مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

جلد ۷- شماره ۵- سال ۱۴۰۱

www.ElitesJournal.ir

بتن خود ترمیم شونده، مصالحی تاثیرگذار در صنعت ساخت وساز

سعیده قائمی فرد

دانشجوی دکتری مهندسی عمران – سازه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

s.ghaemifard@uma.ac.ir

ارسال: آبان ماه ۱۴۰۱ پذیرش: آذر ماه ۱۴۰۱

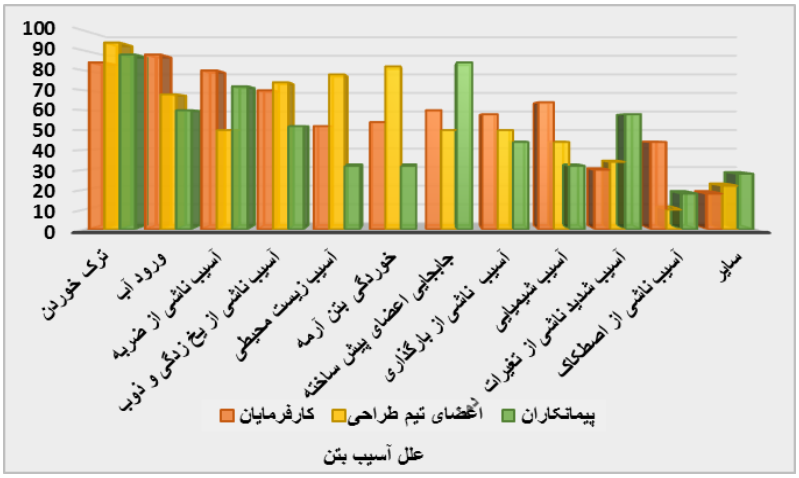
چکیده

بتن به دلیل در دسترس بودن و مقرون به صرفه بودن به طور گسترده در صنعت ساختمان سازی در سراسر جهان استفاده می-شود. بتن بخش خارجی بیشتر سازه‌ها است که در برابر تخریب دائمی و هوازدگی آسیب‌پذیر است، به طوریکه امکان بازسازی ذاتی خواص مهندسی آن، نویدبخش پیشرفت‌های بی‌سابقه‌ای در جهت انعطاف‌پذیری سازه است. به دلیل ترک‌خوردگی، دوام بتن کاهش می‌یابد و بازرسی و نگهداری مکرر سازه‌های بتنی سخت و پرهزینه است. بنابراین، روش‌های خود ترمیمی، روش‌های شناخته شده‌ای برای توقف ترک‌خوردگی و بازیابی مقاومت و دوام بتن هستند. این مقاله، مروری بر روش‌ها و عوامل/ مواد خودترمیم موجود را با برجسته کردن کاربردها، انتقادات و عملکرد آنها در مطالعات مختلف منتشر شده، مورد بحث قرار می‌دهد. توجه به کارایی مواد شفابخش از جمله اجزای بیوتکنولوژیکی، پلیمری و شیمیایی برای ترمیم ترک و بهبود استحکام، تمرکز اصلی است. همچنین روش‌های آزمایش، روش‌های ارزیابی برای محاسبه کارایی و مقایسه مواد خود ترمیم شونده و کارایی آنها مورد توجه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: بتن خود ترمیم‌شونده، ترک خوردگی، مواد خود ترمیمی، کارایی بتن خود ترمیم شونده.

۱– مقدمه

بتن یک مصالح ساختمانی ضروری است که به طور گسترده برای جاده‌ها، ساختمان‌ها، تونل‌ها، متروها، پل‌ها و سایر ساخت و سازهای زیربنایی استفاده می‌شود[۱]. به طور کلی بتن از آب، چسب، سنگدانه درشت و ریز تشکیل شده است[۲]. بتن به دلیل کاربردها و خواص متعددی مانند مقاومت فشاری بالا، دوام بالا، مقرون به صرفه بودن، دسترسی آسان به اجزای تشکیل دهنده آن، سازگاری با میلگردها و ریخته‌گری در اندازه‌ها و اشکال مختلف، یک ماده انتخابی مناسبی است [۳–۵]. متأسفانه بتن در برابر ترک‌خوردگی و سایر انواع آسیب‌ها (مانند زوال) آسیب‌پذیر است که به برخی از مواد شیمیایی شدید (باران اسیدی و نمک و غیره) اجازه ورود به بتن را می‌دهد[۶]. ترک خوردگی یکی از علل مهم زوال بتن و کاهش دوام است [۷– ۸]. شکل ۱ نشان می-دهد که ترک خوردن یکی از دلایل اصلی آسیب/تخریب سازه گزارش شده توسط کارفرمایان، طراحان و پیمانکاران است.



شکل ۱- علل مهم فرسودگی / آسیب سازه‌های بتنی[۹]

ترک‌های ایجاد شده در بتن را می‌توان به حالت‌های زیر دسته بندی کرد:

۱- حالت پلاستیکی:

الف) نشست پلاستیک

ب)حرکت قالب

ج) جمع شدگی پلاستیک

۲- حالت سخت شده:

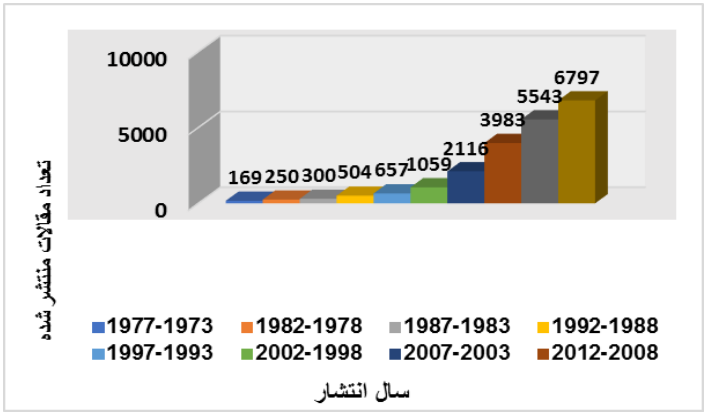
الف) تنش حرارتی

ب) واکنش شیمیایی

ج) خطا در جزئیات و طراحی

د) اضافه بار

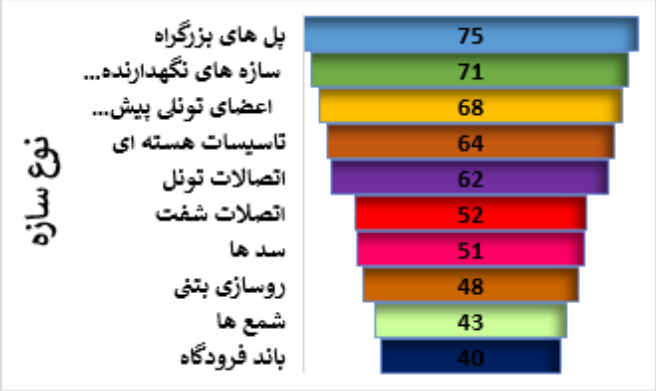
ترک‌های بتن ممکن است در مراحل اولیه، سازه‌های بتنی را تحت تأثیر قرار ندهند اما مطمئناً می‌توانند بر طول عمر آنها تأثیر بگذارند [۱۰]. با توجه به افزایش ترک‌خوردگی سازه‌ها، محققان روشی به نام خودترمیمی را برای غلبه بر فرسودگی سازه بتنی ابداع کردند که محبوبیت آن با افزایش تعداد مقالات منتشر شده در هر سال همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، قابل مشاهده است. ترمیم در بتن بدون دخالت انسان اولین بار در سال ۱۸۳۶ بیان شد [۱۱]، اما از چند دهه گذشته، محققان در حال یافتن روش‌های جدید متفاوتی برای عملکرد خودترمیمی بتن هستند[۱۲].



شکل ۲- تعداد مقالات منتشر شده در مورد بتن خود ترمیم شونده در سال های ۲۰۲۲-۱۹۷۳

خودترمیمی بهترین روش برای کاهش ترک‌خوردگی سازه‌های بتنی است، زیرا فرآیند بازرسی و تعمیر/نگهداری منظم برای سازه‌های بتنی عظیم به دلیل نیاز زیاد به کار و هزینه غیرممکن است [۱۳]. با توجه به شرایط ذکر شده، خودترمیمی یا تعمیر

خودکار، فرآیندی موثر برای آب‌بندی ترک‌های مضر بدون دخالت هیچ نیروی انسانی یا سرمایه گذاری است. امروزه مکانیزم خودترمیم شوندگی در سازه‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته که در شکل۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- کاربرد خودترمیمی در سازه‌های مختلف مهندسی عمران (برحسب درصد) [۹]

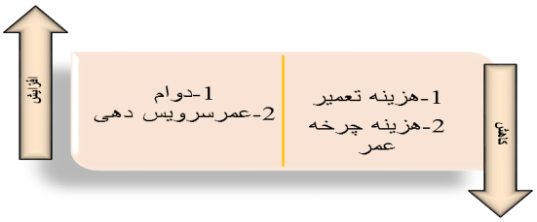
به دلیل خاصیت ذاتی شفا بخشی بتن، خودترمیمی یک خاصیت شناخته شده برای آن به شمار می‌آید [۱۴]. پس از مدتی، ترک ممکن است به دلیل هیدراتاسیون مداوم مواد معدنی کلینکر یا کربناته شدن هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) بهبود یابد. از سوی دیگر، ترمیم خودکار، محدود به ترک‌های جزئی است و تنها زمانی مؤثر است که آب در دسترس باشد. از دهه نود، تلاش‌هایی برای توسعه بتن خودترمیم شونده(SHC)[1] مستقل آغاز شده است [۱۵]. در سال ۲۰۰۶، SHC به عنوان نوع جدیدی از بتن توسط جانکرز [۱۶] ابداع شد.SHC با پراکندگی مواد خاصی (به عنوان مثال، کپسول‌ها یا الیاف) حاوی محلول‌های ترمیم‌کننده در مخلوط بتن [۱۷] ایجاد می‌شود. هنگامیکه ترک بوجود می‌آید، الیاف یا کپسول‌ها خرد می‌شوند و مایع موجود در آنها بلافاصله پخش می‌شود تا ترک را درمان کنند. خودترمیمی ترک‌های بتنی، می‌تواند طول عمر سازه‌های بتنی را افزایش دهد و سازه را با محیط زیست سازگارتر کند و به طور همزمان پایداری آن را افزایش دهد [۱۸]. روش‌های خودترمیمی مختلفی همچون خود-ترمیمی مبتنی بر کپسول، آوندی، رسوب الکترودی، خودترمیمی میکروبیولوژیکی، خودترمیمی از طریق افزودن آلیاژ حافظه‌دار شکلی[2] (SMA) برای ترمیم ترک استفاده می‌شوند [۱۴- ۱۵, ۱۷-۱۹]. برخی از رایج ترین مواد برای کپسوله‌سازی، شامل شیشه [۲۰- ۲۱] و پلیمرها [۲۲-۲۴]، میکروارگانیسم‌های مبتنی بر باکتری [۲۵- ۲۶]، متیل متاکریلات [۲۷]، مواد معدنی [۲۸- ۲۹] و هیدروژل [۳۰] می‌باشند. جانکرز و همکارانش نشان دادند که استفاده از هاگ‌های باکتری به عنوان یک عامل خودترمیمی یک کاربرد بالقوه است [۲۵]. لی و همکارانش نشان دادند که استفاده از سیم SMA به عنوان میله تقویت‌کننده، می‌تواند به بستن ترک ها و ترمیم آسیب‌های اضطراری در سازه‌های بتنی کمک کند. به دلیل خاصیت ارتجاعی بسیار بالا SMA های استفاده شده، شکاف‌ها آب بندی شده بودند [۳۱]. یکی از مکانیسم‌های اصلی زیربنایی خودترمیمی اتوژنیک، هیدراتاسیون باقیمانده سیمان هیدراته نشده در ماتریس زمینه است [۳۲]. نکته قابل توجهی که وجود دارد این است که این روش مقدار محدودی از محصولات ترمیم را تولید می‌کند؛ در نتیجه، خودترمیمی اتوژنیک تنها برای ترک‌هایی با عرض ۵۰ تا ۱۵۰ میکرومتر موثر است [۳۳]. برای ارزیابی عملکرد SHC، چندین روش از جمله بازرسی چشمی و تجزیه و تحلیل ریزساختاری، بازیابی مقاومت و دوام افزایش یافته [۳۲] وجود دارد. به عبارت دیگر، خودترمیمی را می‌توان به سه روش نظارت چشمی درزگیری ترک و شناسایی ترکیبات ترمیم‌کننده که باعث آن می‌شوند، بهبود عملکرد دوام و بازیابی خواص مقاومت ارزیابی کرد [۳۴-۳۶]. با این حال، بازیابی مقاومت بتن در فرآیند خودترمیمی به طور کلی محدود است [۳۷- ۳۸]. بنابراین رفتار خودترمیمی زمانی قابل اعتمادتر است که بسته شدن فیزیکی ترک و بهبود دوام مشاهده شود. به عنوان مثال، پارامترهای کاهش نفوذپذیری، و ارزیابی‌های ریزساختاری بررسی شود [۳۹]. بنابراین، علاقه به مواد خودترمیم شونده، به ویژه قابلیت‌های خودترمیمی در مواد بتن، با تمرکز بر روش‌های مختلف ارائه شده توسط ده ها محقق در سراسر جهان در دو دهه اخیر افزایش یافته است. شکل ۴ نیز مزایای استفاده از SHC را

[1] Self Healing Concrete(SHC)
[2] Shape Memory Alloy

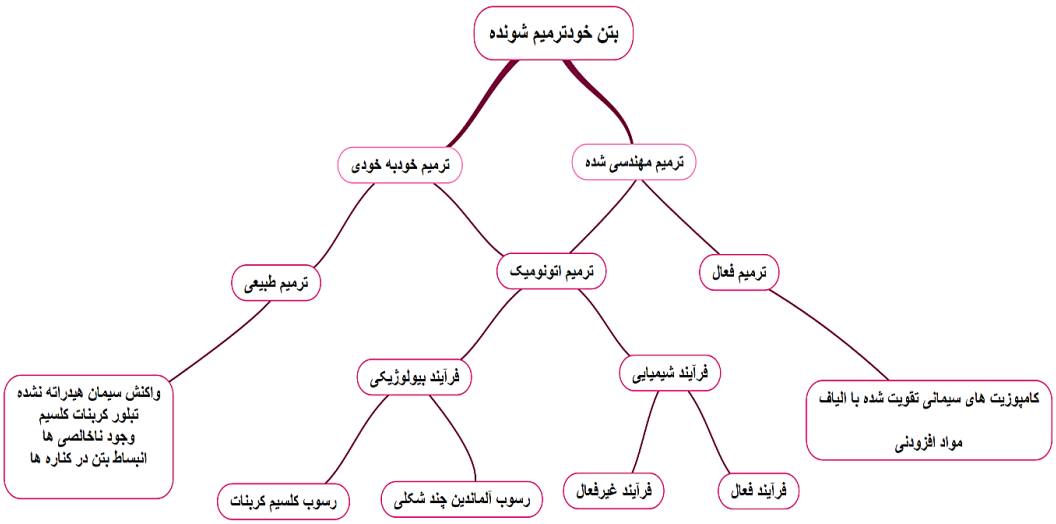
نشان می‌دهد. این مقاله، مروری بر روش‌ها و عوامل/ مواد خودترمیم موجود را با برجسته کردن کاربردها، انتقادات و عملکرد آنها در مطالعات مختلف منتشر شده، مورد بحث قرار می‌دهد.

۲- طبقه‌بندی روش‌های خودترمیمی

چندین روش خودترمیمی که تاکنون کشف شده و در چندین مطالعه مورد بحث قرار گرفته است در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- مزایای بتن خودترمیم شونده در صنعت ساخت و ساز



شکل۵- دیدگاه سلسله مراتبی از روش‌های خوددرمانی

۲-۱- ترمیم خودکار

ترمیم درونی یا خودکار فرآیندی است که در آن ترمیم جزئی ترک از طریق فرآیندهای شیمیایی طبیعی مرتبط با سن بتن حاصل می‌شود. برای مثال، ترمیم عمدتاً به دلیل هیدراتاسیون بیشتر اجزای بدون هیدراته در بتن تازه ایجاد می‌شود که با سخت شدن بتن، محتوای آن کاهش می‌یابد. خودترمیمی می‌تواند در زیرساخت‌های متنوع با شرایط محیطی گوناگون از جمله محیط‌های زیرآب، زیرزمینی و محیط‌های مرطوب و خشک رخ دهد[۱۸, ۳۲, ۴۰]. در کاربردهای عملی سازه‌های بتنی سنتی، داشتن عرض ترک کنترل شده غیرواقعی است. بنابراین، سه توصیه برجسته به منظور بهبود عملکرد خودترمیم شونده ارائه شده است: ترکیب مواد افزودنی معدنی، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC)[1]، و با اصلاح عوامل زیر:

۱-شرایط عمل آوری: برای تسهیل پخش‌شدن محصولات ترمیمی، عمل آوری با آب توصیه می‌شود.

۲- عرض ترک: عرض قابل ترمیم عمدتاً به ۲۰۰ میکرومتر محدود می‌شود.

۳-نسبت آب به سیمان: نسبت سیمان به آب بالاتر، ذرات سیمان هیدرات نشده بیشتری برای هیدراتاسیون بیشتر در دسترس است.

۴- سن بتن: در صورت امکان بهتر است ترک خوردگی در سنین پایین ایجاد شود.

[1] Engineered Cementitious Composites

۵- تنش داخلی: پیش تنیدگی در سنین پایین برای افزایش بازیابی خواص مکانیکی.

لی و یانگ بازیابی مقاومت خمشی در نمونه‌های تیرهای بتنی پیش ترک خورده که در معرض بار فشاری اولیه قرار داشتند، را بررسی کردند[۳۳]. در مطالعه دیگری در مورد منشورهای بتنی، نمونه‌هایی که در معرض تنش فشاری اولیه قرار گرفتند، خواص مکانیکی شان بهبود یافته بودند [۴۱]. بتن معمولی عموماً دارای تکامل حرارتی بالاتری است و انبساط حرارتی ایجاد می‌کند که باعث انقباض و ترک می‌شود [۴۲]. یکی از مواد معدنی گسترده مورد استفاده در SHC، افزودنی کریستالی[1] (CA) است که توسط استاندارد اروپایی 2–934 به عنوان مقاوم در برابر آب و توسط ACI 212.3R-16 به عنوان کاهش دهنده نفوذپذیری در بتن تعریف شده است[۴۳]. این اختلاف در تعریف به موضوع CA در تحقیقاتی اشاره می‌کند که در آن تنوع زیادی به دلیل ترکیبات غیر یکپارچه و تجاری شده وجود دارد. با این حال، مناسب بودن آن در SHC به دلیل توانایی ماده افزودنی برای غیرفعال ماندن تا زمانی که توسط رطوبت یا ورود آب تحریک شود، مشخص شده است. تقریباً ۲۰ تا ۳۰ درصد سیمان در بتن معمولی/سنتی هیدراته باقی می‌ماند. اگر بتن شروع به ترک خوردن کند، ذرات سیمان هیدراته نشده با آب ورودی واکنش می‌دهند. این واکنش دوباره فرآیند هیدراتاسیون را آغاز می‌کند و محصولات هیدراتاسیون را برای پر کردن ترک‌ها ایجاد می‌کند. این فرآیند خوددرمانی ذاتی به عنوان درمان مستقل [۴۴] شناخته می‌شود. ترمیم مستقل می‌تواند به روش‌های زیر[۴۵, ۴۶] مانند شکل۶ الف وب امکان‌پذیر باشد.

الف- تشکیل $CaCO_3$ یا $Ca(OH)_2$ برای مسدود کردن ترک‌ها.

ب- هیدراتاسیون ذرات هیدراته نشده سیمان.

ج. مسدود شدن ترک‌ها با وجود ناخالصی در آب.

د. انبساط / تورم ژل هیدرات کلسیم سیلیکات[2] (CSH).

تمام فرآیندهای ذکر شده می‌توانند به طور همزمان رخ دهند. علاوه بر این، برخی از فرآیندهای ذکر شده تنها می‌توانند تا حدی شکاف‌ها را پر کنند. در بین تمام مکانیسم‌های شفابخش طبیعی، تشکیل $CaCO_3$ و $Ca(OH)_2$ مؤثر می‌باشد که می‌تواند به روش زیر تشکیل شود:

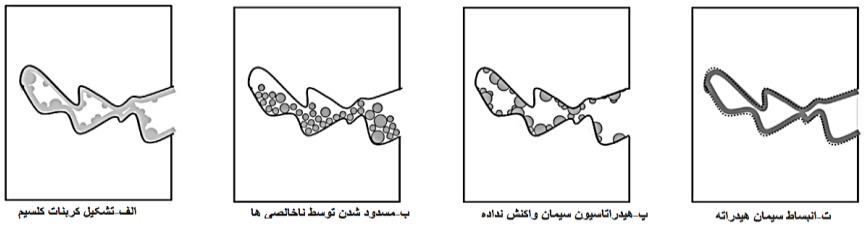
$$H_2O + CO_2 \Leftrightarrow H_2CO_3 \quad (۱)$$

$$H_2CO_3 \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \quad (۲)$$

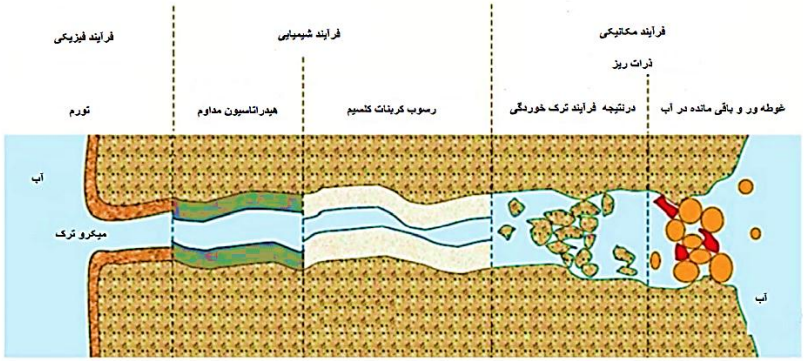
$$HCO3- \Leftrightarrow 2H++ CO32- \quad (۳)$$

$$Ca^{3+} + CO_3^{2-} \Leftrightarrow CaCO_3 \quad (۴)$$

$$Ca^{2+} + HCO_3^- \Leftrightarrow CaCO_3 + H+ \quad (۵)$$



[1] Crystalline Admixture
[2] Calcium-Silicate Hydrate



شکل ۶- (الف) روش‌های خودترمیمی طبیعی[۴۵, ۴۶] ، (ب) ترمیم خودبه خودی به دلیل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی در مواد سیمانی[۲۲, ۴۷]

۲-۱-۱- سن و ترکیب

پتانسیل ترمیم خودبه خودی به ترکیب بتن بستگی دارد که شامل پارامترهای زیر است:

الف-محتوای کلینکر در سیمان

نوع سیمان عامل مهمی برای تأثیر بر ترکیب بتن نیست. با این حال، تامین یون های کلسیم توسط محتویات کلینکر (در سیمان) تعیین می‌شود که در نهایت توانایی ماتریس زمینه برای تشکیل رسوبات $CaCO_3$ را نشان می‌دهد.

ب-افزودن سیلیکات

چنین افزودنی در مخلوط بتن بر نوع مخلوط تهیه شده با تأثیر بر واکنش‌های پوزولانی، مدت مکانیسم التیام و مصرف $Ca(OH)_2$ تأثیر می گذارد.

پ- نوع سنگدانه

این عامل بر الگوی ترک خوردگی و فرآیند التیام مربوطه که باید آغاز شود، تأثیر می گذارد.

ت-نوع بتن

نوع بتن مربوط به نسبت w/c، سادگی بایندر در تولید مقدار قابل توجهی ژل (CSH) به دلیل هیدراتاسیون، نوع بایندر و مقدار مصرف می‌باشد.

ث-سن بتن

سن بتن برای مکانیسم بهبود حیاتی است. سن اولیه بتن عمیق‌تر است [۴۸] زیرا دارای ذرات پیوندی آب نشده بیشتری برای تشکیل ژل C-S-H [۱]جدید است. بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی [۲] (SEM) نشان داد که بازیابی مقاومت بتن ترک خورده غوطه ور در آب به دلیل تشکیل CSH و پورتلندایت [۳] است در حالی که بازیابی در سختی بتن با تشکیل اترینگایت [۴] مرتبط است.

۲-۱-۲-وجود آب

غوطه ور شدن در آب بهترین گزینه برای قرار گرفتن در معرض خودترمیمی است. وجود آب برای پدیده ترمیم خودبه خودی برای انجام واکنش‌های شیمیایی حیاتی است و همچنین به عنوان عامل انتقال ذرات عمل می‌کند. خواص مختلف (دما، گرادیان فشار، قلیاییت، فشار و سختی[۴۹]) آب نیز بر پدیده ترمیم اثر دارد. علاوه بر این، مطالعات اندکی نشان داده‌اند که پدیده خودترمیمی در چرخه‌های مرطوب و خشک در مقایسه با شرایط غوطه‌وری کامل در آب، به دلیل در دسترس بودن زیاد دی اکسید کربن (CO_2) در هوا و تشکیل $CaCO_3$ ، بهتر عمل می‌کند.

۲-۱-۳-شکل و اندازه ترک

از نظر هندسی، ترک‌ها با شناسایی ابعاد ترک (ارتفاع، طول و عرض) و الگوی ترک (شاخه‌ای یا انباشته) میزان بهبودی خودبه خودی را نشان می‌دهند. ترک‌های باریک‌تر را می‌توان به راحتی و به سرعت با محدود کردن عرض ترک و افزایش مکانیسم

[1] Calcium Silicate Hydrate
[2] Scanning Electron Microscope
[3] portlandite
[4] Ettringite

ترمیم ،بهبود داد. کنترل تشکیل و انبساط ترک همچنین می‌تواند آب را در سراسر ماتریس زمینه ذخیره و انتقال دهد تا هیدراتاسیون (و بهبودی) را افزایش دهد [۵۰]. علاوه بر این، سن اولین ترک نیز همراه با هندسه ترک برای افزایش ترمیم خود به خودی مهم است.

۳- خودترمیمی مستقل(اتونومیک)

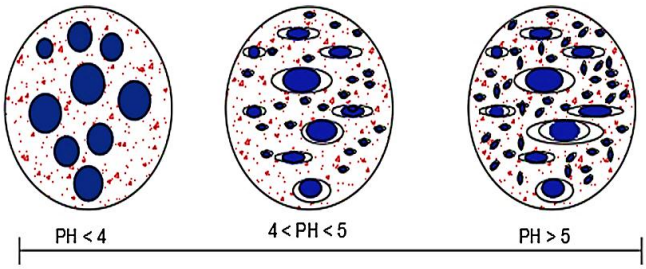
خودترمیمی مستقل شامل افزودنی‌های طراحی شده برای مخلوط شدن در ماتریس سیمانی برای اهداف درمانی است و همچنین از روش های خاصی برای انتقال چنین افزودنی‌هایی استفاده می‌کند.

۳-۱-کپسوله سازی

کپسوله‌سازی یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای رساندن عوامل ترمیم به ماتریس سیمانی است. مواد متعددی برای تولید کپسول‌ها و عوامل شفابخش در دسترس هستند و از این رو کارایی‌های خود ترمیمی متفاوتی را به دست می‌آورند[۵۱]. برای کپسولاسیون، نیاز اساسی این است که مقاومت مکانیکی کافی برای مقاومت در برابر نیروهای داخلی در ماتریس سیمانی یا اختلاط بتن داشته باشد و عامل التیام‌دهنده داخل کپسول باید ویسکوزیته پایینی داشته باشد تا به طور موثر در داخل ترک آزاد شود [۵۲]. عملکرد فرآیند ترمیم کپسولاسیون نیز تابعی از قطر کپسول، ضخامت پوسته و بافت سطح است[۵۳].

در سال ۱۹۹۴، کارولین درای [۵۱]برای اولین بار یک کپسول داخلی را در زمینه بتن پیشنهاد کرد. او از متیل متاکریلات به عنوان عامل شفابخش در یک کپسول فیبر پلی پروپیلن متخلخل توخالی استفاده کرد که نتایج نشان داد این روش استحکام خمشی مخلوط را افزایش می‌دهد [۵۳]. جوزف و همکاران و لی و همکاران[۲۰, ۵۳] از سیانواکریلات برای کپسول منفرد توخالی استفاده کردند. ون تیتلبوم و همکاران [۵۴] و کارایسکو و همکاران [۵۵] از کپسول‌های توخالی حاوی پلی اورتان استفاده کرد.ون تیتلبوم کپسول‌های بلند را در تماس با آرماتور فولادی و کپسول‌های کوتاه تعبیه‌شده در بتن قرار داد در حالی که کارایسکو کپسول‌ها را در یک شبکه جاسازی کرد و به میلگردهای تقویت‌کننده متصل شد. محققان دیگر از عوامل شفابخش مختلف از طریق روش کپسوله‌سازی برای ترمیم ترک استفاده کردند[۵۵-۵۷]، مانند وایت و همکارانش [۵۸]که فناوری ریزپوشانی و کپسول متشکل از دی سیکلوپنتادین به عنوان عامل شفابخش و اوره فرمالدئید به عنوان ماده پوسته را بررسی کردند. وانگ [۵۹] هاگ‌های باکتری را در یک هیدروژل محصور کرد و سپس آن را با مخلوط بتن مخلوط کرد. مستوی و همکاران[۶۰] میکروکپسول‌هایی با لایه های پوسته دوگانه متشکل از پلی اورتان و پلی اوره فرمالدئید و سیلیکات سدیم به عنوان ماده ترمیمی برای جلوگیری از پارگی میکروکپسول در طول اختلاط بتن توسعه دادند. دونگ و همکاران[۶۱] میکرو کپسول‌هایی با سه ضخامت پوسته متفاوت و اندازه متوسط ۴۱۵.۳ میکرومتر ساخته و مقاومت پوسته را در محلول بتن شبیه سازی شده آزمایش کرد. مشخص شد که با ضخامت پوسته کمتر، رهاسازی مواد ترمیمی افزایش و در سطح PH بالا، این میزان کاهش می‌یابد. کانلوپولوس و همکاران[۶۲] میکروکپسول-هایی با سیلیکات سدیم به عنوان هسته و صمغ ژلاتین-اقاقیا به عنوان مواد پوسته با استفاده از روش توده شدگی[1] ساختند که اندازه میکروکپسول‌ها متوسط ۷۰۰-۳۰۰ میکرومتر با محدوده ضخامت پوسته ۲۰-۵ میکرومتر به دست آمد. همچنین آنها، میکروکپسول ها را در سطوح مختلف PH آزمایش کردند تا ماندگاری میکروکپسول‌ها در یک محیط بتنی شبیه سازی شده بررسی کنند که مشاهده شد مورفولوژی وشکل میکروکپسول‌ها در حالت قلیایی بالا به بلند و باریک و در PH اسیدی بالا گرد و شکننده متغیر است. براون و همکاران[۶۳]، بلیزیک و همکاران[۶۴]، لی و همکاران[۵۱] و مستوی و همکاران [۶۰] از اوره فرمالدئید به عنوان ماده پوسته از طریق روش امولسیون سازی با سطح PH کنترل شده ۳.۴-۳.۰، دمای ۵۷-۵۰ درجه سانتی گراد و سرعت هم زدن ۳۰۰-۵۰۰ دور در دقیقه استفاده کرد. قطر نهایی میکروکپسول بین ۱۲۵ تا ۲۹۷ میکرومتر بود. خلاصه‌ای از روش های کپسولاسیون مورد استفاده در تحقیقات مختلف در جدول۱ آورده شده است.

[1] Coacervation



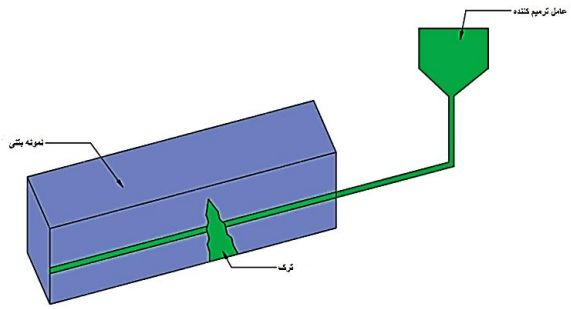
شکل ۷- بررسی میزان کارایی آزادسازی عامل ترمیم در میکروکپسول با سطح PH [۶۲]

جدول ۱ - خلاصه ای از روش های کپسولاسیون مورد استفاده.

مواد پوسته	مواد کپسوله شده	درصد جایگزینی با وزن سیمان(%)	کارایی	مرجع
پلی اورتان / اوره فرمالدئید	سدیم سیلیکات	۵ -۲/۵	عرض ترک و انتقال امواج اولتراسونیک را کاهش می دهد.	[۶۵]
پلی اوره فرمالدئید	اپوکسی	۲-۱	استحکام خمشی را افزایش می دهد.	[۶۶]
اوره فرمالدئید	اپوکسی	۹-۰	تخلخل، انتشار کلرید و نفوذپذیری را کاهش می دهد. استحکام فشاری، کششی و مدول الاستیک دینامیکی را افزایش می دهد.	[۶۷-۶۹]
آلژینات	Ag+	۱۰	مقاومت در برابر کلرید را افزایش می دهد.	[۷۰]
سیلیکا	اپوکسی	۱۰-۵	ضریب جذب را کاهش می دهد.	[۷۱]
پلی اوره	سدیم سیلیکات	۰.۸	جذب مویرگی را کاهش می دهد.	[۷۰]
پلی استایرن-دیوینیل بنزن	اپوکسی	۲-۰	انرژی شکستگی را افزایش می دهد. جذب آب را کاهش می دهد.	[۷۲]
ملامین اوره فرمالدئید	اپوکسی	۴-۱	استحکام خمشی را افزایش می دهد.	[۵۱]

۳-۲- سیستم آوندی

روش آوندی یکی دیگر از روش‌های خودترمیمی بتن برای رساندن عوامل ترمیم کننده به نمونه بتن است. این روش ساختار عروقی بدن انسان را تقلید می کند[۱۳, ۷۵]. این روش شامل مجموعه‌ای مجزا یا شبکه‌ای از لوله‌های توخالی است که در داخل بتن قرار می‌گیرد و عامل ترمیم کننده از منبع خارجی تامین می‌شود.(شکل۸)، بنابراین این سیستم برای عوامل ترمیم کننده منفرد یا چندگانه مناسب است[۱۵]. در سال ۱۹۹۳، درای [۱۵] برای اولین بار سیستم آوندی را برای بهبود ترک و کاهش نفوذپذیری پیشنهاد کرد. با نصب دو لوله الیافی با استفاده از پلی پروپیلن در یک ماتریس بتنی و کار با پمپ خلاء، متیل متاکریلات به عنوان عامل ترمیم کننده از طریق لوله‌های الیافی به داخل بتن کشیده شد. علاوه بر این، درای از سیستم آوندی برای سازه‌های قابی شکل، با قرار دادن پیپت ها در سرتاسر تیر و در اتصالات لنگری تیر–ستون برای ترمیم ترک‌های ایجاد شده به دلیل بارگذاری دینامیکی استفاده کرد[۷۶].



شکل ۸- رویکرد سیستم آوندی برای بهبود ترک[۷۶]

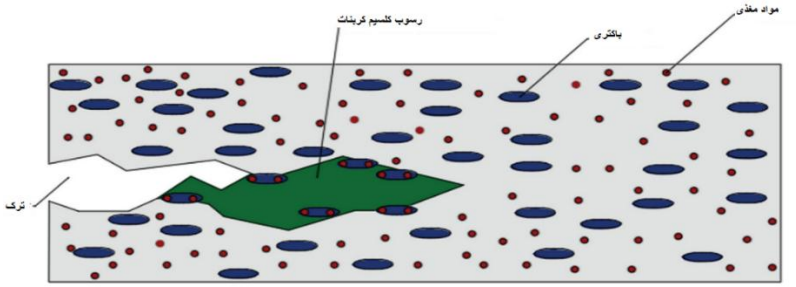
جوزف و همکاران[۵۳, ۷۷] از سیانواکریلات - به عنوان عامل ترمیم و یک لوله شیشه‌ای بوروسیلیکات برای رساندن آن به بتن استفاده کرد. نیشیواکی و همکاران[۷۸] یک سیستم آوندی پیشنهاد کرد که می‌تواند ترک‌ها را بدون دخالت انسان ترمیم کند، که شامل جریان الکتریکی تعبیه شده در لوله‌های آلی که حاوی عامل ترمیم است، می‌شود. با وقوع ترک، مسیر رسانای جریان کاهش می‌یابد و مقاومت الکتریکی افزایش تا ترک گرم شود. با این کار لوله آلی ناحیه انتخاب شده ذوب می‌شود و عامل ترمیم کننده آزاد می‌شود. سنگاجی و شلنگن[۷۵] بتن آوندی را پیشنهاد کردند که از شبکه متخلخل در مرکز نمونه بتنی تشکیل شده است. میکروکنترل‌کننده‌ها در بتن نصب شدند تا در هنگام وقوع ترک، ورودی‌ها را به یک محرک ارسال کنند تا پمپی را فعال کند که عامل ترمیم کننده را در بتن متخلخل و داخل ترک‌ها آزاد شود.

۳-۳- کارایی ترمیم کنندگی

مواد خود ترمیم کننده بتن یکی از مواد مهم در زمینه مواد هوشمند هستند که پتانسیل بازیابی جزئی یا کامل عملکرد تخریب شده سازه و بازگرداندن به شرایط اولیه را دارند[۷۹]. در علم بیومیمتیک، خودترمیمی به معنای به دست آوردن مجدد قدرت در نتیجه بازسازی است[۸۰]. بنابراین، بسته به نیاز بازیابی، محققان باید مواد ترمیم مورد نظر را انتخاب کنند[۸۱]. یک ماده خود ترمیم کننده موثر باید: ۱- دیواره های ترک را آب بندی کند تا نفوذپذیری را کاهش دهد، ۲- با ماتریس بتن سازگار باشد، ۳- فعالیت بالقوه طولانی مدت داشته باشد، ۴- چندین رویداد را پردازش کند و ۵- از نظر اقتصادی مناسب باشد[۸۱]. در ادامه به منظور خودترمیمی مستقل، مواد را می توان به عنوان باکتری، پلیمر و ترکیبات شیمیایی (به ویژه سیلیکات سدیم و منیزیم) طبقه بندی شده است.

۳-۳-۱-باکتریایی

مواد ترمیم کننده زیستی بر اساس رشته مطالعاتی باکتریولوژی، شاخه ای از میکروبیولوژی [۲۶]است. فن‌آوری‌های ترمیمی بیوتکنولوژیک در زیر گروه باکتری‌های جنس باسیلیوس دسته‌بندی می‌شوند که در برابر محیط‌های قلیایی بسیار مقاوم هستند[۸۲]. یک روش نزدیک برای بهبود باکتری، شامل فراهم کردن منبعی از مواد مغذی برای باکتری‌ها و بدست آوردن کربنات کلسیم رسوب شده در نتیجه فرآیند متابولیک (شکل ۹)، مانند فتوسنتز، کاهش سولفات و تولید هیدرولیز اوره است[۸۳- ۸۴].



شکل ۹- بهبود ترک در نتیجه رسوب کربنات کلسیم ناشی از باکتری‌ها[۸۴]

فرض بر این است که باکتری‌ها قادر به تشکیل رسوبات کربنات کلسیم هستند[۸۴- ۸۵] و از نظر بیولوژیکی رسوبات شیمیایی را القا می‌کنند که در آن ارگانیسم یک میکرو محیط خارج سلولی بهینه از فازهای معدنی ایجاد می‌شود که به عنوان کانی زیستی شناخته می‌شود[۸۶]. مسیر رسوب القایی شامل تجزیه اوره توسط باکتری است که آنزیم اوره را به آمونیوم و کربنات هیدرولیز می کند[۸۳]. در مرحله اولیه فعالیت میکروارگانیسم، یک مول اوره درون سلولی به یک مول آمونیاک و یک مول کاربامات هیدرولیز می‌شود و کاربامات به طور خود به خود هیدرولیز شده و یک مول آمونیاک و یک مول اسید کربنیک تشکیل می‌دهد (معادلات (۶) و (۷))[۸۷].

$$CO(NH_2)_2+H_2O \rightarrow NH_2COOH+NH_3 \quad (۶)$$

$$NH_2COOH+H_2O \rightarrow NH_3+H_2CO_3 \quad (۷)$$

پس از آن، این محصولات در آب به تعادل می‌رسند و بی‌کربنات تشکیل می‌دهند و دو مول آمونیوم و دو مول یون هیدروکسید تولید می‌شوند (معادلات (۸) و (۹))[۸۷]. سطح PH افزایش می یابد و به نوبه خود می‌تواند تعادل بی‌کربنات را تغییر دهد (معادله (۱۰)).

$$H_2CO_3 \rightarrow HCO_{3^-} + H^+ \quad (۸)$$

$$2NH^3 + 2\,H_2O \rightarrow 2NH_4 + 2OH^- (PH\text{افزایش}) \quad (۹)$$

$$CO_{3^-} + H + 2NH4^+ + 2OH^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + 2NH4^+ + 2\,H_2O \quad (۱۰)$$

با این حال، از طریق مسیر اورئولیتیک، تولید یون‌های آمونیوم منجر به انتشار اکسید نیتروژن به اتمسفر می‌شود. به طور کلی، این میزان در مقایسه با منابع معمولی آلودگی نیتروژن پایین است[۸۸] .تولید آمونیوم همچنین می‌تواند منجر به ایجاد نمک‌های آمونیوم شود که ممکن است سبب خوردگی تقویت کننده یا تبدیل آمونیوم به اسید نیتریک که می‌تواند به ساختار بتن آسیب برساند[۸۹].

۳-۳-۲- پلیمرها

برهم کنش سطحی مونومرهای پلیمری و زنجیره پلیمری، پلیمرها را در نتیجه پیوندهای شیمیایی و فیزیکی تولید می‌کند. تئوری این رابطه بین اتمی و بین مولکولی شامل موارد زیر است: ۱- پیوند یونی که جذب یون‌های مثبت و منفی است، ۲- پیوند کووالانسی از طریق تجمع جفت الکترون بین دو اتم و ۳- پیوند فلزی شامل الکترون‌های آزاد که از طریق جرم حرکت می‌کنند[۹۰]. در بتن، پلیمرهای ترموپلاستیک ضروری هستند، زیرا می‌توانند پس از قرار گرفتن در معرض دمای خارجی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای مجدداً پردازش شوند و برخلاف پلیمرهای ترموست، وضعیت خود را به مایع تغییر دهند[۹۱]. این برهمکنش چسبندگی بین بتن و پلیمرها است که کارایی در ترمیم ترک را فراهم می‌کند[۵۳]. یک تعریف معمولی از چسبندگی ارائه شده توسط استاندارد ASTM 907-55 بیان می کند که دو سطح توسط نیروهای سطحی که ممکن است متشکل از نیروهای ظرفیتی یا عمل بهم پیوسته یا هر دو باشد [۹۰] به هم متصل می‌شوند، بنابراین، برای ترمیم ترک موثر، چسبندگی پلیمر باید قوی تر از بتن باشد. در سال ۱۹۷۰، مالینسکی و همکاران [۹۲] برای اولین بار از پلیمرهای خود ترمیم شونده استفاده کردند که در یک ماده پلیمری ساخته شده بود. بعدها، محققان روش‌های مختلفی را با استفاده از پلیمرهای ترموپلاستیک برای خودترمیمی پلیمری اعمال کردند[۹۳, ۹۴]. در سال ۲۰۰۱، وایت و همکاران[۵۸] اولین کسانی بودند که روش ریزپوشانی را که شامل یک پوسته پلیمری و مواد هسته پلیمری بود، بررسی کردند. روش پیشنهادی آنها، تامین مواد ترمیمی بدون مداخله دستی بود که شامل یک کاتالیزور شیمیایی و عامل ترمیم کننده محصور شده - دی سیکلوپنتادین - و اوره فرمالدئید به عنوان ماده پوسته‌ای بود که در یک ماتریس جاسازی شده بود به طوریکه در حین پارگی کپسول، عامل ترمیم کننده آزاد شد و در تماس با کاتالیزور، پلیمریزاسیون ادامه می‌یابد. تا کنون مواد خود ترمیم شونده پلیمری توجه زیادی را به خود جلب کرده اند و رویکرد ریزپوشانی برای عوامل ترمیم کننده پلیمری یکی از موفق ترین و استراتژیک ترین رویکردها برای بتن خود ترمیم شونده است. در حال حاضر تحقیقات گسترده‌ای بر روی کپسوله‌سازی با پلیمرها به‌عنوان عامل ترمیم و مواد پوسته تأکید دارد[۵۷]. یک پارامتر مهم برای بازده رهاسازی عامل ترمیم کننده، ویسکوزیته پلیمر[۹۵] است که بر چسبندگی بین دیواره های ترک و عامل ترمیم کننده تأثیر می‌گذارد. بنابراین، شناسایی خواص رئولوژیکی به عنوان مثال، ویسکوزیته مواد ترمیمی مهم است.

در طول رهاسازی عامل ترمیمی، عوامل با چگالی بسیار کم در ترک نگهداری نمی‌شوند زیرا توسط منافذ موضعی جذب می‌شوند و همچنین برعکس، عوامل بسیار چسبناک نمی‌توانند به داخل شکاف ها جاری شوند[۹۶]. برای دستیابی به ویسکوزیته مورد نظر برای پلیمر، ون تیتلبوم و همکاران[۹۶] پلیمر را به مونومر متیل متاکریلات[1] (MMA) در پنج غلظت مختلف اضافه کرد تا ویسکوزیته را افزایش دهد در حالی که فیتیراو همکاران [۵۶]شتاب دهنده‌هایی را برای کاهش زمان واکنش و ایجاد کف برای پر کردن ترک‌ها اضافه کرد.

[1] Methyl Methacrylate

۳-۳-۳- سدیم سیلیکات

وجود سیلیکات سدیم در ماتریس بتن باعث واکنش شیمیایی با $Ca(OH)_2$ حل نشده برای تولید محصول اولیه هیدراتاسیون سیلیکات‌های کلسیم (C_2S و C_2S) می‌شود[۹۷]. محصول حاصل شده از سیلیکات سدیم و هیدروکسید کلسیم، ژل هیدرات سیلیکات کلسیم است (C-S-H) که با ژل C-S-H در طول هیدراتاسیون اولیه خمیر سیمانی یکسان است[۹۸]. ژل C-S-H ناشی از واکنش شیمیایی سیلیکات سدیم و هیدروکسید کلسیم با پر کردن ترک‌ها و منافذ، دوام و مقاومت بتن را افزایش می‌دهد. در حالی که این واکنش فیزیکی همزمان با وقوع ترک است، اما واکنش دیگری بین سدیم و هیدروکسید کلسیم در بتن رخ می‌دهد که ژل سدیم-سیلیکات-هیدروکسید (N-S-H) است که این ماده در بلندمدتبه عنوان مثال در طی یک سال تولید می‌شود[۹۹]. کندریک و همکاران[۱۰۰] نظریه ای را بیان کردند که شامل هیدروکسید کلسیم برای واکنش با میکروسیلیس و تشکیل ژل C-S-H، معروف به تری متیل سیلیلاتو تولید پلی ارگانوسیلوکسان است. از آنجایی که هیدروکسید سدیم در سیمان پرتلند وجود دارد و همچنین به عنوان یک فعال کننده قلیایی با میکرو سیلیس عمل می‌کند، ژل N-S-H (پلی ارگانوسیلوکسان ها) تولید می‌کند. نویسندگان پیشنهاد کردند که مراحل مختلف N-S-H ممکن است در بتن وجود داشته باشد واکنش شیمیایی که شامل تشکیل کلسیم - سیلیکات - هیدروکسید و سدیم - سیلیکات - هیدروکس است.

ژل C-S-H

$$Na_2O.SiO_2+Ca(OH)_2 \rightarrow X(CaO.SiO_2).H_2O+Na_2O \quad (۱۱)$$

$$X(CaO.SiO_2).H_2O+Na_2O+CO_2 \rightarrow CaCO_3+SiO_2+2NaOH \quad (۱۲)$$

ژل N-S-H

$$SiO2+4\ NaOH \rightarrow Na4\ SiO4+2\ H2O \quad (۱۳)$$

۳-۳-۴- منیزیم

استفاده از کانی ها در زمینه سیمانی می‌تواند تغییرات بالقوه ای را در خواص بتن به دلیل برهمکنش بین مواد معدنی و ذرات سیمانی هیدراته نشده ایجاد کند[۱۰۱]. در طول پنج دهه گذشته، اکسید منیزیم در بتن برای اهداف ترمیم خودکار استفاده شده است. ترمیم به دلیل تغییرات حجمی ناشی از هیدراتاسیون و کربناته شدن اکسید منیزیم در ماتریس سیمانی رخ می‌دهد که به طور بالقوه می‌تواند عرض ترک را کاهش داده و ترک ها را بهبود بخشد. واکنش‌های شیمیایی که اکسید منیزیم را در ماتریس سیمانی شامل می شود عبارتند از:

$$MgO+H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 \quad (۱۴)$$

$$Mg(OH)_2+CO_2+2H_2O \rightarrow MgCO_3.3H_2O \quad (۱۵)$$

کارایی فناوری‌های مختلف مواد ترمیم کننده با استفاده از عملکرد مکانیکی و دوام پس از بهبود در بخش بعدی مورد بحث قرار گرفته است.

۴- عملکرد مکانیکی

راندمان ترمیم در ماتریس سیمانی عمدتاً انواع مختلفی از مواد را در نظر می‌گیرد که برای اهداف ترمیم کنندگی و قابلیت بازیابی خواص مکانیکی تحت شرایط مختلف به کار می‌روند. روش‌های آزمایش مختلفی برای ارتباط متقابل عملکرد مکانیکی فن‌آوری‌های ترمیم کنندگی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد مکانیکی بتن معمولاً با اعمال نیروی ثابت و دقیق به بتن و نظارت بر پاسخ بتن ناشی از آن نیرو به دست می آید [۶۲]. روش‌های آزمایش مختلفی برای نظارت بر خواص مکانیکی بتن مانند آزمایش‌های خمشی، کششی، فشاری و غیر مخرب[1] (NDT) در نظر گرفته می‌شوند[۶۰, ۹۰, ۹۶, ۱۰۲]. چندین استاندارد برای آزمایش مقاومت خمشی موجود است از جمله AS1012.11 [۱۰۳] و BS-EN12390-5:2009 [۱۰۴]که نرخ بارگذاری را برای آزمایش خمشی سه نقطه و خمش چهار نقطه ای برای تعیین مقاومت خمشی و مدول الاستیک بتن در نظر می‌گیرد. محققان

[1] Non-Destructive Test

با آزمایش خمش سه نقطه ای، یک بریدگی در وسط بخش ترک خورده ایجاد کردند تا برمحل وقوع ترک تمرکزکنند و یک عرض ترک کنترل شده ایجاد شود[۹۵]. در عوض مطالعات دیگری نمونه‌ها را بدون ایجاد شکاف آزمایش کردند تا عملی‌ترین مقدار ترک را به‌دست آورند و کارایی کلی‌تر عامل ترمیم کننده را مشاهده کنند[۱۰۵- ۱۰۶]. روش دیگری برای ایجاد ترک در بتن، آزمایش شکافت کششی است[۱۰۷]. مطابق استانداردAS 1012.10-2000 ، یک نیروی قطری بر روی صفحه طولی یک نمونه استوانه ای تا زمان شکست اعمال می‌کند[۵۷]. آزمایش تراکم یک دیگر از رایج‌ترین آزمایشی است که محققان برای تعیین ویژگی‌های بتن اعمال می‌کنند[۱۰۸]. استاندارد ASTM C39-03 تست فشاری را اینگونه تعریف می‌کند: «اعمال یک بار محوری فشاری به سیلندرها یا هسته‌های قالب با سرعتی که در محدوده تعیین‌شده است تا زمانی که خرابی رخ دهد»[۱۰۹]. محققان از آزمایش فشاری به عنوان مرحله‌ای حیاتی برای مطالعه بهبودی در طول آزمایش‌های خود با اعمال نرخ‌های بار مختلف استفاده کرده‌اند[۱۱۰-۱۱۲]. در بتن سخت شده، پالس سرعت اولتراسونیک نیز می‌تواند برای تعیین مقاومت بتن و در نتیجه مدول دینامیکی الاستیسیته انجام شود [۱۱۳].

۴-۱- باکتریایی

استفاده از باکتری‌ها در ترمیم ترک بتن[۲۵] برای دستیابی به کارایی مقاومت بتن و بازیابی خواص مکانیکی به طور فزاینده‌ای محبوب شده است[۱۰۸]. در سال ۲۰۰۱، راماچاندران و همکاران. برای اولین بار استفاده از باکتری در خود ترمیمی بتن را بررسی کرد و پس از ۲۸ روز افزایش مقاومت فشاری ۱۲ درصد را تجربه کرد[۱۱۴]. در حالی که گوش و همکاران[۱۱۰] با همین روش ۲۵ درصد افزایش مقاومت فشاری برای ملات بتن به دست آورد و با این حال، با ارائه هاگ‌های باکتری کمتر از ۱ میلی متر به طور مستقیم در مخلوط بتن، طول عمر باکتری ها را کاهش داد[۱۸, ۲۵]. بنابراین محققان روش‌های مختلفی را برای انتقال باکتری به ماتریس سیمانی قبل از فعال‌سازی توسعه داده‌اند[۱۰۸]. ون تیتلبوم و همکاران[۸۲] از ژل سل لوازیل[1] به عنوان رویکردی برای محافظت از باکتری‌ها استفاده کردند، در حالی که وانگ و همکاران و بنگ و همکاران[۱۱۴, ۱۱۵] از پلی اورتان به عنوان تکنیکی برای بی حرکت کردن باکتری‌ها استفاده کردند.همچنین در آزمایش دیگری وانگ و همکارانش[۲۴] از کپسوله سازی برای محافظت از باکتری‌ها استفاده کرد. محققان از سنگدانه‌های سبک وزن[2] (LWA) و نانو پلاکت های گرافیت[3] (GNP) به عنوان حامل باکتری‌ها استفاده کردند[۱۱۶].

۴-۲- پلیمرها

پلیمرها به طور موثر در ترمیم ترک کارآمد هستند و بسیاری از مطالعات نشان دادند که قدرت مکانیکی مجدداً کامل یا جزئی رادارند[۱۰۵] که با موفقیت دوام سازه را افزایش می‌دهد و هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد[۴۵]. محققان اظهار داشتند که مواد سیمانی توانایی ترمیم ریز ترک‌ها را دارند و با استفاده از مواد پلیمری به عنوان عوامل ترمیم کننده ذخیره شده در میکروکپسول یا لوله‌ها، عموماً بازیابی نسبتا خوبی از خواص مکانیکی حاصل می‌شود[۷۲, ۱۱۷]. گریارت و همکاران[۱۰۶] پلیمرهای سوپرجاذب[4] کمتر از ۴۰۰ میکرومتر با محتوای ۰.۵٪ و ۱٪ را به سیمان اضافه کرد و به ترتیب به افزایش مقاومت خمشی ۸٪ و ۶٪ دست یافت.

۴-۳- سدیم سیلیکات

استفاده از سدیم سیلیکات در ابتدا به عنوان فعال‌کننده قلیایی در مواد سیمانی برای بهبود دوام و استحکام استفاده شده است[۳۷]. ژل C-S-H که از واکنش سیلیکات سدیم تشکیل شده است ، قابلیت پرکردن ریز ترک‌ها و منافذ را دارد و کارایی و استحکام ترمیم را بهبود می‌بخشد[۹۹]. کانلوپولوس و همکاران[۱۱۸] از سیلیکات سدیم در کپسول‌های لوله‌ای شیشه‌ای که در یک تیر بتنی

[1] Levasil sol gel
[2] Light Weight Aggregate
[3] Graphite Nano Platelets
[4] Superabsorbent polymers

قرار داده شده‌اند استفاده کرد. آنها به بازیابی ظرفیت بار ۱۷٪ و ترمیم ترک ۱۰۰٪ دست یافتند. در حالی که هوانگ و همکاران[۱۱۹] سیلیکات سدیم را در اسفنج‌های کوچکی و در کامپوزیت های سیمانی مهندسی شده (ECC) مخلوط شده اند ذخیره کرد.

۴-۴-منیزیم

اکسید منیزیم برای ترمیم بتن و بهبود راندمان مقاومت با مخلوط کردن آن در زمینه سیمانی استفاده شده است[۱۰۱]. محققان از روش‌های مختلفی برای گنجاندن اکسید منیزیم در مخلوط بتن استفاده کردند. قریشی و همکاران[۱۲۰] پودر اکسید منیزیم را مستقیماً با سیمان پرتلند مخلوط کردند سپس خاک رس بنتونیت را اضافه نمودند تا خاصیت تورمی خاک رس را بررسی کنند. در آزمایش دیگری[۳۴]، همان نویسندگان از اجزای مختلف اکسید منیزیم (M92-200 و N50) در نسبت‌های مختلف استفاده کردند و آنها را مستقیماً در مخلوط بتن مخلوط کردند. مشاهده شد که نسبت پایین اکسید منیزیم، مقاومت بالاتری را در هر دو جزء اکسید منیزیم (M92-200 و N50) ایجاد کرد. کانلوپولوس و همکاران[۱۴۱،۱۱۸] از پودر اکسید منیزیم در یک کپسول دو جداره که شامل یک لوله داخلی (قطر ۶.۱۵ میلی متر) با آب و یک لوله بیرونی (قطر ۱۱ میلی متر) بود که پودر اکسید منیزیم در آن قرار داشت، استفاده کرد. نمونه‌ها در شرایط محیطی رطوبت بالا و غوطه وری در آب نگه داشته شدند.

۵- روش‌های اندازه‌گیری راندمان ترمیم بتن

برای ارزیابی کارایی ترمیم بتن تحت شرایط متعدد و عوامل التیام‌دهنده، نیاز به روش‌های ارزیابی واضحی از جمله تحلیل‌های نوری و چشمی و قضاوت تحلیلی وجود دارد [۱۲۱]. ارزیابی پتانسیل خودترمیمی بتن به دلیل در دسترس بودن چندین روش ارزیابی جدید جذاب شده است [۵]. برخی از مطالعات نشان دادند که روش مناسب برای ارزیابی کارایی خود ترمیمی بتن با استفاده از اندازه گیری مقاومت، سختی و دوام است [۱۲۲]. ماهسواران و همکاران[۱۲۳] در مطالعه خود از باکتری باسیلوس سرئوس[1] استفاده کردند و آزمایش فشرده سازی برای ارزیابی کارایی التیام و بهبود مقاومت با مقایسه نمونه شاهد و نمونه ترک خورده با باکتری به عنوان عامل ترمیم انجام دادند.

به دست آوردن مقاومت مناسب بتن کار دشواری است، زیرا مقاومت بتن نه تنها به ساختار مواد بستگی دارد، بلکه به واکنش‌های مکانیکی در کامپوزیت‌های بتن نیز بستگی دارد[۱۲۲]. فرمیا و همکاران[۱۲۴] از سختی دو لوله سیمانی مختلف به نام های بوکاتینی[2] با قطر خارجی و داخلی به ترتیب ۵ و۲ میلی متر، ماچرونی با قطر خارجی وداخلی به ترتیب ۱۰ و۷.۵ میلی متر که هر طول هر دو لوله ۱۳۰ میلی متر بود ،به عنوان روشی برای ارزیابی کارایی استفاده کردند. یک اندازه گیری معمولی سختی، جابجایی باز شدن دهان ترک (CMOD) را نشان می داد. محققان به روش‌های مختلفی برای ارزیابی کارایی ترمیم دست یافتند. وانگ و همکاران[۵۹] هاگ‌های Bacillus sphaericus را در هیدروژل محصور کرد و آن را با ملات مخلوط کرد. نفوذپذیری آب برای این آزمایش به منظور ارزیابی کارایی بهبود در نتیجه پخش شدن $CaCo_3$ انجام شد. هوانگ و همکارش [۱۲۵] آزمایش نفوذپذیری گاز را برای ارزیابی کارایی ترمیم با استفاده از ۱٪ الیاف PVA و ۰.۷٪ وزن سیمان فوق روان کننده انجام دادند در حالی که جیانگ[۱۲۶] آزمایش جذب را طبق ASTM C-1585-04 برای ارزیابی کارایی عوامل ترمیم کننده مختلف انجام داد.

۵-۱ -تجزیه و تحلیل نوری

میکروسکوپ نوری و توموگرافی کامپیوتری روش‌های مرسومی هستند که برای ارزیابی کارایی و درجه مشخصه کارایی خود ترمیمی آسیب‌ها در نمونه‌های بتنی استفاده می‌شوند[۲۲]. چاهال و همکاران [۱۲۷]باکتری S. pasteurii را به عنوان عامل ترمیم برای نمونه‌های خود پذیرفتند و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی به نظر می‌رسید که مقدار قابل توجهی کلسیت در نمونه وجود دارد، بنابراین تایید کردند که کربنات کلسیم به دلیل وجود باکتری‌ها تشکیل شده است. کانلوپولوس و همکاران

[1] Bacillus cereus
[2] Bucatini

[۱۱۸] همچنین SEM را برای ارزیابی کارایی توانایی ترمیم چهار ماده معدنی مختلف اتخاذ کرد، که همه مواد معدنی کارایی درمان را تا حدی تایید کردند. با استفاده از پراش پرتو ایکس[1] (XRD)، مشاهده شد که مخلوط شاهد دارای کمترین شدت ترمیمی در بین تمام کانی‌ها بود، اگرچه به دلیل وجود اترینگات، میزان قدرت درترمیم و پر شدن ترک را نیز نشان داد. هوانگ و همکاران[۱۱۹] از سیلیکات‌های سدیم کپسوله شده و جاسازی شده در ECC استفاده کرد و پس از ۲۸ روز، از طیف سنجی پراکنده انرژی[2] (EDS) برای ارزیابی کارایی بهبودی استفاده کرد که نتایج نشان داد مقدار O، C، Si و Ca بالا بود و سهم Na/Si به صورت خطی با افزایش نسبت Ca/Si به دلیل تشکیل C-S-H و سیلیکات سدیم کاهش یافت.

۵-۲- تحلیل و آنالیز چشمی

کارایی بهبود نیز با تجسم ترک‌ها از میکروسکوپ نوری و تصاویر دیجیتال با وضوح بالا ارزیابی می شود[۲۲]. قریشی و الطبا [۳۴] تصاویری از MgO (N50 و M92) به دست آوردند و از ماکروسکوپ دیجیتال استریو نوع GXCAM ۱.۳ برای گرفتن تصاویر برای نقاط مورد نظر استفاده کردند.مطابق نتایج به دست آمده، بهبود ترک ها مشاهده شد و نشان داده شد که N50 نسبت به M92 در بهبود کارآمدتر است.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی ادبیات کارایی خود ترمیمی در مواد سیمانی، پدیده خود ترمیمی شامل ترکیبی از فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی پیچیده است. به طور کلی، بهبودی به دلیل واکنش ذرات هیدراته نشده در پیوند ماتریس سیمانی بین دیواره‌های ترک و مواد شیمیایی موجود اتفاق می‌افتد. خود ترمیمی مواد سیمانی شناسایی شده تحت فرآیند مستقل نیز می‌تواند شامل فرآیندهای خودبه خودی باشد، بنابراین روش‌های ترمیم بر روی ذرات سیمانی هیدراته نشده تمرکز دارند. رویکردهای رایج افزودن عوامل شفابخش به ماتریس سیمانی، در حال حاضر محدود به کپسوله کردن و بی حرکتی (به طور معمول)، سیستم آوندی (محدود) و در برخی موارد اختلاط مستقیم پلیمرهای سوپر جاذب به شکل پودر است. یکی از عامل های شفابخش جذاب، مواد باکتریایی است که توانایی زیادی در ایجاد رسوب کربنات کلسیم دارند. به طور معمول، به نظر می رسد Sporosarcina pasteurii یک فناوری بیولوژیکی مناسب برای خودترمیمی بتن است. با این حال، مواد شفابخش بیوتکنولوژیکی زمانی که همراه با یک حامل استفاده می‌شوند، نسبتاً کارآمد هستند، زیرا طول عمر باکتری زمانی که مستقیماً در ماتریس سیمانی قرار می‌گیرند کاهش می‌یابد.

پلیمرهای ترموپلاستیک به دلیل آزادسازی موثر پلیمر در داخل ترک و افزایش چسبندگی با دیواره‌های ترک، برای آزمایش‌های آوندی و کپسوله‌سازی کاربردی هستند. بازیابی قابل توجهی با استفاده از پلیمرهای ترموپلاستیک برای آب‌بندی ترک، بازیابی مقاومت و کاهش حجم حفره‌های نفوذپذیر حاصل می‌شود. با این حال، برای استفاده مؤثرتر از مواد پلیمری و تقویت پدیده‌های شفابخش، اغلب به یک جزء دوم برای واکنش با پلیمر و جامد شدن نیاز است. این جنبه به طور چشمگیری دشواری‌ها (و هزینه ها) مرتبط با روند ترمیم را افزایش می‌دهد. تحقیقات بیشتر نیاز به بررسی اثرات مضر احتمالی بر محیط زیست و سلامت انسان قبل از استفاده از قارچ‌ها به عنوان عامل ترمیمی برای مواد سیمانی دارد. کارایی ترمیم بتن با استفاده از ترکیبات شیمیایی به دلیل نتایج مطلوب واکنش شیمیایی بین مواد سیمانی غیرهیدرات و عوامل التیام‌دهنده امیدوارکننده به نظر می‌رسد. به عنوان مثال، بهبود قابل توجهی با استفاده از اکسید منیزیم به دلیل خاصیت تورم آن به دست می‌آید، بنابراین باعث کاهش عرض ترک و بهبود می‌شود. به طور معادل، سیلیکات سدیم با مواد سیمانی هیدراته نشده واکنش داده و ژل هیدرات سیلیکا کلسیم را تشکیل می‌دهد. از این رو بازسازی داخلی بتن از طریق مواد بتن مانند با راندمان ترمیم ترک بسیار خوب و بهبود مقاومت به دست می‌آید. کارایی فرآیند ترمیم در مواد سیمانی در فن‌آوری‌های شفابخش کنونی به اندرکنش بین ماتریس ماده التیام‌یافته و ویژگی‌های شیمیایی عامل شفابخش بستگی دارد. به نظر می‌رسد رویکردهای آزمایش مکانیکی به خصوص مبتنی بر مقاومت فشاری و خمشی، برای اثبات

[1] X-Ray Diffraction
[2] Energy Dispersive Spectroscopy

اثربخشی فرآیندهای بهبودی منجر به نتایج غیرقطعی با روندهای متعدد و متضاد یافته شده توسط محققان می‌شود. معمولاً آزمایش‌های مکانیکی برای تشخیص واکنش‌های شیمیایی که در داخل ترک اتفاق می‌افتد مانند عدم چسبندگی مواد پلیمری بین دیواره‌های ترک یا ژل تشکیل‌دهنده مواد سیلیسی، مناسب نیستند. در عوض رویکردهای ریزساختاری همبستگی خوبی را نشان داده‌اند. همچنین ثابت شده است که اندازه و هندسه ترک به دلیل رویکرد مکانیکی که توسط اکثر محققان برای ایجاد ترک اولیه در نمونه استفاده می‌شود، بر نتایج مطالعات بهبودی تأثیر می‌گذارد. ترمیم ترک‌های یکنواخت میکرو می‌تواند به طور قابل‌توجهی با بهبود ترک‌های ماکرو با عرض متغیر متفاوت باشد. قطعا در این زمینه به مطالعه بیشتری نیاز است. در نهایت، آزمایش‌های دوام هنگام ارزیابی راندمان ترمیم مهم‌تر هستند، زیرا آنها حداقل تأثیر را بر روی ماتریس داخلی ماده سیمانی در طول دوره آزمایش دارند. بنابراین می توان درک بهتر و سازگاری نتایج را به دست آورد.

این مقاله روش‌های مختلف خودترمیمی در بتن را مورد بحث قرار داد. یک طبقه بندی جامع ارائه شده است که روش‌های ممکن مورد استفاده برای طراحی بتن خودترمیم شونده با عوامل ترمیم‌کننده و کارایی متفاوت را پوشش می‌دهد.

۷- منابع

1.Danish, A., M.U. Salim, and T. Ahmed, Trends and developments in green cement "A sustainable approach". Sustainable Structures and Materials, an International Journal, 2019. 2(1): p. 45-60.

2.Abdullahi, M., Effect of aggregate type on compressive strength of concrete. International Journal of Civil and structural engineering, 2012. 2(3): p. 782.

3.Palanisamy, M., et al., Permeability properties of lightweight self-consolidating concrete made with coconut shell aggregate. Journal of Materials Research and Technology, 2020. 9(3): p. 3547-3557.

4.Muhammad, N.Z., et al., Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches. Construction and Building Materials, 2015. 101: p. 80-90.

5.Muhammad, N.Z., et al., Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. Construction and Building Materials, 2016. 112: p. 1123-1132.

6.Basheer, L., J. Kropp, and D.J. Cleland, Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. Construction and building materials, 2001. 15(2-3): p. 93-103.

7.Shaikh, F.U.A., Effect of cracking on corrosion of steel in concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018. 12(1): p. 1-12.

8.Yoo, D.-Y., et al., Self-healing capability of asphalt concrete with carbon-based materials. Journal of Materials Research and Technology, 2019. 8(1): p. 827-839.

9.Gardner, D., et al., A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. Case studies in construction materials, 2018. 8: p. 238-247.

10.Mihashi, H. and T. Nishiwaki, Development of engineered self-healing and self-repairing concrete-state-of-the-art report. Journal of Advanced Concrete Technology, 2012. 10(5): p. 170-184.

11.Hearn, N. and C. Morley, Self-sealing property of concrete—Experimental evidence. Materials and structures, 1997. 30(7): p. 404-411.

12.Li, V.C. and E. Herbert, Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. Journal of Advanced Concrete Technology, 2012. 10(6): p. 207-218.

13.Souradeep, G. and H.W. Kua, Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016. 28(12): p. 04016165.

14.Rajczakowska, M., et al., Self-Healing Potential of Geopolymer Concrete. Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings, 2019. 34(1): p. 6.

15.Dry, C., Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. Smart Materials and Structures, 1994. 3(2): p. 118.

16.Jonkers, H.M. and E. Schlangen. Crack repair by concrete-immobilized bacteria. in Proceedings of the first international conference on self healing materials. 2007.

17.Sangadji, S. and E. Schlangen, Self healing of concrete structures-novel approach using porous network concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 2012. 10(5): p. 185-194.

18.Van Tittelboom, K. and N. De Belie, Self-healing in cementitious materials—A review. Materials, 2013. 6(6): p. 2182-2217.

19.Han, B., X. Yu, and J. Ou, Self-sensing concrete in smart structures. 2014: Butterworth-Heinemann.

20.Li, V.C., Y.M. Lim, and Y.-W. Chan, Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. Composites Part B: Engineering, 1998. 29(6): p. 819-827.

21.Liang, F., S. Liu, and C. Wang, Editorial (Thematic Issue: Recent Progress on Molecular Recognition and Supramolecular Devices). Current Organic Chemistry, 2014. 18(15): p. 1935-1936.

22.De Rooij, M., et al., 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. Vol. 11. 2013: Springer.

23.Yang, Z., et al., A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. Cement and Concrete Composites, 2011. 33(4): p. 506-512.

24.Wang, J., et al., Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. Cement and concrete research, 2014. 56: p. 139-152.

25.Jonkers, H.M., et al., Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecological engineering, 2010. 36(2): p. 230-235.

26.Siddique, R. and N.K. Chahal, Effect of ureolytic bacteria on concrete properties. Construction and building materials, 2011. 25(10): p. 3791-3801.

27.Mihashi, H., et al., Fundamental study on development of intelligent concrete characterized by self-healing capability for strength. Transactions of the Japan Concrete Institute, 2000. 22: p. 441-450.

28.Qureshi, T., A. Kanellopoulos, and A. Al-Tabbaa, Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system for self-healing concrete. Construction and Building Materials, 2016. 121: p. 629-643.

29.Alghamri, R., et al., Preparation and polymeric encapsulation of powder mineral pellets for self-healing cement based materials. Construction and building Materials, 2018. 186: p. 247-262.

30.De Belie, N., et al., A review of self-healing concrete for damage management of structures. Advanced materials interfaces, 2018. 5(17): p. 1800074.

31.Li, H., Z.-q. Liu, and J.-p. Ou, Behavior of a simple concrete beam driven by shape memory alloy wires. Smart materials and structures, 2006. 15(4): p. 1039.

32.Qureshi, T. and A. Al-Tabbaa, Self-healing concrete and cementitious materials. 2020: IntechOpen London, UK.

33.Li, V.C. and E.-H. Yang, Self healing in concrete materials, in Self healing materials. 2007, Springer. p. 161-193.

34.Qureshi, T. and A. Al-Tabbaa, Self-healing of drying shrinkage cracks in cement-based materials incorporating reactive MgO. Smart Materials and Structures, 2016. 25(8): p. 084004.

35.Antiohos, S., et al., Influence of quicklime addition on the mechanical properties and hydration degree of blended cements containing different fly ashes. Construction and Building Materials, 2008. 22(6): p. 1191-1200.

36.Qureshi, T., A. Kanellopoulos, and A. Al-Tabbaa, Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing. Construction and Building Materials, 2018. 192: p. 768-784.

37.Giannaros, P., A. Kanellopoulos, and A. Al-Tabbaa, Sealing of cracks in cement using microencapsulated sodium silicate. Smart Materials and Structures, 2016. 25(8): p. 084005.

38.Amran, M., et al., Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review. Construction and Building Materials, 2021. 272: p. 121942.

39.Qureshi, T. and A. Al-Tabbaa. Influence of Expansive minerals on the Self-healing of Cement Paste and Mortar Systems. in Fifth International Conference on Self-Healing Materials. 2015.

40.Roig-Flores, M. and P. Serna, Concrete early-age crack closing by autogenous healing. Sustainability, 2020. 12(11): p. 4476.

41.Schlangen, E., N.t. Heide, and K.v. Breugel, Crack healing of early age cracks in concrete, in Measuring, monitoring and modeling concrete properties. 2006, Springer. p. 273-284.

42.Higgins, D., et al., Cementitious Materials: The Effect of GGBS, Fly Ash, Silica Fume and Limestone Fines on the Properties of Concrete. Concrete Society Technical Rep, 2011. 74.

43.Oliveira, A.d.S., et al., An overview of a twofold effect of crystalline admixtures in cement-based materials: from permeability-reducers to self-healing stimulators. 2021.

44.Byoungsun, P. and C.C. Young, Investigating a new method to assess the self-healing performance of hardened cement pastes containing supplementary cementitious materials and crystalline admixtures. Journal of Materials Research and Technology, 2019. 8(6): p. 6058-6073.

45.Wu, M., B. Johannesson, and M. Geiker, A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. Construction and Building Materials, 2012. 28(1): p. 571-583.

46.Talaiekhozani, A. and M.Z. Abd Majid, A review of self-healing concrete research development. Journal of Environmental Treatment Techniques, 2014. 2(1): p. 1-11.

47.Aldea, C.-M., et al., Extent of healing of cracked normal strength concrete. Journal of materials in civil engineering, 2000. 12(1): p. 92-96.

48.Huang, H., G. Ye, and D. Damidot, Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. Cement and concrete research, 2014. 60: p. 68-82.

49.Ma, H., S. Qian, and Z. Zhang, Effect of self-healing on water permeability and mechanical property of medium-early-strength engineered cementitious composites. Construction and Building Materials, 2014. 68: p. 92-101.

50.Barros, J.A., L. Ferrara, and E. Martinelli, Recent advances on green concrete for structural purposes. The Contribution of the Eu-fp7 Project Encore, 2017.

51.Li, W., et al., Preparation and properties of melamine urea-formaldehyde microcapsules for self-healing of cementitious materials. Materials, 2016. 9(3): p. 152.

52.Han, N.-X. and F. Xing, A comprehensive review of the study and development of microcapsule based self-resilience systems for concrete structures at Shenzhen University. Materials, 2016. 10(1): p. 2.

53.Joseph, C., et al., Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. Magazine of Concrete Research, 2010. 62(11): p. 831-843.

54.Van Tittelboom, K., et al., The efficiency of self-healing concrete using alternative manufacturing procedures and more realistic crack patterns. Cement and concrete composites, 2015. 57: p. 142-152.

55.Karaiskos, G., et al., Performance monitoring of large-scale autonomously healed concrete beams under four-point bending through multiple non-destructive testing methods. Smart Materials and Structures, 2016. 25(5): p. 055003.

56.Feiteira, J., E. Gruyaert, and N. De Belie, Self-healing of moving cracks in concrete by means of encapsulated polymer precursors. Construction and Building Materials, 2016. 102: p. 671-678.

57.Maes, M., K. Van Tittelboom, and N. De Belie, The efficiency of self-healing cementitious materials by means of encapsulated polyurethane in chloride containing environments. Construction and Building Materials, 2014. 71: p. 528-537.

58.White, S.R., et al., Autonomic healing of polymer composites. Nature, 2001. 409(6822): p. 794-797.

59.Wang, J., et al., Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. Construction and building materials, 2014. 68: p. 110-119.

60.Mostavi, E., et al., Evaluation of self-healing mechanisms in concrete with double-walled sodium silicate microcapsules. Journal of materials in civil engineering, 2015. 27(12): p. 04015035.

61.Dong, B., et al., Smart releasing behavior of a chemical self-healing microcapsule in the stimulated concrete pore solution. Cement and Concrete Composites, 2015. 56: p. 46-50.

62.Kanellopoulos, A., et al., Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: synthesis, characterisation and proof of concept. Smart Materials and Structures, 2017. 26(4): p. 045025.

63.Brown, E.N., et al., In situ poly (urea-formaldehyde) microencapsulation of dicyclopentadiene. Journal of microencapsulation, 2003. 20(6): p. 719-730.

64.Blaiszik, B., et al., Microcapsules filled with reactive solutions for self-healing materials. Polymer, 2009. 50(4): p. 990-997.

65.Grantham, M., Concrete Solutions: Proceedings of Concrete Solutions, 6th International Conference on Concrete Repair, Thessaloniki, Greece, 20-23 June 2016. 2016: CRC Press.

66.Li, W., Z. Jiang, and Z. Yang, Acoustic characterization of damage and healing of microencapsulation-based self-healing cement matrices. Cement and Concrete Composites, 2017. 84: p. 48-61.

67.Wang, X., et al., Experimental study on cementitious composites embedded with organic microcapsules. Materials, 2013. 6(9): p. 4064-4081.

68.Souza, L. and A. Al-Tabbaa, Microfluidic fabrication of microcapsules tailored for self-healing in cementitious materials. Construction and Building Materials, 2018. 184: p. 713-722.

69.Katoueizadeh, E., S.M. Zebarjad, and K. Janghorban, Investigating the effect of synthesis conditions on the formation of urea–formaldehyde microcapsules. Journal of Materials Research and Technology, 2019. 8(1): p. 541-552.

70.Xiong, W., et al., A novel capsule-based self-recovery system with a chloride ion trigger. Scientific Reports, 2015. 5(1): p. 1-6.

71.Calvo, J.G., et al., Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions. Construction and Building Materials, 2017. 138: p. 306-315.

72.Li, W., et al., Self-healing efficiency of cementitious materials containing microcapsules filled with healing adhesive: Mechanical restoration and healing process monitored by water absorption. PloS one, 2013. 8(11): p. e81616.

73.Carrera, E., Theories and finite elements for multilayered, anisotropic, composite plates and shells. Archives of Computational Methods in Engineering, 2002. 9(2): p. 87-140.

74.Khatir, A., Tehami, M., Khatir, S., & Abdel Wahab, M. (2016). Multiple damage detection and localization in beam-like and complex structures using co-ordinate modal assurance criterion combined with firefly and genetic algorithms. JOURNAL OF VIBROENGINEERING, 18(8), 5063–5073. .

75.Sangadji, S. and E. Schlangen. Feasibility and potential of prefabricated porous concrete as a component to make concrete structures self-healing. in International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering. 2011. RILEM Publications SARL.

76.Dry, C.M. Smart earthquake-resistant materials: using time-released adhesives for damping, stiffening, and deflection control. in 3rd International Conference on Intelligent Materials and 3rd European Conference on Smart Structures and Materials. 1996. SPIE.

77.Joseph, C., A. Jefferson, and M. Cantoni. Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials. in First international conference on self-healing materials. 2007.

78.Nishiwaki, T., et al., Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006. 4(2): p. 267-275.

79.Bekas, D., et al., Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques. Composites Part B: Engineering, 2016. 87: p. 92-119.

80.Speck, O., et al., Self-Healing Processes in Plants–A Treasure Trove for Biomimetic Self-repairing Materials. Faculty of Biology, University of Freiburg, Germany, 2013.

81.Zwaag, S., Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science. Vol. 30. 2008: Springer Science+ Business Media BV Dordrecht, The Netherlands.

82.Van Tittelboom, K., et al., Use of bacteria to repair cracks in concrete. Cement and concrete research, 2010. 40(1): p. 157-166.

83.Vijay, K., M. Murmu, and S.V. Deo, Bacteria based self healing concrete–A review. Construction and Building Materials, 2017. 152: p. 1008-1014.

84.Hammes, F., et al., Strain-specific ureolytic microbial calcium carbonate precipitation. Applied and environmental microbiology, 2003. 69(8): p. 4901-4909.

85.Boquet, E., A. Boronat, and A. Ramos-Cormenzana, Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon. Nature, 1973. 246(5434): p. 527-529.

86.Hamilton, W., Microbially influenced corrosion as a model system for the study of metal microbe interactions: a unifying electron transfer hypothesis. Biofouling, 2003. 19(1): p. 65-76.

87.Dick, J., et al., Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by Bacillus species. Biodegradation, 2006. 17(4): p. 357-367.

88.Seifan, M., A.K. Samani, and A. Berenjian, Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. Applied microbiology and biotechnology, 2016. 100(6): p. 2591-2602.

89.De Muynck, W., N. De Belie, and W. Verstraete, Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. Ecological engineering, 2010. 36(2): p. 118-136.

90.Sasse, H. and M. Fiebrich, Bonding of polymer materials to concrete. Matériaux et construction, 1983. 16(4): p. 293-301.

91.Nji, J. and G. Li, A biomimic shape memory polymer based self-healing particulate composite. Polymer, 2010. 51(25): p. 6021-6029.

92.Malinskii, Y.M., et al., Investigation of self-healing of cracks in polymers. Polymer Mechanics, 1970. 6(2): p. 240-244.

93.Dry, C., Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials. Composite structures, 1996. 35(3): p. 263-269.

94.Wool, R. and K. O'connor, A theory crack healing in polymers. Journal of applied physics, 1981. 52(10): p. 5953-5963.

95.Araújo, M., et al., Acrylate-endcapped polymer precursors: effect of chemical composition on the healing efficiency of active concrete cracks. Smart Materials and Structures, 2017. 26(5): p. 055031.

96.Van Tittelboom, K., et al., Methyl methacrylate as a healing agent for self-healing cementitious materials. Smart Materials and structures, 2011. 20(12): p. 125016.

97.Chen, J.J., et al., Solubility and structure of calcium silicate hydrate. Cement and concrete research, 2004. 34(9): p. 1499-1519.

98.Jennings, H.M., A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. Cement and concrete research, 2000. 30(1): p. 101-116.

99.Pelletier, M.M., et al., Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent. Cem. Concr. Res, 2011. 8: p. 1055.

100.Kendrick, D., J. Parsonage, and R. Vazifdar, Interaction of alkali and alkali earth metal hydroxides with microsilica. Cement and concrete research, 1998. 28(11): p. 1537-1544.

101.Homma, D., H. Mihashi, and T. Nishiwaki, Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites. Journal of Advanced Concrete Technology, 2009. 7(2): p. 217-228.

102.Gandhimathi, A. and D. Suji, Studies on the Development of Eco-friendly Self-healing Concrete-A Green Building Concept. Nature Environment and Pollution Technology, 2015. 14(3): p. 639.

103.Standard, B., Testing concrete. Recommendations for the, 1881. 7.

104.En, B., 12390-5: 2009–Testing hardened concrete. Flexural strength of test specimens, 2009.

105.Hilloulin, B., et al., Design of polymeric capsules for self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 2015. 55: p. 298-307.

106.Gruyaert, E., et al., Self-healing mortar with pH-sensitive superabsorbent polymers: testing of the sealing efficiency by water flow tests. Smart Materials and Structures, 2016. 25(8): p. 084007.

107.Australia, S., Methods of testing concrete-Determination of indirect tensile strength of concrete cylinders. 2000, AS.

108.Khaliq, W. and M.B. Ehsan, Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. Construction and Building Materials, 2016. 102: p. 349-357.

109.ASTM, C. C 39-99 Standard Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, West Conshohocken, PA. in American Society for Testing and Materials. 1999.

110.Ghosh, P., et al., Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. Cement and concrete research, 2005. 35(10): p. 1980-1983.

111.Park, S.-J., et al., Calcite-forming bacteria for compressive strength improvement in mortar. Journal of microbiology and biotechnology, 2010. 20(4): p. 782-788.

112.Jonkers, H.M. and E. Schlangen, Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach. Proceedings of FRACOS6: fracture mechanics of concrete and concrete structures. Catania, Italy, 2007: p. 1821-1826.

113.International, A., ASTM C597-02 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. 2002, ASTM International West Conshohocken, PA, USA.

114.Bang, S.S., J.K. Galinat, and V. Ramakrishnan, Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized Bacillus pasteurii. Enzyme and microbial technology, 2001. 28(4-5): p. 404-409.

115.Wang, J., et al., Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. Construction and building materials, 2012. 26(1): p. 532-540.

116.Wiktor, V. and H.M. Jonkers, Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. Cement and concrete composites, 2011. 33(7): p. 763-770.

117.Yang, Z., et al., Laboratory assessment of a self-healing cementitious composite. Transportation research record, 2010. 2142(1): p. 9-17.

118.Kanellopoulos, A., T. Qureshi, and A. Al-Tabbaa, Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites. Construction and Building Materials, 2015. 98: p. 780-791.

119.Huang, H., et al. Application of sodium silicate solution as self-healing agent in cementitious materials. in International RILEM conference on advances in construction materials through science and engineering. 2011. RILEM Publications SARL: Hong Kong, China.

120.Qureshi, T. and A. Al-Tabbaa. The effect of magnesia on the self-healing performance of Portland cement with increased curing time. in 1st International Conference on Ageing of Materials & Structures. 2014.

121.Malm, F. and C. Grosse. Efficiency of self-healing agents for cementitious materials characterized by NDT. in WCNDT, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016. 2016.

122.姜忠賢, Evaluation of autogenous healing ability of cementitious composites. 2012, 名古屋大学.

123.Maheswaran, S., et al., Strength improvement studies using new type wild strain Bacillus cereus on cement mortar. Current science, 2014: p. 50-57.

124.Formia, A., et al., Setup of extruded cementitious hollow tubes as containing/releasing devices in self-healing systems. Materials, 2015. 8(4): p. 1897-1923.

125.Huang, H. and G. Ye, Self-healing of cracks in cement paste affected by additional Ca2+ ions in the healing agent. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015. 26(3): p. 309-320.

126.Jiang, Z., W. Li, and Z. Yuan, Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. Cement and Concrete Composites, 2015. 57: p. 116-127.

127.Chahal, N., R. Siddique, and A. Rajor, Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. Construction and Building Materials, 2012. 28(1): p. 351-356.