

## مطالعه مروری بر ارزیابی روش‌های پرکاربرد خودترمیمی بتن

### جهت استفاده در زیرساخت‌های راه

#### مقاله علمی - مروری

ندا کامبوزیا\*، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
امیر سلیمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
حدیثه دولتی، دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [nkamboozia@iust.ac.ir](mailto:nkamboozia@iust.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۴۴-۲۱

#### چکیده

بتن ماده‌ای حساس به ترک بوده و در حین ساخت و طول عمر خود ترک‌ها و خرابی‌های متعددی را تجربه می‌کند. ترمیم ترک‌ها و خرابی‌ها در طول عمر سازه‌های بتنی بخصوص در مورد روسازی‌های بتنی، علاوه بر دشواری همواره هزینه‌های هنگفتی را با خود به همراه داشته و یکی از ایرادهای بنیادین روسازی‌های بتنی به شمار می‌رود. استفاده از بتن‌های خودترمیم شونده در زیرساخت‌های راه بتنی از لحاظ اقتصادی و عملکردی، می‌تواند راهکاری ایده‌آل در پوشش این ضعف بتن باشد. بتن‌های خودترمیم شونده در سال‌های اخیر معرفی شده و بر روی آن‌ها تحقیقاتی صورت گرفته است اما دشواری در اجرا روش‌های خودترمیمی در راه‌های بتنی باعث شده تا استفاده رایج از بتن‌های خودترمیم شونده در مقیاس گسترده در صنعت راهسازی به تاخیر بی‌افتد. در این مقاله، تعدادی از روش پرکاربرد در ایجاد خودترمیمی در بتن‌های متداول از جمله خودترمیمی خودکار، خودترمیمی ذاتی، خودترمیمی به کمک کپسولاسیون عامل ترمیم کننده و برخی افزودنی‌ها که قابلیت خودترمیمی در بتن ایجاد می‌کنند، بررسی و مقایسه گردیده تا مشخص شود که کدام روش عملکرد ایده‌آل‌تری در ترمیم ترک‌های بتن داشته و قابلیت صنعتی‌تر شدن بیشتری دارد تا بتوان از آن در ایجاد خودترمیمی در زیرساخت‌های راه‌های بتنی بهره برد. در نتیجه این مطالعه و مقایسه سطح بلوغ فناوری روش‌های ارائه شده در خودترمیمی بتن، مشخص گردید که کپسوله کردن عوامل ترمیم کننده در محفظه‌هایی مانند سنگدانه‌های متخلخل یا الیاف‌های طبیعی می‌تواند راهکاری ایده‌آل در ایجاد خودترمیمی در زیرساخت‌های راه‌های بتنی باشد.

واژه‌های کلیدی: بتن خودترمیم شونده، خودترمیمی خودکار، خودترمیمی ذاتی، روسازی بتنی

#### ۱- مقدمه

روسازی راه می‌یابند و منجر به تخریب گسترده لایه‌های زیرین روسازی می‌شوند. همچنین با گسترش ترک‌های ایجاد شده به سطح زیرین روسازی مسیری برای نفوذ عوامل مخرب به داخل لایه‌های زیرین به وجود می‌آید که منجر به تضعیف و تخریب کلی روسازی راه می‌گردد (Barbu & Stoian, 2021; Li et al., 2020). صنعت ساخت و ساز همواره در حال تغییر و تحول بوده و مصالح هوشمند جهت استفاده بهینه از منابع، بهبود

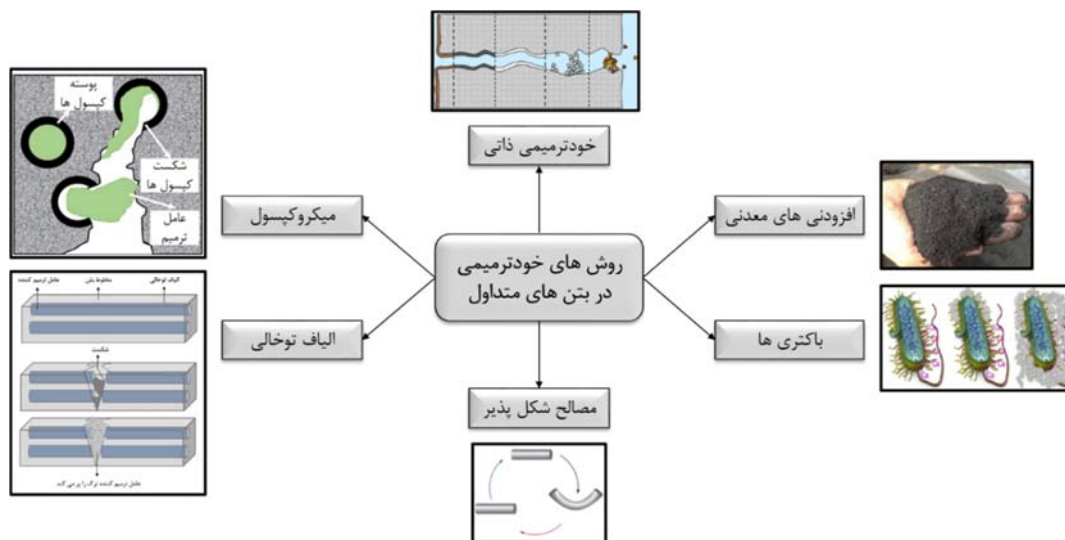
در سازه‌های بتنی شکل‌گیری ترک یکی از اصلی‌ترین دلایل خرابی به شمار می‌رود. بطور کلی بتن در طول عمر خود ممکن است تحت تنش‌های کششی دچار ترک شود. این ترک‌ها هنگامی رخ می‌دهند که بار اعمالی از مقاومت کششی بتن فراتر رود. همچنین روسازی‌های بتنی به علت افزایش روز افزون ترافیک عبوری همواره در معرض ترک خوردگی سطحی هستند که با افزایش بارهای وارده ترک‌های سطحی به سطح زیرین

با رها سازی این عامل در بتن صورت گیرد، در دسته مصالح خودترمیم شونده خودکار<sup>۳</sup> قرار می‌گیرند. در حالیکه اگر خودترمیمی در ذات آن مصالح باشد، می‌توان آن مصالح را هوشمند نامید و فرآیند ترمیم در دسته بندی خودترمیمی ذاتی<sup>۴</sup> طبقه بندی کرد. به طور مثال مصالح سیمانی دارای این خاصیت خودترمیمی ذاتی هستند، زیرا با قرار دادن نمونه بتنی در آب، سیمان هیدراته نشده با حباب‌های آب واکنش هیدراتاسیون داده و منجر به ایجاد خودترمیمی در بتن می‌گردد (Ghosh, 2009). در این مقاله، سعی شده تا با مروری بر مطالعات صورت گرفته در زمینه خودترمیمی بتن، شناخت واقعی تری نسبت به انواع روش‌های خودترمیمی در بتن و نحوه عملکرد ترمیم خرابی‌ها آن‌ها ارائه شود. از آنجا که در مطالعات صورت گرفته کمتر در مورد قابلیت اجرایی و صنعتی شدن خودترمیمی در روسازی‌های بتنی بحث شده است، در این مقاله با بررسی روش‌های موجود، بیشتر به امکان صنعتی شدن بتن‌های خودترمیم شونده و استفاده در صنعت روسازی بتنی راه پرداخته می‌شود.

## ۲- روش‌های متداول خودترمیمی در بتن

در دهه‌های اخیر، متدهای خودترمیمی متعددی در حوزه مصالح ساختمانی به کار گرفته شده‌اند که منجر به توسعه رویکردهای مختلف در این حوزه گردیده است. به عنوان مثال، استفاده از باکتری‌ها به عنوان عاملی ترمیم دهنده در مصالح (Shashank & Nagaraja, 2022) یا کارگذاری کپسول‌های حاوی عامل ترمیم کننده در داخل مصالح ساختمانی (Wang et al., 2021) و یا استفاده از متد سیستم عروقی (Sidiq & Gravina & Giustozzi, 2019) که این سیستم با تقلید از ساختار عروقی بدن انسان الگو گرفته شده است. علاوه بر این، موادی کاربردی مانند آلیاژهای حافظه دار (Abedinzadeh & Faraji Nejad, 2021) و پلیمرهای فوق جاذب آب (Snoeck et al, 2014) نیز جهت ترمیم ترک‌های بتن مورد استفاده قرار گرفته است که به صورت خلاصه در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در ادامه به معرفی و بررسی هر یک از این روش‌های خودترمیمی می‌پردازیم.

اثرگذاری و بهبود کیفیت ساختار سازه‌ها بکار گرفته می‌شود. افزایش طول عمر زیرساخت‌های راه بدون شک تاثیر فعالیت‌های بشر بر پایداری زیست بوم را کاهش می‌دهد. تلاش برای توجیه تحقیقات بنیادین و مخاطره آمیز با وعده حل مشکلات جدی زیست محیطی که امروزه جامعه با آن مواجه است، ممکن است کمی دور از ذهن به نظر برسد. اما با این حال نباید محققان را از شروع این تحقیقات باز دارد و چه بسا شروع نکردن این تحقیقات باعث بدتر شدن وضعیت شود. علاوه بر این، در صورت امکان بهبود کیفیت و عمر مفید سازه‌های بتنی سود بسیاری را برای عوامل اجرا و صنعت روسازی بتنی قابل تصور خواهیم بود. در سازه‌های بتنی، طراحی بتن به گونه‌ای است که در ابتدای عمر خود، مشخصات از پیش تعریف شده‌ای را برآورده کند. سپس طول عمر سازه‌ها از طریق برنامه‌های تعمیر و نگهداری نظارت شود. با این حال، اخیرا دانشمندان حوزه بررسی مصالح شروع به پذیرش این امر کرده‌اند که خودترمیمی در مصالح را در طول زمان مورد بررسی و ارزیابی قرار دهند (Schlangen & Joseph, 2009). سالانه ۱۲ میلیارد تن مصالح بتنی تولید می‌شود، تولید کربن در حین فرآیند تولید این میزان بتن می‌تواند تاثیرات مخربی بر تغییرات اقلیمی زیست بوم داشته باشد فلذا یکی از راهکارهای جلوگیری از این امر می‌تواند افزایش تولید سازه‌های بتنی پایدار به کمک خودترمیمی در بتن باشد (Hossain et al, 2022). خودترمیمی در بتن با ایجاد ترک در آن نمود پیدا می‌کند، در واقع با ایجاد شدن ترک یا شکاف در بتن، مکانیزم خودترمیمی در بتن فعال شده و ترک ایجاد شده در بتن ترمیم می‌شود تا از عمیق‌تر شدن ترک و تخریب سازه بتنی جلوگیری شود. با توجه به ماهیت خودترمیمی در مصالح، می‌توان فرآیند خودترمیمی را به دو حالت غیرفعال<sup>۱</sup> و فعال<sup>۲</sup> تقسیم بندی کرد. خودترمیمی در حالت غیرفعال در واقع بیانگر توانایی مصالح در واکنش به یک محرک خارجی بدون نیاز به دخالت انسان یا عاملی خارجی (مانند رطوبت یا حرارت) است، در حالیکه برای خودترمیمی مصالح در حالت فعال نیاز به مداخله انسان یا عاملی خارجی هست. در بتن‌هایی که قابلیت خودترمیمی به دلیل ایجاد یک عامل داخلی باشد، مانند کار گذاشتن چسب بتن یا عامل ترمیم شونده محصور شده، و ترمیم

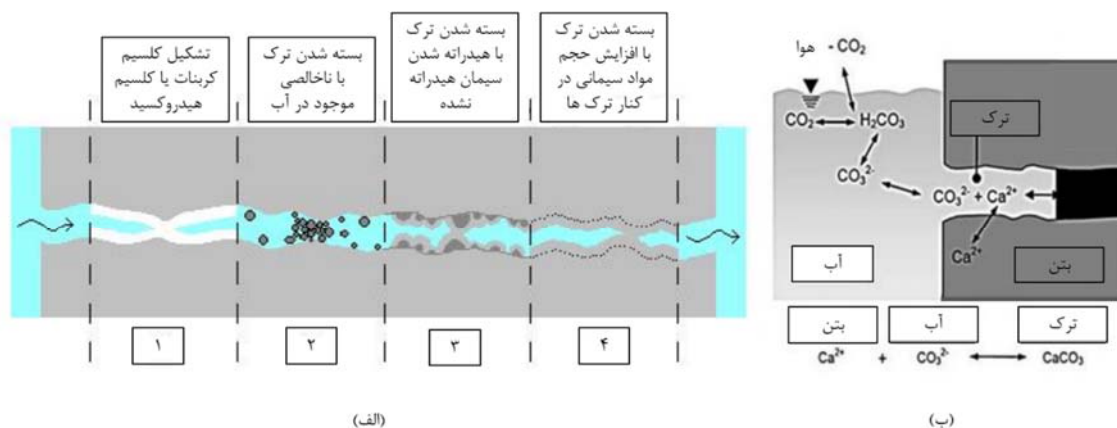


شکل ۱. انواع روش های خودترمیمی در بتن های متداول

## ۲-۱- روش خودترمیمی ذاتی

خودترمیمی ذاتی اولین و طبیعی ترین فرآیند خودترمیمی در بتن هست که مهمترین مکانیزم آن کربناته شدن هیدروکسید کلسیم (پورتلندیت) و ادامه هیدراتاسیون ذرات سیمان نیمه هیدراته است (De Rooij & Schlangen & Joseph, 2013). بطور معمول محیط های با رطوبت بالا برای انجام روش خودترمیمی ذاتی مساعد نبوده و برای این امر نیاز به ارتباط مستقیم با آب است (Roig-Flores & Serna, 2020). در فرآیند کربناته شدن کریستال های کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) در سطوح ترک به دلیل واکنش های شیمیایی بین  $\text{Ca}^{2+}$  موجود در بتن هیدراته و  $\text{CO}_2$  موجود در آب، ترک رسوب می کند. رسوب  $\text{CaCO}_3$  در طی ۳ الی ۵ روز اولیه ترمیم در آب قادر به کاهش نفوذپذیری آب در بتن ترک خورده بوده و مطابق با گزارش برخی مطالعات، بیشترین غلظت این رسوب بر روی سطح ترک گزارش شده است (Sisomphon & Copuroglu & Koenders, 2012). روش خودترمیمی ذاتی قادر خواهد بود تا ترک های با عرض حداقل ۰/۰۶ میلیمتر و حداکثر ۰/۳ میلیمتر را ترمیم کند (Wang et al., 2019). همچنین با غوطه ور سازی نمونه ها در آب با استفاده از روش خودترمیمی ذاتی، ترک با عرض ۰/۴۵ میلیمتر را در مدت زمان ۹۰ روز به طور کامل ترمیم می یابد (Yildirim et al., 2018).

یکی از موضوعاتی که در زمینه خودترمیمی ذاتی توجه ها را به خود جلب کرده استفاده از مواد سیمانی نظیر دوده سیلیسی، خاکستر بادی، سنگ آهک، متاکائولین و سرباره کوره بلند جهت بهبود عملکرد خودترمیمی ذاتی است. این مواد با توجه به ویژگی ذاتی خود در به تاخیر انداختن هیدراتاسیون و همچنین با توجه به ظرفیت باقی مانده این مصالح در لحظه ترک، می توانند خودترمیمی ذاتی را بهبود ببخشند (Darquennes et al., 2016; Na et al., 2012). همچنین مخلوط های با درصد سیمان یا مواد سیمانی بالاتر عملکرد بهتری در روش خودترمیمی ذاتی خواهند داشت. بطور کلی، خودترمیمی ذاتی می تواند در هر نوع ماده مبتنی بر سیمان رخ دهد اما برای موثر بودن این نوع خودترمیمی به شرایط خاصی از قبیل عرض ترک کمتر از ۰/۱۵ میلیمتر و وجود آب یا  $\text{CO}_2$  نیاز هست. رمضان و حداد (Ramadan & Haddad, 2017) قابلیت خودترمیمی و بازیابی خواص مکانیکی بتن خودمتراکم حاوی پودر سنگ آهک را با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی از جمله سن بارگذاری و محیط ترمیم (آب و هوا) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که بعد از ایجاد خرابی، نمونه هایی که جهت ترمیم در آب قرار داده شدند، دارای عملکرد ترمیم و بازیابی خواص مکانیکی بهتری نسبت به نمونه هایی که در هوا قرار گرفتند هستند.



شکل ۲. سازوکار روش خودترمیمی ذاتی (الف) در حالت عادی (ب) در حالت غرق آب (Wu & Johannesson & Geiker, 2012; Morsali et al., 2019)

Qian & Zhou (2020, Singh & Gupta) و نانو رس‌ها (Schlangen, 2010) اشاره کرد. این مواد جذب آب بالایی دارند و در صورت ایجاد ترک در بتن آب جذب شده را به صورت کنترل شده رها می‌کنند. مزیت اصلی این روش، افزایش سرعت ترمیم در مقایسه با ترمیم ذاتی است (Toledo Filho et al., 2005). پلیمرهای فوق جاذب آب<sup>۵</sup> (SAP) از جمله مواد خاصی هستند که اثرات ترکیبی را تجربه می‌کنند. پلیمرهای فوق جاذب آب، پلیمرهای دارای پیوند متقاطع با ظرفیت بالایی برای جذب سیالات هستند (He et al., ۲۰۱۹). این پلیمرها هنگامیکه مایعات را جذب می‌کنند، متورم شده و ژل نرم و نامحلولی تشکیل می‌دهند (Lee & Wong & Buenfeld, 2010). ظرفیت تورم این پلیمرها به شدت به محیط آن‌ها بستگی دارد. پلیمرهای فوق جاذب آب در محیط خنثی و اسیدی جذب آب بالایی دارند در حالیکه در محیط قلیایی به سختی می‌توانند آب جذب کنند (Kang & Hong & Moon, 2018). پلیمرهای فوق جاذب آب بطور تخمینی ۵۰۰ الی ۱۰۸۰ برابر جرم خود آب مقطر جذب می‌کنند و در طول اختلاط ملات ۱۰ الی ۳۰ برابر جرم خود آب جذب می‌کنند (He et al., 2019; Kang & Hong & Moon, 2018). توجه به خواص پلیمرهای فوق جاذب آب، زمان جذب آب در این پلیمرها از ثانیه تا دقیقه متغیر است (Snoeck et al., 2018; Hong & Choi, 2017). هنگامیکه پلیمرهای فوق جاذب آب به بتن اضافه می‌شوند، در طول قالب‌گیری و گیرش بتن به دلیل PH بالای بتن، پلیمرهای فوق جاذب آب جذب آب و افزایش حجم زیادی را تجربه نمی‌کنند. اگر بتن ترک

## ۲-۲- روش خودترمیمی خودکار

در سیستم خودترمیمی خودکار برخلاف سیستم خودترمیمی ذاتی، ترمیم با استفاده از عواملی صورت می‌گیرد که یا بطور مستقیم در مخلوط سیمانی مخلوط می‌شوند یا در یک سیستم کپسوله تعبیه می‌شوند که تا لحظه بهره برداری از آن‌ها محافظت شود (Han & Xing, 2016). فعال شدن عوامل ترمیم در این سیستم می‌تواند با ایجاد ترک یا تماس با هوا یا آب یا سایر عوامل وارد شده به بتن از طریق ترک باشد. اگر عامل ترمیم دهنده بدون محافظ در مخلوط گنجانده شود کارایی آن می‌بایست تا زمان ایجاد ترک حفظ شود. همچنین اگر عامل ترمیم کننده توسط کپسول محصور شده باشد، این کپسول‌ها می‌بایست بتوانند در فرآیند اختلاط مقاومت کنند. همچنین عامل ترمیم کننده می‌بایست بتواند بعد از رها شدن از کپسول‌ها در ترک جاری شود و آن را ترمیم کند (Sidiq et al., 2020). در این بخش به بررسی عواملی که در ترمیم خودکار ترک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند مانند آزاد سازی آب کنترل شده، افزودنی‌های معدنی، چسب‌های بتن و باکتری‌ها پرداخته شده است.

## ۲-۲-۱- رها سازی آب کنترل شده

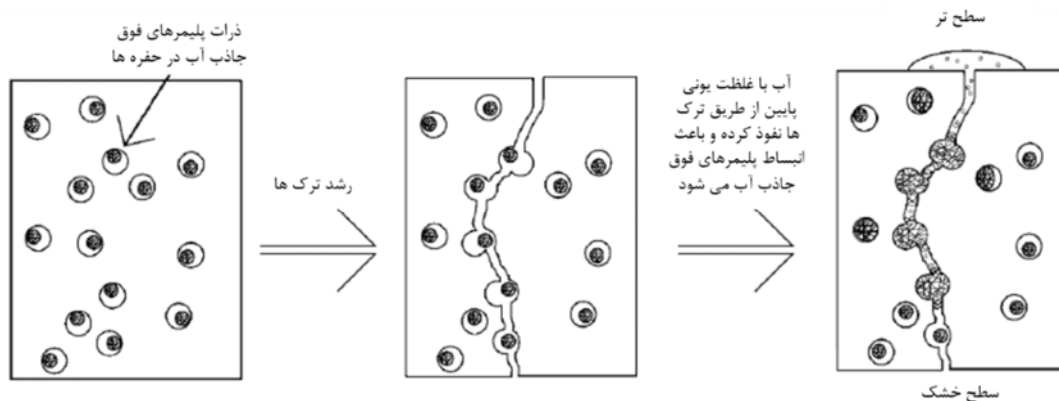
کپسوله کردن آب برای ایجاد خودترمیمی خودکار در بتن می‌تواند روشی کاربردی باشد. در این میان مواد جاذب آب می‌توانند به عنوان محفظه نگهدارنده آب عمل کنند. از جمله این مواد می‌توان به پلیمرهای فوق جاذب آب، الیاف‌های گیاهی

خورد و در تماس با آب قرار گیرد، دو واکنش که منجر به خودترمیمی در بتن می‌شود رخ می‌دهد. انسداد محل ترک توسط ژل تولید شده: پلیمرهای فوق جاذب آب، آب را جذب کرده و زلهایی تشکیل می‌دهند که می‌توانند ترک‌های ایجاد شده در بتن را پر کنند که این امر منجر به آب بند شدن ترک‌ها در بتن می‌شود که در شکل ۳ چگونگی این عملکرد نشان داده شده است. البته لازم به ذکر است که این اثر موقتی بوده و اگر سطح بتن خشک شود، آب جذب شده توسط این پلیمرها آزاد شده و SAPها منقبض می‌شوند. اگرچه در صورت جذب مجدد آب دوباره رشد کرده ترک را آب بند می‌کنند (Lee & Wong & Buenfeld, 2010).

کمک به بهبود ترمیم ذاتی بتن: آب جذب شده در SAPها به تدریج آزاد شده و با ذرات سیمان هیدراته نشده یا سایر مواد سیمانی، که در بخش ترمیم ذاتی به آنها اشاره شد، واکنش نشان داده و باعث ترمیم ذاتی بتن می‌شود.

دوز مورد مصرف پلیمرهای فوق جاذب آب در حالت خشک معمولاً بین ۰/۳ الی ۰/۶ درصد وزن سیمان است (He et al.,

2017; Hong & Choi, 2019). همچنین افزودن ۱ درصد SAP برحسب وزن سیمان می‌تواند نسبت آب به سیمان را از ۰/۳۵ به ۰/۴۳ افزایش دهد (Sisomphon & Copuroglu, 2013 & Koenders, 2013). یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار در خودترمیمی به واسطه پلیمرهای فوق جاذب آب اندازه این پلیمرها است. بطور معمول، پلیمرهای فوق جاذب آب با اندازه تقریبی ۵۰۰ میکرومتر در مقایسه با پلیمرهایی با ابعاد ۲۰۰ یا ۸۰ میکرومتر عملکرد بهتری در خودترمیمی از خود نشان می‌دهند و زمان واکنش کمتری دارند (Park & Choi, 2018). یکی از معایب اصلی پلیمرهای فوق جاذب آب حفره‌های هستند که توسط این پلیمرها در بتن ایجاد می‌گردند که در نهایت منجر به کاهش مقاومت فشاری در بتن می‌شوند (Hong & Choi, 2017). همچنین این پلیمرها در محیط‌های دریایی کارایی ندارند و ظرفیت تورم آنها بشدت در این محیط‌ها کاهش می‌یابد (Snoeck et al., 2014; et al Lee, 2010).



شکل ۳. مکانیزم انسداد ترک و آب بندی ترک توسط پلیمرهای فوق جاذب آب (Lee et al., 2010)

نشان داده و کریستال‌های غیرمحلولی را تولید می‌کنند که منجر به ترمیم ترک‌ها می‌شود. برخی مطالعات نشان می‌دهند که افزودنی‌های کریستالی از نقطه نظر بسته شدن ترک و جلوگیری از نفوذ آب به داخل بتن اندکی خودترمیمی را در بتن افزایش می‌دهند (Roig-Flores et al., 2016; Cuenca & Tejedor & Ferrara, 2018). اگرچه مطالعاتی نشان می‌دهد که به کار بردن این افزودنی منجر به بازیابی خواص مکانیکی در بتن نمی‌گردد (Escoffres & Desmetre & Charron,

۲-۲-۲- افزودنی‌های معدنی<sup>۶</sup> در این گروه می‌توان به عوامل ترمیم کننده مختلفی اشاره کرد. برخی از این عوامل را می‌توان بدون فرآیند کپسولاسیون به بتن اضافه کرد، اما برخی دیگر را باید کپسوله کرد تا در لحظه نیاز بتوانند عمل کنند. عوامل ترمیم دهنده در این بخش شامل مواد افزودنی کریستالی، مواد منبسط کننده و مواد مبتنی بر سیلیس است. افزودنی‌های کریستالی<sup>۷</sup> (CA) افزودنی‌های تجاری هستند که با رطوبت بتن تازه و محصولات هیدراتاسیون واکنش

دارا بود. کربناته شدن پرتلندیت منجر به بارش کلسیت به صورت فله یا در سطح ترک شد. در نتیجه، مشخص شد که با استفاده از مقادیر مناسبی از عوامل انبساط کننده و کربنات‌ها می‌توان خواص خودترمیمی برای ترمیم ترک‌ها را بطور قابل توجهی افزایش دهد. عوامل مبتنی بر سیلیس، در واکنشی مشابه به واکنش پوزولانی، ژلهایی را تشکیل می‌دهند که منجر به ترمیم ترک‌ها می‌شوند. پرمصرف‌ترین ماده در این روش سیلیکات سدیم است، همچنین در بعضی تحقیقات سیلیس کلئیدی نیز پیشنهاد شده است (Tan et al., 2015). همچنین سیلیکات سدیم یکی از پرمصرف‌ترین عوامل ترمیم در سیستم‌های خودترمیمی بر پایه میکروکپسول‌ها است. سیلیکات سدیم با خمیر سیمان در فعل و انفعالات پیچیده با هیدروکسید کلسیم، آلومینات کلسیم و فلزهای غیرهیدراته واکنش نشان داده که در نهایت منجر به تولید ژلهای ترمیم کننده ترک می‌شود (Cuenca & Tejedor & Ferrara, 2018). بطور کلی در اکثر مطالعاتی که سیلیکات سدیم به عنوان عامل ترمیم کننده مورد استفاده قرار گرفته، این محصول همواره به صورت کپسوله شده داخل بتن قرار گرفته و پس از ترک خوردن و رها شدن از میکروکپسول‌ها واکنش نشان داده و با تولید ژل ترک را ترمیم کرده است (Beglarigale et al., 2018). روش مورد بحث بسیار موثر بوده و برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که این روش قادر خواهد بود تا ترک‌های با عرض ۰/۲ میلی‌متر را بهبود بخشد، نفوذ پذیری آب را داخل بتن کاهش دهد و بازیابی خواص مکانیکی نمونه ترمیم یافته را بهبود بخشد (Sidiq et al., 2019). با این حال، افزایش درصد میکروکپسول‌ها در این روش می‌تواند با افزایش تخلخل در بتن مقاومت فشاری آن را کاهش دهد (Mao & Litina & Al-Tabbaa, 2020).

#### ۲-۳- چسب‌های بتن به عنوان عامل ترمیم کننده

چسب‌های بتن به دلیل قابلیت چسباندن سطوح بتن به یکدیگر می‌توانند به عنوان یکی از سیستم‌های خودترمیمی مورد استفاده قرار گیرند. بطور کلی، دو نوع چسب در این مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است: چسب‌های تک جزئی و چسب‌های چند جزئی. چسب‌های تک جزئی برای انجام فرآیند ترمیم نیاز به یکسری عوامل خارجی نظیر گرما یا رطوبت دارد. به همین علت چسب‌هایی که در معرض نور (Lv et al., 2020) (al, 2000) (Dry, 2000) و یا رطوبت (مانند

2018). بطور کلی طبق مطالعات انجام شده، افزودنی‌های کریستالی تنها در تماس با آب عملکرد مطلوبی دارند و همچنین برای ترمیم ترک‌های با عرض کمتر از ۰/۳ میلی‌متر موثر هستند (Roig-Flores et al., 2016).

از جمله مواد منبسط کننده کاربردی که توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است می‌توان به سولفو آلومینات کلسیم<sup>۹</sup> (CSA)، اکسید منیزیم (MgO)، اکسید کلسیم (CaO) و سولفات کلسیم (CaSO) اشاره کرد که به واسطه رفتار انبساطی که دارند مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. محققان با استفاده از CSA در ۱۰ درصد وزنی سیمان برای ترک‌های تا عرض ۰/۳ میلی‌متر شاهد عملکرد بهتری را از نقطه نظر بسته شدن ترک و جلوگیری از نفوذ آب به نسبت سایر مواد منبسط کننده بودند (Sisomphon & Copuroglu & Koenders, 2013).

در برخی از مطالعات جهت بهبود ترمیم ترک‌ها افزودنی‌های کریستالی و سولفو آلومینات کلسیم به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت. در یکی از این مطالعات افزودن ۱۰ درصد CSA و ۱/۵ درصد CA برحسب وزن سیمان منجر به ترمیم ترک‌های تا عرض ۰/۴ میلی‌متر شد (Sisomphon & Copuroglu & Koenders, 2013; Park & Choi, 2018). قریشی و همکاران (Qureshi et al., 2019).

در مطالعه‌ای ژئومواد، عوامل انبساط دهنده، مخلوط‌های شیمیایی به همراه ادغام آن‌ها را در بتن خودترمیم شونده مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، نمونه مرجع با نمونه حاوی ۱۰ درصد سیمان جایگزین شده توسط عوامل انبساطی شامل آهک و CaSO مقایسه شدند و مشخص شد که نمونه‌های دارای عوامل انبساط کننده، ممکن است کم و بیش باعث ترمیم ترک با عرض ۰/۲۲ میلی‌متر شوند. آسیپوتیس و همکاران (is Aspiot et al., 2021) اثر خودترمیمی چندین ترکیب از افزودنی‌های

مختلف (اسیدهای دی کربوکسیلیک، کربنات سدیم، افزودنی‌های منبسط کننده، دوده سیلیسی و الیاف) موجود در نمونه‌های بتن حاوی ترک مصنوعی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه اثر بخشی این عوامل در ترمیم بتن از طریق مشاهدات استریومیکروسکوپی<sup>۹</sup> و آزمایش‌های دوام مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با استفاده از این افزودنی‌ها می‌توان از بسته شدن ترک تا ۴۰۰ میکرومتر اطمینان حاصل کرد. همچنین ترکیب اسیدهای دی کربوکسیلیک و افزودنی‌های انبساطی با حفظ دانه‌های کلینکر واکنش نداده که ممکن است در مراحل بعدی هیدراته شوند، بهترین عملکرد را

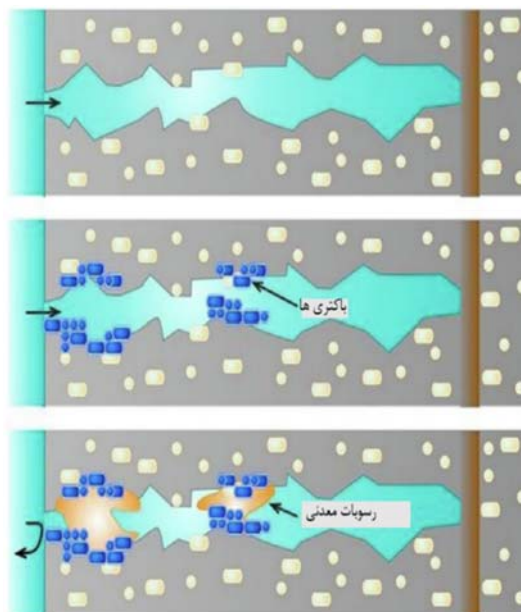
این روش که در نتیجه واکنش‌های بیولوژیکی در بتن رخ می‌دهد، به صورت طبیعی و فاقد هرگونه آلودگی است (Iheanyichukwu & Umar & Ekwueme, 2018). شکل ۴ روند شمانیک ترمیم ترک توسط باکتری‌ها را نشان می‌دهد (Joshi et al., 2017). سازوکار اساسی ترمیم ترک به وسیله باکتری بر این پایه است که باکتری‌ها مانند کاتالیزور عمل کرده و مواد آغازگر را به پرکننده‌ای مناسب تبدیل می‌کنند. سپس مواد تولید شده جدید بر پایه کربنات کلسیم رسوب می‌دهند و این مواد همانند سیمان زیستی عمل کرده و ترک را ترمیم می‌کنند (Dhami & Reddy & Mukherjee, 2012). پدیده، «رسوب کلسیت تحریک شده با باکتری»<sup>۱۱</sup> (MICP)، فرآیندی طبیعی و فاقد آلودگی زیست محیطی بوده که نخستین بار توسط گروه راماکریشنان ابداع گردید. این روش، از شاخه علمی بزرگتری به نام «زیست کانی سازی»<sup>۱۲</sup> نشئت گرفته است. از این پدیده که براساس قابلیت رسوب‌دهی کلسیت، به وسیله باکتری‌ها طراحی و ساخته می‌شود می‌توان جهت افزایش مقاومت فشاری و سختی نمونه‌های بتنی استفاده کرد (Bang & Galinat & Ramakrishnan, 2001; Jiang et al., 2024). روش رسوب کلسیت تحریک شده با باکتری واکنش‌های پیچیده بیوشیمیایی را شامل می‌شود که کارایی آن شدیداً تحت تاثیر عواملی نظیر تخلخل محیط، تعداد سلول‌های موجود و حجم مواد مغذی اضافه شده قرار گیرد. بافر فسفات یا اوره و ماده حاوی کلسیم مانند کلرید کلسیم می‌توانند به عنوان موادی مغذی بسیار مناسب استفاده شوند. باکتری در حضور این مواد مغذی موجب رسوب کلسیت می‌شود. PH، عامل مهمی در فعالیت یا عدم فعالیت باکتری‌ها در محیط بتن است. به عنوان مثال، مقدار بهینه PH محیط، برای رشد باسیلیوس پاستوری، حدوداً ۹ است که کاملاً قلیایی است. اسیدیته بالای محیط بتن با PH حدود ۲ تا ۵، مهمترین عامل در تاخیر در رشد باکتری است (Stanaszek-Tomal, 2020; Javeed et al., 2024).

سیانوآکریلات‌ها (Selvarajoo et al, 2020) یا پلی یورتان‌ها (Anglani & Tulliani & Antonaci, 2020) سخت می‌شوند، در دسته چسب‌های تک جزئی و به عنوان عامل ترمیم کننده معرفی می‌گردند. در این مکانیزم هنگامیکه ترک در بتن رخ دهد، قسمت ترک خورده بتن و چسب در معرض شرایط محیطی قرار گرفته و واکنش ترمیم شروع می‌گردد. چسب‌های چند جزئی برای انجام فرآیند ترمیم نیاز به افزودن دو عامل محصور شده داخل بتن را دارند. برخی از این عوامل که برای خودترمیمی در بتن استفاده می‌شوند شامل رزین اپوکسی‌های دو جزئی (Jimenez & Guerrero, 2015) یا چسب‌های تک جزئی هستند که به همراه یک کاتالیزور برای تسریع واکنش ترمیم داخل بتن قرار داده می‌شوند. بطور کلی این دو سیستم قابلیت ترمیم ترک‌های بزرگ حتی تا ۰/۳ - ۰/۵ میلیمتر را دارند و در چندین مطالعه عناصر ترمیم یافته حتی قادر به بازیابی خواص مکانیکی خود نیز بودند (Hu et al., 2018).

#### ۲-۲-۴- باکتری‌ها

یکی دیگر از مکانیزم‌های خودترمیمی بتن که مبتنی بر افزودن عاملی به مخلوط بتن جهت ایجاد خودترمیمی در بتن هست، خودترمیمی به واسطه باکتری‌ها است. بتن باکتریایی<sup>۱۳</sup> یا زیست بتن، بتنی است که با افزودن انواع باکتری به بتن بتواند ترک‌های ایجاد شده در بتن را بطور خودکار و بدون دخالت عامل خارجی ترمیم کند. در این بخش سعی شده است تا پتانسیل باکتری‌ها به عنوان عامل ترمیم دهنده در بتن مورد بررسی قرار گیرد. باکتری‌ها بطور طبیعی در همه جای کره زمین قابل یافت شدن هستند. بطور مثال، در رسوبات و سنگ‌ها در اعماق بیش از یک کیلومتر یا محیط‌های بشدت خشک و یا حتی در داخل سنگ‌ها می‌توان گونه‌های مختلفی از باکتری‌ها را یافت (Jorgensen & D'Hondt, 2006). این نوع باکتری‌ها می‌توانند برای مدتی طولانی بدون آب و مواد مغذی زنده بمانند. هنگام ایجاد ترک و نفوذ آب در ساختار بتن، باکتری‌های موجود فعال گشته و با تولید رسوب کربنات کلسیم ترک‌ها را به مرور زمان ترمیم می‌کنند.

پرستگاری و مصطفوی نژاد ( Parastegari & Mostofinejad, 2019) انجام شده است، نشان داده شده است که بتن‌های حاوی باکتری با PH بالا، منافذی با اندازه نسبتاً کوچک و محیطی نسبتاً خشک دارند. بنابراین، اگر محیط کشت حفاظت نشده باشد، باکتری‌ها در بلند مدت دوام نمی‌آورد و از بین می‌رود. یکی از راهکارهای محافظت از باکتری در بتن، ایجاد حباب‌های هوا است. این پژوهش اولین بار توسط پرستگاری و همکاران صورت گرفت و نتایج این پژوهش نشان داد که حباب‌های هوا ایجاد شده در بتن، کارایی باکتری را افزایش داده و با کاربرد باکتری‌ها در بتن هوادار و قرار دادن آن در کنار منبع کلسیم، عمق کرناسیون کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، دهقانی و حمزه (Dehghani & Hamzeh, 2021) خواص مکانیکی بتن خودترمیم شونده حاوی میکروارگانیسم‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. بتن حاوی میکروارگانیسم در دو غلظت مختلف باکتری باسیلیوس پاستوری و کلسیم لاکتات ساخته شدند و با بتن حاوی میکروسلیس، لاتکس و بتن شاهد مقایسه شدند. نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه از نظر استحکام فشاری، خمشی و کششی بررسی شدند و نتایج نشان داد که بتن حاوی میکروسلیس و عامل ترمیم کننده در مقایسه با سایر نمونه‌ها مقاومت فشاری بالاتر و مقاومت خمشی و کششی کمتری را داشتند. کیان و ژو (Tang & Xu, 2021) روشی سازگار با محیط زیست برای ترمیم ترک بتن ارائه دادند که مبتنی بر رسوب کرنات کلسیم ناشی از میکروپوست است. نتایج نشان داد که روش باکتری‌های تخمیر شده با اسپری پانتاسیل بالای برای تولید عوامل ترمیم کننده میکروبی بر پایه پودر و کپسول دارد. این عوامل در مقایسه با عوامل ترمیم مبتنی بر مایع، از نظر تولید، حمل و نقل، ذخیره سازی و استفاده راحت‌تر هستند و هیچ تاثیر منفی بر نسبت مخلوط و عملکرد بتن ندارد. سالم و همکاران (Saleem et al, 2021) در پژوهشی که بر روی خودترمیمی روسازی‌های صلب انجام دادند، با افزودن سنگدانه‌های حاصل از بازیافت آجر و باکتری‌های باسیلیوس به عنوان عامل ترمیم کننده توانستند علاوه بر ترمیم ترک‌های با عرض ۰/۹۲ میلیمتر، ۶۹ درصد استحکام اولیه نمونه‌های بتنی در مدت زمان ۷ روز را بازیابی کنند.



شکل ۴. روند ترمیم ترک بتن باکتریایی توسط باکتری‌های موجود در بتن (Joshi et al., ۲۰۱۷)

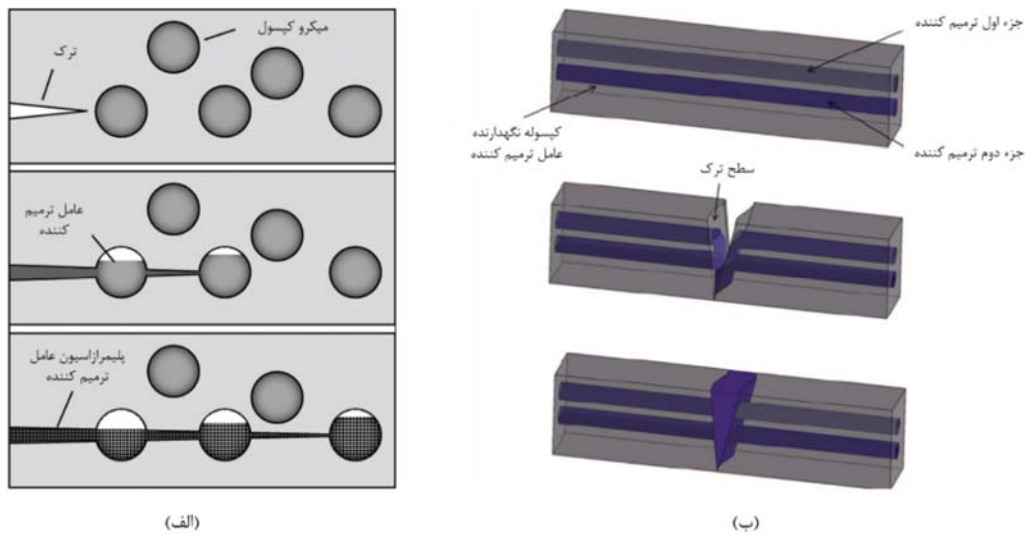
بطور کلی تاکنون باکتری‌هایی که در خصوص کاربردشان در بتن باکتریایی پژوهش صورت گرفته شامل؛ باسیلیوس پاستوری، باسیلیوس اسفیریکوس<sup>۳</sup>، اشریستا کلی<sup>۴</sup> و باسیلیوس سوبتیلیس می‌شوند. بیشتر این باکتری‌ها در فرآیندی که رسوبات کلسیتی را تولید می‌کنند، شرکت کرده و باعث بهبود خواص بتن می‌شوند (Tomal-Stanaszek, 2020).

در بیشتر پژوهش‌های انجام شده، از باکتری‌های باسیلیوس استفاده شده. این خانواده از باکتری‌ها از اوره، آمونیوم و دی اکسید کربن تغذیه کرده و کلسیم کرنات تولید می‌کنند (Yao, 2014). یکی از روش‌های افزایش دوام بتن و ترمیم ترک‌های موجود در آن، استفاده از روش‌های زیستی اضافه کردن باکتری به اب اختلاط بتن است. سینگ و همکاران (Singh, Kaur, Singh, 2020) با استفاده از محلول باکتریایی باسیلیوس در مخلوط بتن سعی در بهبود خواص مکانیکی بتن داشتند. از ذرات رس به اندازه ۱۰ میلیمتر به عنوان حامل باسیلیوس برای ترمیم ترک‌ها استفاده شد و تقریباً ۴۰ درصد ترمیم در ۶۳ روز مشاهده شد. بتن باکتریایی نه تنها به ترمیم ترک کمک می‌کند بلکه در برخی موارد مشاهده گردیده که استفاده از محلول باکتری باسیلیوس بر مخلوط بتن خواص مکانیکی آن را افزایش داده و تخلخل را به نسبت نمونه‌های بتن معمولی ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. در پژوهشی که اخیراً توسط

### ۳-۲- روش خودترمیمی بر پایه روش کپسوله کردن

سیستم‌های خودترمیمی موجود که توسط خرابی‌های تازه ایجاد شده مثل ترک‌ها شروع به کار می‌کنند، این توانایی را دارند که به صورت خودکار ترک را ترمیم کنند و در نتیجه آسیب‌های بعدی را به تاخیر بی‌اندازند یا از آن‌ها جلوگیری کنند. یکی از چالش‌های اصلی برای دستیابی به خودترمیمی در این روش، محافظت از عامل ترمیم کننده داخل بتن و فعال سازی آن تنها در زمان نیاز است. با این رویکرد، چندین تکنیک کپسوله سازی جهت ذخیره سازی عوامل شیمیایی و یا باکتری‌ها و استفاده آن در داخل بتن در حال توسعه هست. سیستم کپسوله سازی بسته به عامل ترمیم دهنده می‌تواند توسط یک جزء تعبیه شوند (اگر عامل ترمیم دهنده با حرارت، آب یا هوا واکنش نشان دهد) یا چند جزئی باشند. بطور کلی روش خودترمیمی به واسطه

کپسوله کردن را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم بندی کرد: کپسول‌های پراکنده در مخلوط بتن (که عمدتاً شامل میکروکپسول‌های بین ۲۰ تا ۸۰۰ میکرومتر هستند (Kanellopoulos et al., 2017)) و کپسول‌های کارگذاری شده در ساختار بتن (که عمدتاً لوله‌های شیشه‌ای و سرامیکی با طول بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر در این دسته قرار می‌گیرند (Van Tittelboom et al., 2015)). هر دو روش برای فعال شدن نیاز به شکست فیزیکی دارند. گروه اول به عنوان ترکیبی اضافه به مخلوط بتن اضافه می‌شود و روشی مناسب جهت ترمیم ترک‌های غیرقابل پیش بینی یا پراکنده است و روش دوم باید در یک مکان خاص و مانند میلگردهای تقویت کننده در بتن قرارگیرد و برای ترمیم ترک‌های قابل پیش بینی بهینه است. شکل ۵ مکانیزم ترمیم ترک به واسطه دو روش را نشان می‌دهد.



شکل ۵. مکانیزم خودترمیمی به روش کپسوله کردن (الف) میکروکپسول‌ها (ب) لوله‌های توخالی

(McDonald et al., 2019; Banea et al., 2014)

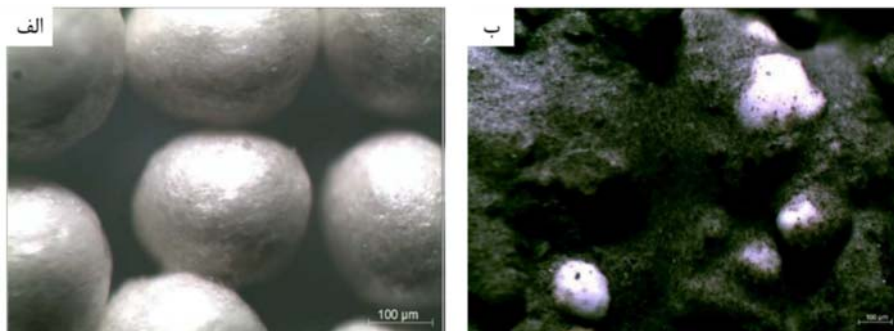
آمین به عنوان ماده ترمیم کننده بودند، خودترمیمی مخلوط حاوی اپوکسی را بررسی کردند. همچنین به منظور بررسی استحکام مکانیکی و گسیختگی این حباب‌های شیشه‌ای، آزمایش‌های میکروفشرده سازی بر روی یکی از این حباب‌ها شیشه‌ای صورت گرفت. نتایج ترمیم نشان دادند که بالاترین راندمان ترمیم ۶۲٪ در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد و بمدت ۲۴ ساعت و مربوط به درصد‌های ۱۲/۵ و ۱۵ درصد رزین اپوکسی بود. دیگر عوامل مهمی که بر روی این متد کارآمد است در پژوهشی توسط گیلفورد و همکاران (Gilford III et al., 2014) مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، اثرات پارامترهای آماده سازی مثل دما، سرعت ترکیب کردن ماده ترمیم کننده، PH بر ضخامت پوسته و قطر میکروکپسول‌ها و همچنین مکانیزم خودترمیمی در بتن از طریق آزمون‌های تجربی بررسی شد. در این پژوهش

### ۳-۲-۱- خودترمیمی به روش میکروکپسول‌ها

ایده خودترمیمی در این روش به این نحو است که میکروکپسول‌های در مسیر ترک، ترک می‌خورند و ماده ترمیم کننده داخل خود را در ترک ایجاد شده جاری می‌سازند که در نهایت منجر به ترمیم ترک شود. در انتخاب یک میکرو کپسول موثر باید به این امر توجه شود که دیواره میکروکپسول‌ها به حدی قوی باشد که در حین فرآیند اختلاط آسیب نبینند و بتواند پیوند خوبی با ماتریس بتن ایجاد کند (که در شکل ۶ نشان داده شده)، همچنین در هنگام بروز میکرو ترک دیواره این کپسول‌ها شکسته شود تا ماده ترمیم کننده در ترک جاری شود (De Belie et al., 2018). ژانگ و وانگ و یانگ (Zhang & Wang & Yang, 2014) با استفاده از حباب‌های شیشه‌ای توخالی شامل سوراخ‌های در حد میکرون که حاوی اپوکسی و

تجزیه و تحلیل پس از پردازش انتشار صوتی بیشتر استفاده شد و اثرات غلظت میکروکپسول‌ها و سطح پیش از آسیب بررسی شد. ماولودین و اوسیف (Mauludin & Oucif, 2018) رفتار شکست بتن خودترمیم شونده مبتنی بر روش کپسولاسیون را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، تاثیر کپسول‌ها از جمله نسبت حجمی و ضخامت پوسته به هسته بر ظرفیت حمل بار و احتمال شکست کپسول‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. کپسول‌ها از متیل متاکریلات ساخته شده‌اند و ترک‌های بالقوه توسط عناصر چسبیده از پیش درج شده با قوانین تنش و برش نرم در امتداد تمام مرزهای عنصر از جمله فصل مشترک بین فازهای مختلف نشان داده می‌شوند. نتایج نشان داد که نسبت ضخامت پوسته هسته کپسول تاثیر قابل توجهی بر استحکام نمونه ندارد اما تاثیر بسیار مهمی بر شکست کپسول دارد و هرچه نسبت ضخامت هسته به پوسته بیشتر باشد، تعداد کپسول‌های بیشتری می‌شکنند. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2021) میکروکپسول‌هایی با رزین فنلی آلزینات سدیم/ملامین به عنوان پوسته و رزین اپوکسی به عنوان پلیمرآزاسیون تهیه شد. با انجام طیف سنجی فروسرخ و تبدیل فوری و آنالیز کالری سنجی روبشی تقاضی، تغییرات گروه عملکردی و پایداری حرارتی میکروکپسول‌های کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت فشاری و عملکرد ترمیم نمونه‌های ملات سیمان با دوزهای مختلف میکروکپسول‌ها توسط آزمایش فشرده سازی تک محوری مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که وقتی درصد میکروکپسول‌ها ۴ درصد باشد، میکروکپسول‌ها بهترین عملکرد فشرده سازی را دارند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2021) با ترکیب مواد معدنی و سنگدانه‌های سبک با کرنات‌های داخلی با کارایی خودترمیمی در بتن را افزایش دادند. وانگ و همکاران در این مطالعه، سنگدانه‌های سبک وزن با استفاده از رزین اپوکسی کپسوله شدند. علاوه بر توصیف ساختار و عملکرد کپسوله سازی سنگدانه‌های سبک محصور شده بر خواص تازه، سخت شده و خودترمیم شونده بتن ترک خورده و محصولات ترمیم مورد بررسی قرار گرفت.  $CaCo_2$  به عنوان محصول اصلی ترمیم دهنده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان دادند که سنگدانه‌های سبک کپسوله شده خواص مکانیکی و توانایی نگهداری کرنات را بهبود بخشید. برای بتن حاوی افزودنی معدنی و سنگدانه‌های سبک محصور شده، درحالی‌که مقدار اسلامپ و زمان گیرش کاهش می‌یابد، مقاومت نمونه و مقاومت در برابر انتقال کلرید افزایش می‌یابد. راندمان ترمیم نرمال شده نواحی ترک و مقاومت و مخزن نگهدارنده به دست آمده از آنالیز طیف سنجی با ترکیب مواد معدنی و سنگدانه‌های سبک کپسوله شده به ترتیب، ۴۵/۶۹ و ۴۸/۷۱ و ۸۵/۳۳ درصد ترمیم را نشان می‌دهد. در اکثر مطالعات موفق مرتبط با استفاده از روش میکروکپسول‌ها، از درصد حجمی بالایی از میکروکپسول‌ها (در حدود ۴ الی ۷ درصد) استفاده شده که این امر می‌تواند برای سایر مشخصات بتن مانند استحکام بتن مضر باشد.

گیلفورد و همکاران دو ماده ترمیم کننده دی سیلیکو پتادین و سیلیکات سدیم مورد استفاده قرار گرفتند. براساس نتایج آزمایشات مشخص شد که با افزایش PH از ۳ به ۳/۷، ضخامت پوسته برای سیلیکات سدیم افزایش یافت، در حالی‌که ضخامت پوسته در PH برابر با ۳/۴ به حداقل مقدار خود برای دی سیلیکو پتادین رسید. تا به حال، کپسول‌های شیشه‌ای که نمی‌توانند در برابر فرآیند اختلاط بتن مقاومت کنند و بیشتر برای اثبات مفهومی در مقیاس آزمایشگاهی برای محصور کردن عوامل ترمیم کننده در بتن خودترمیم شونده استفاده شده‌اند. هیلولین و همکاران (Hilloulin et al., 2015) طراحی کپسول‌های پلیمری را ارائه کردند که قادر به مقاومت در برابر فرآیند اختلاط بتن هستند و می‌توانند با ظاهر شدن ترک بشکنند. سه پلیمر مختلف، پلی اسید لاکتیک<sup>۱۵</sup> (PLA) پلی استایرن<sup>۱۶</sup> (PS) و پلی متیل متاکریلات<sup>۱۷</sup> (PMMA) در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفتند. پرز و همکاران (Perez et al., 2015) در زمینه خودترمیمی به وسیله میکروکپسول‌ها، دو افزودنی خلاقانه در نظر گرفتند: میکروکپسول‌های سیلیسی حاوی اپوکسی و نانوسیلیسی حاوی آمین. اثر درصد افزودنی‌ها بر ریزساختار خمیر سیمان با دوده سیلیسی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان دادند که با افزایش درصد افزودنی‌ها، جهت گیری ترجیحی فاز پرتلنیدت همراه با کاهش مقاومت فشاری به دلیل وجود درصد جزئی از ماکرو منافذ و استحکام کم کپسول‌ها مشاهده می‌شود. دانگ و همکاران (Dong et al., 2016) برای توسعه خودترمیمی در مصالح سیمانی، از میکروکپسول‌های اوره فرمالدئید/اپوکسی با روش پلیمرآزاسیون درجا، که از رزین اپوکسی به عنوان ماده ترمیم کننده و رزین اوره فرمالدئید به عنوان پوسته میکروکپسول‌ها استفاده کردند. تاثیر میکروکپسول‌ها بر خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. راندمان ترمیم به ماکسیمم مقدار ۱۹/۸ درصد رسید. قریشی و همکاران (Qureshi et al., 2016) روش کپسوله کردن پودرهای معدنی (اکسید منیزیم، بنتونیت و آهک زنده) برای خودترمیمی ملات‌های پایه سیمانی را ارائه کردند. این سیستم از ماکروکپسول‌های شیشه‌ای برای پوشاندن مواد معدنی و آب(کپسول داخلی)، تشکیل شده. نمونه‌های آماده شده بعد از شکست اولیه تحت ۳ حالت مختلف عمل آوری قرار گرفتند؛ شرایط محیطی، قرار گرفتن در معرض رطوبت و غوطه‌ور شدن در آب. نتایج ترمیم نشان داد که حالت غوطه‌ور شدن در آب با ۹۵ درصد آب بندی ترک و ۲۵ درصد بازیابی استحکام در ۲۸ روز، بازده ترمیم بهینه را همراه دارد. لی و جیانگ و یانگ (Li & Jiang & Yang, 2017) از میکروکپسول‌های پلی اوره فرمالدئید حاوی رزین اپوکسی برای ترمیم کامپوزیت‌های سیمانی مورد مطالعه قرار دادند. فرآیند آسیب و ترمیم در محل توسط تکنیک انتشار صوتی<sup>۱۸</sup> (AE) شناسایی شد که در آن AE غیرفعال و AE فعال برای ارائه اطلاعات تکمیلی در مورد آسیب و تشکیل ترک ترکیب شدند. این دو سیگنال، نماینده ترک خوردگی ماتریس و جداسازی رابط، به عنوان کالیبراسیون برای



شکل ۶. مورفولوژی میکروکپسول‌ها (الف) قبل از اختلاط و (ب) بعد از اختلاط با مخلوط بتن (D, Yong et al., ۲۰۱۷)

نرخ بارگذاری بر میزان خودترمیمی بود. نتایج کیفی وقوع ترک جدید در بارگذار مرحله دوم را نشان دادند. انگیزه دراز مدت این پژوهش ارائه داده‌های مناسب برای توسعه یک مدل عددی برای فرآیند ترمیم خودکار در مصالح سیمانی بود. تیتلبوم و همکاران (Van Tittelboom et al., 2011) برای خودترمیمی بتن از ماده ترمیم کننده محصور شده در بتن استفاده کردند. در این پژوهش، با استفاده تو موگرافی کامپیوتری و مشاهده بصری صورت‌های ترک، پرشدن ترک توسط ماده ترمیم کننده مشاهده شد. نتایج نشان داد که بیش از ۵۰ درصد از استحکام و سختی اولیه بتن دوباره بازیابی شد و نفوذپذیری هم بدلیل ترمیم ترک کاهش یافت. در پژوهشی دیگر تیتلبوم و همکاران (Van Tittelboom et al., 2012) از لوله‌های سرامیکی پر شده از پلی اورتان برای ترمیم ترک‌ها بهره بردند. ترمیم ترک به واسطه این روش به اندازه ترمیم دستی ترک با رزین اپوکسی موثر بود و نتایج نشان داد که ۸۰ درصد استحکام اولیه بازیابی شد. مینبو و همکاران (Minnebo et al., 2017) سیستمی مبتنی بر سیستم عروقی، حامل ماده ترمیم کننده استفاده کردند. سیستم شبکه عروقی یکی از روش‌هایی است که شباهت زیادی به الیاف توخالی دارد و به نحوی روش الیاف توخالی از آن نشئت گرفته، این روش به تقلید از ساختار عروقی بدن انسان است. در این روش مجموعه‌ای جداگانه یا شبکه‌ای از لوله‌های توخالی در داخل بتن قرار می‌گیرند و مایع خودترمیم کننده از خارج به بتن تزریق می‌شود (شکل ۸). این سیستم شامل لوله‌هایی است که به یک قطعه توزیع پریتر سه بعدی متصل هستند. این سیستم دارای ۴ خروجی است که با لوله‌هایی متصل می‌شوند و دارای یک ورودی است که از بیرون قابل دسترسی است. مواد مختلفی برای عامل ترمیم کننده این سیستم در نظر

### ۲-۳-۲- خودترمیمی با استفاده از لوله‌های توخالی پر شده با ماده ترمیم کننده و سیستم شبکه عروقی<sup>۱۹</sup>

این روش برخلاف روش استفاده از میکروکپسول‌ها برای خرابی‌ها و ترک‌های قابل پیش بینی موثر بوده و کپسول‌ها و لوله‌های واقع شده در این روش نیاز چندانی به مقاومت در برابر فرآیند اختلاط ندارند زیرا همانند آرما تورگذاری این لوله‌ها قبل از ریختن بتن در قالب قرار می‌گیرند (شکل ۷). با این حال، این لوله‌ها همچنان باید ضربه‌های ایجاد شده در حین تراکم بتن را تحمل کنند. این روش دارای پتانسیل ترمیم بسیار بالایی است. بسیاری از نویسندگان با استفاده از انواع چسب بتن به عنوان عامل ترمیم دهنده محصور شده در لوله‌ها، به بازیابی عالی مشخصات بتن از جمله بازیابی خواص مکانیکی دست یافتند. درای (Dry, 1994) به عنوان اولین فردی که این متد را ابداع کرد در سال ۱۹۹۴ به ترمیم ترک‌ها در بتن با این روش پرداخت و در دو حالت فعال و غیرفعال این متد را بررسی کرد. تاو و همکاران (Thao et al., 2009) اثربخشی سیستم ترمیم کننده که با استفاده از کارگذاری لوله‌های شیشه‌ای توخالی با قطر داخلی ۴ و قطر خارجی ۶ میلی‌متر پر شده با رزین اپوکسی تک جزئی در بتن تقویت شده با مش فولادی، را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ترمیم به واسطه این روش با افزایش قدرت تقریباً ۳۰ درصد بیشتر از مقدار اولیه بدست آمد. برای محافظت در برابر شکستگی زودرس، لازم است یک لایه ملات ۶/۵ میلی‌متری به دور لوله شیشه‌ای پیچیده و قبل از ریختن تیر اصلی بمدت یک روز عمل‌آوری شود. جوزف و همکاران (Joseph et al., 2010) آزمایشات خودترمیمی را بر روی تیرهای بتنی حاوی حامل‌های شیشه‌ای پر شده با چسب انجام دادند. مطالعات در بارگذاری مرحله اول بیشتر متمرکز بر تاثیر سطح مسلح شده و

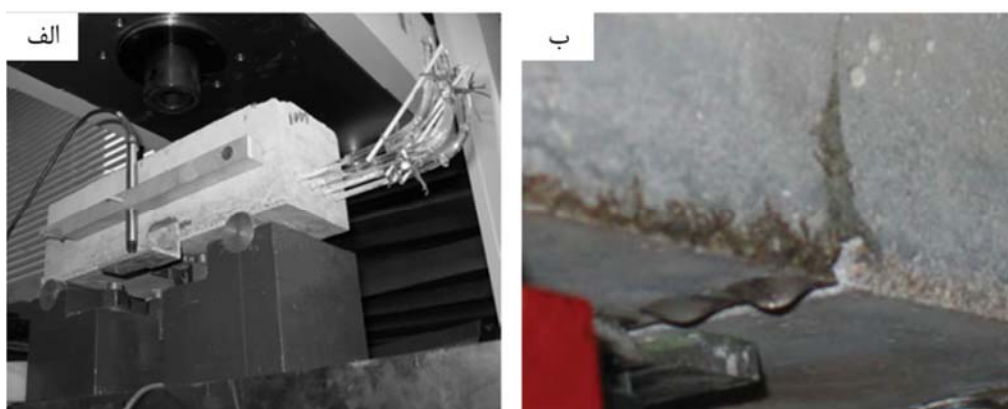
(Murugan & Vijayalakshmi & Aadhitya, 2019)

با استفاده از لوله‌های شیشه‌ای حاوی رزین اپوکسی خودترمیمی بتن را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش بتن خودترمیم شونده حاوی لوله‌های شیشه‌ای تحت آزمایش‌های سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت فشاری قرار گرفت که نتایج مطلوبی را ثبت کرد. سلیمی و کامبوزیا و محمد علیها (Salimi & Kamboozia & Mohammad Aliha, 2024) در مطالعه‌ای قابلیت خودترمیمی بتن غلطکی حاوی لوله‌های شیشه‌ای پر شده با رزین اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند که نتایج این مطالعه نشان داد بتن غلطکی حاوی لوله‌های شیشه‌ای پر شده با رزین اپوکسی در فاز آزمایشگاهی قادر به بازیابی درصد بالایی از خواص شکست خود بودند.

گرفته شده‌اند (مثل پلی متیل متاکریلات، نشاسته، سیمان، فسفات معدنی و آلومینا). آزمایش خمش سه نقطه و خمش چهار نقطه ثابت کرد که خودترمیمی با این سیستم شبکه عروقی امکان پذیر هست. ژیانگ هو و همکاران (Hu et al., 2018) با استفاده از لوله‌های شیشه‌ای از جنس کوارتز حاوی پلی اورتان تک جزئی رقیق شده با استون خودترمیمی در بتن را مورد آزمایش قرار دادند. در ابتدا ویسکوزیته، ناحیه پراکندگی، کشش سطحی و استحکام کششی پلی‌اورتان رقیق شده با استون مورد آزمایش قرار گرفت. سپس خواص مکانیکی بتن خودترمیم شونده با انجام آزمایشات خمش ۳ نقطه‌ای بررسی و راندمان ترمیم تعیین شد که در بهترین حالت این راندمان مقدار ۶۷ درصد ترمیم را گزارش داد. در پژوهشی دیگر، موروگان و همکاران



شکل ۷. کپسول‌های حاوی ماده ترمیم کننده در بتن (الف) قبل از بتن ریزی (ب) حین بتن ریزی (Van Mullem et al., ۲۰۲۰)



شکل ۸. مکانیزم خودترمیمی به روش سیستم شبکه عروقی (الف) شرایط آزمایش (ب) جاری شدن عامل ترمیم کننده پس از شکستن لوله‌ها (Schlangen & Joseph, ۲۰۰۹)

### ۲-۳-۳- انواع عوامل ترمیم کننده مورد استفاده در روش

#### کپسوله کردن

انتخاب عامل ترمیم کننده مناسب برای موفقیت متد خودترمیمی بسیار مهم است. در فناوری بتن های خودترمیم شونده چسب های مختلفی مورد استفاده قرار گرفتند که چندی از پرکاربردترین آن ها به شرح ذیل است.

#### -رزین اپوکسی

یکی از انواع پر کاربرد رزین ها در امر چسب بتن یا تقویت خودترمیمی، رزین های اپوکسی می باشند. رزین های اپوکسی با ویسکوزیته پایین در حال حاضر عامل اصلی ترمیم هستند که در ترمیم فعال مورد استفاده قرار می گیرد. رزین های اپوکسی مواد بادوامی هستند که عموماً مقاومت حرارتی و رطوبتی خوبی دارند. آن ها انواع مختلفی نظیر رزین اپوکسی های تک قسمتی یا دو قسمتی دارند، اپوکسی تک قسمتی که با اثر گرما فعال می شود و اپوکسی دو قسمتی که دارای یک قسمت هاردنر یا سخت کننده و یک قسمت رزین اپوکسی هستند. مشکل اصلی استفاده از رزین اپوکسی دوجزئی این است که هر دو جزء باید همزمان در محل ترک خوردن وجود داشته باشند، با توجه به اینکه هر دو مایع باید در کپسول قرار گیرند، احتمال وجود هر دو کپسول در محل ترک و ترک خوردن همزمان بسیار کم است (Van Mullem et al., 2020).

#### سیانوآکریلات

سیانوآکریلات ها یکی از اعضای خانواده چسب های بسیار قوی هستند، دارای سیستم های یک قسمتی هستند که به رطوبت واکنش نشان می دهند و با توانایی آن ها در ترمیم سریع شناخته می شوند. سیانوآکریلات ها مقاومت پیوندی را تشکیل می دهند که اغلب از مقاومت بستر فراتر میرود همچنین ویسکوزیته پایینی دارند. ویژگی مهم سیانوآکریلات ها در رابطه با کاربرد آن در بتن، اسیدی بودن محلول سیانوآکریلات است، زیرا در تماس با بتن که ماده ای قلیایی است (با PH تقریباً ۱۳) باعث خنثی شدن چسب می شود و در نتیجه زمان گیرش را سریع تر می کند. اگر چه این سریع بودن می تواند از پراکندگی مناسب عامل ترمیم در ترک جلوگیری کند. سیانوآکریلات به دلیل تاثیرات مکش گرانشی و خاصیت مویرگی به مناطق بزرگی از خرابی نفوذ می کند (Ghosh et al., 2009). یکی از نقطه ضعف های سیانوآکریلات ها سرعت عمل آوری سریع و ماندگاری کوتاه آن ها است. دی ناردی و همکاران (De Nardi et al., 2021)

سیانوآکریلات اصلاح شده با ماندگاری طولانی مناسب برای ادغام در یک سیستم خودترمیمی مورد مطالعه قرار دادند. یک سری n-ca از یک چسب تجاری اتیل سیانوآکریلات مخلوط با اسید آکریلیک<sup>۲۰</sup> (AA) و نیتروآنتراکینون<sup>۲۱</sup> (nAq) در نسبت های مختلف تشکیل شد. خواص مکانیکی و پلیمرزاسیون n-ca طی یک دوره عمل آوری ۷ الی ۲۱ روزه، از طریق یک سری آزمایش های کشش با استفاده از مکعب های ملات سیمان مورد ارزیابی قرار گرفت. در نتیجه تحقیقات n-ca با فرمولاسیون (Ca:AA:nAq) ۴:۱:۰.۲ افزایش قابل توجهی در استحکام کششی از ۱۴ به ۲۱ روز با مقدار حداکثر ۲/۶ مگاپاسکال نشان داد.

#### محلول قلیایی - سیلیسی

محلول قلیایی سیلیس در حضور اکسیژن هیدراتاسیون می شود و در نتیجه صفحات ترک اولیه را به هم پیوند می دهد. استحکام این پیوند از چسب کمتر است، اما استحکام پیوند از استحکام کششی مواد اطراف بیشتر است. همچنین استفاده از این عامل در بتن مشکلات سازگاری کمتری ایجاد می کند.

#### متیل متاکریلات

مایعی بی رنگ است که منشاء آلی دارد و یک متیل استر از اسید متاکریلیک و نوعی رزین با واکنش پذیری بالاست. از متیل متاکریلات چسبنده به عنوان یک عامل ترمیم کننده در بتن استفاده می شود که نتیجه استفاده از آن، بازسازی استحکام مکانیکی، افزایش شکل پذیری و ترمیم موثر ترک ها است. متیل متاکریلات با نئودکانوئیت کبالت به عنوان عامل ترمیم و هیدروپروکسید کومین به عنوان کاتالیزور مخلوط می شود.

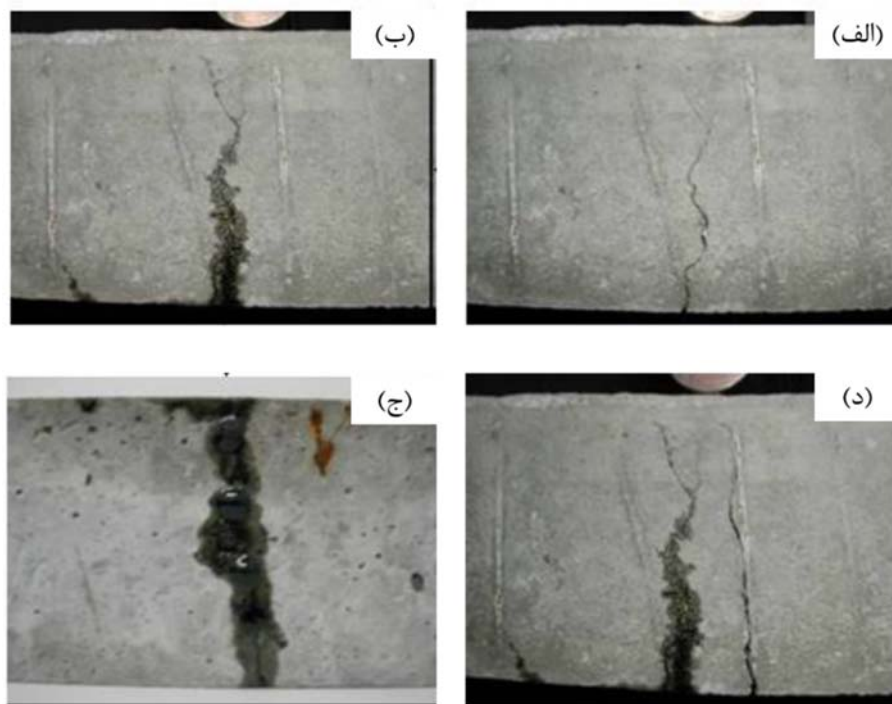
### ۳- مصالح شکل پذیر در خودترمیمی مصالح

#### سیمانی

یکی از مصالح معروف مورد استفاده در این بخش آلیاژهای حافظه دار<sup>۲۲</sup> (SMA) است که برخی خواص آن ها نظیر انعطاف پذیری و دوام و مقاومت در برابر خستگی، می تواند به خودترمیمی بتن کمک کند. این روش خودترمیمی با یک تماس فیزیکی به نمونه فعال می شود، خودترمیمی در این روش به دلیل دو ویژگی برگشت پذیری و فوق الاستیک بودن این آلیاژها صورت می گیرد. اثر برگشت پذیری آلیاژهای حافظه دار، به بازگشت به شکل اولیه نمونه های حاوی SMA بعد از اعمال حرارت کمک می کند و ویژگی فوق الاستیک بودن آن ها باعث بازگشت به حالت اولیه نمونه ها بعد از رفع بار وارده کمک

توخالی حاوی عامل ترمیم کننده را نشان می‌دهد. شو و همکاران (Xu & Hu & Xu, 2021) به منظور بهبود عملکرد خودترمیمی در درزهای انبساطی روسازی‌های بتنی، عملکرد کامپوزیت‌های متشکل از دی اکسید تیتانیوم و آلیاژهای حافظه دار پلی یورتان<sup>۳۳</sup> (SMPU/TiO) به عنوان پرکننده درز انبساطی روسازی بتنی مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین در این مطالعه اثر افزودن پلی کاپرولاکتون ترموپلاستیک<sup>۲۴</sup> (PCL) به عنوان عامل ترمیم کننده در این کامپوزیت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیقات نشان دادند که، کامپوزیت متشکل از دی اکسید تیتانیوم و آلیاژهای حافظه دار پلی یورتان عملکرد شکل پذیری مطلوبی در درز انبساطی روسازی بتنی داشته. همچنین افزودن PCL بیش از ۱۰ درصد منجر به کاهش عملکرد شکل پذیری این کامپوزیت شد. لذا مقدار بهینه CLP جهت استفاده به عنوان عامل ترمیم کننده در این کامپوزیت به مقدار ۱۰ درصد مشخص گردید.

می‌کند (Song & Ma & Li, 2006). آلیاژهای حافظه دار می‌توانند برای ارائه یک مکانیزم خودترمیمی ایده‌آل برای ترمیم ترک‌های بزرگتر، به صورت ترکیبی با الیاف‌های توخالی پر شده با عامل ترمیم کننده استفاده شوند. کوانگ و او (Kuang & Ou, 2008) با الهام از این ایده خودترمیمی در تیرهای بتنی حاوی سیم‌های با آلیاژ حافظه دار و الیاف توخالی پر شده با چسب اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. همانطور که انتظار می‌رفت، نمونه‌های حاوی سیم‌های با آلیاژ حافظه دار و الیاف توخالی پر شده با چسب اپوکسی نتایج ترمیم ایده‌آل‌تری را به نسبت نمونه‌های حاوی سیم‌های با آلیاژ حافظه دار بدون الیاف توخالی پر شده با چسب اپوکسی از خود نشان دادند. فلذا ترکیب سیم‌های SMA با الیاف توخالی حاوی عامل ترمیم کننده بطور قابل توجهی ترمیم را در سازه‌های بتنی افزایش می‌دهد اما هزینه ساخت آن‌ها را نیز بطور چشمگیری افزایش می‌دهد. شکل ۹، فرآیند ترمیم ترک در نمونه‌های حاوی سیم SMA و الیاف

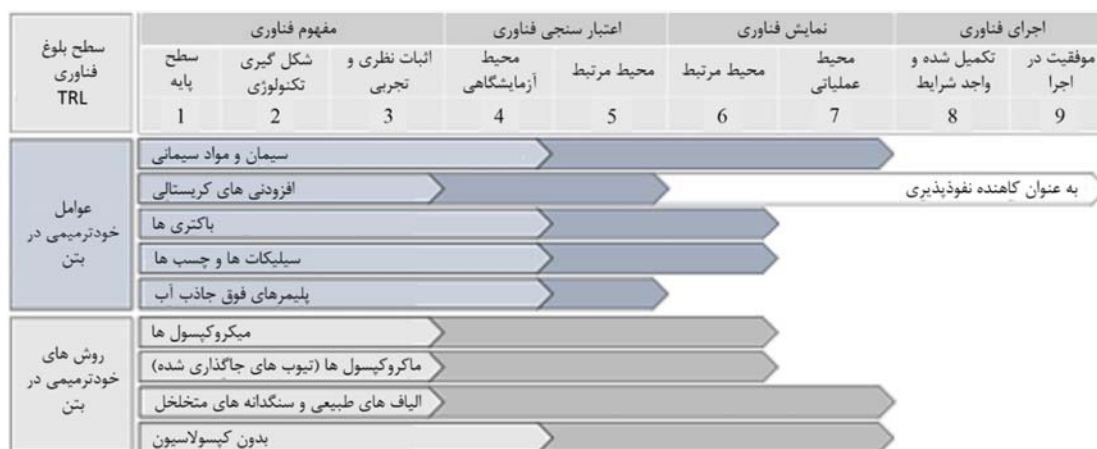


شکل ۹. فرآیند ترمیم ترک در نمونه‌های حاوی سیم‌های با آلیاژ حافظه‌دار و الیاف توخالی پر شده با عامل ترمیم کننده (الف) ایجاد ترک اولیه (ب) شکستن الیاف توخالی و جاری شدن عامل ترمیم کننده در ترک (ج) برداشتن بار وارده و بسته شدن ترک و ترمیم ترک توسط عامل ترمیم کننده (د) بارگذاری مجدد نمونه و ایجاد ترک در محلی جدید (Kuang & Ou, ۲۰۰۸)

#### ۴- سطح بلوغ فناوری‌های خودترمیمی در بتن

پایلوت مورد ارزیابی قرار دهند. با این حال رسیدن به سطوح بلوغ فناوری بالاتر نیازمند تجاری شدن این تکنولوژی‌ها و استفاده در پروژه‌های گسترده است که تا به امروز هیچ یک از تکنیک‌های خودترمیمی در بتن نتوانسته‌اند به این سطح بلوغ فناوری برسند. شکل ۱۰ محدوده سطوح بلوغ فناوری را برای تکنیک‌های مختلف خودترمیمی در بتن با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه خودترمیمی بتن را نشان می‌دهد (Roig-Flores & Formagini & Serna, 2021). همچنین جهت مقایسه بهتر روش‌های خودترمیمی در بتن، مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها به صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه گردیده است.

سطح بلوغ فناوری<sup>۲۵</sup> (TRL)، شاخصی عددی جهت تعیین بلوغ فناوری‌ها است. این شاخص عددی بین ۱ تا ۹ بوده و عدد ۹ بیانگر بالاترین سطح بلوغ فناوری و عدد ۱ بیانگر پایین‌ترین سطح فناوری است که بر اساس مستندات هر طرح به آن اختصاص داده می‌شود. در ارتباط با تکنیک‌های خودترمیمی در بتن، اغلب تکنیک‌های ارائه شده توسط محققان در مرحله آزمایشگاهی بوده و دارای سطح بلوغ فناوری برابر با ۴ هستند و برخی از آن‌ها از محیط‌های آزمایشگاهی خارج شده و در محیط‌ها آزمایشی کوچکی استفاده شده‌اند که این تکنیک‌ها دارای سطح بلوغ فناوری ۵ هستند و تنها تعداد اندکی از تکنیک‌های خودترمیمی سطح بلوغ فناوری ۶ و ۷ را کسب کرده‌اند و نتوانسته‌اند تکنولوژی‌های خودترمیمی را در سطح



شکل ۱۰. محدوده TRL برای عوامل و تکنیک‌های خودترمیمی در بتن‌های متداول (رنگ‌های روشن بیانگر مقادیر حداقل و رنگ‌های تیره بیانگر مقادیر حداکثر) (Roig-Flores & Formagini & Serna, 2021)

جدول ۱. مزایا و معایب روش‌های خودترمیمی در بتن (Wu et al., 2012)

معایب	مزایا	روش خودترمیمی
دشواری در بتن ریزی تأثیر منفی بر خواص مکانیکی بتن در صورت استفاده بیش از حد از الیاف توخالی	تزیق عامل ترمیم کننده در صورت لزوم قابلیت استفاده از مقدار زیادی عامل ترمیم کننده قابلیت ترمیم چندین باره	کپسوله سازی (تامین عامل ترمیم کننده از خارج نمونه)
دشواری در بتن ریزی تأثیر منفی بر خواص مکانیکی بتن در صورت استفاده بیش از حد از الیاف توخالی مشکل در رهاسازی عامل ترمیم کننده	رها سازی عامل ترمیم در صورت نیاز ذخیره سازی عامل ترمیم کننده قابلیت ترمیم موثر بیش از یک خرابی	کپسوله کردن عامل ترمیم کننده در داخل نمونه

دشواری تهیه میکروکپسول‌ها و بکار بردن آن‌ها در بتن مقدار محدود عامل ترمیم کننده پیوند بین میکروکپسول‌ها و مخلوط بتن اثر منفی بر خواص مکانیکی بتن در صورت بکار بردن تعداد زیاد میکروکپسول‌ها	رها سازی عامل ترمیم در صورت نیاز قابلیت ترمیم همزمان چندین محل خرابی قابلیت ترمیم موثر خرابی‌های متعدد	میکروکپسول
وقوع انقباض‌های ناخواسته در صورت ترمیم نامناسب مطمئن نبودن از تولید محصولات ترمیم مناسب در صورت نیاز دشواری بودن اثر بخشی ترمیم در وقوع خرابی‌های مختلف	اثر بخشی موثر ترمیم سازگاری مطلوب محصولات تولید شده ناشی از ترمیم با مخلوط سیمانی	مواد افزودنی منبسط شونده و افزودنی‌های معدنی
نیاز به برآورده کردن پیش نیازهای متعدد نیاز به محافظت از باکتری‌ها در بتن بازیابی خواص مکانیکی و ترمیم چندباره خرابی‌ها می- تواند نگران کننده باشد	روشی طبیعی، بدون آلودگی و فعالیت‌های زیستی	باکتری
هزینه بالا نیاز به حرارت بالا جهت فعال سازی فرآیند ترمیم می- تواند نگران کننده باشد	قابلیت کنترل ترک‌های در حد ماکرو نسبت بالای بازیابی خواص مکانیکی اثر بخش بودن تحت خرابی‌های متعدد	مصالح حافظه‌دار شکلی

#### ۴-۱- روش‌های ارزیابی خودترمیمی در بتن

در سال‌های اخیر روش‌های متعددی جهت ارزیابی خودترمیمی در بتن پیشنهاد شده است که علاوه بر تلاش‌های متعدد پژوهشگران مختلف جهت ارائه روشی در قالب استاندارد بین‌المللی جهت ارزیابی خودترمیمی در بتن، تا به امروز هیچ استاندارد جهت ارزیابی خودترمیمی در بتن منتشر نشده است. با توجه به مطالعات عمیق صورت گرفته توسط CAS<sup>1</sup>، روش‌های ارزیابی ترمیم را می‌توان به ۳ دسته کلی تقسیم بندی کرد که معیار این تقسیم بندی خواصی از نمونه‌های بتنی است که مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Ferrara et al., 2018).

#### ۴-۱-۱- بسته شدن ترک‌ها

پر کردن ترک‌ها یا به عبارتی دیگر بسته شدن ترک‌ها یکی از ساده‌ترین دستاوردهای خودترمیمی به حساب می‌آید که از ساختار ترمیم زخم در بدن انسان تقلید گردیده است. متدهای مورد استفاده در ارزیابی بسته شدن ترک شامل ارزیابی سطحی ترک و ارزیابی بسته شدن ترک‌های داخل نمونه بتنی از طریق اسکن نمونه است (Flores et al-Roig, 2016).

#### ۴-۲- نفوذ پذیری

یکی از اهداف اصلی خودترمیمی بتن، بهبود دوام سازه‌های بتنی است. از جمله مهم‌ترین سیالاتی که می‌تواند بتن را به خطر بی‌اندازد آب هست که ممکن است حاوی یون‌های مخرب برای بتن باشد که با نفوذ به نمونه‌های بتنی منجر به تخریب آن‌ها شود. همچنین نفوذ گازهایی از جمله کربن دی اکسید و اکسیژن نیز به داخل بتن می‌تواند دوام سازه‌های بتنی را به خطر بی‌اندازد. از آزمون‌های مورد استفاده جهت ارزیابی نفوذ این عوامل مخرب به بتن می‌توان به تست نفوذ پذیری (ایجاد جریان ناشی از اختلاف فشار) (Sisomphon & Copuroglu & Koenders, 2012; Roig-Flores et al., 2016)، تست انتشار (ایجاد جریان ناشی از اختلاف غلظت) (Darquennes et al., 2016) و تست جذب (ایجاد جریان ناشی از حرکت مویرگی از منافذ به سمت محیط) (Snoeck et al., 2018; Mao & Litina & Al-Tabbaa, 2020) اشاره کرد.

### ۴-۳- خواص مکانیکی

سنگدانه‌های متخلخل یا در بعضی موارد در لوله‌های شیشه‌ای و به کاربرد آن در بتن، سطح بلوغ فناوری بالاتری را به نسبت سایر روش‌های ارائه شده داشته و خودترمیمی به واسطه این روش می‌تواند تا چندین مرتبه سازه‌های بتنی آسیب دیده را ترمیم کند. بنابراین، به نظر می‌رسد این روش در مقایسه با سایر روش‌های خودترمیمی در بتن، دارای قابلیت صنعتی شدن بیشتری بوده و می‌تواند تأثیر مثبتی بر افزایش دوام و عمر روسازی‌های بتنی داشته باشد. با توجه به مطالعات محدودی که بر روی خودترمیمی روسازی‌های بتنی صورت گرفته، استفاده از روش ذکر شده بطور جامع در روسازی‌های بتنی، مخصوصاً بتن غلطکی که یکی از پرکاربردترین مصالح مورد استفاده در روسازی‌های بتنی است، مورد مطالعه قرار نگرفته است. به نظر می‌رسد که با ارزیابی جامع استفاده از این روش خودترمیمی در روسازی‌های بتنی بتوان گامی بزرگ در برطرف کردن یکی از ضعف‌های عمده روسازی‌های بتنی که دشواری و هزینه بر بودن تعمیر و نگهداری آن‌ها است برداشت.

### ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Passive
2. Active
3. Autonomous Healing
4. Autogenous Healing
5. Super Absorbent Polymers
6. Mineral Admixtures
7. Crystalline Admixture
8. Calcium Sulfo Aluminate  
(Ca<sub>4</sub>(AlO<sub>2</sub>)<sub>6</sub>SO<sub>4</sub>)
9. Stereo Microscope
10. Bacterial Concrete
11. Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation
12. Biomineralization
13. Bacillus Sphaericus
14. Escherichia Coli
15. Polylactic acid
16. Poly Styrene
17. Poly Methyl Methacrylate
18. Acoustic Emission
19. Vascular System
20. Acrylic acid
21. Nitro anthraquinone
22. Shape Memory Alloy
23. Shape memory polyurethane
24. Thermoplastic polycaprolactone
25. Technology Readiness Level
26. Cost Action Sarcos

یک فرآیند ترمیم کامل می‌تواند خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی را نیز ترمیم و بازیابی کند. در این زمینه می‌توان از آزمون خمشی (Restuccia et al., ۲۰۱۷)، آزمون کششی (Cuenca & Ferrara, ۲۰۲۰) و در بعضی موارد از آزمون فشاری (Wu et al., ۲۰۱۲) جهت ارزیابی بازیابی خواص مکانیکی نمونه‌ها بهره برد. با این حال، ارتباط این روش به صورت مستقیم با ترمیم ترک‌ها در بتن دشوار است. همچنین به دلیل دشواری بررسی وضعیت ترک‌ها در داخل نمونه‌های بتنی، آزمایش‌های غیرمخرب نیز جهت ارزیابی ترمیم پیشنهاد شده‌اند. این روش‌ها می‌توانند به طور غیرمستقیم چندین ویژگی از بتن را مورد ارزیابی قرار دهند. از جمله مهمترین این روش‌ها می‌توان به روش فرکانس تشدید (Yildirim & Sahmaran & Ahmed, 2015)، نفوذ یون کلرید (Wang et al., 2019)، سرعت پالس التراسونیک (Murugan et al., 2019)، انتشار آکوستیک (Van Tittelboom et al., 2015) و روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (Wang et al., 2021) اشاره کرد. بطور کلی، روش‌های ترمیم شامل ایجاد خرابی کنترل شده در نمونه، ارزیابی خواص نمونه (مانند عرض ترک یا خواص مکانیکی) قبل از ترمیم و ارزیابی این خواص بعد از فرآیند ترمیم است. اکثر محققان ارزیابی ترمیم را با مقایسه این خواص در قبل و بعد از ترمیم نمونه‌ها انجام می‌دهند.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی روش‌های متعدد خودترمیمی ارائه شده در سالیان اخیر در بتن‌های متداول جهت استفاده در روسازی‌های بتنی پرداخته شد. یکی از معایب اصلی سازه‌های بتنی دشواری تعمیر و نگهداری این نوع سازه‌ها است که در بعضی موارد دیده شده هزینه تعمیر و نگهداری این سازه‌ها از هزینه ساخت آن‌ها نیز فراتر رفته است. جهت صرفه جویی در هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی، مطالعات گسترده‌ای در زمینه افزایش دوام و طول عمر این نوع سازه‌ها صورت گرفت که عمدتاً در زمینه خودترمیمی بتن بوده و اکثر این مطالعات در فاز آزمایشگاهی باقی ماندند. دلیل اصلی این امر، هزینه بالای ساخت بتن‌های خودترمیم شونده نسبت به بتن‌های متداول بوده که منجر شد تا کاربرد بتن‌های خودترمیم شونده تنها در سازه‌هایی که از نظر ایمنی در درجات بالاتری قرار دارند نظیر تونل‌ها، سازه‌های دریایی، راهسازی و در سازه‌هایی که تعمیر و نگهداری آن‌ها دشوار است توجیه پذیر باشد. از دیدگاه قابلیت صنعتی شدن با توجه به سطح بلوغ فناوری ارائه شده برای روش‌های خودترمیمی در بتن، ادغام عامل ترمیم کننده در

- Cuenca, E.; Tejedor, A.; Ferrara, L. (2018). A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. *Constr. Build. Mater.* 179, 619-632.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.261**
- Darquennes, A., Olivier, K., Benboudjema, F., & Gagné, R. (2016). Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 113, 1017-1028.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.087**
- De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., & Jonkers, H. M. (2018). A review of self-healing concrete for damage management of structures. *Advanced materials interfaces*, 5(17), 1800074.  
**doi.org/10.1002/admi.201800074**
- De Nardi, C., Gardner, D., Cazzador, G., Cristofori, D., Ronchin, L., Vavasori, A., & Jefferson, T. (2021). Experimental investigation of a novel formulation of a cyanoacrylate-based adhesive for self-healing concrete technologies. *Frontiers in Built Environment*, 7, 660562.  
**https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.660562**
- De Rooij, M.R.; Schlangen, E.; Joseph, C. (2013). Self-healing phenomena in cementbased materials. RILEM State-of-the-Art Reports, vol 11. *Springer*, Dordrecht.
- Dehghani, H., Hamzeh, R., (2021). Mechanical properties evaluation of self-healing concrete containing microorganisms. *Modares Civil Engineering Journal*, Vol. 21, No. 1, 13-29.  
**https://mcej.modares.ac.ir/article-16-44218-en.html**
- Dhami, N. K., Reddy, M. S., Mukherjee, A., Improvement in strength properties of ash bricks by bacterial calcite. *Ecological Engineering*, Vol. 39, No. 1, (2012), 31-35.  
**doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.11.011**
- Dong, B., Fang, G., Wang, Y., Liu, Y., Hong, S., Zhang, J., & Xing, F. (2017). Performance recovery concerning the permeability of concrete by means of a microcapsule based self-healing system. *Cement and Concrete Composites*, 78, 84-96.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.005**
- Dry, C.M. (2000). Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing
- Abedinzadeh, R., & Faraji Nejad, M. (2021). Effect of embedded shape memory alloy wires on the mechanical behavior of self-healing graphene-glass fiber-reinforced polymer nanocomposites. *Polymer Bulletin*, 78(6), 3009-3022.
- Aspiotis, K., Sotiriadis, K., Ntaska, A., Mácová, P., Badogiannis, E., & Tsivilis, S. (2021). Durability assessment of self-healing in ordinary Portland cement concrete containing chemical additives. *Construction and Building Materials*, 305, 124754.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124754**
- Anglani, G.; Tulliani, J-M.; Antonaci, P. (2020) Behaviour of pre-cracked self-healing cementitious materials under static and cyclic loading. *Mater.* 13 (5), 1149.  
**doi.org/10.3390/ma13051149**
- Barbu, A. M., & Stoian, M. M. (2021). Innovative technologies in construction. Self-repairing concrete used in road infrastructure. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, *IOP Publishing*. Vol. 664, No. 1, 012082.
- Banea, M. D., da Silva, L. F., Campilho, R. D., & Sato, C. (2014). Smart adhesive joints: An overview of recent developments. *The Journal of Adhesion*, 90(1), 16-40.  
**doi.org/10.1080/00218464.2013.785916**
- Bang, S. S., Galinat, J. K., Ramakrishnan, V., Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 28, No. 4-5, (2001), 404-409.  
**doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00348-3**
- Beglarigale, A.; Seki, Y.; Demir, N.Y.; Yazıcı, H. (2018). Sodium silicate/polyurethane microcapsules used for self-healing in cementitious materials: Monomer optimization, characterization, and fracture behavior. *Constr. Build. Mater.* 162, 57-64.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.164**
- Cuenca, E.; Ferrara, L. (2020). Fracture toughness parameters to assess crack healing capacity of fiber reinforced concrete under repeated cracking-healing cycles. *Theor. Appl. Fract. Mech.* 106, 102468.  
**doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102468**

- Hong, G., & Choi, S. (2017). Rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers. *Construction and Building Materials*, 143, 366-375.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.133**
- Hossain, M. R., Sultana, R., Patwary, M. M., Khunga, N., Sharma, P., & Shaker, S. J. (2022). Self-healing concrete for sustainable buildings. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-9.  
**doi:10.1007/s10311-021-01375-9**
- Hu, Z.X.; Hu, X.M.; Cheng, W.M.; Zhao, Y.Y.; Wu, M.Y. (2018). Performance optimization of one-component polyurethane healing agent for self-healing concrete. *Constr. Build. Mater.* 179, 151-159.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.199**
- Iheanyichukwu, C. G., Umar, S. A., & Ekwueme, P. C. (2018). A review on self-healing concrete using bacteria. *Sustain. Struct. Mater. Int. J.*, 1, 12-20.
- Javeed, Y., Goh, Y., Mo, K. H., Yap, S. P., & Fen, L. B. (2024). Microbial self-healing in concrete: A comprehensive exploration of bacterial viability, implementation techniques, and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*.  
**doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.261**
- Jiang, L., Li, P., Wang, W., Zhang, Y., & Li, Z. (2024). A self-healing method for concrete cracks based on microbial-induced carbonate precipitation: bacteria, immobilization, characterization, and application. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 13(2), 222-242.  
**doi.org/10.1080/21650373.2023.2263447**
- Jiang, W., Zhou, G., Wang, C., Xue, Y., & Niu, C. (2021). Synthesis and self-healing properties of composite microcapsule based on sodium alginate/melamine-phenol-formaldehyde resin. *Construction and Building Materials*, 271, 121541.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121541**
- Jiménez, I.; Guerrero, A. (2015). Synthesis and characterization of epoxy encapsulating silica microcapsules and amine functionalized silica nanoparticles for development of an innovative self-healing concrete. *Mater. Chem. Phys.* 165, 39-48.  
**doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.08.047**
- chemicals into concrete to reduce permeability. *Cem. Concr. Res.* 30 (12), 1969-1977.  
**doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00415-4**
- Dry, C. (1994). 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*, 3(2), 118.
- Escoffres, P.; Desmettre, C.; Charron, J.P. (2018). Effect of a crystalline admixture on the self-healing capability of high-performance fiber reinforced concretes in service conditions. *Constr. Build. Mater.* 173, 763-774.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.003**
- Ferrara, L.; Van Mullem, T.; Alonso, M.C. Antonaci, P.; Borg, R.P.; Cuenca, E.; et al. (2018). Experimental characterization of the self-healing capacity of cement-based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2. *Constr. Build. Mater.* 167, 115-142.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.143**
- Ghosh, S. K. (Ed.). (2009). Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications, Vol. 18, *Weinheim, Wiley-vch*.
- Gilford III, J., Hassan, M. M., Rupnow, T., Barbato, M., Okeil, A., & Asadi, S. (2014). Dicyclopentadiene and sodium silicate microencapsulation for self-healing of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(5), 886-896.  
**doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000892**
- Han, N. X., & Xing, F. (2016). A comprehensive review of the study and development of microcapsule based self-resilience systems for concrete structures at Shenzhen University. *Materials*, 10(1), 2.  
**doi.org/10.3390/ma10010002**
- He, Z., Shen, A., Guo, Y., Lyu, Z., Li, D., Qin, X., & Wang, Z. (2019). Cement-based materials modified with superabsorbent polymers: A review. *Construction and Building Materials*, 225, 569-590.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.139**
- Hilloulin, B., Van Tittelboom, K., Gruyaert, E., De Belie, N., & Loukili, A. (2015). Design of polymeric capsules for self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 55, 298-307.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.022**

- 48-61.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.013**  
 -Lv, L.; Guo, P.; Liu, G.; Han, N.; Xing, F. (2020) Light induced self-healing in concrete using novel cementitious capsules containing UV curable adhesive. *Cem. Concr. Compos.* 105, 103445.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp. 2019.103445.**  
 -Mao, W.; Litina, C.; Al-Tabbaa, A. (2020) Development and application of novel sodium silicate microcapsulebased self-healing oil well cement. *Mater.* 13 [2], 456.  
**doi.org/10.3390/ma13020456**  
 -Mauludin, L. M., & Oucif, C. (2018). Interaction between matrix crack and circular capsule under uniaxial tension in encapsulation-based self-healing concrete. *Underground Space*, 3(3), 181-189. **doi.org/10.1016/j.undsp.2018.04.004**  
 -McDonald, S. A., Coban, S. B., Sottos, N. R., & Withers, P. J. (2019). Tracking capsule activation and crack healing in a microcapsule-based self-healing polymer. *Scientific reports*, 9(1), 17773.  
 -Minnebo, P., Thierens, G., De Valck, G., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Hemelrijck, D., & Tsangouri, E. (2017). A novel design of autonomously healed concrete: Towards a vascular healing network. *Materials*, 10(1), 49. **doi.org/10.3390/ma10010049**  
 -Morsali, Saeed & Isildar, Gamze. (2019). The application of bacteria as a main factor in self-healing concrete technology factor in self-healing concrete technology.  
 -Murugan, P. B., Vijayalakshmi, R., & Aadhitya, P. (2019). Investigation on Self-Healing Concrete Using Epoxy RESIN. *International Research Journal of Engineering and Technology*. Vol.06.  
 -Na, S. H., Hama, Y., Taniguchi, M., Katsura, O., Sagawa, T., & Zakaria, M. (2012). Experimental investigation on reaction rate and self-healing ability in fly ash blended cement mixtures. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(7), 240-253.  
**doi.org/10.3151/JACT.10.240**  
 -Parastegari, N., Mostofinejad, D., (2019). Influence of bacteria on performance of air entrained concrete. *Amirkabir Journal Civil Engineering*, Vol. 50, No. 6, 1103-1112.  
**doi.org/10.22060/ceej.2018.12371.5188**  
 -Park, B.; Choi, Y.C. (2018). Self-healing capability of cementitious materials with  
 -Jørgensen, B. B., & D'Hondt, S. (2006). A starving majority deep beneath the seafloor. *Science*, 314(5801), 932-934.  
**doi.org/ 10.1126/science.1133796**  
 -Joseph, C., Jefferson, A. D., Isaacs, B., Lark, R., & Gardner, D. (2010). Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. *Magazine of Concrete Research*, 62(11), 831-843.  
**doi.org/10.1680/macrc.2010.62.11.831**  
 -Joshi, S., Goyal, S., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2017). Microbial healing of cracks in concrete: a review. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 44(11), 1511-1525.  
**doi.org/10.1007/s10295-017-1978-0**  
 -Kang, S. H., Hong, S. G., & Moon, J. (2018). Importance of monovalent ions on water retention capacity of superabsorbent polymer in cement-based solutions. *Cement and Concrete Composites*, 88, 64-72.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.015**  
 -Kanellopoulos, A.; Giannaros, P. Palmer, D. Kerr, A.; Al-Tabbaa, A. (2017). Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: synthesis, characterisation and proof of concept. *Smart Mater. Struct.* 26, 045025.  
**doi.org/10.1088/13 61-665X/aa516c**  
 -Kuang, Y., & Ou, J. (2008). Self-repairing performance of concrete beams strengthened using superelastic SMA wires in combination with adhesives released from hollow fibers. *Smart Materials and Structures*, 17(2), 025020.  
**doi.org/10.1088/09641726/17/2/025020.**  
 -Lee, H. X. D., Wong, H. S., & Buenfeld, N. R. (2010). Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete. *Advances in Applied Ceramics*, 109(5), 296-302.  
**doi.org/10.1179/174367609X459559**  
 -Li, H., Yu, J., Wu, S., Liu, Q., Wu, Y., Xu, H., & Li, Y. (2020). Effect of moisture conditioning on mechanical and healing properties of inductive asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 241, 118139.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118139**  
 -Li, W., Jiang, Z., & Yang, Z. (2017). Acoustic characterization of damage and healing of microencapsulation-based self-healing cement matrices. *Cement and Concrete Composites*, 84,

- Roig-Flores, M., & Serna, P. (2020). Concrete early-age crack closing by autogenous healing. *Sustainability*, 12(11), 4476.  
**doi.org/10.3390/su12114476**
- Saleem, B., Hussain, A., Khattak, A., & Khan, A. (2021). Performance evaluation of bacterial self-healing rigid pavement by incorporating recycled brick aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 117, 103914.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103914**
- Salimi, A., Kamboozia, N., & Aliha, M. R. M. (2024). Experimental Investigation of the self-healing capability of Roller-Compacted Concrete (RCC) containing epoxy-filled glass tubes through fracture properties. *Case Studies in Construction Materials*, e03369.  
**doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03369**
- Schlangen, E., & Joseph, C. (2009). Self-healing processes in concrete. *Self-healing materials, Fundamentals, Design Strategies, and Applications*.  
**doi.10.1002/9783527625376**
- Selvarajoo, T.; Davies, R.E. Freeman, B.L. Jefferson, A.D. (2020). Mechanical response of a vascular self-healing cementitious material system under varying loading conditions. *Constr. Build. Mater.* 254, 119245.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119245**
- Shashank, B. S., & Nagaraja, P. S. (2022). Fracture behavior study of self-healing bacterial concrete. *Materials Today: Proceedings*, 60, 267-274. **doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.520**
- Sidiq, A., Gravina, R., & Giustozzi, F. (2019). Is concrete healing really efficient? A review. *Construction and Building Materials*, 205, 257-273.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002**
- Sidiq, A. Gravina, R.J. Setunge, S. Giustozzi, F. (2019). Microstructural analysis of healing efficiency in highly durable concrete. *Constr. Build. Mater.* 215, 969-983.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.233**
- Sidiq, A., Setunge, S., Gravina, R. J., & Giustozzi, F. (2020). Self-repairing cement mortars with microcapsules: A microstructural evaluation approach. *Construction and Building Materials*, 232, 117239.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117239**
- Singh, H., & Gupta, R. (2020). Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs). *Constr. Build. Mater.* 189, 1054-1066.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.061**
- Perez, G., Gaitero, J. J., Erkizia, E., Jimenez, I., & Guerrero, A. (2015). Characterisation of cement pastes with innovative self-healing system based in epoxy-amine adhesive. *Cement and concrete composites*, 60, 55-64.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.010**
- Qian, S. Z., Zhou, J., & Schlangen, E. (2010). Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. *Cement and concrete composites*, 32(9), 686-693.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.015**
- Qureshi, T., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2019). Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-II: Impact of age and the role of optimized expansive minerals in healing performance. *Construction and Building Materials*, 194, 266-275.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.027**
- Qureshi, T. S., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016). Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 121, 629-643.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.030**
- Ramadan, K. Z., & Haddad, R. H. (2017). Self-healing of overloaded self-compacting concrete of rigid pavement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(1), 63-77.  
**doi.org/10.1080/19648189.2015.1090931**
- Restuccia, L. Reggio, A. Ferro, G.A. Tulliani, J.M. (2017). New self-healing techniques for cement-based materials. *Procedia Struct. Integr.* 3, 253-260.  
**doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.016**
- Roig-Flores, M., Formagini, S., & Serna, P. (2021). Self-healing concrete-what is it good for? *Materiales de Construcción*, 71(341), e237-e237.  
**doi.org/10.3989/mc.2021.07320**
- Roig-Flores, M.; Pirritano, F.; Serna, P. Ferrara, L. (2016) Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. *Constr. Build. Mater.* 114, 447-457.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.196**

- healing microcapsules for self-repair in concrete. *J. Appl. Polym. Sci.* 133 [12], 43090.  
**doi.org/10.1002/app.43090**
- Tang, Y., & Xu, J. (2021). Application of microbial precipitation in self-healing concrete: A review on the protection strategies for bacteria. *Construction and Building Materials*, 306, 124950.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124950**
- Thao, T. D. P., Johnson, T. J. S., Tong, Q. S., & Dai, P. S. (2009). Implementation of self-healing in concrete—Proof of concept. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 2(2), 116-125.  
**doi.org/10.1080/19373260902843506**
- Toledo Filho, R. D., Ghavami, K., Sanjuán, M. A., & England, G. L. (2005). Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and concrete composites*, 27(5), 537-546.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.005**
- Van Mullem, T., Anglani, G., Dudek, M., Vanoutrive, H., Bumanis, G., Litina, C., & De Belie, N. (2020). Addressing the need for standardization of test methods for self-healing concrete: An inter-laboratory study on concrete with macrocapsules. *Science and technology of advanced materials*, 21(1), 661-682.  
**doi.org/10.1080/14686996.2020.1814117**
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., Lehmann, F., & Grosse, C. U. (2012). Acoustic emission analysis for the quantification of autonomous crack healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 333-341.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.079**
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Loo, D., & Jacobs, P. (2011). Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 497-505.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.01.004**
- Van Tittelboom, K.; Tsangouri, E. Van Hemelrijck, D.; De Belie, N. (2015) The efficiency of self-healing concrete using alternative manufacturing procedures and more realistic crack patterns. *Cem. Concr. Compos.* 57, 142-152.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.002**
- Wang, X., Chen, S., Yang, Z., Ren, J., Zhang, X., & Xing, F. (2021). Self-healing concrete permeability of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00324.  
**doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00324**
- Singh, P., Kaur, I., & Singh, N. (2020). A review of different bacteria carriers used in self-healing mechanism. *Materials Today: Proceedings*, 32, 955-960.
- Sisomphon, K.; Copuroglu, O.; Koenders, E.A.B. (2013) Effect of exposure conditions on self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* 42, 217-224.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.012**
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., & Koenders, E. A. B. (2012). Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 566-574.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.005**
- Snoeck, D., Van Tittelboom, K., Steuperaert, S., Dubruel, P., & De Belie, N. (2014). Self-healing cementitious materials by the combination of microfibrils and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(1), 13-24.  
**doi.org/10.1177/1045389X12438623**
- Snoeck, D., Van den Heede, P., Van Mullem, T., & De Belie, N. (2018). Water penetration through cracks in self-healing cementitious materials with superabsorbent polymers studied by neutron radiography. *Cement and Concrete Research*, 113, 86-98.
- Song, G., Ma, N., & Li, H. N. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering structures*, 28(9), 1266-1274.  
**doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.12.010**
- Stanaszek-Tomal, E., (2020). Bacterial concrete as a sustainable building material? A review. *Sustainability*, Vol. 12, No. 696, 1-13.  
**doi.org/10.3390/su12020696**
- Sun, B.; Wu, H.; Song, W.; Li, Z.; Yu, J. (2019) Design methodology and mechanical properties of Superabsorbent Polymer (SAP) cement-based materials. *Constr. Build. Mater.* 204, 440-449.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.206**
- Tan, N.P.B.; Keung, L.H.; Choi, W.H.; Lam, W.C.; Leung, H.N. (2015) Silica-based self-

- Xu, H., Hu, Z., & Xu, T. (2021). Effects of healing agent on shape memory, mechanical and self-healing properties of joint filler on cement concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 304, 124592.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124592**
- Xu, J., Yao, W., (2014). Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent. *Cement and Concrete Research*, Vol. 64, No. 1, 1-10.  
**doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.003**
- Yıldırım, G., Khiavi, A. H., Yeşilmen, S., & Şahmaran, M. (2018). Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 87, 172-186.  
**doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.004**
- Yildirim, G., Sahmaran, M., & Ahmed, H. U. (2015). Influence of hydrated lime addition on the self-healing capability of high-volume fly ash incorporated cementitious composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 04014187.  
**doi.org/10.1061/ (ASCE) MT.1943-5533.0001145**
- Zhang, H., Wang, P., & Yang, J. (2014). Self-healing epoxy via epoxy-amine chemistry in dual hollow glass bubbles. *Composites Science and Technology*, 94, 23-29.  
**doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.01.009**
- incorporating mineral additives and encapsulated lightweight aggregates: Preparation and application. *Construction and Building Materials*, 301, 124119.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124119**
- Wang, X. F., Yang, Z. H., Fang, C., Han, N. X., Zhu, G. M., Tang, J. N., & Xing, F. (2019). Evaluation of the mechanical performance recovery of self-healing cementitious materials—its methods and future development: a review. *Construction and Building Materials*, 212, 400-421.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.117**
- Wang, X., Huang, Y., Huang, Y., Zhang, J., Fang, C., Yu, K., & Xing, F. (2019). Laboratory and field study on the performance of microcapsule-based self-healing concrete in tunnel engineering. *Construction and Building Materials*, 220, 90-101.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.017**
- Wang, Y., Lin, Z., Tang, C., & Hao, W. (2021). Influencing factors on the healing performance of microcapsule self-healing concrete. *Materials*, 14(15), 4139.  
**doi.org/10.3390/ma14154139**
- Wu, M., Johannesson, B., & Geiker, M. (2012). A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, 28(1), 571-583.  
**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086**

# **Evaluation of Widely Used Concrete Self-Healing Methods for Use in Road Infrastructure- A Review**

*Neda Kamboozia, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Amir Salimi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Hadiseh Dolati, B.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran.*

*E-mail: nkamboozia@iust.ac.ir*

Received: November 2024- Accepted: February 2025

## **ABSTRACT**

Concrete is a material that is sensitive to cracking and often experiences numerous cracks and failures during the casting process and throughout its lifespan. Repairing these cracks in concrete structures, especially in concrete pavements, is challenging and costly, posing a significant issue in concrete pavements. Self-healing concrete offers an economical and functional solution to this problem. However, despite recent advancements and extensive research in self-healing concretes, challenges in implementing these methods in Road infrastructures have delayed their widespread adoption. This article explores common methods for imparting self-healing properties to concrete, including autonomous healing, autogenous healing, and healing through encapsulated agents and additives. A comparative analysis was conducted to determine the most effective method for repairing concrete cracks and its potential for industrial application. Based on the evaluation of the Technology Readiness Level (TRL) of self-healing methods, encapsulating healing agents within containers such as porous aggregates or natural hollow fibers appears to be the most promising solution for enabling self-healing properties in concrete pavements.

**Keywords:** Self-Healing Concrete, Autonomous Healing, Autogenous Healing, Concrete Pavement