

مروری بر فناوری‌های نوین در تکنولوژی بتن خودترمیم‌شونده

سید شهاب امامزاده *

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.

محمد بشیر عزیزی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران (مهندسی و مدیریت ساخت)، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

علی محمد محمدی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران (سازه)، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

امیر حسین شاه‌رخی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران (سازه)، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه باهنر، کرمان، ایران.

امیر صادقی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران (مهندسی و مدیریت ساخت)، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

چکیده

در چند دهه گذشته، ساخت ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها نیاز به دوام و عملکرد بالاتری در موادی مانند بتن داشته است. سازه بتنی دارای استحکام فشاری بالایی است و با حضور فولاد قابلیت شکل‌پذیری نیز دارد. ضعف اصلی بتن حساسیت آن به ترک‌هایی است که ناشی از تنش‌های کششی، حرارتی و محیطی ایجاد می‌شوند. اگرچه ترک‌ها در بتن ممکن است در ابتدا جزئی به نظر برسند، اما اجازه می‌دهند آب، یون‌های خورنده و سایر عوامل محیطی نفوذ کنند و در نهایت منجر به کاهش دوام شوند که هزینه‌های نگهداری سازه‌ها را افزایش می‌دهد. یک راه حل مدرن برای مقابله با این مشکل، توسعه بتن خود ترمیم‌کننده است. بتن خودترمیم‌کننده نوعی بتن هوشمند است که قادر است ترک‌ها را بدون هیچ‌گونه دخالت انسانی خودبه‌خود تعمیر کند. این بتن از رویکردهایی مانند ادغام باکتری‌ها، کپسول‌های حاوی عامل ترمیم‌کننده یا سیمان‌های ویژه برای شناسایی ترک‌های ایجاد شده و اصلاح آن‌ها استفاده می‌کند. مزایای این فناوری کمک به توسعه پایدار، دوام بیشتر و کاهش هزینه‌های نگهداری است. این فناوری منجر به افزایش پایداری محیطی می‌شود؛ زیرا کاهش نیاز به نگهداری و تعویض مصالح به کاهش مصرف مواد خام و تولید زباله‌های ساختمانی کمک می‌کند. در این تحقیق با استفاده از پایگاه داده science direct و کلیدواژه بتن خودترمیم (self – healing concrete)، ۹۳ مقاله چاپ شده در حوزه بتن خودترمیم تا سال ۲۰۲۵، استخراج و موردبررسی قرار گرفت. در بخش این تحقیق ابتدا اصول و مکانیزم‌های بتن خودترمیم‌شونده بررسی خواهد شد. سپس، مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای این فناوری موردبحث قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: بتن، بتن خودترمیم، توسعه پایدار، دوام، ترک بتن

* نویسنده مسئول: shemazadeh@khu.ac.ir

۱- مقدمه

که ترک‌ها در لوله‌ها و سازه‌های نگهدارنده آب خود به خود ترمیم شدند [۱]. تحقیقات اولیه بر روی استفاده از میکروارگانیزم‌ها و مواد شیمیایی خاص به عنوان افزودنی‌هایی برای بتن متمرکز بود. این تحقیقات نشان داد که با استفاده از این مواد، بتن می‌تواند در صورت بروز ترک‌ها و آسیب‌ها، به طور خودکار فرآیند ترمیم را آغاز کند. به عنوان مثال، در برخی از پروژه‌ها از باکتری‌های خاصی استفاده شد که در صورت تماس با آب، کربنات کلسیم تولید می‌کردند و این ماده می‌توانست ترک‌ها را پر کند [۲]. در سال‌های بعد، تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شد و محققان به توسعه انواع مختلف بتن‌های خودترمیم‌شونده پرداختند.

ترک‌ها در بتن معمولاً به اشکال مختلفی دیده می‌شوند که عبارت‌اند از ترک سطحی، در این ترک توسعه ترک کم عمق و در فاصله نزدیک به هم ولی نامنظم است. ترک پوست‌ماری، این نوع ترک را به ترک‌های ریز و سطحی می‌گویند. ترک مورب: این نوع ترک معمولاً در یک عضو خمشی ایجاد می‌شود که زاویه شکست حدود ۴۵ درجه است. ترک طرح‌دار ریز: این نوع ترک بر اثر کاهش مواد در نزدیکی سطح و با افزایش حجم مواد در زیر سطح و یا هر دو است.

در این تحقیق پس از بررسی روش‌های خودترمیمی بتن مانند استفاده از میکروکپسول یا روش‌های باکتریایی به مزایا و معایب هر روش پرداخته شده و چالش‌های موجود در این زمینه شناسایی و راهکارهای اجرایی مطرح می‌گردد.

۲- روش‌های پیشگیری خرابی بتن

پیشگیری یکی از روش‌های کاهش آسیب در زمان بهره‌برداری است. طرح اختلاط مناسب، استفاده از پوزولان‌ها و افزودنی‌های مناسب و توجه به مطالعات ریز ساختاری بتن باعث افزایش دوام، افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری بتن در دراز مدت می‌شود. در این وضعیت شاید نیاز کمتری به خودترمیمی و درمان بتن در آینده نباشد. در ادامه نمونه‌های از تلاش‌های پیشگیرانه در این زمینه ارائه می‌گردد.

مواد پوزولانی مانند دوده سیلیسی و شرایط عمل‌آوری در بهبود دوام و تراکم میکروساختاری بتن تأثیر دارند. به عنوان مثال، صامتی و همکاران [۳] نشان دادند که ترکیب عمل‌آوری حرارتی و

بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی قرن، یکی از مصالح اصلی در صنعت ساخت‌وساز به شمار می‌آید. بتن در بخش‌های مختلف اعم از ساخت‌وسازهای شهری مانند ساختمان‌های مسکونی و اداری، پیاده‌روها و کف‌پوش تا سازه‌های عظیم مانند پل‌ها، سدها و مترو استفاده می‌شود. بتن به دلیل کاربردها و خواص متعدد مانند مقاومت فشاری بالا، دوام بالا، مقرون‌به‌صرفه بودن و به علت در دسترس بودن اجزاء تشکیل‌دهنده آن و همچنین سازگاری بالا با میلگرد، شکل‌پذیری در اندازه‌ها و اشکال مختلف، یک ماده انتخابی مناسب در ساخت‌وساز است. از مهم‌ترین ضعف بتن می‌توان به ضعف آن در برابر کشش و ترک‌خوردگی اشاره کرد. امروزه یکی از دغدغه‌های اصلی هر سازه بتنی، کنترل و جلوگیری از بروز ترک است. ترک‌های کوچک در بتن موجب ایجاد خطر برای کل سازه می‌شوند. به این دلیل که نفوذ آب داخل بتن موجب تنزل خواص بتن و خوردگی فولاد می‌شود. تا کنون مطالعات زیادی در زمینه بهبود کیفیت بتن انجام شده است که اکثر آنها در زمینه تغییر در ترکیب بتن یا طرح اختلاط صورت گرفته است.

معمولاً ترک‌ها با استفاده از اپوکسی یا پخش ملات روی سطح آسیب‌دیده تعمیر می‌شوند. اگر موقعیت ترک در سازه در دسترس نباشد تعمیر آن با روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. بتن خودترمیم‌شونده یکی از فناوری‌های مهم در صنعت بتن است که به منظور افزایش دوام و کاهش هزینه‌های نگهداری سازه‌ها توسعه یافته است. این نوع بتن به گونه‌ای طراحی شده است که قادر به شناسایی و ترمیم خودکار ترک‌ها و آسیب‌های کوچک است. با استفاده از مواد افزودنی خاص، مانند میکروارگانیزم‌ها یا پلیمرها، بتن خودترمیم‌شونده می‌تواند در مواجهه با آسیب‌های ناشی از تنش‌های مکانیکی یا شرایط محیطی، واکنش نشان دهد و به بهبود عملکرد و طول عمر سازه‌ها کمک کند. این فناوری نه تنها به کاهش نیاز به تعمیرات مکرر کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به حفظ منابع طبیعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از ساخت‌وساز نیز منجر شود.

بتن خودترمیم‌شونده به عنوان یک فناوری نوین در صنعت بتن، تاریخچه‌ای نسبتاً کوتاه اما پر از پیشرفت‌های چشمگیر دارد. خودترمیمی در کامپوزیت‌های سیمانی برای اولین بار توسط آکادمی علوم فرانسه در سال ۱۸۳۶ مورد توجه قرار گرفت، زمانی

در بتن تماس پیدا می‌کند و یک واکنش شیمیایی رخ می‌دهد که محصول خودترمیمی ایجاد کرده و ترک را ترمیم می‌کند. مکانیزم‌های مختلفی برای تحریک آزادسازی عوامل ترمیمی از میکروکپسول‌ها وجود دارد. این تحریک‌ها را می‌توان به دودسته کلی تحریک فیزیکی و تحریک شیمیایی تقسیم کرد. در تحریک فیزیکی، مکانیزم‌هایی مانند تنش مکانیکی و امواج فراصوت می‌توانند باعث شکست پوسته میکروکپسول‌ها شوند. برای مثال لی و همکاران [۱۰]. میکروکپسول‌هایی با پوسته‌ای از پلی متیل متاکریلات (PMMA) ساختند که حساس به واکنش‌های یونی بود و آزادسازی عامل ترمیمی را با واکنش‌های پیچیده بین یون‌های کلر و دی‌سولفات سرب در دیواره میکروکپسول‌ها تحریک می‌کرد. در تحقیق دیگری دونگ و همکاران [۱۱] در آزمایش‌های خود مشاهده کردند که میزان آزادسازی عامل ترمیمی در محلول شبیه‌سازی‌شده بتن با کاهش pH افزایش می‌یابد. علاوه بر این، امواج فراصوت، تابش مایکروویو و میدان‌های الکترومغناطیسی به‌عنوان راه‌هایی برای تحریک سیستم‌های خودترمیمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای نمونه در تحقیقی میکروکپسول‌های پوشش داده شده با نانوذرات آهن (Fe_3O_4) و پارافین ساخته شد که می‌توانند با استفاده از القای الکترومغناطیسی شکسته شوند [۱۲].

آسیب‌های ناشی از ترک خوردگی و تخلخل در بتن را می‌توان با دو رویکرد قبل از آسیب و بعد از آسیب کنترل نمود. استفاده از مواد افزودنی مناسب و طرح اختلاط بهینه جزو روش‌های کنترل آسیب یا پیشگیری قبل از بهره‌برداری هستند در صورتی که روش‌های خود ترمیمی جزو روش‌هایی پس از آسیب و درمان هستند. در ادامه این دو روش بررسی می‌شوند.

۴-۱- مزایا و معایب فناوری میکروکپسول

میکروکپسول‌ها به دلیل ساختار هسته - پوسته‌ای خود می‌توانند عوامل ترمیمی مختلفی را در خود محصور کنند. این فناوری به دلیل قابلیت تحریک‌پذیری و نرخ‌های ترمیم بالا، گزینه‌ای امیدوارکننده برای کاربردهای مهندسی است. با این حال، برخی چالش‌هایی مانند نبود تحریک مؤثر در شرایط عملی، هزینه بالای آماده‌سازی مواد و محدودیت‌هایی در تولید صنعتی در مقیاس بزرگ در این روش وجود دارد.

جایگزینی دوده سیلیسی می‌تواند مقاومت بتن را در برابر حملات شیمیایی مانند حمله سولفاتی به طور چشمگیری افزایش دهد. این یافته‌ها حاکی از آن است که به کارگیری هم‌زمان مواد مکمل و شرایط بهینه ساخت می‌تواند بستری مناسب برای افزایش کارایی سیستم‌های خودترمیم‌کننده در بتن فراهم آورد.

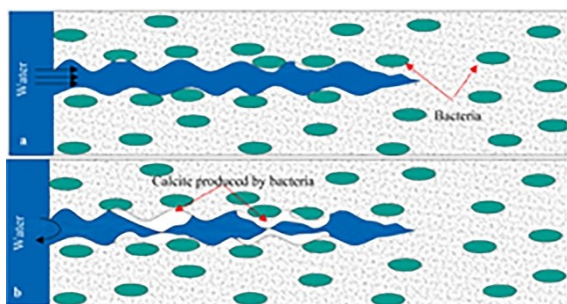
بهبود تراکم و کاهش نفوذپذیری ماتریس سیمانی، عاملی کلیدی در افزایش اثربخشی سیستم‌های خودترمیم‌کننده است. در این راستا، استفاده از نانومواد و الیاف به عنوان رویکردی مکمل مطرح می‌شود. محمدی [۴] در پژوهشی نشان داد که نانوسیلیس با پر کردن فضای بین ذرات و کاهش تخلخل، و الیاف با کنترل گسترش ترک‌های ریز، به طور هم‌زمان منجر به کاهش قابل توجه نفوذپذیری و افزایش دوام بتن می‌شوند. این استراتژی می‌تواند محیط بهینه‌تری را برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها یا عملکرد عوامل ترمیمی در بتن خودترمیم فراهم کند، چرا که نفوذ کمتر عوامل مخرب، زمان و امکان بیشتری برای فرآیند ترمیم ایجاد می‌نماید. با در تحقیق دیگری امامزاده [۵] به کاربرد مواد معدنی مانند زئولیت در دوام بتن خودتراکم پرداخت. همچنین از باکتری‌ها علی‌رغم اینکه در بتن‌های خودترمیم بکار می‌روند برای اهداف افزایش دوام در مرحله قبل از بهره‌برداری و خرابی بتن نیز استفاده شده است [۶] [۷].

۳- روش‌های درمان خرابی بتن

روش‌های درمان روش‌هایی هستند که پس از وقوع آسیب پیشنهاد می‌شوند. این روش‌ها معمولاً در زمان بهره‌برداری بتن و زمانی که تحت اثر عواملی بتن دچار آسیب می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های خود ترمیمی یکی از روش‌هایی است که توسط محققین زیادی برای درمان بتن مطرح شده [۸] و [۹]. که جزییات آن در این تحقیق بررسی می‌شود.

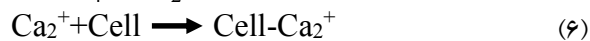
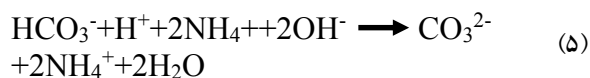
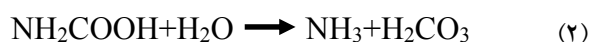
۴- خودترمیمی میکروکپسولی

این فناوری شامل کپسوله‌سازی یک عامل ترمیمی درون یک ماده پوسته‌ای و سپس مخلوط کردن این میکروکپسول‌ها در بتن است. زمانی که ترک در بتن ایجاد می‌شود، تنش در نوک ترک باعث شکستن میکروکپسول‌ها شده و عامل ترمیمی آزاد می‌شود. سپس این عامل به داخل ترک جریان یافته و با عامل پخش‌کننده موجود

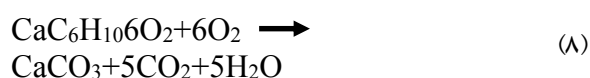


شکل ۱- فرایند ترمیم باکتریایی ترک در کامپوزیت‌های سیمانی (a) نفوذ آب به ترک‌ها و فعال‌سازی باکتری‌ها (b) تشکیل کلسیت توسط باکتری و بسته شدن ترک‌ها و محدود شدن نفوذ آب [۱۵]

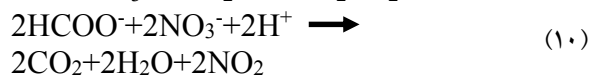
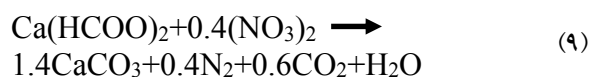
این روش به دلیل سازگاری بالای رسوبات کربنات کلسیم با ماتریس بتن، عدم تأثیر منفی بر محیط‌زیست، و امکان توزیع یکنواخت، به یکی از روش‌های متداول در فناوری بتن خودترمیم تبدیل شده است [۱۶]. واکنش شیمیایی در این روش طبق مطالعات یورولیز آنزیمی [۱۷ و ۱۸] و شکل ۲ به شرح زیر است.



تبدیل متابولیکی اسید آلی [۸ و ۱۹]:



کاهش نیتрат [۲۰ و ۲۱]:



روش‌های افزودن باکتری‌ها به بتن عبارت‌اند از:

- افزودن مستقیم: در این روش، باکتری‌ها به مخلوط بتن اضافه می‌شوند، اما متابولیسم آنها در محیط قلیایی بتن کاهش می‌یابد.
- کپسوله‌سازی: این روش شامل محصورسازی باکتری‌ها در موادی است که آنها را از محیط قلیایی محافظت می‌کند.
- تزریق یا پاشش روی سطح: این روش معمولاً برای ترمیم

۴-۲- روش‌های ساخت میکروکپسول

بیش از ۲۰۰ روش برای تولید میکروکپسول‌ها وجود دارد که اندازه، شکل، ضخامت و خواص مکانیکی پوسته کپسول را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این روش‌ها به سه دسته کلی فیزیکی، شیمیایی و ترکیبی تقسیم می‌شوند. روش‌های شیمیایی بیشتر برای میکروکپسوله کردن مواد فعال شیمیایی استفاده می‌شوند، در حالی که روش‌های فیزیکی معمولاً برای میکروکپسوله کردن مواد دارویی، غذایی و موادی که با موجودات زنده در ارتباط هستند، به کار می‌روند.

در روش‌های فیزیکی مانند خشک کردن پاششی و پلیمریزاسیون مذاب، فرایند سریع و ساده بوده ولی نرخ محصورسازی پایین بوده و مصرف انرژی بالایی دارد. در روش‌های شیمیایی مانند پلیمریزاسیون درجا و پلیمریزاسیون بین سطحی نرخ محصورسازی بالا بوده و فرایند هزینه بالایی داشته و محدودیت‌هایی مربوط به مواد استفاده‌شده دارد. در روش‌های ترکیبی فیزیکی و شیمیایی مانند ژلاسیون یونی بهره‌وری بالا بوده و تولید کپسول سریع است منتهم هزینه این روش‌ها بالا و احتمال تخلخل در محصولات زیاد است.

۵- خودترمیمی میکروبی

فناوری خودترمیمی میکروبی رویکرد نوآورانه برای ترمیم ترک‌های سطحی یا داخلی است که با استفاده از میکروارگانیسم‌ها و فرایندهای متابولیکی آنها انجام می‌شود [۱۳، ۱۴]. این فرایند شامل تولید یون‌های کربنات از طریق متابولیسم میکروارگانیسم‌ها و رسوب‌دهی این یون‌ها به شکل کریستال‌های کلسیم کربنات در حضور یون‌های کلسیم محیط است که به سه روش اصلی یورولیز آنزیمی^۱، تبدیل متابولیکی اسید آلی^۲ و کاهش نیترات صورت می‌پذیرد. مراحل فرایند مطابق شکل ۱ عبارت‌اند از:

۱. ترک خوردگی بتن
۲. فعال‌سازی باکتری‌ها در حضور رطوبت و اکسیژن
۳. تولید یون‌های کربنات توسط باکتری‌ها
۴. رسوب‌دهی کریستال‌های کربنات کلسیم (کلسیت)
۵. پرشدن ترک‌ها و ترمیم کامل

² Acidic Metabolic Conversion

¹ Enzymatic Urolisis

چندین برابر سریع‌تر و کارآمدتر از روش‌های باکتریایی است که منجر به ترمیم نقص‌های بزرگ در مقیاس زمانی چندین برابر کوتاه‌تر می‌شود. این روش قادر به خودترمیمی نمونه‌هایی با نقص‌های میلی‌متری در عرض ۲۴ ساعت است و به طور قابل توجهی سریع‌تر از تمام روش‌های فعلی است که برای بازایی مقاومت ترک‌های میکرو به حداقل ۲۸ روز نیاز دارند. این روش ارزان از نظر بیولوژیکی ایمن است، به طور فعال CO_2 را مصرف می‌کند و از استفاده از معرف‌های ناسالم جلوگیری می‌کند. این روش می‌تواند یک مکانیسم کارآمد برای تعمیر و تقویت سازه‌های بتنی موجود باشد [۲۲].

۷- خودترمیمی کریستالی

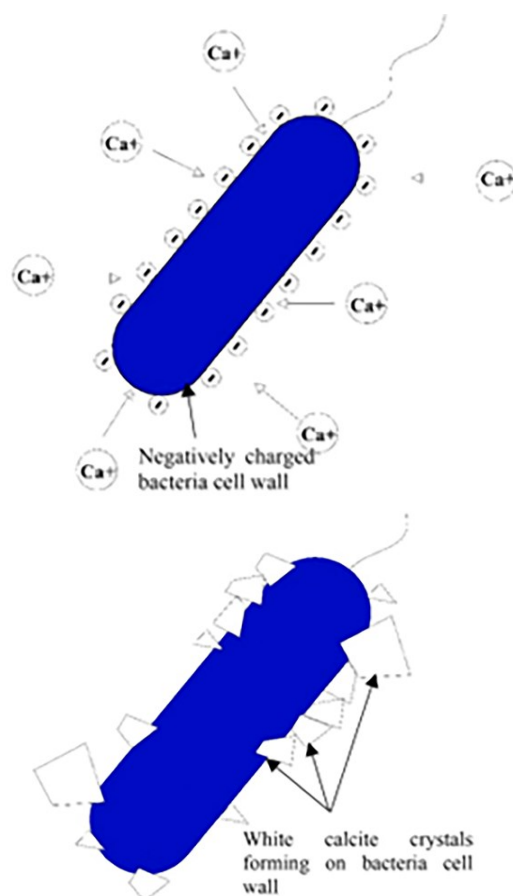
ترکیب خودترمیمی کریستالی یکی از مؤثرترین و پرکاربردترین روش‌های ترمیم خودکار بتن است که با استفاده از افزودنی‌های کریستالی (Crystalline Admixtures) یا CA انجام می‌شود [۲۳][۲۴]. این فناوری بر پایه تشکیل بلورهای نامحلول در منافذ و ترک‌های بتن عمل می‌کند و می‌تواند دوام و طول عمر سازه‌های بتنی را به طور قابل توجهی افزایش دهد [۲۵][۲۶]. مطالعات نشان داده است که مقاومت نمونه‌های حاوی افزودنی‌های کریستالی حدود ۷ تا ۱۰ درصد بیشتر از نمونه‌های معمولی است [۲۷].

مکانیسم خودترمیمی کریستالی بر اساس واکنش مواد شیمیایی فعال موجود در افزودنی‌های کریستالی با آب و محصولات هیدراتاسیون سیمان (به ویژه هیدروکسید کلسیم) استوار است [۲۸]. این واکنش‌ها منجر به تشکیل بلورهای نامحلول سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و سایر محصولات کریستالی درون منافذ و ترک‌ها می‌شود [۲۹][۳۰].

هنگامی که ترک در بتن ایجاد می‌شود، نفوذ آب به درون ترک، مواد شیمیایی فعال را تحریک کرده و فرایند کریستالزایی آغاز می‌شود [۳۱]. این بلورها به تدریج رشد کرده و ترک را پر می‌کنند و از نفوذ بیشتر عوامل مخرب جلوگیری می‌نمایند [۳۲]. مطالعات بروز نیز نشان می‌دهد که این روش به دلیل ماهیت هیدروفیلی (آب‌دوست) افزودنی‌های کریستالی، سرعت واکنش بالایی با آب داشته و می‌تواند ترک‌ها را به طور مؤثری ترمیم کند [۳۳].

افزودنی‌های کریستالی در اشکال مختلفی توسط تولیدکنندگان

ترک‌های سطحی استفاده می‌شود.



شکل ۲- تشکیل کلسیت بر روی دیواره باکتری [۱۵]: الف)

یون‌های کلسیم با بار مثبت به سمت دیواره سلولی باکتری که بار منفی دارد، حرکت می‌کنند. ب) یون‌های کلسیم با یون‌های کربنات واکنش داده و بلورهای کلسیت را بر روی دیواره سلولی باکتری تشکیل می‌دهند.

۶- خودترمیمی آنزیمی

در روش‌های آنزیمی ادعا شده است که مکانیسم خودترمیمی پیشرو مبتنی بر استفاده از باکتری‌ها و میکروب‌ها است که هستند و کاربردهای محدودی دارند و همچنین اثرات ناشناخته‌ای بر سلامتی دارند. این مطالعات با الهام از فرآیند بسیار کارآمد انتقال CO_2 در سلول‌های بیولوژیکی، روشی را برای توسعه مکانیسم خودترمیمی در یک ماتریس سیمانی با استفاده از مقادیر ناچیز آنزیم کربنیک انیدراز (CA) معرفی می‌کند. CA واکنش بین یون‌های Ca^{2+} و CO_2 اتمسفری را برای ایجاد کریستال‌های کربنات کلسیم با خواص ترمومکانیکی مشابه ماتریس سیمانی کاتالیز می‌کند. سرعت رشد کریستال با استفاده از این روش

گونگون عرضه می‌شوند که عمدتاً شامل سه دسته اصلی هستند [۳۴]:

۱. مواد پاششی یا پوششی برای سطوح
۲. افزودنی‌های داخلی برای آب‌بندی یکپارچه بتن
۳. ملات‌های ترمیمی و آب‌بندی

افزودنی‌های کریستالی معمولاً به صورت پودرهای خاکستری رنگ با دانه‌بندی بسیار ریز هستند که به عنوان جایگزین بخشی از سیمان یا به عنوان افزودنی مستقل به مخلوط بتن اضافه می‌شوند [۳۵]. درصد مصرف معمول این افزودنی‌ها بین ۱ تا ۳ درصد وزن سیمان متغیر است، اگرچه مقادیر بهینه آن به نوع افزودنی و شرایط کاربری بستگی دارد [۳۶].

کارایی خودترمیمی کریستالی تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: ترکیب مواد سیمانی، نسبت آب به سیمان و سن بتن [۳۷]. محیط ترمیم نیز نقش حیاتی دارد؛ به طوری که شرایط غوطه‌وری در آب، تماس با آب و چرخه‌های تر و خشک عملکرد بسیار بهتری نسبت به شرایط قرارگیری در معرض هوا از خود نشان می‌دهند [۳۸].

عرض و شکل ترک نیز از دیگر عوامل تعیین‌کننده هستند. مطالعات اخیر نشان داده است که افزودنی‌های کریستالی می‌توانند ترک‌هایی با عرض بیشتر (تا ۵ میلی‌متر) را نسبت به بتن معمولی ترمیم کنند [۲۶]. همچنین، وجود رطوبت کافی برای فعال‌سازی واکنش‌های شیمیایی و رشد بلورها ضروری است [۳۹].

تحقیقات اخیر نشان داده است که ترکیب افزودنی‌های کریستالی با سایر مواد می‌تواند اثر هم‌افزایی قابل توجهی در بهبود خودترمیمی داشته باشد [۴۰]. مطالعات کوئکا و همکاران [۴۲] نشان داد که استفاده هم‌زمان از افزودنی‌های کریستالی با الیاف، مواد منبسط‌شونده و پلیمرهای سوپرچسب (SAP) می‌تواند کارایی ترمیم را در چندین سیکل ترک‌خوردگی و ترمیم افزایش دهد. همچنین، ترکیب افزودنی‌های کریستالی با پوزولان‌ها مانند دوده سیلیس و خاکستر بادی، به دلیل تولید بیشتر محصولات هیدراتاسیون و افزایش چگالی ریزساختار، عملکرد ترمیمی بهتری را به همراه دارد [۴۲]. راونیتجا و همکاران [۴۳] نشان دادند که این ترکیبات می‌توانند نرخ بازیابی مقاومت را تا ۳۵ درصد افزایش دهند.

نتایج آزمایش‌های متعدد حاکی از بهبود قابل توجه خواص مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی افزودنی‌های کریستالی است

[۱۰]. مطالعه فرارا و همکاران [۴۴] نشان داد که این بتن‌ها پس از ایجاد ترک و طی دوره ترمیم، قادر به بازیابی ۶۰ تا ۹۰ درصد مقاومت اولیه خود هستند. در زمینه دوام، کاهش نفوذپذیری و مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید از مهم‌ترین دستاوردهاست. دینگ و همکاران [۴۵] با اندازه‌گیری ضریب نفوذ کلراید در بتن‌های حاوی افزودنی کریستالی، بهبود قابل توجه مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید را گزارش کردند. همچنین مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان و حملات سولفاتی در این بتن‌ها بهبود چشمگیری نشان می‌دهد [۴۶].

افزودنی‌های کریستالی به دلیل کارایی بالا و سهولت مصرف، کاربرد گسترده‌ای در پروژه‌های مختلف عمرانی یافته‌اند. از مهم‌ترین زمینه‌های کاربرد می‌توان به سازه‌های آبی مانند سدها و مخازن، تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی، سازه‌های دریایی، پارکینگ‌ها و سازه‌های در معرض مواد شیمیایی اشاره کرد [۴۷]. تحقیقات آینده در این زمینه بر توسعه افزودنی‌های کریستالی با کارایی بالاتر، کاهش هزینه‌ها، و بررسی عملکرد در شرایط محیطی مختلف متمرکز خواهد بود. همچنین، استانداردسازی روش‌های ارزیابی خودترمیمی و تعیین حداکثر عرض ترک قابل ترمیم از دیگر زمینه‌های مورد توجه محققان است [۴۸]. در پژوهش‌های داخلی، قاسم زاده موسوی نژاد در تحقیقی اثر افزودنی کریستالی را بر روی خواص خودترمیمی بتن بررسی نمود [۴۹].

۸- عوامل مؤثر بر ظرفیت خودترمیمی بتن

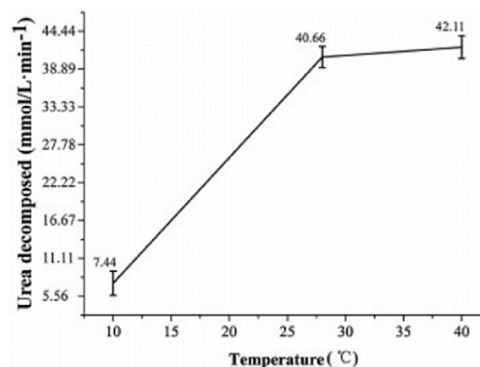
۸-۱- عوامل داخلی

ترکیب و خواص بتن، مانند نسبت آب به سیمان، نقش مهمی در تعیین ظرفیت خودترمیمی دارد. میزان و اندازه ذرات میکروکپسول‌ها و نوع میکروارگانیزم‌ها بر کارایی ترمیم اثرگذار است.

۸-۲- عوامل خارجی

شرایط محیطی: رطوبت و دما بر فرایند خودترمیم اثر مستقیم دارند. برای مثال، دماهای بالا واکنش‌های شیمیایی را تسریع می‌کند، درحالی‌که دماهای پایین فعالیت باکتری‌ها را محدود می‌کند. شرایط بارگذاری: شدت و نوع بارهای واردشده بر سازه می‌تواند بر اثربخشی ترمیم ترک‌ها تأثیرگذار باشد.

عوامل خارجی نظیر میدان مغناطیسی نیز می‌توانند بر عملکرد بتن تأثیر گذار باشند. مطالعات نشان داده‌اند که اعمال میدان مغناطیسی با شدت‌های مختلف (۵/۰ تا ۱ تسلا) به بتن حاوی میکروسیلیس، نه تنها مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد، بلکه میزان خوردگی آرماتور مدفون در بتن را تا ۱۷ درصد کاهش می‌دهد. این موضوع حاکی از آن است که به کارگیری میدان مغناطیسی می‌تواند به عنوان یک روش کمکی در کنار فناوری‌های خودترمیمی، دوام بتن را در محیط‌های خورنده بهبود بخشد [۵۰].



شکل ۳- تأثیر دما بر یورولیز آنزیمی [۲۱]

جدول ۱- مزایا و معایب روش‌های خودترمیمی بتن

روش خودترمیمی	مزایا	معایب
استفاده از باکتری	از طبیعت گرفته شده و در نتیجه آلودگی کمتری تولید می‌کند.	اقدامات حفاظتی از باکتری‌ها باید به درستی در نظر گرفته شود. پیش‌نیازهای استفاده از این روش در نظر گرفته شود. مشکلات ریخته‌گری.
کپسوله‌سازی (باکتری کپسولی)	ترشح مقدار متوسطی از عامل ترمیم‌کننده در صورت نیاز.	در آزاد کردن عامل ترمیم‌کننده ممکن است مشکلی پیش آید. عوامل مقاومت ماتریس سیمانی در حضور بیش از اندازه الیاف توخالی تأثیر می‌پذیرد. مشکلات ریخته‌گری.
فیبرهای پر شده از مواد ترمیم‌گر	ترشح عامل ترمیم‌کننده در صورت نیاز. مواد تنظیم‌کننده به مقدار زیاد قابل تنظیم.	وجود کنترل نشده لوله باعث ضعف در پارامترهای مقاومت ماتریس سیمانی می‌شود
مواد نانو	مشخصات مکانیکی مواد به خوبی بازیابی می‌شوند. دارای خاصیت ترمیم‌کنندگی فوق‌العاده. مقرون به صرفه بودن و کاهش مصرف انرژی.	الزامات ایمنی شدیداً باید در نظر گرفته شود.
مواد افزودنی	از نظر ترمیم‌کنندگی کارایی بالایی دارند. سازگاری بالا با سیمان	خاصیت انبساط و گسترش آن مطلوب نیست.

۹- روش‌های ارزیابی بتن ترمیم‌شده

کم‌خطا را در بررسی بتن‌های نوین مانند بتن خودترمیم‌شونده پررنگ می‌کند.

عوامل خارجی مانند روش‌های ارزیابی غیر مخرب نیز می‌توانند در پایش عملکرد بتن خودترمیم‌شونده مؤثر باشند. مطالعه‌ای نشان داد که ترکیب پردازش تصویر با روش‌های غیر مخرب متداول (مانند اولتراسونیک و چکش اشمیت) می‌تواند دقت تخمین مقاومت فشاری بتن را حتی در نمونه‌های مغزه‌گیری شده از سازه افزایش دهد [۵۱]. این امر اهمیت استفاده از روش‌های ارزیابی دقیق و

۱۰- نمونه‌هایی از آخرین تحقیقات انجام شده

۱۰-۱- خودترمیمی میکروبی

مطالعات زیادی بر روی استفاده از میکروب‌ها در بتن خودترمیم به‌ویژه میکروب باسیلوس^۱ انجام شده است [۵۲]، و همان‌طور که

^۱ Bacillus

پیوندی شامل پلیمرها، باکتری‌ها، و ژئوپلیمرها را از نظر عملکرد مکانیکی، دوام و تأثیرات زیست‌محیطی مقایسه کرد. ژئوپلیمرها به دلیل مقاومت بالا در برابر شرایط سخت محیطی و پتانسیل ترمیم خودکار، به عنوان گزینه‌ای پایدار معرفی شدند.

۱۱- دسته‌بندی مقالات بررسی شده بر اساس نوع مکانیزم خود ترمیمی

در این بخش، مقالات مرور شده در زمینه خودترمیم‌شونده بتنی تحت چند گروه کلی دسته‌بندی می‌شوند. این دسته‌بندی با منظور برقراری درک بهتری از راهکارهای استفاده شده در پیشینه موجود تهیه شده است.

۱۱-۱- خودترمیمی خودزا

در روش خودترمیمی خودزا^۱، ترمیم ترک‌ها به صورت طبیعی بدون افزودنی‌های خارجی می‌افتد و از ادامه هیدراسیون ذرات باقی‌مانده سیمان یا تشکیل بلورهای کربنات کلسیم تحت تأثیر آب و CO_2 ناشی می‌شود. اگرچه این روش بدون هزینه‌های اضافی و ساده است، اما ظرفیت آن در ترمیم ترک‌های عرض زیاد محدود است [۶۳-۵۹].

۱۱-۲- خودترمیمی مستقل مبتنی بر پلیمر

در این گروه از کپسول‌ها یا الیاف پلیمری حاوی مواد ترمیمی استفاده می‌گردد که با شکست فعال می‌شوند و مواد ترمیم‌کننده را آزاد می‌کنند. این سیستم در تقویت دوام و بهبود نفوذپذیری بتن بسیار مؤثر بوده، ولی عملکرد آن در چرخه‌های آسیب‌پذیر محدود است [۶۶-۶۴].

۱۱-۳- خودترمیمی مستقل مبتنی بر باکتری

این مکانیزم از باکتری‌های خاصی (معمولاً از جنس باسیلوس) برای تشکیل رسوبات کربنات کلسیم استفاده می‌کند. باکتری‌ها در حضور رطوبت فعال می‌شوند و با رسوب‌گذاری $CaCO_3$ ترک‌های موجود را به طور مؤثری پر می‌کنند. این فرایند یکی از مؤثرترین و پرکاربردترین راه‌حل‌ها در سال‌های اخیر بوده است

در این مقالات ذکر شده است این میکروارگانیزم‌ها از طریق متابولیسم خود و تولید کربنات کلسیم ($CaCO_3$) موجب پر کردن ترک‌ها و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شوند و کاهش نفوذ آب و مواد شیمیایی مضر و در نتیجه افزایش عمر بتن را به دنبال خواهد داشت.

در مطالعه‌ای بتن حاوی باکتری توانست ترک‌هایی به عرض $0/46$ میلی‌متر را ترمیم کند در حالی که نمونه‌های کنترل تنها قادر به ترمیم ترک‌های به عرض $0/18$ میلی‌متر بودند. این بهبود دو برابر شدن ظرفیت ترمیم ترک‌ها را نسبت به نمونه‌های کنترل نشان می‌دهد و به تقویت دوام و طول عمر بتن کمک می‌کند [۵۳]. علاوه بر این، یان و همکاران [۵۴] نشان دادند که بتن‌های مبتنی بر رسوب‌گذاری کربنات توسط میکروارگانیزم‌ها (MICP)، توانایی ترمیم ترک‌هایی با عرض $0/47$ میلی‌متر را دارند و خواص مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و مقاومت در برابر خوردگی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

در مطالعه‌ای توسط راجادسینگو و همکاران [۵۵]، استفاده از باکتری‌های باسیلوس جهت تولید رسوبات کربنات کلسیم بررسی شد که منجر به افزایش مقاومت فشاری تا 20% و کاهش نفوذپذیری شد. این روش نه تنها عملکرد مکانیکی را بهبود بخشید، بلکه یک راه‌حل پایدار و اقتصادی برای ترمیم ترک‌ها در شرایط مختلف محیطی فراهم آورد.

۱۰-۲- میکروکپسول‌ها و پلیمرهای ترمیم‌گر

در تحقیقی شائو و همکاران [۵۶]، به بررسی نقش میکروکپسول‌ها در بهبود خواص چندمنظوره بتن‌های سیمانی پرداخت. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این تکنولوژی منجر به عملکرد ترمیمی خودکار و بهبود دوام سازه در برابر عوامل محیطی می‌شود. در مطالعه‌ای دیگری عملکرد میکروکپسول‌ها و شبکه‌های الیافی در انتقال مواد ترمیمی بررسی شده است. در این تحقیق، پلیمرها از طریق تعامل شیمیایی با دیواره ترک‌ها، واکنش نشان داده و ترک‌ها به طور مؤثر ترمیم شدند [۵۷].

۱۰-۳- ژئوپلیمرها و سیمان‌های نوین

مطالعه‌ای مقایسه‌ای توسط نودهی و همکاران [۵۸] سه نوع ماده

^۱ Autogenous Self-Healing

[۶۷-۷۹].

۱۱-۶- خودترمیمی مبتنی بر الیاف حافظه‌دار شکل

الیاف حافظه‌دار شکل (SMA) دارای خاصیت بازگشت به حالت اولیه در دماهای خاص هستند و قابلیت بستن ترک‌ها به صورت فیزیکی را دارند. این سیستم عمدتاً در بتن‌های مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای یا شوک‌های حرارتی استفاده می‌شود. [۸۴-۸۶].

۱۱-۷- فناوری‌های هیبریدی و چندعاملی

برخی مطالعات از ترکیب دو یا چند مکانیزم برای دستیابی به عملکرد بهتر استفاده کرده‌اند؛ به عنوان مثال، ترکیب باکتری با حامل‌های پلیمری یا استفاده هم‌زمان از نانوذرات و مواد معدنی. این رویکردها نقش کلیدی در توسعه نسل بعدی بتن‌های هوشمند ایفا می‌کنند [۹۳-۸۷].

۱۱-۴- خودترمیمی مبتنی بر سیستم‌های وازکولار

سیستم‌های وازکولار^۱ شبکه‌هایی درون بتن دارند که می‌توانند در چند مرحله مواد ترمیم‌کننده را انتقال دهند. این روش به طور قابل توجهی از نظر توانایی ترمیم چندباره مؤثر است و معمولاً در پروژه‌هایی با نیاز به پایداری بلندمدت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸۰-۸۲].

۱۱-۵- خودترمیمی مبتنی بر نانو کامپوزیت‌ها

در این روش از نانوذراتی نظیر اکسید گرافن (GO) یا نانولوله‌های کربنی (CNT) استفاده می‌شود که باعث افزایش مقاومت مکانیکی، کاهش رشد ترک‌ها و در برخی موارد تحریک فرایند ترمیم می‌شوند [۸۳].



شکل ۴- الگوریتم بتن خود ترمیم

۱۲- نتیجه‌گیری

ویژگی‌های بسیار عالی این مواد است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به مقاومت بالا، شکل‌پذیری بسیار عالی بتن، مواد سازنده

استفاده از بتن‌ها در انواع پروژه‌های ساختمانی و عمرانی به دلیل

¹ Vascular Systems

- rolled compacted concrete," *Concrete Research*, 17 4 (2024): 33-44, doi: 10.22124/jcr.2025.28717.1675
- [5] S. S. Emamzadeh, "An Experimental Study on Workability and Durability Properties of Zeolite-based Self Compact Concrete," *Concrete Research*, 13 3 (2020): 77-91, doi: 10.22124/jcr.2020.14755.1401
- [6] F. Mohammadkazemi, K. Doosthoseini, E. Ganjian and M. Azin, "Effects of Bacterial Nanocellulose on Properties of Fiber-Cement Composites and Durability to Freeze-Thaw Cycling," *Concrete Research*, 7 2 (2015): 47-56,
- [7] A. Jafarniya, M. Fayyaz and M. M. Sadat Ebrahimi, "The effect of metabolic processes of *Bacillus subtilis* on mechanical properties and water absorption of concrete," *Concrete Research*, 14 3 (2021): 71-81, doi: 10.22124/jcr.2021.19288.1492
- [8] M. Sadeghpour and M. baradaran, "Effect of *Sporosarcina* bacteria and fly ash on concrete self-healing ability," *Concrete Research*, 15 3 (2022): 69-80, doi: 10.22124/jcr.2022.21953.1568
- [9] M. Nezafat Tabalvandani, M. Esfandi Sarafriz, M. Tajabadi-Ebrahimi and A. Akhavan Sepahy, "Mechanical and durability properties of self-healing concrete containing carbonate precipitation bacteria immobilized in perlite," *Concrete Research*, 15 3 (2022): 57-68, doi: 10.22124/jcr.2022.21339.1544
- [10] Li, Victor C and Herbert, Emily, Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 207-218, (2012), Japan Concrete Institute.
- [11] Dong, S., Zhang, W., Wang, X., & Han, B. (2023). New-generation pavement empowered by smart and multifunctional concretes: A review. *Construction and Building Materials*, 402, 132980. n.d.
- [12] Ren J, Li M, Cai Y, Liu J, Dong Z, Guo J, et al. Application and impact of carrier systems and immobilization methods in microbial self-healing cement-based composites: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering* 2024;98:111124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobte.2024.111124>.
- [13] Zhu H, Hu Z, He K, Yang H, Kong D, Pan R. Chloride transport and intelligent repair processes in microencapsulated self-healing concrete: A review. *Journal of Building Engineering* 2024;98:110988. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobte.2024.110988>.
- [14] Basit Ehsan Khan M, Dias-da-Costa D, Shen

بسیار ساده و قابل دسترس، مقاومت بالا در برابر افزایش دما و عمر مفید طولانی آن اشاره کرد؛ اما بتن‌ها در کنار این همه ویژگی‌های منحصر به فرد، یک عیب بزرگ هم دارند و این عیب نیاز آن‌ها به نگهداری است. استفاده از بتن خودترمیم‌شونده می‌تواند بسیاری از نگرانی‌های کارفرمایان و مهندسين اجرایی در مورد ایجاد ترک‌ها و آسیب رسیدن به سازه‌های بتنی را از بین ببرد. به علاوه حالت هوشمند این بتن‌ها خطاهای انسانی را کاهش داده و به ما اطمینان می‌دهد که همه ترک‌ها تشخیص داده شده و ترمیم می‌شوند. از طرفی در کنار خودترمیمی خواص ویژه‌ای به بتن داده می‌شود که از نظر سازه‌ای اهمیت بالایی دارد. با به کارگیری بتن خودترمیم‌شونده به جای روش‌های سنتی ترمیم بتن از هزینه‌های گزاف تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی کاسته می‌شود. همچنین با مصرف کمتر سیمان و عدم استفاده از مواد پلیمری به کاررفته در مصالح ترمیم به حفظ محیط زیست کمک شایانی خواهد شد. در مواد خودترمیم‌شونده بلافاصله پس از بروز ترک، خودترمیمی شروع می‌شود و مواد مضر به داخل بتن نفوذ پیدا نکرده و بتن آسیب نمی‌بیند؛ ولی در مورد بتن معمولی ابتدا بتن ترک می‌خورد و مواد مضر وارد بتن می‌شود و به بتن آسیب می‌رساند و باید با صرف وقت و هزینه به جست‌وجوی ترک و آسیب دیدگی پرداخت. در ضمن لازم است مصالح مناسب ترمیم بتن انتخاب شده و پس از عملیات ترمیم از قسمت ترمیم شده نگهداری شود.

۱۳- مراجع

- [1] M.D Rooij, K.V. Tittelboom, Belie N De, Schlangen E. Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials 2015.
- [2] Ahamed MK, Wang H, Hazell PJ. From biology to biomimicry: Using nature to build better structures – A review. *Constr Build Mater* 2022;320:126195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126195>.
- [3] N. Sameti, E. Ghiasvand, E. Zeighami and S. M. Mirhosseini, "Assessment the effect of curing temperature on sulfate resistance of alkali activated slag mortar containing silica fume," *Concrete Research*, 14 4 (2021): 87-99, doi: 10.22124/jcr.2021.20125.1507
- [4] Mohammadi, "The effect of nanosilica, types of fibers and other additives on the permeability of

- simulations across scales. *Chem Rev* 2023;123:10838–76.
- [24] Ravitheja A, Reddy TCS, Sashidhar C. Self-healing concrete with crystalline admixture—a review. *J Wuhan Univ Technol Sci Ed* 2019;34:1143–54.
- [25] Gojević A, Netinger Grubeša I, Marković B, Juradin S, Crnoja A. Autonomous Self-Healing Methods as a Potential Technique for the Improvement of Concrete's Durability. *Materials (Basel)* 2023;16:7391. <https://doi.org/10.3390/ma16237391>.
- [26] Nasim M, Dewangan UK, Deo S V. Autonomous healing in concrete by crystalline admixture: A review. *Mater Today Proc* 2020;32:638–44.
- [27] Ferrara L, Krelani V, Moretti F. On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing. *Smart Mater Struct* 2016;25:84002.
- [28] Roig-Flores M, Moscato S, Serna P, Ferrara L. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Constr Build Mater* 2015;86:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091>.
- [29] Sisomphon K, Copuroglu O, Koenders EAB. Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. *Constr Build Mater* 2013;42:217–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.012>.
- [30] Park B, Choi YC. Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs). *Constr Build Mater* 2018;189:1054–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.061>.
- [31] Cuenca E, Tejedor A, Ferrara L. A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. *Constr Build Mater* 2018;179:619–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.261>.
- [32] Van Tittelboom K, De Belie N. Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. *Materials (Basel)* 2013;6:2182–217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>.
- [33] Al Badi S, Itam Z, Najeeb MI, Zahari NM, Mohd Hafiez AH, Shaik Ahmad Fadzil SMM, et al. Efficiency of Self-Healing Microcapsules in Concrete Slabs Subjected to Low Velocity Impact Force. *Pertanika J Sci & Technol* 2025;33.
- [34] Ferrara L, Krelani V, Carsana M. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. *Constr Build Mater* 2014;68:535–51.
- L. Factors affecting the self-healing performance of bacteria-based cementitious composites: A review. *Constr Build Mater* 2023;384:131271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131271>.
- [15] Fahimizadeh M, Pasbakhsh P, Mae LS, Tan JBL, Raman RKS. Multifunctional, Sustainable, and Biological Non-Ureolytic Self-Healing Systems for Cement-Based Materials. *Engineering* 2022;13:217–37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.11.016>.
- [16] Ekinici E, Türkmen İ, Birhanli E. Performance of self-healing geopolymer paste produced using *Bacillus subtilis*. *Constr Build Mater* 2022;325:126837. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126837>.
- [17] Ekinici E, Türkmen İ, Birhanli E. Mechanical and durability characteristics of GGBS-based self-healing geopolymer mortar produced using by an endospore-forming bacterium. *Journal of Building Engineering* 2022;57:104944. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104944>.
- [18] Khaliq W, Ehsan MB. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Constr Build Mater* 2016;102:349–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>.
- [19] Wiktor V, Jonkers HM. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cem Concr Compos* 2011;33:763–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012>.
- [20] Erşan YÇ, Hernandez-Sanabria E, Boon N, de Belie N. Enhanced crack closure performance of microbial mortar through nitrate reduction. *Cem Concr Compos* 2016;70:159–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.001>.
- [21] Wu M, Hu X, Zhang Q, Xue D, Zhao Y. Growth environment optimization for inducing bacterial mineralization and its application in concrete healing. *Constr Build Mater* 2019;209:631–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.181>.
- [22] Jessica A. Rosewitz, Shuai Wang, Suzanne F. Scarlata, Nima Rahbar, An enzymatic self-healing cementitious material, *Applied Materials Today*, Volume 23, 2021.
- [23] Nguyen M-T, Fernandez CA, Haider MM, Chu K-H, Jian G, Nassiri S, et al. Toward self-healing concrete infrastructure: review of experiments and

properties of concrete. *Constr Build Mater* 2023;409:133932.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133932>

[46] Cappellesso V, Ferrara L, Gruyaert E, Van Tittelboom K, De Belie N. Resilient crystalline admixture in ultra-high performance self-healing concrete under cyclic freeze-thaw with de-icing salts. *Cem Concr Res* 2024;181:107524.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107524>.

[47] Souradeep G, Kua HW. Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete. *J Mater Civ Eng* 2016;28:4016165.

[48] Hearn N. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? *Mater Struct* 1998;31:563–7.
<https://doi.org/10.1007/BF02481539>.

[49] S. H. Ghasemzadeh Mosavi Nejad and M. Ramezani Khajeh Ghiyasi, "The influence of Crystalline Admixture on the Self healing Concrete," *Concrete Research*, 13 1 (2020): 39-51, doi: 10.22124/jcr.2020.12357.1338

[50] F. Javahershenas , M. M. Ranjbar , M. Sohrabi Gilani and M. Hajforoush, "Effect of different magnetic field intensities on the corrosion of steel rebar embedded in concrete incorporating silica fume, exposed to corrosive environment," *Concrete Research*, 18 2 (2025): 5-17, doi: 10.22124/jcr.2025.30949.1706

[51] 51 H. Araghi , R. Madandoust and M. Effati, "Evaluation of Concrete Compressive Strength by Integrating Non-Destructive Methods and Image Processing," *Concrete Research*, 18 2 (2025): 43-57, doi: 10.22124/jcr.2025.30497.1703

[52] Ren J, Li M, Cai Y, Liu J, Dong Z, Guo J, et al. Application and impact of carrier systems and immobilization methods in microbial self-healing cement-based composites: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering* 2024;98:111124.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111124>.

[53] Nur MMA, Dewi RN. Opportunities and challenges of microalgae in biocement production and self-repair mechanisms. *Biocatal Agric Biotechnol* 2024;56:103048.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103048>.

[54] Yan Y, Jia G, Li Z, Liu W, Zhang Y, Ma G, et al. "Smart" concrete based on microbially induced carbonate precipitation – A review. *Constr Build Mater* 2024;451:138904.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138904>.

[55] Rajadesingu S, Palani N, Mendonce KC, Vijayakumar P, Monisha P, Ayyadurai S. State-of-

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.008>.

[35] Chandra Sekhara Reddy T, Ravitheja A. Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments. *Ain Shams Eng J* 2019;10:23–32.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.01.005>.

[36] Snoeck D, De Belie N. Repeated Autogenous Healing in Strain-Hardening Cementitious Composites by Using Superabsorbent Polymers. *J Mater Civ Eng* 2016;28.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001360](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001360).

[37] De Belie N, Gruyaert E, Al-Tabbaa A, Antonaci P, Baera C, Bajare D, et al. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. *Adv Mater Interfaces* 2018;5.
<https://doi.org/10.1002/admi.201800074>.

[38] Weng T-L, Cheng A. Influence of curing environment on concrete with crystalline admixture. *Monatshefte Für Chemie - Chem Mon* 2014;145:195–200.
<https://doi.org/10.1007/s00706-013-0965-z>.

[39] Jaroenratanapirom D, Sahamitmongkol R. Self-crack closing ability of mortar with different additives. *J Met Mater Miner* 2011;21:9–17.

[40] Pazderka J, Hájková E. Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete. *Acta Polytech* 2016;56:306–11.

[41] Cuenca E, Mezzena A, Ferrara L. Synergy between crystalline admixtures and nano-constituents in enhancing autogenous healing capacity of cementitious composites under cracking and healing cycles in aggressive waters. *Constr Build Mater* 2021;266:121447.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121447>

[42] Homma D, Mihashi H, Nishiwaki T. Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites. *J Adv Concr Technol* 2009;7:217–28.

[43] Ravitheja A, Reddy TCS, Sashidhar C. Improvising the Self-Healing Capabilities of Concrete Using Different Pozzolan Materials and Crystalline Admixtures. *J Wuhan Univ Technol Sci Ed* 2022;37:429–39.
<https://doi.org/10.1007/s11595-022-2549-4>.

[44] Ferrara L, Van Mullem T, Alonso MC, Antonaci P, Borg RP, Cuenca E, et al. Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2. *Constr Build Mater* 2018;167:115–42.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.143>.

[45] Ding Y, Wu Z, Huang Q, Wang Q, Ren Q, Zhang Z, et al. Research on crystalline admixtures for low carbon buildings based on the self-healing

03633.

[64] De Grave L, Bernaerts K V, Van Vlierberghe S. Chemical functionalization strategies for poly(aspartic acid) towards crosslinking and processing capabilities. *Polymer (Guildf)* 2024;294:126723.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126723>.

[65] Ma E, Chen X, Lai J, Kong X, Guo C. Self-healing of microcapsule-based materials for highway construction: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 2023;10:368–84.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.02.003>.

[66] Wan P, Wu S, Liu Q, Zou Y, Zhao Z, Chen S. Recent advances in calcium alginate hydrogels encapsulating rejuvenator for asphalt self-healing. *Journal of Road Engineering*. 2022 Sep 1;2(3):181-220. n.d.

[67] Bagga M, Hamley-Bennett C, Alex A, Freeman BL, Justo-Reinoso I, Mihai IC, et al. Advancements in bacteria based self-healing concrete and the promise of modelling. *Constr Build Mater* 2022;358:129412.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129412>.

[68] Mohamed A, Fan M, Bertolesi E, Chen H, Fu Z, Roberts T. Microbial loading and self-healing in cementitious materials: A review of immobilisation techniques and materials. *Mater Des* 2024;245:113249.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113249>.

[69] Shilar FA, Ganachari S V, Patil VB. A comprehensive review on the strength, durability, and microstructural analysis of bacterial concrete. *Structures* 2024;68:107078.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107078>.

[70] Aytekin B, Mardani A, Yazıcı Ş. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties. *Constr Build Mater* 2023;378:131198.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131198>.

[71] Mengistu DM, Mamo AN, Gameda MT. Isolation and characterization of calcite precipitating bacteria from soda lakes that have the capability to produce biocement for self-healing concretes. *Constr Build Mater* 2023;408:133510.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133510>.

the-art review on advancements of eco-friendly bacterial-infused self-healing concrete for sustainable constructions. *Journal of Building Engineering* 2024;91:109669.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109669>.

[56] Shao L, Feng P, Liu Q, Chen C, Cai Y, Xu G. A review on performance improvement and multifunctionalization of cement composites using capsules. *Constr Build Mater* 2023;409:133977.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133977>.

[57] Tran NP, Nguyen TN, Ngo TD. The role of organic polymer modifiers in cementitious systems towards durable and resilient infrastructures: A systematic review. *Constr Build Mater* 2022;360:129562.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129562>.

[58] Nodehi M, Ozbakkaloglu T, Gholampour A. A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties. *Journal of Building Engineering* 2022;49:104038.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104038>.

[59] S. I, A. D, Pichumani M. Diverse perspectives on self healing ability of Engineered Cement Composite – All-inclusive insight. *Constr Build Mater* 2022;323:126473.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126473>.

[60] Xi B, Al-Obaidi S, Ferrara L. Effect of different environments on the self-healing performance of Ultra High-Performance Concrete – A systematic literature review. *Constr Build Mater* 2023;374:130946.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130946>.

[61] Lin X, Li W, Castel A, Kim T, Huang Y, Wang K. A comprehensive review on self-healing cementitious composites with crystalline admixtures: Design, performance and application. *Constr Build Mater* 2023;409:134108.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134108>.

[62] Zhang L, Zheng M, Zhao D, Feng Y. A review of novel self-healing concrete technologies. *Journal of Building Engineering* 2024;89:109331.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109331>.

[63] Zhang J. Recent advance of MgO expansive agent in cement and concrete. *Journal of Building Engineering* 2022;45:103633.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103633>.

- Shields Y, Van Tittelboom K, et al. Recent progress in vascularization of cementitious composites: Fundamental concepts, strategies and applications. *Constr Build Mater* 2024;449:138419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138419>.
- [81] Yesudhas Jayakumari B, Nattanmai Swaminathan E, Partheeban P. A review on characteristics studies on carbon nanotubes-based cement concrete. *Constr Build Mater* 2023;367:130344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130344>.
- [82] Nodehi M, Aguayo F, Madey N, Zhou L. A Comparative Review of Polymer, Bacterial-based, and Alkali-Activated (also Geopolymer) Binders: Production, Mechanical, Durability, and Environmental impacts (life cycle assessment (LCA)). *Constr Build Mater* 2024;422:135816. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135816>.
- [83] Anwar A, Liu X, Zhang L. Nano-cementitious composites modified with Graphene Oxide – a review. *Thin-Walled Structures* 2023;183:110326. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110326>.
- [84] Tabrizikahou A, Kuczma M, Czaderski C, Shahverdi M. From experimental testing to computational modeling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites. *Compos B Eng* 2024;281:111530. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111530>.
- [85] Wang R, Hu Z, Li Y, Wang K, Zhang H. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze–thaw environment. *Constr Build Mater* 2022;321:126371. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126371>.
- [86] Qian H, Umar M, Nasir Ayaz Khan M, Shi Y, Manan A, Raza A, et al. A state-of-the-art review on shape memory alloys (SMA) in concrete: Mechanical properties, self-healing capabilities, and hybrid composite fabrication. *Mater Today Commun* 2024;40:109738. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109738>.
- [87] Wong PY, Mal J, Sandak A, Luo L, Jian J, Pradhan N. Advances in microbial self-healing concrete: A critical review of mechanisms, developments, and future directions. *Science of The Total Environment* 2024;947:174553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174553>.
- Monisha P, Vijayakumar P, Ayyadurai S. Exploring the potential of bacterial concrete: A sustainable solution for remediation of crack and durability enhancement – A critical review. *Constr Build Mater* 2024;439:137238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137238>.
- [73] Sharma T, Banerjee A, Nanthagopalan P. Probing the Abyss: Bacteria-based self-healing in cementitious construction materials – A Review. *Constr Build Mater* 2024;455:139054. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139054>.
- [74] Osta MO, Mukhtar F. Effect of bacteria on uncracked concrete mechanical properties correlated with damage self-healing efficiency – A critical review. *Developments in the Built Environment* 2024;17:100301. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100301>.
- [75] Fronczyk J, Janek M, Szeląg M, Pyzik A, Franus W. Immobilization of (bio-)healing agents for self-healing concrete technology: Does it really ensure long-term performance? *Compos B Eng* 2023;266:110997. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110997>.
- [76] Bhutange SP, Latkar M V, Muhammad S. A review on the potential challenges in the application of biocementation in cement-based materials, possible solutions and way forward. *Mater Today Commun* 2024;38:107986. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107986>.
- [77] Tian Q, Zhou J, Hou J, Zhou Z, Liang Z, Sun M, et al. Building the future: Smart concrete as a key element in next-generation construction. *Constr Build Mater* 2024;429:136364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136364>.
- [78] Barbhuiya S, Das BB, Adak D. A comprehensive review on integrating sustainable practices and circular economy principles in concrete industry. *J Environ Manage* 2024;370:122702. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122702>.
- [79] Zhang YS, Liu Y, Sun XD, Zeng W, Xing HP, Lin JZ, et al. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in concrete crack repair: A review. *Constr Build Mater* 2024;411:134313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134313>.
- [80] Yen E, Mishra G, Iqbal MI, Namakiaraghi P,

- [88] Al-Fakih A, Mahamood MAA, Al-Osta MA, Ahmad S. Performance and efficiency of self-healing geopolymer technologies: A review. *Constr Build Mater* 2023;386:131571. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131571>.
- [89] Son Y, Yang J, Kim W, Park W. Advanced bacteria-based biomaterials for environmental applications. *Bioresour Technol* 2024;414:131646. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131646>.
- [90] Kazemi M, Wang H, Fini E. Bio-based and nature inspired solutions: A step toward carbon-neutral economy. *Journal of Road Engineering* 2022;2:221–42. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.08.001>.
- [91] Raza A, El Ouni MH, uz Zaman Khan Q, Azab M, Khan D, Elhadi KM, et al. Sustainability assessment, structural performance and challenges of self-healing bio-mineralized concrete: A systematic review for built environment applications. *Journal of Building Engineering* 2023;66:105839. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105839>.
- [92] Benjamin B, Zachariah S, Sudhakumar J, Suchithra T V. Harnessing construction biotechnology for sustainable upcycled cement composites: A meta-analytical review. *Journal of Building Engineering* 2024;86:108973. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108973>.
- [93] Zhang J, Deng J, He Y, Wu J, Simões MF, Liu B, et al. A review of biomineralization in healing concrete: Mechanism, biodiversity, and application. *Science of The Total Environment* 2024;917:170445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170445>.

An overview of new technologies in self-healing concrete technology

Seyed Shahab Emamzadeh *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Mohammad Bashir Azizi

Master of Science in Civil Engineering (Construction Engineering and Management), Faculty of Engineering and Technology, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Ali Mohammad Mohammadi

Master of Science in Civil Engineering (Structure), Faculty of Engineering and Technology, University of Birjand, Birjand, Iran.

Amir Hossein Shahrokhi

Master of Science in Civil Engineering (Structure), Faculty of Engineering and Technology, Bahonar University, Kerman, Iran.

Amir Sadeghi

Master of Science in Civil Engineering (Construction Engineering and Management), Faculty of Engineering and Technology, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Abstract

Over the past few decades, the construction of buildings and infrastructure has required higher durability and performance in materials such as concrete. Concrete structures have high compressive strength and, with the presence of steel, are also flexible. The main weakness of concrete is its susceptibility to cracks caused by tensile, thermal, and environmental stresses. Although cracks in concrete may initially appear minor, they allow water, corrosive ions, and other environmental factors to penetrate, ultimately leading to reduced durability, which increases the cost of maintaining structures. A modern solution to this problem is the development of self-healing concrete. Self-healing concrete is a type of smart concrete that is capable of repairing cracks on its own without any human intervention. This concrete uses approaches such as the incorporation of bacteria, capsules containing a healing agent, or special cements to detect and repair the cracks that have formed. The advantages of this technology are contributing to sustainable development, greater durability, and reduced maintenance costs. This technology leads to increased environmental sustainability because reducing the need for maintenance and replacement of materials helps reduce the consumption of raw materials and the production of construction waste. In this study, using the science direct database and the keyword self-healing concrete, 60 articles published in the field of self-healing concrete up to 2025 were extracted and reviewed. In this section, the principles and mechanisms of self-healing concrete will first be examined. Then, the advantages, limitations and applications of this technology will be discussed.

Keywords: Concrete, Self-Healing, Durability, Sustainable Development, Concrete Cracking.

* Corresponding Author: shemamzadeh@khu.ac.ir