مروری بر بتن خودترمیم‌شونده با استفاده از باکتری: مکانیزم‌ها، کاربردها و چالش‌ها در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته

امیر حسین محرر*، محمد جهانی، فتاح پیرویان

[۱] هیئت علمی گروه عمران، دانشگاه ملی‌مهارت تهران، تهران - مشاور واحد کامپوزیت بتن کارخانه فناوری پیش‌ساخته شیراز اسکان، شیراز

[۲] دانشجو دکترای عمران، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران - رئیس هیئت مدیره کارخانه فناوری بتن پیش‌ساخته شیراز اسکان و شرکت مهندسی‌سازان، شیراز

[۳] کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس - کارشناس تحقیق و توسعه کارخانه فناوری پیش‌ساخته شیراز اسکان، شیراز

چکیده

بتن خودترمیم‌شونده به‌عنوان یکی از نوآوری‌های مهم در صنعت ساخت‌وساز، قابلیت ترمیم ترک‌های ایجادشده را بدون نیاز به مداخله خارجی فراهم کرده و در نهایت، پایداری، افزایش عمر مفید سازه و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری را تضمین می‌کند. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از باکتری باسیلوس است که با تولید کربنات کلسیم موجب پر شدن ترک‌ها و حفرات ریز شده و در محیط‌های قلیایی، نفوذپذیری بتن را از طریق کاهش حفرات مویینه و کنترل انتقال رطوبت و سیالات خورنده به حداقل می‌رساند. این فناوری به‌ویژه در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته، که در معرض تنش‌های حمل‌ونقل، جابجایی و نصب قرار دارند، می‌تواند نقشی کلیدی ایفا کند. به‌کارگیری این نوع بتن در المان‌های پیش‌ساخته علاوه بر بهبود دوام و عملکرد مکانیکی، منجر به کاهش آسیب‌های ناشی از حمل‌ونقل، افزایش پایداری در شرایط محیطی نامساعد، و بهینه‌سازی هزینه‌های ترمیم و نگهداری می‌شود. در این مقاله مروری، ابتدا مکانیزم‌های مختلف خودترمیمی در بتن بررسی شده و سپس بر نقش باکتری باسیلوس در این فرآیند و تأثیر آن بر افزایش دوام و عملکرد سازه‌های بتنی پیش‌ساخته تأکید می‌شود. همچنین، اثر تشکیل کربنات کلسیم بر ویژگی‌های مکانیکی، دوام، و نفوذپذیری بتن مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۱. مقدمه

بتن به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین و پرکاربردترین مصالح ساختمانی در پروژه‌های عمرانی و زیرساختی، به دلیل ویژگی‌های خاص خود از جمله مقاومت فشاری بالا، توانایی تحمل بارهای سنگین، و دوام در برابر شرایط محیطی متنوع، نقش حیاتی در صنعت ساخت‌وساز ایفا می‌کند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که بتن در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته، که به دلیل تولید در شرایط کنترل‌شده کارخانه‌ای و استفاده در پروژه‌های بزرگ، نیازمند دوام بالا و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری باشند، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، این ماده ساختمانی در معرض انواع مختلفی از آسیب‌ها و ترک‌خوردگی‌ها قرار می‌گیرد که می‌تواند تأثیرات منفی بر عملکرد و طول عمر سازه‌ها بگذارد. عواملی چون بارگذاری‌های سازه‌ای، تغییرات دمایی، تغییرات رطوبت، چرخه‌های انجماد و ذوب، و نفوذ مواد شیمیایی خورنده، از مهم‌ترین عواملی هستند که می‌توانند موجب ایجاد ترک‌هایی در سطح بتن شوند. این ترک‌ها، اگر به‌موقع ترمیم نشوند، می‌توانند به کاهش قابل توجه مقاومت مکانیکی، نفوذپذیری بالاتر، و در نهایت به تخریب و آسیب‌دیدگی سازه منجر شوند[۱]. یکی از مشکلات عمده بتن در برابر تنش‌ها و بارهای خارجی، ضعف آن در کشش است که باعث تشکیل ترک‌ها و شکست‌های سطحی می‌شود. این ضعف در کشش به دلیل خواص مکانیکی بتن، که عمدتاً از جدایش دانه‌های بزرگ و ماتریس خمیر سیمانی تشکیل شده است، به وجود می‌آید. این وضعیت زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که بدانیم ترک‌ها می‌توانند مسیر ورود آب، گازها، و مواد خورنده شیمیایی را فراهم کرده و از این طریق دوام بتن را تحت تاثیر قرار دهند لذا، توجه به روش‌های نوین برای ترمیم خودکار ترک‌ها و افزایش دوام بتن، به‌ویژه در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته که در معرض آسیب‌های ناشی از حمل‌ونقل، نصب، و شرایط محیطی مختلف قرار دارند، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد[۲].

بتن خودترمیم‌شونده به‌عنوان یکی از راهکارهای نوآورانه در این زمینه، می‌تواند به‌طور مؤثر ترک‌ها و آسیب‌های سطحی و حتی عمقی بتن را بدون نیاز به مداخله دستی ترمیم کرده و موجب بهبود دوام سازه‌ها شود. این نوع بتن از روش‌های مختلفی برای ترمیم ترک‌ها استفاده می‌کند که می‌تواند شامل خودترمیمی شیمیایی، بیولوژیکی یا فیزیکی باشد که به طور خلاصه به صورت زیر معرفی شده‌اند:

روش‌های شیمیایی: این روش‌ها معمولاً بر پایه استفاده از مواد شیمیایی خاصی هستند که در صورت ایجاد ترک در بتن، وارد عمل می‌شوند و فرآیند ترمیم را آغاز می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، استفاده از ترکیبات خاصی مانند پلیمرهای حساس به رطوبت که در صورت تماس با آب در ترک‌ها، متورم شده و شکاف‌ها را می‌بندند [۵-۳].

روش‌های بیولوژیکی: در این روش‌ها از موجودات زنده مانند باکتری‌ها برای ترمیم ترک‌ها استفاده می‌شود. این باکتری‌ها، به‌ویژه باکتری‌های باسیلوس، با تولید مواد معدنی مانند کربنات کلسیم در محیط‌های قلیایی بتن، موجب پر شدن ترک‌ها و بهبود ویژگی‌های دوام بتن می‌شوند. این روش، که به آن خودترمیمی بیولوژیکی گفته می‌شود، به‌دلیل کم‌هزینه بودن و پایداری آن در طولانی‌مدت مورد توجه قرار گرفته است.

روش‌های فیزیکی: این روش‌ها شامل استفاده از مواد خاصی مانند میکروکپسول‌ها یا الیاف‌های با قابلیت ترمیم خودکار هستند. این مواد در صورت ایجاد ترک‌ها، مواد ترمیمی را آزاد کرده و ترک‌ها را پر می‌کنند.

بتن خودترمیم‌شونده با دو رویکرد اصلی، یعنی استفاده از باکتری‌ها و میکروکپسول‌ها، توسعه یافته است. در روش باکتریایی، از میکروارگانیسم‌هایی مانند Bacillus subtilis استفاده می‌شود که با تولید کربنات کلسیم، ترک‌های ریز را پر کرده و مقاومت مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشند. این باکتری‌ها در حضور رطوبت و مواد مغذی فعال می‌شوند و فرآیند ترمیم را آغاز می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از Bacillus subtilis می‌تواند مقاومت فشاری و خمشی بتن را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

در مقابل، روش میکروکپسول شامل تعبیه کپسول‌های حاوی مواد ترمیم‌کننده در ماتریس بتن است. با ایجاد ترک، این کپسول‌ها شکسته شده و مواد ترمیمی آزاد می‌شوند که با محصولات هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ترک‌ها را پر می‌کنند. این روش به‌طور مستقل از شرایط محیطی عمل می‌کند و نیازی به حضور رطوبت یا مواد مغذی ندارد. با این حال، پیچیدگی فرآیند تولید و هزینه‌های مرتبط با تهیه و توزیع یکنواخت میکروکپسول‌ها در مخلوط بتن، از چالش‌های این روش محسوب می‌شوند. انتخاب بین این دو رویکرد بستگی به عوامل متعددی مانند شرایط محیطی، هزینه‌ها و نیازهای خاص پروژه دارد. در پروژه‌هایی که رطوبت محیطی کافی و امکان تأمین مواد مغذی وجود دارد، استفاده از روش باکتریایی می‌تواند مؤثر باشد. در مقابل، در شرایطی که کنترل شرایط محیطی دشوار است، روش میکروکپسول ممکن است گزینه مناسب‌تری باشد[۴].

از آن‌جایی که بتن خودترمیم‌شونده قادر است خود را ترمیم کرده و از گسترش ترک‌ها جلوگیری کند، این فناوری نه تنها هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه به‌عنوان یک فناوری پایدار، می‌تواند به حفظ منابع طبیعی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی نیز کمک کند به علاوه، این ویژگی‌های بتن خودترمیم‌شونده، آن را به یک انتخاب مناسب برای کاربرد در مناطق با شرایط سخت و پرتنش تبدیل می‌کند، جایی که ترمیم‌های مکرر و هزینه‌بر ممکن است به هر دلیلی عملی نباشند. در این مقاله مروری، تمرکز اصلی بر بررسی مکانیزم اثر باکتری‌های باسیلوس به‌عنوان یکی از مؤثرترین و پایدارترین گزینه‌ها برای فرآیند خودترمیمی بتن خواهد بود[۴].

تاریخچه‌ی این مفهوم (بتن خودترمیم شونده) به دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی بازمی‌گردد، زمانی که ایده‌ی اولیه‌ی این فناوری از مشاهده‌ی خاصیت خودترمیمی مواد طبیعی مانند پوست و استخوان انسان الهام گرفته شد. در آن زمان، محققان به دنبال راهی بودند تا ترک‌های کوچک در بتن به صورت خودکار ترمیم شوند و عمر سازه‌ها افزایش یابد. در سال ۲۰۰۶، گروهی از محققان دانشگاه دلفت هلند به سرپرستی پروفسور هنک جونکرز، نخستین نمونه‌های موفق بتن خودترمیم‌شونده مبتنی بر باکتری را معرفی کردند. این پژوهشگران با استفاده از باکتری‌های باسیلوس و

افزودن آن‌ها به مخلوط بتن، توانستند مکانیزم خودترمیمی را در بتن ایجاد کنند. این باکتری‌ها در حضور آب و مواد مغذی مانند لاکتات کلسیم، کلسیت تولید کرده و ترک‌های ریز در بتن را پر می‌کنند.

این دستاورد علمی، راه را برای تحقیقات بیشتر در زمینه‌ی بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن هموار کرد و به توسعه‌ی فناوری‌های نوین در صنعت ساخت‌وساز منجر شد.

۱-۱. کاربردهای بتن خودترمیم‌شونده مبتنی بر باکتری باسیلوس در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته

یکی از مهم‌ترین کاربردهای بتن خودترمیم‌شونده مبتنی بر باکتری باسیلوس، افزایش دوام و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته است. سازه‌های بتنی پیش‌ساخته به دلیل تولید در شرایط کنترل‌شده و انتقال به محل نصب، در معرض ترک‌خوردگی ناشی از حمل‌ونقل، تغییرات دما، و نشست‌های اولیه قرار دارند. این ترک‌ها می‌توانند عملکرد سازه را تحت تأثیر قرار داده و هزینه‌های زیادی برای تعمیر و نگهداری ایجاد کنند. استفاده از بتن خودترمیم‌شونده در این سازه‌ها، به‌ویژه از طریق فرآیند رسوب کربنات کلسیم تولید شده توسط باکتری باسیلوس، موجب می‌شود که ترک‌های ریز در مراحل اولیه تشکیل خود ترمیم شده و از رشد آن‌ها جلوگیری شود. این ویژگی به‌ویژه برای قطعات بتنی پیش‌ساخته مورد استفاده در پل‌ها، تونل‌ها، ساختمان‌های ماژولار و پانل‌های دیواری اهمیت دارد، زیرا کاهش ترک‌خوردگی باعث افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ آب، گازهای خورنده و مواد شیمیایی مضر می‌شود. علاوه بر این، در محیط‌های دریایی که سازه‌های پیش‌ساخته در تماس مستقیم با آب شور قرار دارند، بتن خودترمیم‌شونده می‌تواند از آسیب‌های ناشی از خوردگی میلگرد و واکنش‌های سولفاتی جلوگیری کند. استفاده از این فناوری در المان‌های بتنی پیش‌ساخته مورد استفاده در ساختمان‌های بلندمرتبه و پروژه‌های زیربنایی، نظیر دال‌های بتنی و دیوارهای حائل، به کاهش نیاز به تعمیرات مکرر و افزایش طول عمر مفید این سازه‌ها کمک شایانی می‌کند[۶-۳].

شکل ۱. کارخانه فناوری بتن پیش‌ساخته شیرازاسکان

۱-۲. چالش‌های پیش‌رو بتن خودترمیم‌شونده با استفاده از باکتری باسیلوس

با وجود مزایای متعدد، کاربرد بتن خودترمیم‌شونده با باکتری باسیلوس با چالش‌هایی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، پایداری باکتری‌ها در محیط بتن است، زیرا کمبود مواد مغذی می‌تواند بر بقای آن‌ها تأثیر منفی بگذارد. برای رفع این مشکل، از حامل‌های محافظ مانند ژل میکروسیلیس، هیدروژل یا کپسوله‌سازی در نانوذرات استفاده می‌شود، اما این روش‌ها هزینه تولید را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، فرآیند ترمیم توسط باکتری‌ها وابسته به وجود رطوبت کافی در ترک‌های بتن است، که در محیط‌های خشک و سازه‌های داخلی ممکن است عملکرد بهینه‌ای نداشته باشد. از دیگر چالش‌ها، کنترل میزان تولید رسوبات کربنات کلسیم است، زیرا در برخی شرایط، رسوب بیش از حد می‌تواند باعث مسدود شدن منافذ و کاهش نفوذپذیری بتن شود که در برخی کاربردها، مانند سازه‌های زهکشی، ممکن است تأثیر منفی داشته باشد. همچنین،

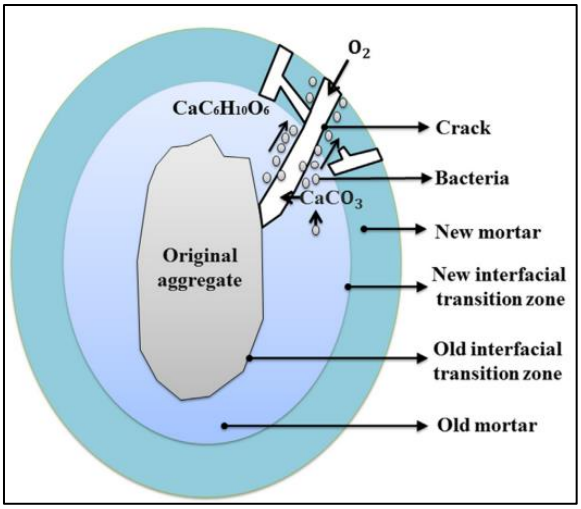
استانداردهای رایج در صنعت ساختمان هنوز به‌طور کامل با فناوری بتن خودترمیم‌شونده سازگار نشده‌اند، که باعث محدودیت در پذیرش و استفاده گسترده از این تکنولوژی در پروژه‌های عمرانی می‌شود[۷].

۱-۳. نقش باکتری باسیلوس در خودترمیمی بتن و افزایش دوام آن

اخیرا محققان و توسعه‌دهندگان حوزه بتن، جهت کنترل یا کاهش آسیب‌ها و خطرات بالقوه‌ی مذکور و هزینه‌های ترمیم و مقاوم‌سازی، بهبود پارامترهای دوام و عمر مفید سازه‌های بتنی، پژوهش‌های وسیعی را اتخاذ کرده‌اند که عمدتا از طریق روش‌های خودترمیمی هوشمند توسط عوامل ترمیم کننده، یا پوزولانهای سازگار با شرایط مورد نظر می‌باشد. روش‌های خودترمیمی بتن با وجود جذابیت‌های فنی، تاکنون به میزان کافی در صنعت ساختمان و پروژه‌های عمرانی به کار گرفته نشده است، که به دلیل کمبود اطلاعات در میان مهندسان و مجریان سازه بوده است[۷و۸]. استفاده از بتن‌های خودترمیم‌شونده از نظر فنی ممکن است از لحاظ اجرایی عملی به نظر نیاید، ولی در بلند مدت، با بهبود پارامترهای دوام و همچنین افزایش عمر مفید سازه، توجیه اقتصادی و فنی را به دنبال دارد. یکی از نقاط ضعف اصلی بتن، مقاومت پایین در برابر تنش‌های کششی و شکست است که منجر به تشکیل میکروترک‌ها می‌شود. از طرفی، ضعف بتن در برابر تنش‌های کششی به مرور زمان منجر به تشکیل ریزترک‌های طولی میگردد، این ترک‌ها در محیط‌های مرطوب باعث ورود مواد خارجی و بعضا مخرب مانند CO_2 میگردند که به کربناسیون طبیعی بتن دامن می‌زنند. به علاوه، تشخیص ترک‌های موجود در ماتریس سیمانی به دلیل اندازه آنها بسیار دشوار است که حتی ممکن است از ترک‌های ریز به ترک‌های با مقیاس میکرو تبدیل شوند؛ که ایده آل ترین ابعاد برای حرکت از بین حفرات مویرگی یون‌های رسانا درون بافت بتن می‌باشند که در نهایت باعث افت دوام بتن می‌شوند. از طرفی، روش‌های سنتی نیز مانند مقاوم‌سازی بتن، زمان‌بر و پرهزینه بوده که شناسایی وترمیم کلیه ترک‌ها با توجه به موقعیت، عمق و میزان آسیب دیدگی داخل بتن، چالش‌های فنی زیادی دارد[۹].

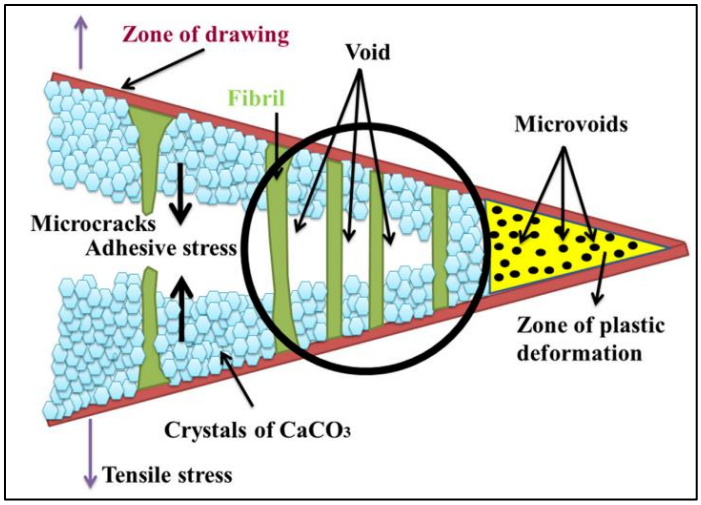
۲. مکانسیم تاثیر باکتری باسیلوس در فرآیند ترمیم بتن

بتن زیستی به عنوان یک تکنیک خودترمیم‌شونده از نوعی از باکتری‌ها بهره می‌برد که از طریق تولید رسوبات کربنات کلسیم/ کلسیت($CaCO_3$)، ترک‌های موجود در بتن را ترمیم می‌کنند. تحقیقات نشان داده‌اند که این باکتری‌ها در صورت حضور میکروترک‌های سطحی و عمقی بتن فعال شده و با جذب آب و مواد مغذی، آنهارا در راستای رشد و تکثیر خود استفاده می‌کنند. سپس، سنگ‌آهک تولید شده توسط باکتری‌ها، ترک‌های موجود را پر کرده که علاوه بر مسدود کردن راه عبور و حرکت مویرگی رطوبت و سایر سیالات، به تقویت ساختار مکانیکی بتن نیز کمک می‌کند. استفاده از باکتری‌ها در ماتریس کاپوزیت سیمانی می‌تواند از طریق رسوب باکتری‌ها در آن صورت گیرد. روش‌های مختلفی برای اعمال باکتری‌ها وجود دارد که شامل کاربرد مستقیم، بی‌حرکتی و کپسوله‌سازی می‌باشند. هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خود را دارند، اما به طور کلی، ترمیم خودکار، یک روش کارآمد است که می‌تواند میزان آسیب ترک‌های بتن را کاهش دهد و با بررسی معیارهای استحکامی، ایمنی و کیفیت لازم را برای ساختمان‌ها ارائه نماید[۱۲-۱۰].



شکل۲. تاثیر باکتری بر ترمیم ناحیه‌ی انتقال

به طور کلی تمرکز اصلی اکثر پژوهش‌ها در بحث خاصیت خودترمیم شوندگی بتن، بر روی عملکرد و توانایی عوامل ترمیم کننده بر پرکنندگی ریزترک‌ها و بهبود دوام بتن بوده است. در پژوهشی، محققان نقش افزودن این عوامل ترمیم‌کننده بر روی میزان ریکاوری خواص مکانیکی مخصوصا مقاومت فشاری و تنش کششی بتن بررسی کردند. آنها بیان کردند افزودن باکتری باسیلوس به بتن قبل از وقوع هرگونه ترک باعث افت خواص مکانیکی بتن می‌گردد. آنها همچنین نشان دادند اکثرا در موادی که ترک‌ها را پر میکنند تاثیر چشمگیری بر خواص مکانیکی بتن ندارند و پیشنهاد دادند که صرفا به منظور مسدود نمودن حفرات مویینه انتقال رطوبت و ترک‌های میکرومتری به بتن اضافه گردند[۱۳]. ترمیم شوندگی، شامل بهره‌مندی از مکانیسم‌های خودترمیم‌کننده در ماتریس سیمانی است که از طریق عوامل شیمیایی یا زیستی انجام می‌شود. به عنوان مثال، فناوری ترمیم شوندگی از متابولیسم میکروبی برای تبدیل کلسیم آلی مانند فرمات کلسیم یا لاکتات کلسیم به $CaCO_3$ یا ایجاد $MgCO_3$ از $Mg(OH)_2$ و پر کردن ترک‌ها استفاده می‌کند[۱۴]. در پژوهشی دیگر، دانشمندان بیان کردند که اثر خودترمیمی بتن از طریق روش‌های بیولوژیکی قابلیت‌های فراوانی را از خود نشان می‌دهد، با این حال، قبل از اجرای عملی آن، باید بر چندین چالش غلبه کرد: (الف) در محیط‌های بسیار قلیایی که فعالیت میکروبی محدود است، و طول عمر باکتری ها کوتاه است، که موانعی را برای دستیابی به خودترمیمی طولانی مدت ایجاد می کند. (ب): مرگ باکتری ها در بتن ممکن است باعث ایجاد حفره هایی شود که منجر به کاهش مقاومت شده و در فرآیند هیدراتاسیون سیمان اختلال ایجاد کند [۲و۱۷-۱۵].



شکل۳. مکانسیم تاثیر باکتری باسیلوس در ترمیم بتن تحت اثر تنش کششی

۳. روش‌های ارزیابی خواص و اثربخشی باکتری باسیلوس در بتن

روش‌های مختلفی برای ارزیابی خواص و حتی اثربخشی این مواد ترمیم کننده بر بتن وجود دارد. در خصوص بررسی خواص مکانیکی، می‌توان آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی، کششی، شکاف خوردگی، سرعت پالس اولتراسونیک را نام برد. آزمایش نفوذپذیری شامل تست‌های نفوذ آب، نفوذ کلرید تسریع شده، جذب آب کل، و یا نفوذ پذیری گاز می‌باشد. اما برای بررسی عمیق‌تر میزان پرکنندگی این عوامل ترمیم کننده، و دسترسی به ریزساختار فیزیکی بتن در مقیاس میکرو یا نانو، آزمایش نفوذپذیری جیوه (MIP) یک شیوه‌ی بسیار کارآمد و دقیق است که ابعاد خلل و فرج شامل؛ عمق و قطر حفرات را مشخص می‌نماید. لازم به ذکر است که این آزمایش، مکمل تست‌های التراسونیک و مقاومت الکتریکی، و حتی نفوذ یون کلرید تسریع شده نیز می‌باشد که می‌توان میزان حرکت یون‌های رسانا و رطوبت را تعیین نمود[۱۶و۱۷].

آزمایش التراسونیک به عنوان یکی از روش‌های غیر مخرب برای ارزیابی بتن‌های خودترمیم‌شونده بسیار مفید است. در این روش، امواج صوتی با فرکانس‌های بالا و مبدل‌های مختلف از طریق بتن فرستاده می‌شوند و بازتاب آنها از ترک‌ها، حفره‌ها، یا مناطق ضعیف در بتن را اندازه‌گیری می‌کند. با تحلیل الگوی بازتاب امواج و سرعت رفت و برگشت پالس‌ها، می‌توان اطلاعاتی درباره همگنی، ساختار داخلی بتن و میزان خودترمیمی آن دریافت کرد. برای بتن‌های خودترمیم‌شونده، این روش می‌تواند به عنوان یک ابزار ارزیابی تخلخل‌سنجی مورد استفاده قرار گیرد تا اثرات ترمیمی و اصلاحی در ساختار بتن، از جمله پرکردن ترک‌ها و جایگزینی مناطق ضعیف، مورد بررسی قرار گیرد. محققان نیز این موضوع را به اثبات رسانده‌اند که سیگنال فرکانس پالس‌های عبوری اولتراسونیک به تنهایی هیچ اثر مخربی روی سلولهای باکتری داخل بتن خودترمم شونده ندارد[۱۷].

برای بررسی دقیق‌تر خواص شیمیایی و ترکیبات تشکیل شده در ماتریس سیمان، به واسطه‌ی حضور عوامل ترمیم کننده یا پوزولان‌ها، از آزمایش‌های انحراف اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)؛ طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS) و عمق کربناسیون انجام می‌شوند. XRD به بررسی و شناسایی ترکیبات شیمیایی تشکیل شده ناشی از حضور عوامل ترمیم‌کننده و یا پوزولانها، فاکتورهای خارجی میپردازد. آزمایش EDX-mapping برای بررسی و تشخیص فراوانی عناصر تشکیل دهنده‌ی ترکیبات شیمیایی و نسبت آنها با یکدیگر، که بعضا در تخمین نسبتا دقیق برخی ویژگی‌های شیمیایی و مکانیکی نمونه مورد نظر مرتبط می‌باشد (مانند Ca/Si, Al/Mg). از آزمایش SEM نیز برای شکل شناسی و رویت بافت بتن در ناحیه‌ی انتقال و یا ناحیه‌ی ترمیم شده توسط عوامل ترمیم کننده، رشد کریستال‌های اترینگایت،

بلوری یا تخت بودن هیدروکسیدکلسیم، و تخلخل کلی نمونه مورد نظر استفاده می‌شود[۱۸و۱۹]. آزمایش تعیین عمق کربناسیون و قلیاییت بتن با استفاده از pH-meter صورت میگیرد. در ابتدا با اسپری محلول فنل‌فتالین و الکل ٪۱ بر روی سطح بتن نصف شده، تغییرات رنگ (بنفش - قرمز - بی رنگ) را مشاهده و سپس با pH-meter، قلیایت آن را اندازه‌گیری میکنیم، و ضمن علم به این موضوع که pH بتن معمولی در شرایط ایده آل به دلیل حضور کلسیم هیدروکسید معمولا بالای ۱۱ میباشد، مقادیر کمتر از آن را نواحی کربناته شده (شدید-خفیف) تلقی می‌کنیم[۳ و ۱۹]. به علاوه، با این آزمایش مشخص می‌شود در چه نواحی بتن، واکنش کربناسیون شدید بوده و CaCO3 بیشتری تشکیل شده، که منجر به حل شدن نمکهای فرایدل و کوزل گردیده و ظرفیت اتصال کلرید کاهش یافته است[۹]. در آزمایش XRD نیز شدت پیک کلسیت (CaCO3) مهر تاییدی بر نتایج عینی عمق کربناسیون نمونه بتنی خواهد بود. اهمیت موضوع کربناسیون در بتن‌های خودترمیم شونده، از آنجایی که رسوبات پرکننده (ترمیم کننده) ترک‌ها عمدتا بر پایه‌ی کلسیت هستند، به علت وابستگی شدید ظرفیت اتصال کلرید با کربناسیون یک ارزیابی ضروری است تا در استفاده بهینه از این تکنولوژی در سازه‌های بتن آرمه (فولادی) نهایت دقت و حساسیت به کار برده شود.

شکل۴. پر شدن ترک توسط باکتری باسیلوس

دیگر پژوهشگران در مورد افزودن باکتری‌ها به مخلوط بتن با استفاده از ژئوپلیمر تحقیق کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که با این روش عرض ترک‌ها با ابعاد ۳ ±۸۹ میکرومتر به طور کامل مهر و موم می‌شود و باکتری‌ها به کامپوزیت‌های سیمانی آسیب قابل توجهی وارد نمی‌کنند. وجود منافذ بزرگی که در ژئوپلیمر متصل به یکدیگر هستند، دلیل علمی اصلی قابلیت ترمیم است و فضای لازم برای توسعه و فعال‌سازی مجدد باکتری‌ها در کامپوزیت‌های سیمانی را فراهم می‌کند[۲۰]. با این حال، در تحقیق دیگری نشان داده شد نمونه‌هایی که به طور مستقیم با باکتری‌ها ترکیب شده‌اند، هیچ عملکردی در ترمیم ترک بتن ارائه نمی‌دهند[۲۰].

باکتری باسیلوس می‌تواند مقاومت فشاری بتن را بهبود بخشد که نانو ذرات اکسید آهن به عنوان موثرترین عامل بی‌حرکتی برای حفظ باکتری‌ها تا پس از تولید ترک‌ها، و به دنبال آن، ماسه سیلیسی و ذرات سنگ آهک در نظر گرفته می‌شوند[۱۹]. در مطالعه‌ای از باکتری باسیلوس استفاده شد و باکتری‌های موجود در پودر سنگ آهک را قبل از مخلوط کردن با سایر اجزا بتن، تثبیت کردند و نشان دادند که مقاومت فشاری در سن ۱۴ روز ٪۵/۷۵ بهبود یافته است. در نهایت، به این نتیجه رسیدند که پودر سنگ آهک می‌تواند به عنوان یک ماده محافظ برای باسیلوس در نظر گرفته شود که ماندگاری طولانی مدت باکتری‌ها را در یک محیط قلیایی تضمین کند[۳].

در تحقیقی دیگر، محققان به این نتیجه رسیدند که مواد سیمانی با قلیاییت کم، ساخته شده توسط سیمان سولفوآلومینات کلسیم با دود سیلیس ۲۰ درصد می‌توانند به عنوان یک عامل محافظ برای باکتری‌های مبتنی بر اورئولیز مورد استفاده قرار گیرند که مقاومت فشاری به مقدار ٪۵۰ و نفوذناپذیری تحت فشار آب را به مقدار چشمگیری در مقایسه با ملات ساده افزایش داده است[۲۲].

پژوهشگران در یک مطالعه، هزینه استفاده از باکتری در بتن را نسبت به بتن معمولی مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که قیمت بتن حاوی باکتری حدود ۱/۲ تا ۱/۶ برابر بیشتر از بتن معمولی با کیفیت پایین است. این مسئله اصلی، به دلیل تولید محدود بتن باکتریایی به صورت انبوه و هنوز استفاده گسترده از آن در صنعت ساختمان است. در تحقیقات بتن باکتریایی، مقاومت فشاری، تولید کربنات

کلسیم، و کامپوزیت‌های سیمانی از جمله موضوعات مورد توجه قرار گرفته‌اند، و مطالعات آینده در این حوزه شامل: سازگاری باکتری‌ها و مواد محافظتی با بتن؛ تجزیه و تحلیل چرخه زندگی بتن‌های زیستی؛ و مدل‌سازی عددی برای بهینه‌سازی خصوصیات و ترکیب مواد محافظ خواهند بود. به هرحال، با توجه به چند رشته بودن بتن باکتریایی، انتظار می‌رود که محققان از زمینه‌های مختلف در مهندسی عمران و مواد با یکدیگر همکاری نمایند [۱۴].

در نهایت، بررسی کلی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که روش‌های مختلفی برای ادغام باکتری‌ها در بتن وجود دارد، اما بیشتر آزمایش‌ها، بررسی‌های ماکرو و ریزساختار را شامل می‌شوند. هرچند تعداد کمی از محققان آزمایش‌هایی در سطح ساختار نانو انجام داده‌اند که در این حوزه، اکثر پژوهشگران برای اندازه‌گیری تأثیر قدرت باکتری‌ها، از روش‌های مخرب استفاده کرده‌اند. با این حال، در آینده‌ی نه چندان دور، احتمال استفاده از روش‌های غیرمخرب مانند انتشار صوتی برای نظارت بر ترمیم در زمان واقعی ترک‌های داخل ماتریس بتن با کمک باکتری‌ها وجود دارد. فناوری خودترمیمی در بتن یک راهکار موثر برای جلوگیری از نیاز به تعمیر و نگهداری‌های هزینه‌بر سازه‌های بتنی و همچنین کاهش انتشار دی‌اکسید کربن است. با توجه به افزایش تقاضا برای بتن به عنوان یک ماده ساختمانی و افزایش سرعت توسعه زیرساخت‌ها، تولید بتن با مدیریت بهینه مصرف انرژی و کاهش ردپای کربن بسیار حیاتی است. به طور کلی، بزرگراه‌ها، زیرساخت‌ها و سازه‌ها و مخازن نگهدارنده آب و سایر سیالات، از موامل سیمانی خودترمیم‌کننده بهره بیشتری می‌برند [۱۴و۲۱-۲۳].

۴. مکانیسم اثر باکتری و تاثیر کربنات کلسیم بر کاپوزیت شیمیایی بتن

به طور کلی، کلسیت (Calcite) یکی از پلی‌مورف‌های پایدار کربنات کلسیم ($CaCO_3$) است که در سیستم بلوری تری‌گونال (تری‌گونال-رومبوئدریک) متبلور می‌شود. این ماده معدنی دارای سختی ۳ در مقیاس موس بوده و ویژگی‌هایی مانند انحلال‌پذیری وابسته به pH، خاصیت دوشکستی و قابلیت رسوب‌گذاری زیستی دارد که نسبت به فازهای ژلی وزن مخصوص کمتری داشته و به لحاظ خواص کلی مکانیکی بتن تاثیری ندارد ولی به‌عنوان فاز غالب در فرآیند کربناسیون بتن نقش مهمی در تغییر خواص شیمیایی و دوام بتن ایفا می‌کند. در طی فرآیند کربناسیون دی‌اکسید کربن موجود در هوا با هیدروکسید کلسیم در بتن واکنش داده و کربنات کلسیم تشکیل می‌دهد. این واکنش می‌تواند منجر به کاهش pH بتن شود که به نوبه خود خاصیت قلیایی محیط را کاهش داده و احتمال خوردگی میلگردهای فولادی را نیز متعاقبا افزایش می‌دهد. این موضوع در حضور یون‌های کلرید بسیار خطرناک‌تر است؛ به این صورت که کربناسیون ظرفیت اتصال کلرید ماتریس خمیر سیمان را کاهش داده و باعث حرکت آزادانه کلرین‌های آزاد موجود در بافت بتن می‌گردد[۲۴].

با این حال، تشکیل کربنات کلسیم می‌تواند به عنوان یک ماده پُرکننده، ساختار میکروسکوپی بتن را بهبود بخشیده و استحکام فشاری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را افزایش دهد. در این میان، استفاده از روش‌های نوین، مانند بهره‌گیری از باکتری باسیلوس در بتن خودترمیم‌شونده، می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود دوام بتن داشته باشد. این باکتری‌ها با تولید بیولوژیکی کربنات کلسیم، خلل و فرج و ترک‌های بتن را پر کرده و بهبود چشمگیری در بحث نفوذناپذیری و دوام بتن ایجاد می‌کنند. با این حال، افزایش تولید کربنات کلسیم از طریق فرآیندهای بیولوژیکی می‌تواند نرخ کربناسیون را نیز افزایش دهد که ممکن است تأثیراتی بر خوردگی میلگردهای مدفون در بتن داشته باشد. در این راستا طی پژوهشی، تأثیر جایگزینی کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن در بتن مورد بررسی قرار گرفت[۲۵]. نتایج نشان داد که با وجود کاهش مقدار سیمان، مقاومت فشاری اولیه و نهایی بتن تقریباً ثابت باقی ماند. این امر نشان می‌دهد که استفاده از کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن می‌تواند به کاهش مصرف سیمان کمک کرده و در عین حال خواص مکانیکی بتن را حفظ کند. در تحقیقی، اثرات افزودن نانوکربنات کلسیم خالص و با پوشش کربن و پلیمر بر روی اسلامپ و مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه بتن بررسی شد. نتایج نشان داد که جایگزینی نانوکربنات کلسیم با پوشش کربن، خصوصیات مکانیکی بتن را بهبود بخشیده است. در تحقیقی، تأثیر نانوکربنات کلسیم و نانوسیلیس بر خواص بتن خودتراکم مقایسه شد. نتایج نشان داد که هر دو نانوماده می‌توانند بهبودهایی در خواص مکانیکی و دوامی بتن خودتراکم ایجاد کنند، اما نانوکربنات کلسیم تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت فشاری داشت[۲۶]. علاوه بر این، افزودن باکتری باسیلوس به بتن، از طریق تولید آنزیم اوره‌آز، موجب تسریع فرآیند رسوب

کربنات کلسیم می‌شود که می‌تواند باعث پر شدن ریزترک‌ها شده و از نفوذ آب و یون‌های مخرب جلوگیری کند. با این حال، باید توجه داشت که این افزایش تولید کربنات کلسیم می‌تواند میزان کربناسیون را تشدید کند، به‌ویژه در محیط‌های با رطوبت بالا که کربناسیون سریع‌تر رخ می‌دهد. در مجموع، تشکیل کربنات کلسیم در بتن می‌تواند تأثیرات مثبت و منفی بر ویژگی‌های دوام آن داشته باشد. از یک سو، کاهش pH ناشی از کربناسیون می‌تواند خطر خوردگی میلگردها را افزایش دهد، اما از سوی دیگر، تشکیل کربنات کلسیم می‌تواند به عنوان یک پُرکننده، ساختار داخلی بتن را بهبود بخشیده و استحکام آن را افزایش دهد. استفاده از نانوکربنات کلسیم و کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن می‌تواند به کاهش مصرف سیمان و بهبود خواص مکانیکی و دوامی بتن کمک کند. همچنین، بتن خودترمیم‌شونده مبتنی بر باکتری، با تولید زیستی کربنات کلسیم، روشی نوین برای افزایش دوام و پایداری سازه‌های بتنی است که در عین حال نیازمند بررسی دقیق‌تر تأثیر آن بر فرآیند کربناسیون و خوردگی فولاد است[۲۶].

۵. کنترل شدت کربناسیون در بتن‌های خود ترمیم‌شونده

استفاده از مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس (دوده سیلیس) به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن، راهکاری مؤثر برای کاهش خطر کربناسیون و بهبود دوام سازه‌های بتنی محسوب می‌شود. میکروسیلیس با دارا بودن درصد بالایی از سیلیس فعال، در واکنش با هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) حاصل از هیدراتاسیون سیمان، سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تولید می‌کند که به‌عنوان فاز چسبنده اصلی در بتن شناخته می‌شود. این واکنش پوزولانی منجر به کاهش میزان هیدروکسید کلسیم آزاد در ماتریس بتن می‌شود که خود ماده اولیه برای واکنش با دی‌اکسید کربن و تشکیل کلسیت (کربنات کلسیم) است[۲۶].

کاهش هیدروکسید کلسیم آزاد در بتن، احتمال واکنش آن با دی‌اکسید کربن موجود در هوا را کاهش داده و در نتیجه نرخ کربناسیون بتن را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، محصولات واکنش پوزولانی، ساختار میکروسکوپی بتن را بهبود بخشیده و با کاهش اندازه و تعداد منافذ، نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهند. این کاهش نفوذپذیری، ورود دی‌اکسید کربن و سایر عوامل مخرب به داخل بتن را محدود کرده و به افزایش دوام و عمر مفید سازه‌های بتنی کمک می‌کند. مطالعات متعددی تأثیر مثبت میکروسیلیس بر کاهش کربناسیون و بهبود خواص مکانیکی بتن را تأیید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، در پژوهشی با عنوان "بررسی تأثیر استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس، متاکائولن و زئولیت و ترکیب آن‌ها بر دوام بتن در محیط‌های دریایی" که در نشریه مهندسی عمران فردوسی منتشر شده است، نشان داده شد که استفاده از میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان، منجر به کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت بتن در برابر عوامل مخرب محیطی می‌شود[۲۷و۲۸].

۶. نتیجه‌گیری

مرور کلی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از این فناوری می‌تواند منجر به افزایش طول عمر مفید سازه‌ها، بهینه‌سازی هزینه‌های نگهداری و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از تخریب و جایگزینی زودهنگام بتن شود. مکانیزم عملکرد این فناوری به این صورت است که باکتری‌های باسیلوس در داخل بتن به‌صورت کپسوله‌شده قرار می‌گیرند و هنگامی که ترک‌ها در سطح بتن ایجاد می‌شوند و رطوبت به این ترک‌ها نفوذ می‌کند، باکتری‌ها فعال شده و با استفاده از کلسیم لاکتات موجود در بتن، کربنات کلسیم ($CaCO_3$) تولید می‌کنند. این فرآیند باعث پر شدن ترک‌ها و جلوگیری از گسترش آسیب در سازه می‌شود. با این حال، چالش‌هایی نظیر حفظ پایداری باکتری در محیط قلیایی بتن، نیاز به حضور رطوبت برای فعال‌سازی فرآیند ترمیم، و هزینه‌های تولید بالاتر در مقایسه با بتن معمولی، از موانع اصلی در توسعه و کاربرد گسترده این فناوری هستند. چالش دیگری که در صورت نادیده گرفتن ممکن است به پدیده‌ی کربناسیون شدید و کاهش نسبی خواص مکانیکی منجر شود، بحث تشکیل کلسیت یا کربنات کلسیم ($CaCO_3$) بیش‌از اندازه است. روند تشکیل این ترکیب شیمیایی در صورت نادیده گرفته شدن باعث تبدیل فازهای ژلی به ترکیبات متخلخل‌تر می‌شود که می‌تواند به افت مقاومت فشاری و دوام طولانی‌مدت بتن منجر گردد. به منظور غلبه بر این چالش‌ها، پژوهش‌های آتی باید بر بهینه‌سازی روش‌های کپسوله‌سازی، افزایش کارایی فرآیند ترمیم در محیط‌های مختلف و کاهش هزینه‌های تولید تمرکز کنند. توسعه افزودنی‌های خاص که امکان تنظیم میزان تولید کربنات کلسیم را فراهم کنند، می‌تواند راهکاری مؤثر در

جلوگیری از تولید بیش از حد این ترکیب باشد. علاوه بر این، استفاده از نانوذرات سیلیکا و سایر افزودنی‌های معدنی می‌تواند نقش مهمی در کنترل تشکیل فازهای ژلی و حفظ خواص مکانیکی بتن خودترمیم‌شونده ایفا کند. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب مواد پوزولانی و مواد بازیافتی در ساختار بتن خودترمیم‌شونده نه تنها به افزایش پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه باعث بهبود خواص رئولوژیکی، مقاومت فشاری و دوام بتن نیز می‌شود.

در نهایت، برای اینکه این فناوری به‌عنوان یک راهکار عملی و اقتصادی در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته، مورد استفاده گسترده‌تری قرار گیرد، نیاز است که سیاست‌های حمایتی، استانداردهای طراحی و دستورالعمل‌های اجرایی متناسب تدوین شوند. ایجاد همکاری‌های بین‌المللی میان مراکز تحقیقاتی و صنعتی می‌تواند به تسریع فرآیند تجاری‌سازی این فناوری نوآورانه کمک شایانی کند

منابع

[1]. De Belie, N., et al. (2013). A review of self-healing concrete for damage management of structures. *Materials and Structures, 46*(5), 869-878.

[2]. Sadeghpour, M., & Baradaran, M. (2023). Effect of bacteria on the self-healing ability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials, 364*, 129956.

[3]. Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials—A review. *Materials, 6*(6), 2182-2217.

[4]. De Belie, N., et al. (2013). A review of self-healing concrete for damage management of structures. *Materials and Structures, 46*(5), 869-878.

[5]. Bentz, D. P., et al. (2009). Effect of bacteria on the self-healing ability of fly ash concrete. *Cement and Concrete Research, 39*(6), 518-524.

[6]. Jonkers, H. M., et al. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering, 36*(2), 230-235.

[7]. Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites, 33*(7), 763-770.

[8]. Van Tittelboom, K., et al. (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research, 40*(1), 157-166.

[9]. Wang, J., et al. (2012). Self-healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concrete Research, 42*(3), 497-505.

[10]. Li, V. C., et al. (2016). Autonomous healing of cracks in engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concrete Research, 82*, 1-12.

[11]. Ghosh, S., et al. (2014). Self-healing concrete: A review. *Construction and Building Materials, 56*, 1-11.

[12]. Sánchez, F., et al. (2015). Self-healing concrete: A review. *Materials, 8*(6), 3058-3083.

[13]. Ghosh, S., et al. (2015). Self-healing concrete: A review. *Construction and Building Materials, 56*, 1-11.

[14]. Jonkers, H. M., et al. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering, 36*(2), 230-235.

[15]. Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites, 33*(7), 763-770.

[16]. Van Tittelboom, K., et al. (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research, 40*(1), 157-166.

[17]. Wang, J., et al. (2012). Self-healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concrete Research, 42*(3), 497-505.

[18]. Li, V. C., et al. (2016). Autonomous healing of cracks in engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concrete Research, 82*, 1-12.

[19]. Ghosh, S., et al. (2014). Self-healing concrete: A review. *Construction and Building Materials, 56*, 1-11.

[20]. Azevedo, A. R., et al. (2019). Self-healing concrete: A review on the recent advances and future perspectives. *Construction and Building Materials, 225*, 1035-1049.

[21]. Nematollahi, B., & Sanjayan, J. G. (2014). The effect of microbial healing on the mechanical properties of concrete. *Journal of Materials Science, 49*(5), 2643-2653.
[22]. Khatib, Z., & Lam, S. (2014). Bio-based self-healing concrete: A review of bacteria as a healing agent. *Journal of Environmental Management, 146*, 151-160.
[23]. Shrestha, S., et al. (2019). Effect of self-healing materials on the mechanical and durability properties of concrete: A comprehensive review. *Journal of Materials Science, 54*(3), 2450-2471.
[24]. Li, Z., et al. (2018). An investigation of the mechanical properties of self-healing concrete incorporating microbial healing agents. *Construction and Building Materials, 171*, 605-614.
[25]. Mohammed, M. H., & Hashim, S. A. (2020). A review of self-healing concrete: Methods and applications. *Journal of Building Engineering, 29*, 101111.
[26]. Silva, F., & Monteiro, P. J. (2018). The role of bacteria in the self-healing mechanism of concrete: A critical review. Cement and Concrete Composites, 91, 222-234.
[27]. Xu, J., et al. (2021). Advances in bio-based self-healing concrete: Mechanisms, performance, and future perspectives. Journal of Cleaner Production, 280, 124376.
[28]. Tziviloglou, E., et al. (2016). Performance evaluation of bacteria-based self-healing concrete. Cement and Concrete Research, 88, 76-92.