J., Yao, W., "Multiscale Mechanical Quantification of Self-Healing Concrete Incorporating Non-Ureolytic Bacteria-Based Healing Agent", *Cement and Concrete Research*, Vol. 64, No. 1, (2014), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.003>
71. Bleszynski, R. F., Thomas, M. D. A., "Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 7, No. 2, (1998), 66-78. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00030-8)
72. Zhu, T., Dittrich, M., "Carbonate Precipitation through Microbial Activities in Natural Environment, and Their Potential in Biotechnology: A Review", *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol. 4, No. 4, (2016), 1-21. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00004>
73. López-Moreno, A., Sepúlveda-Sánchez, J. D., Mercedes, E., Guzmán, M. A., Le Borgne, S., "Calcium Carbonate Precipitation by Heterotrophic Bacteria Isolated from Biofilms Formed on Deteriorated Ignimbrite Stones: Influence of Calcium on EPS Production and Biofilm Formation by These Isolates", *Biofouling*, Vol. 30, No. 5, (2014), 547-560. <https://doi.org/10.1080/08927014.2014.888715>
74. Lee, Y. S., Park, W., "Current Challenges and Future Directions for Bacterial Self-Healing Concrete", *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 102, No. 1, (2018), 3059-3070. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8830-y>
75. Schaub, S. A., Sorber, C. A., "Virus and Bacteria Removal from Wastewater by Rapid Infiltration Through Soil", *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 33, No. 3, (1977), 609-619. <https://doi.org/10.1128/aem.33.3.609-619>
76. Ortega-Villamagua, E., Gudiño-Gomezjurado, M., Palma-Cando, A., "Review Microbiologically Induced Carbonate Precipitation in the Restoration and Conservation of Cultural Heritage Materials", *Molecules*, Vol. 25, No. 5499, (2020), 1-23. <https://doi.org/10.3390/molecules25235499>
77. Lucas, S. S., Moxham, C., Tziviloglou, E., Jonkers, H., "Study of Self-Healing Properties in Concrete With Bacteria Encapsulated in Expanded Clay", *Science and Technology of Materials*, Vol. 30, No. 1, (2018), 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.006>
78. De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, "Insights into the Current Trends in the Utilization of Bacteria for Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation", *Materials*, Vol. 13, No. 4993, (2020), 1-28. <https://dx.doi.org/10.3390/ma13214993>
53. Bang, S. S., Galinat, J. K., Ramakrishnan, V., "Calcite Precipitation Induced by Polyurethane-Immobilized *Bacillus Pasteurii*", *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 28, No. 4-5, (2001), 404-409. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(00\)00348-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00348-3)
54. Santosh, K., Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., Bang, S. S. J. A. M. J., "Remediation of Concrete Using Microorganisms", *American Concrete Institute Journal*, Vol. 98, No. 4, (2001), 3-9. <http://dx.doi.org/10.14359/10154>
55. Chen, H. J., Peng, Ch. F., Tang, Ch. W., Chen, Y. T., "Self-Healing Concrete by Biological Substrate", *Materials* (Basel, Switzerland), Vol. 12, No. 4099, (2019), 1-16. <https://doi.org/10.3390/ma12244099>
56. Nayanthara, P. G. N., Dassanayake, A. B. N., Nakashima, K., Kawasaki, S., "Microbial Induced Carbonate Precipitation Using a Native Inland Bacterium for Beach Sand Stabilization in Nearshore Areas", *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 3201, (2019), 1-24. <https://doi.org/10.3390/app9153201>
57. Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W., "Use of Bacteria to Repair Cracks in Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 1, (2010) 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.025>
58. Stanaszek-Tomal, E., "Bacterial Concrete as a Sustainable Building Material? A Review", *Sustainability*, Vol. 12, No. 696, (2020), 1-13. <https://doi.org/10.3390/su12020696>
59. Rahman, M. M., Hora, R. N., Ahenkorah, I., Beecham S., Karim, M. R., Iqba, I., "State-of-the-Art Review of Microbial-Induced Calcite Precipitation and Its Sustainability in Engineering Applications", *Sustainability*, Vol. 12, No. 6281, (2020), 1-41. <https://doi.org/10.3390/su12156281>
60. Parastegari, N., Mostofinejad, D., "Influence of Bacteria on Performance of Air Entrained Concrete", *Amirkabir Journal Civil Engineering*, Vol. 50, No. 6, (2019), 1103-1112. <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.12371.5188>
61. Dehghani, H., Hamzeh, R., "Mechanical Properties Evaluation of Self-Healing Concrete Containing Microorganisms", *Modares Civil Engineering Journal*, Vol. 21, No. 1, (1400), (2021), 13-29. (In Persian). <https://mcej.modares.ac.ir/article-16-44218-en.html>
62. Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W., De Belie, N., "Self-Healing Concrete by Use of Microencapsulated Bacterial Spores", *Cement and Concrete Research*, Vol. 56, No. 1, (2014), 139-152. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009>
63. Dhami, N. K., Reddy, M. S., Mukherjee, A., "Improvement in Strength Properties of Ash Bricks by Bacterial Calcite", *Ecological Engineering*, Vol. 39, No. 1, (2012), 31-35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.11.011>
64. Song, X. F., Wei, J. F., He, T. S., "A Method to Repair Concrete Leakage Through Cracks by Synthesizing Super-Absorbent Resin in Situ", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, (2009), 386-391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.009>
65. Nguyen, H. T.; Ghorbel, E., Fares, H., Cousture, A. "Bacterial Self-Healing of Concrete and Durability Assessment", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 104, No. 1, (2019), 103-340. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103340>

T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J.M., Vucetic, S., Wang, J., Jonkers, H. M., "A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures", *Advanced Materials Interfaces*, Vol. 5, No. 17, (2018), 1-28. <https://doi.org/10.1002/admi.201800074>

Accepted Manuscript