مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک دوره ۱۲ شماره ۲سال ۱۴۰۱ (۲۰۲۲) ۵۰-۶۷

عوامل مؤثر بر استفاده از باکتری در خواص مکانیکی بتن خودترمیم شونده

کیارش عبدالهی[۱]

۱ - دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب kiarash.abdollahi@gmail.com

چکیده:

در طول عمر مفید سازه‌های بتنی، ناگزیر خرابی رخ می‌دهد. پدیده معمول خرابی در طول زمان در سازه‌های بتنی ترک خوردگی است که بر دوام و یکپارچگی این سازه‌ها تأثیر می‌گذارد. تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی نیازمند نیروی کار و هزینه بر است. همچنین دسترسی به بخش‌های آسیب دیده پس از اتمام ساخت و ساز دشوار است. خود درمانی یک راه حل ممکن است. استراتژی کپسوله سازی به‌طور گسترده به‌عنوان یک استراتژی همه کاره و مؤثر برای خود درمانی در نظر گرفته می‌شود. در این بررسی، توجه بر ارزیابی عوامل مختلف شفابخش و تکنیک‌های کپسوله‌سازی متمرکز شده است. هشت عامل کلیدی که بر اثربخشی خوددرمانی با کپسوله‌سازی تأثیر می‌گذارند مورد بحث قرار گرفته‌اند. که عبارت‌اند از: (۱) مقاومت در حین اختلاط، (۲) احتمال برخورد ترک‌ها با کپسول‌ها، (۳) زمان و شرایط عمل آوری، (۴) اثر کپسول‌های خالی بر مقاومت بتن، (۵) قابلیت کنترل رهاسازی عامل‌ترمیم کننده، (۶)) پایداری عامل بهبود دهنده، (۷) قابلیت آب بندی و بازیابی دوام و مقاومت ماتریس بتن (در نتیجه خودترمیم)، و (۸) تکرارپذیری عمل خودترمیم. در نهایت، شکاف‌های موجود در تحقیقات فعلی و زمینه‌های مهم برای تحقیقات آینده شناسایی می‌شوند.

کلمات کلیدی: خوددرمانی؛ کپسوله‌سازی؛ باکتری‌ها؛ پلیمرها؛ عرض ترک؛ عامل ترمیم کننده؛ خواص مکانیکی

۱-مقدمه

به‌خوبی شناخته شده است که یکی از نقاط ضعف بتن آسیب پذیری آن در برابر ترک خوردن است. هنگامی که بتن در حالت پلاستیک قرار می‌گیرد یا پس از سخت شدن کامل، ممکن است ترک ایجاد شود. بتن ممکن است به دلیل انقباض پلاستیک، تنش‌های حرارتی، نشست، انقباض خشک شدن، هوازدگی، خوردگی آرماتور یا به دلیل بارگذاری اعمال شده ترک بخورد (ACI 2007؛ Fernandez 2012). ترک خوردگی نیز ممکن است به دلیل عملکرد دو یا چند مورد از این عوامل باشد. به‌عنوان مثال، ترک‌های کم عمق ناشی از انقباض پلاستیک یا خشک شدن انقباض ممکن است تحت بارگذاری خارجی با سطح تنش بسیار کمتری نسبت به بتن که برای آن طراحی شده است، منتشر شود. بتن دارای استحکام کششی پایینی است و به همین دلیل سازه‌های بتنی اغلب با انواع مختلفی از آرماتورها برای مقاومت در برابر تنش‌های کششی ترکیب می‌شوند. اگرچه این اقدامی برای کنترل ترک خوردگی بتن است، اما پیشگیری کامل ترک‌ها تقریباً غیرممکن است. به‌عنوان مثال، آرماتور به‌عنوان یک مهار موضعی در برابر انقباض آزاد عمل می‌کند زمانی که بتن در حالت پلاستیک قرار دارد و باعث ایجاد ترک‌های ناشی از نشست می‌شود (داخیل و همکاران ۱۹۷۵). در ابتدا، ریزترک‌هایی ممکن است تشکیل شوند که تحت بارگذاری خارجی یا سایر عواملی که باعث از بین رفتن یکپارچگی سازه می‌شوند، گسترش یابند. ریزترک‌ها در بتن همچنین با انتقال مواد خورنده به درون ماتریس بتن که منجر به خوردگی فولاد و کاهش مقاومت کششی می‌شود، بر دوام تأثیر می‌گذارد. چنین اتفاقی ممکن است منجر به مشکلات نامطلوب‌تری مانند پوسته شدن و حتی خرابی زودرس سازه شود. بنابراین نگهداری و تعمیر برای آب بندی ترک‌ها برای کاهش نفوذپذیری و بازیابی دوام سازه ضروری است.

با این حال، در برخی موارد، به دلیل عدم دسترسی و قابل مشاهده نبودن ترک‌ها تعمیرات دستی دشوار است. در اروپا، نیمی از بودجه ساخت و ساز سالانه به تعمیرات اختصاص می‌یابد (Cailleux and Pollet 2009). ون بروگل (۲۰۰۷) معتقد است که "افزایش طول عمر زیرساخت‌های ساخته شده ما بدون شک تأثیر فعالیت‌های بشر بر ثبات زیست کره را کاهش می‌دهد." این بدان معناست که افزایش عمر زیرساخت‌های موجود می‌تواند تقاضا برای زیرساخت‌های جدید، هزینه و آلودگی را کاهش دهد. مدیریت خسارت یک مفهوم جایگزین برای پیشگیری از آسیب است و بر این اصل استوار است که آسیب در سازه‌ها تا زمانی قابل تحمل است که‌ترمیم یابد یا بتوان آن را به‌موقع اصلاح کرد (van der Zwaag 2007). یکی از این مفاهیم مدیریت آسیب، بتن خودترمیم شونده است.

این مفهوم عمدتاً از مکانیسم التیام زخم بدن انسان الهام گرفته شده است که می‌تواند با انتشار عوامل بیولوژیکی به نقاط زخمی خود را تا حد مشخصی از آسیب ترمیم کند. به‌طور کلی، سه رویکرد اصلی برای خوددرمانی وجود دارد. این موارد در بخش بعدی توضیح داده شده است.

۲-سه رویکرد برای خوددرمانی

همان‌طور که توسط Van Tittelboom و De Belie (2013) ذکر شد، سه رویکرد گسترده برای خودترمیم در بتن، خودترمیم، مویرگی و مبتنی بر کپسول است.

۲-۱-خودترمیم اتوژن

خودترمیمی خود به ترکیب بتن بستگی دارد و با واکنش هیدراتاسیون محصولات سیمانی در ماتریس یا با واکنش مواد پلیمری در زمینه انجام می‌شود. خوددرمانی اتوژن به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (به‌عنوان مثال، نویل ۲۰۰۲؛ رام و بیسکوپینگ ۱۹۹۸؛ یانگ و همکاران ۲۰۰۹؛ جاکوبسن و همکاران ۱۹۹۶؛ گرنجر و همکاران ۲۰۰۷؛ لی و لی ۲۰۱۱). یکی از نقاط ضعف این رویکرد محدودیت ناشی از عرض ترک است. ترمیم اتوژن در درجه اول برای ترک‌های بسیار باریک مؤثر است. این مشاهدات توسط TerHeide و Schlangen (2007)، TerHeide و همکاران پشتیبانی شد. (۲۰۰۵) و TerHeide (2005). محققان مختلف به‌طور خاص اثربخشی این تکنیک را در آب بندی ترک‌ها با عرض‌های مختلف، ۵-۱۰ میکرومتر (جاکوبسن و سلولد ۱۹۹۶؛ ساهماران و همکاران ۲۰۰۸)، ۲۰۰ میکرومتر (ادواردسن ۱۹۹۹)، و ۳۰۰ میکرومتر (کلیر ۱۹۸۵) مطالعه کردند. تائید شده است که ترک‌های گسترده‌تر که برای دوام سازه‌های بتنی مضر هستند را نمی‌توان به‌طور مؤثر با ترمیم اتوژن ترمیم کرد. این محدودیت توسط لی و لی (۲۰۱۱)، که پیشنهاد استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) حاوی الیاف مصنوعی، مانند پلی‌پروپیلن (PP) و پلی وینیل الکل (PVA) را برای محدود کردن عرض ترک ارائه کردند، مورد توجه قرار گرفت.

علاوه بر این، یک منبع ثابت آب باید برای پشتیبانی از فرآیند هیدراتاسیون وجود داشته باشد تا بتوان ترک‌ها را به‌طور کامل آب بندی کرد. بنابراین، پدیده ترمیم اتوژن ممکن است در بتن تازه برجسته‌تر باشد (ون تیتلبوم و دی بلی ۲۰۱۳)، در حالی که بارش کربنات ممکن است مکانیسم مشخص در مراحل بعدی باشد (نویل ۲۰۰۲). به‌منظور

گنجاندن آب بیشتر برای هیدراتاسیون بیشتر، سعی شد پلیمرهای سوپر جاذب (SAP) در مخلوط بتن گنجانده شود (لی و همکاران ۲۰۱۰؛ کیم و شلانگن ۲۰۱۱؛ اسنوکت آل. ۲۰۱۳)، که می‌توانند رطوبت را برای مدت طولانی‌تری ذخیره و تأمین کنند. دوره زمانی. با این حال، هنگامی که آب از SAP آزاد می‌شود، منافذ یا حفره‌هایی در بتن ایجاد می‌شود که به حلقه‌های ضعیفی در زمینه تبدیل می‌شوند. ترک‌ها حتی ممکن است در طول عمر مفید سازه از طریق آن‌ها پخش شوند (لی و همکاران ۲۰۱۰؛ اسنوک و همکاران ۲۰۱۳).

چندین محقق (Termkhajornkit et al. 2009; Sahmaran et al. 2008; Na et al. 2012) سعی کردند از مواد سیمانی مکمل، مانند خاکستر بادی و سرباره کوره بلند، برای شبیه سازی ترمیم خودکار استفاده کنند. موادی مانند خاکستر بادی و سرباره با سرعت کمتری نسبت به سیمان هیدراته می‌شوند و بنابراین، ذرات هیدراته نشده چنین مواد معدنی باعث بهبودی خودکار در مراحل بعدی بتن می‌شوند. با این حال، نقطه ضعف این روش این است که عامل شفابخش در فرآیند مصرف می‌شود و ممکن است برای هیدراتاسیون بیشتر در مراحل بعدی در دسترس نباشد. افزودن مواد افزودنی کریستالی و عوامل انبساطی، از جمله سولفوآلومینات کلسیم، ممکن است باعث ایجاد واکنش انبساطی ترمیم کننده در ترک‌ها شود (Sisomphon et al. 2011b). با این حال، ممکن است برخی از ترک‌ها در ماتریکس به دلیل انبساط در طول بهبود ایجاد شود.

Jonkers (2007) مفهوم استفاده از هاگ‌های باکتری را برای واسطه کردن فرآیند بهبودی با رسوب کربنات کلسیم پیشنهاد کرد. با این حال، در تحقیقات مقدماتی خود (Jonkers 2007; Jonkers and Schlangen 2009; Jonkers et al. 2010) اگرچه باکتری‌ها شروع به رسوب و رسوب کربنات کلسیم در سطوح ترک کردند، اما آن‌ها برای مدت طولانی زنده نماندند. یک دوره طولانی به دو دلیل: محیط شدیداً قلیایی مخلوط بتن و کوچک شدن منافذ به دلیل هیدراتاسیون سیمان ایجاد می‌شود.

به‌طور خلاصه، مکانیسم ترمیم خودکار دارای چندین ضعف ذاتی است، از جمله:

(۱) وابستگی به سن بتن.

(۲) نیاز به یک منبع داخلی طولانی مدت آب؛

(۳) بقای باکتری‌ها برای رشد کربنات.

و (۴) نیاز به محدودیت در عرض شکاف قابل‌ترمیم.

۲-۲-خود درمانی مویرگی

رویکرد مویرگی خوددرمانی از سیستم شبکه مویرگی در بدن انسان را تقلید می‌کند. شبکه‌ای از لوله‌ها را می‌توان در بتن نصب کرد تا یک عامل شفابخش را به محل‌های ترک خورده/ آسیب دیده برساند. در این رویکرد، عوامل شفابخش در لوله‌های توخالی یا شبکه‌ای از لوله‌ها محبوس می‌شوند و توسط یک منبع خارجی تأمین می‌شوند. دو روش برای دستیابی به خوددرمانی با رویکرد مویرگی وجود دارد: سیستم‌های تک کانالی و چند کانالِ.

هنگامی که فقط از یک عامل شفابخش تک جزئی استفاده می‌شود، از روش مویرگی تک کانالی استفاده می‌شود. هنگامی که شامل شفا با واکنش دو عامل شفابخش باشد، از کانال‌های متعدد استفاده می‌شود.

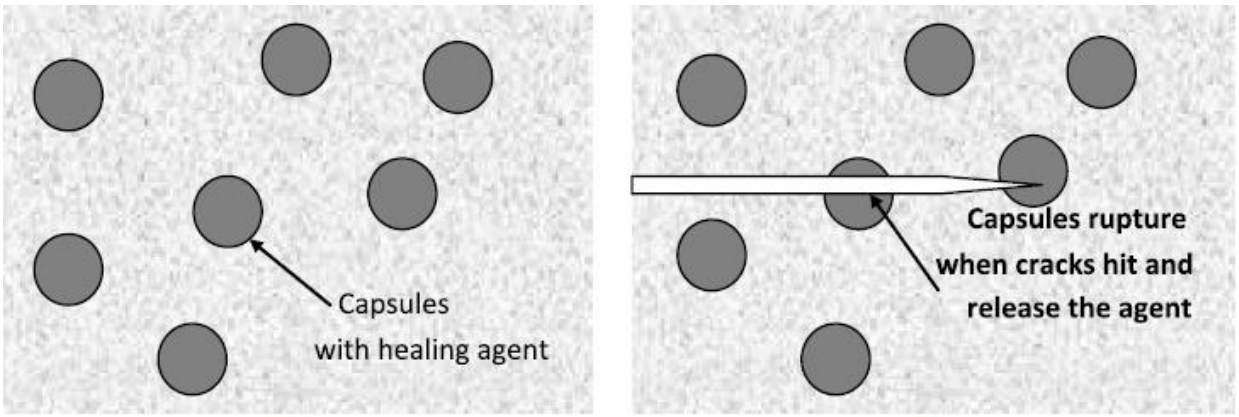
اگرچه عرضه خارجی عامل شفابخش مؤثر است، اما از نظر فنی به خودی خود درمانگر نیست، زیرا نیاز به مداخله خارجی دارد. علاوه بر این، اگرچه در مقیاس آزمایشگاهی امکان پذیر است، ریختن بتن با شبکه‌ای از لوله‌ها برای خودترمیم عروق در سایت‌های ساخت و ساز واقعی دشوار است. از بسیاری جهات، مشکلاتی که این دو روش ذکر شده با آن مواجه می‌شوند را می‌توان با خود درمانی مبتنی بر کپسول برطرف کرد.

خودترمیم مبتنی بر کپسول در خودترمیم کپسولی، کپسول‌ها حفاظت مکانیکی را از عوامل ترمیم دهنده ارائه می‌کنند و تنها پس از ایجاد ترک‌ها (با پارگی یا انتشار کپسول)، رطوبت، هوا یا تغییر در pH، آن‌ها را آزاد می‌کنند. محلول منافذ در ماتریس در مواردی که ترک‌خوردگی مکانیسم ماشه است، کپسول‌ها می‌شکنند و عامل‌ترمیم دهنده با عمل مویرگی به داخل ترک کشیده می‌شود. استراتژی کپسولاسیون قادر به افزایش طول عمر عوامل شفابخش شیمیایی یا بیولوژیکی و کنترل انتشار آن‌ها در ماتریکس است. شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد رویکرد مبتنی بر کپسول فراگیر است و کیفیت تعمیر رضایت بخشی دارد که به‌طور کلی با بازیابی خواص مکانیکی و دوام اندازه گیری می‌شود. با این حال، چالش اصلی رویکرد مبتنی بر کپسول، تکرارپذیری آن در دراز مدت است. سازه‌های بتنی در طول عمر مفید خود در معرض چرخه‌های آسیب متعدد قرار می‌گیرند و بنابراین انتظار می‌رود که یک سیستم مبتنی

بر کپسول موارد متعددی از بهبود باکیفیت را ارائه دهد. میکرو کپسول‌ها می‌توانند مقادیر محدودی از ماده‌ترمیم‌کننده را در خود محصور کنند و بنابراین بیشتر عامل التیام دهنده تحت یک چرخه بارگذاری منفرد تخلیه می‌شود و از این رو بهبودی مکرر در طولانی‌مدت مشکوک است. با این حال، تلاش‌های تحقیقاتی اخیر بر رهاسازی هوشمند عوامل شفابخش [از جمله مواردی که توسط دونگ و همکارانش انجام شده است. (۲۰۱۵)]. بنابراین، اگرچه در این نقطه از زمان خیلی تثبیت نشده است، کپسول‌ها ممکن است به‌گونه‌ای طراحی شوند که بتوان چرخه‌های درمانی متعددی را به دست آورد.

تائو (۲۰۱۱) و ون تیتلبوم و همکاران. (b۲۰۱۱) اثربخشی بهبود تحت چرخه‌های بارگذاری متعدد را با ترکیب عامل‌ترمیم دهنده در لوله‌ها ارزیابی کرد. آن‌ها دریافتند که بازیابی سختی تحت سیکل‌های متعدد بارگذاری کاهش می‌یابد.

بنابراین، تحقیقات آینده در مورد تکرارپذیری سیستم‌های مبتنی بر کپسول مورد نیاز است. شکل ۱ بهبود با رویکرد مبتنی بر میکروکپسول را هنگامی که یک ترک کپسول را در مسیر خود پاره می‌کند، توضیح می‌دهد. بسته به تکنیک کپسولاسیون مورد استفاده، کپسول‌ها یا به‌صورت استراتژیک در مکان‌های پیش بینی شده شکست قرار می‌گیرند (به‌عنوان مثال، کپسول‌های شیشه‌ای لوله‌ای) یا تا حد امکان به‌طور یکنواخت در سراسر ماتریس پراکنده می‌شوند (به‌عنوان مثال، میکرو کپسول‌ها). درمان مبتنی بر کپسول را می‌توان به‌طور کلی به بهبودی ناشی از (۱) رسوب باکتریایی و (۲) عوامل شفابخش شیمیایی محصور شده طبقه بندی کرد. مطالعات در مورد خواص مختلف این مکانیسم‌های درمانی در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد.



(a) (b)

شکل ۱- شماتیک رویکرد خوددرمانی مبتنی بر کپسول

فاز آب را می‌توان برای ایجاد یک بافت خشن به میکرو کپسول‌ها رسوب داد. این می‌تواند به بهبود پیوند با ماتریس سیمانی کمک کند. چنین کپسول‌هایی با عامل شفابخش توسط Kessler و همکاران استفاده شده است. (۲۰۰۳)، براون و همکاران. (۲۰۰۵) و فنگ و همکاران. (۲۰۰۸). Blaiszik و همکاران (۲۰۰۹) روشی را با استفاده از تکنیک سونفیکیشن و محلول آب‌گریز برای تثبیت عامل شفابخش دی سیکلوپنتادین (DCPD) برای سنتز میکرو کپسول‌های UF گزارش کرد. کپسول‌هایی با قطر ۲۲۰ نانومتر و ضخامت دیواره پوسته ۷۷ نانومتر با دیواره پوسته یکنواخت‌تر با موفقیت تولید شدند. با این حال، ادبیات مشکلات متعددی را در مورد انباشته شدن بقایای کپسول نانو اندازه در ماتریس میزبان ذکر می‌کند و این‌ها حتی می‌توانند باعث ایجاد ترک شوند. به غیر از UF، مواد کپسول مبتنی بر ملامین و پلی یورتان (PU) نیز در کاربردهای خودترمیم شونده استفاده شده است. پلتیه و همکاران (۲۰۱۱) و لیو و همکاران. (b۲۰۰۹) کپسول‌های ملامین اوره فرمالدئید (MUF) را تهیه کرد که ثابت شد تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد پایداری حرارتی دارند. در واقع، گزارش شده است که میکرو کپسول‌های MUF دارای خواص برتری نسبت به آن‌هایی هستند که فقط از UF ساخته شده‌اند. سنتز اولی نیز آسان‌تر است (Aïssa et al. 2012). تائو و همکاران (۲۰۰۹) و Thao (2011) مطالعات مقایسه‌ای بین لوله‌های اکریلیک ریخته گری Perspex و لوله‌های شیشه‌ای انجام دادند. آن‌ها دریافتند که لوله‌های شیشه‌ای به دلیل بی‌اثر بودن آن‌ها نسبت به پلیمر موجود مناسب‌تر هستند. ماهیت شکننده لوله‌ها همچنین نشان می‌دهد که می‌توان آن را راحت‌تر پاره کرد. ابعاد بهینه برای دیوارهای داخلی و خارجی به ترتیب ۴ و ۶ میلی متر بود.

Van Tittelboom and De Belie (2010) and Van Tittelboom et al. 2011b) طراحی سیستم را با استفاده از کپسول‌های استوانه‌ای شیشه‌ای و سرامیکی با قطرهای مختلف اصلاح کرد. کپسول‌ها در کنار یکدیگر قرار می‌گرفتند تا وقتی باهم پاره می‌شوند، عوامل شفابخش به‌راحتی باهم مخلوط شوند. عوامل شفابخش مختلف مانند رزین‌های اپوکسی، پلی اورتان، و متیل متاکریلات (MMA) مورد آزمایش قرار گرفتند. بهترین نتیجه از ترکیب MMA-پلی اورتان به دست آمد (Van Tittelboom et al. 2011b). کپسول‌های شیشه‌ای با قطر ۳ میلی متر از نظر بازیابی استحکام بهترین عملکرد را داشتند، در حالی که کپسول‌های سرامیکی از نظر بازیابی نفوذپذیری آب بهترین عملکرد را داشتند. در این تحقیق کپسول‌های شیشه‌ای در محل‌های پیش بینی شده ترک‌ها قرار گرفتند. برای

اکثر اجزای ساختمان، پیش بینی محل ترک ممکن است همیشه امکان پذیر نباشد. شاید بهتر باشد کپسول‌ها را به‌صورت تصادفی اما یکنواخت به‌صورت جفت در تمام مناطقی که در معرض ترک خوردن هستند توزیع شود.

۳-۲-مواد برای عوامل ترمیم دهنده

هوانگ و همکاران (۲۰۱۱) و پلتیر و همکاران. (۲۰۱۱) از کپسول‌های کروی برای کپسوله کردن محلول سیلیکات سدیم استفاده کرد. پارگی کپسول‌ها محلول را در ماتریکس آزاد کرد و واکنش با هیدروکسید کلسیم انجام شد تا هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) تشکیل شود که ترک بتن را التیام بخشید. لی و همکاران (۲۰۱۳) اپوکسی محصور شده در میکرو کپسول‌های پلی استایرن-دیوینیل بنزن (St-DVB). یک سخت کننده مبتنی بر آمین به‌طور جداگانه در ماتریس پراکنده شد. یک بار آن را اپوکسی که پس از پاره شدن کپسول‌ها آزاد می‌شد با سخت‌کننده واکنش نشان داد و ترک‌ها را بهبود بخشید. تائو و همکاران (۲۰۰۹) و Thao (2011) از پیش پلیمر ایزوسیانات محصور شده در لوله‌های شیشه‌ای استوانه‌ای توخالی استفاده کردند. انتخاب عامل شفا، مواد کپسوله‌سازی و مفهوم حفاظت در بتن مورد مطالعه قرار گرفت. پلیمر اپوکسی انتخاب شده دارای ویسکوزیته کم بین ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی پاسکال در ثانیه بود و بنابراین می‌توانست به‌آرامی در شکاف‌ها جریان یابد و التیام مؤثری را ارائه دهد.

Cailleux و Pollet (2009) از میکرو کپسول‌ها برای نگهداری رزین اپوکسی بیسفنول-F استفاده کردند و این میکرو کپسول‌ها را در بتن جاسازی کردند، که در آن سخت‌کننده به‌طور جداگانه پراکنده شد. بهبودی از طریق واکنش پلیمریزاسیون رزین اپوکسی با سخت کننده صورت می‌گیرد. آن‌ها همچنین روغن تونگ یا هیدروکسید کلسیم را با میکرو کپسول‌های کروی ساخته شده از پوسته ژلاتین کپسوله کردند. با این حال، مشکلی که با آن مواجه شد پارگی زودرس کپسول‌ها در حین اختلاط بود. بهبود در طراحی کپسول، از نظر انتخاب مواد و ضخامت، لازم بود تا از تخریب آن‌ها در هنگام اختلاط جلوگیری شود. اصل مشابهی توسط Dry (1994a, 1999) با استفاده از کپسول‌های PP استوانه‌ای پوشش داده شده با موم که حاوی یک مونومر MMA به‌عنوان عامل التیام دهنده است، اعمال شد. به‌طور خاص، درای (۱۹۹۹) از کپسول‌های شیشه‌ای با سیانواکریلات (CA) استفاده کرد. هنگامی که این لوله‌های شیشه‌ای تحت بار شکستند، CA در محیط رها شد و ترک‌ها را بهبود بخشید.

۳-هندسه کپسول و طراحی ویژه برای طرح اختلاط

در یک سیستم چند کپسولی، دو یا چند نوع مختلف کپسول، عوامل ترمیمی متفاوتی را ذخیره می‌کنند. بهبودی با پارگی هر دو نوع کپسول آغاز می‌شود و باعث واکنش آن‌ها با یکدیگر می‌شود. میهاشی و همکاران (۲۰۰۱) از کپسول‌های کروی با پوسته اوره فرمالدئید فرمالین (UFF) حاوی اپوکسی دو جزئی استفاده کرد. با این حال، بهبود بی‌اثر بود، زیرا اختلاط ناکافی از سخت شدن اپوکسی دو جزئی جلوگیری می‌کرد. این فرآیند توسط فنگ و همکاران بهبود یافت. (۲۰۰۸)، که رزین اپوکسی را با یک ماده شیمیایی رقیق کننده اصلاح کرد تا ویسکوزیته را تنظیم کند تا اختلاط بهتری حاصل شود. اگرچه واکنش می‌تواند در دمای اتاق اتفاق بیفتد، اما سود کامل را تنها با پخت حرارتی در حدود ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان به دست آورد.

٤-ترمیم توسط باکتری‌های کپسوله شده

٤-١-کپسوله سازی در پلیمر و ترکیب معدنی ویژه

وانگ و همکاران (b۲۰۱۴) اسپورهای باکتری باسیلوس را در یک سیستم میکروکپسول مبتنی بر ملامین محصور کرد که همچنین حاوی ماده‌ای بی‌اثر برای محافظت از هاگ‌ها بود. غلظت باکتری حدود ۱۰۹ گرم میکروکپسول خشک اضافه شد. راندمان ترمیم ترک که بر حسب نسبت ترک‌ترمیم یافته به ناحیه ترک اولیه اندازه‌گیری شد، حداکثر نرخ بهبودی ۸۰٪ را نشان داد (در حالت خشک کردن مرطوب). حداکثر اندازه ترک‌ترمیم یافته ثبت شده ۹۷۰ میکرومتر (در زیر آب پخت) بود.

وانگ و همکاران. (a۲۰۱۲) از خاک دیاتومه (DE) به‌عنوان حامل برای Bacillus sphaericus استفاده کرد. این گونه برای واکنش با اوره هیدرولیز شده موجود در ماتریکس سیمانی برای رسوب کربنات کلسیم ساخته شد. ترک‌هایی با عرض بین ۰.۱۵ تا ۰.۱۷ میلی متر به‌طور جزئی یا کامل‌ترمیم شده‌اند. با این حال، DE تمایل به جذب مقدار زیادی آب و خشک کردن ملات دارد. مشکل دیگر تشکیل مقدار کمی کریستال‌های اوره یا نیترات کلسیم اضافی است که ممکن است بر مقاومت بتن تأثیر بگذارد.

کپسوله سازی در سنگ‌دانه‌های سیمانی ویژه

Jonkers (2011) و Wiktor and Jonkers (2011a, b) از دانه‌های خاک رس منبسط شده برای افزودن یک عامل‌ترمیم دهنده دو جزئی متشکل از باکتری و لاکتات کلسیم استفاده کردند. سنگ‌دانه‌های رسی متخلخل (سنگ‌دانه‌های سبک وزن (LWA) به‌عنوان یک منبع داخلی رطوبت عمل می‌کنند که برای حمایت از رسوب باکتری‌ها ضروری است. با این حال، کارایی به تعدادی پارامتر مانند مقدار آب در سنگدانه ها، فاصله سنگدانه ها و ساختار منافذ سنگدانه (رینولدز و همکاران ۲۰۰۹) محدودیتی برای استفاده از کپسوله سازی رس منبسط شده وجود دارد. هنگامی که سنگ‌دانه‌های طبیعی با خاک رس LWA جایگزین می‌شوند، کاهش قابل توجهی در مقاومت مکانیکی بتن وجود دارد. سنگدانه ها قسمت عمده بتن و مقاومت فشاری بتن اساساً با چقرمگی آن‌ها تعیین می‌شود.

۲-٤-کپسوله سازی در افزودنی‌های ویژه در ماتریس سیمان

وانگ و همکاران (a۲۰۱۴) در مطالعه خود از هاگ‌ها و بیورآجنت های باکتری ریز پوشانی شده با هیدروژل (مواد مغذی برای باکتری‌ها، اوره و نیترات کلسیم در این مورد) استفاده کردند. مزیت اصلی هیدروژل قابلیت جذب و حفظ رطوبت در مدت زمان طولانی است. هاگ‌های محصور شده می‌توانند به سلول‌های فعال تبدیل شوند و کربنات کلسیم را با تجزیه اوره، زمانی که آب و مواد مغذی کافی در هیدروژل‌ها وجود داشت، رسوب دهند. حداکثر عرض ترک در حدود ۰.۵ میلی متر بود و حداکثر کاهش نفوذپذیری آب در حدود ۶۸٪ مشاهده شد.

۳-٤-کارایی مواد مختلف خودترمیم کننده برای به دست آوردن خروجی مشابه

صرف نظر از روش مورد استفاده، هدف از خودترمیم رسیدن به حداکثر خروجی‌ترمیم ممکن است که با آب بندی عرض ترک و بازیابی خواص اصلی بتن اندازه گیری شود.

هنگامی که اسپورهای باکتری در کپسوله می‌شوند، آب ضروری‌ترین جزء است. وانگ و همکاران (b۲۰۱۴) تا ۸۰ درصد نسبت‌ترمیم (اندازه‌گیری شده با بسته شدن ناحیه ترک) و حداکثر بسته شدن عرض ترک نزدیک به ۰.۶ میلی‌متر را تحت یک چرخه خشک زمانی که اسپورهای باسیلوس در میکرو کپسول‌های ملامین کپسوله می‌شوند، مشاهده کردند. زمانی که اسپورهای باکتری در هیدروژل محصور شدند، نسبت بهبودی بهبود یافت (تا ۹۰٪)، اگرچه حداکثر عرض ترک بسته هنوز حدود ۰.۵ میلی متر بود (وانگ و همکاران a۲۰۱۴).

۵-عوامل مؤثر برای ارزیابی سیستم خوددرمانی

۱-۵-مقاومت در طول فرآیند اختلاط

کپسول‌های شیشه‌ای به‌طور گسترده‌ای برای کپسوله کردن عوامل شفابخش استفاده شده است. مزیت استفاده از کپسول‌های شیشه‌ای در شکنندگی آن‌ها نهفته است، زیرا با ظاهر شدن ترک می‌توانند به‌راحتی پاره شوند.

ون تیتلبوم و همکاران (۲۰۱۵) کارایی‌ترمیم ترک‌ها را با استفاده از تست نفوذپذیری آب اندازه گیری کرد، که در آن از لوله‌های شیشه‌ای کوتاه با کپسول‌های سرامیکی با سه مکانیسم حفاظتی مختلف استفاده شد:

- اتصال به آرماتور
- پوشاندن لوله‌ها / کپسول‌ها با یک لایه ملات در انتهای قالب
- و جاسازی آن‌ها در نوار خمیر سیمان.

مشاهده شد که کپسول‌های متصل به میله‌های تقویت کننده از فرآیند اختلاط بتن بدون هیچ وسیله حفاظتی دیگری جان سالم به در بردند. با این حال، برای اجرای این طرح، برای ریخته‌گری تیرها در لایه‌های مختلف، کار خوبی لازم است. کپسول‌های احاطه شده توسط لایه ملات بهترین عملکرد را داشتند و از آنجایی که در نزدیکی زیر قرار گرفتند، تنها در بهبود ترک‌های سطحی کارآمد بودند. وانگ و همکاران (b۲۰۱۴) از یک روش میکروسکوپ نوری برای تجسم بقای میکرو کپسول‌های مبتنی بر ملامین (با ابعاد حدود ۵ میکرومتر) استفاده کرد که اسپورهای باکتری را محصور کردند.

۲-۵-احتمال برخورد ترک با کپسول‌ها

هنگامی که از کپسول‌های لوله‌ای شیشه‌ای در ماتریس استفاده می‌شود، صفحه ضعیفی ایجاد می‌کنند که ترک‌ها را به سمت خود می‌کشد. در مقایسه با میکرو کپسول‌های استوانه‌ای، مکان‌های ترک را نمی‌توان با قطعیت برای میکرو کپسول‌های کروی و استوانه‌ای پیش بینی کرد. احتمال برخورد ترک‌ها به کپسول‌ها با افزایش تعداد کپسول‌ها افزایش می‌یابد اما این باعث کاهش مقاومت بتن می‌شود. بنابراین، باید بین تعداد کپسول و اثر درمانی تعادل بهینه وجود داشته باشد.

۳-۵-زمان عمل آوری عوامل ترمیم و شرایط عمل آوری

یک سیستم خودترمیم خوب باید بتواند به‌سرعت به آسیب پاسخ دهد، که به این معنی است که عامل‌ترمیم دهنده محصور شده باید در صورت لزوم در سریع‌ترین زمان ممکن آزاد شود. فعال شدن هاگ‌های باکتری محصور شده معمولاً چند روز طول می‌کشد تا پس از قرار گرفتن در معرض رطوبت رخ دهد زیرا هاگ‌ها برای رشد به زمان نیاز دارند. مشخص شد که بسته شدن کامل ترک بر روی سطح پس از ۲ هفته غوطه‌وری در آب رخ می‌دهد (Jonkers 2011).

در حین استفاده از اپوکسی به‌عنوان عامل‌ترمیم کننده، باید توجه داشت که نسبت صحیح مخلوط برای پخت مهم است. سخت شدن زودرس یا سخت شدن با تأخیر ممکن است زمانی اتفاق بیفتد که اجزا به‌درستی مخلوط نشده باشند. Thao (2011) اپوکسی یک جزئی را در داخل کپسول‌های شیشه‌ای استوانه‌ای محصور کرد که در تماس با هوا هنگامی که در ماتریس آزاد می‌شوند، سخت می‌شوند. به دلیل واکنش پذیری کمتر عامل، هیچ سختی قبل از پارگی کپسول رخ نداد. تائو (۲۰۱۱) مشاهده کرد که پخت کامل اپوکسی حدود ۷ روز پس از رها شدن از کپسول صورت گرفت. عرض ترک ۰.۳ میلی متر با بازیابی ۹۹٪ سختی (در مورد دال‌های بتنی) ترمیم شد. علاوه بر این، هنگامی که اعضای بتنی در معرض نور خورشید قرار می‌گیرند، اپوکسی ممکن است به دلیل پلیمریزاسیون ناشی از واکنش فتوشیمیایی سریع‌تر عمل کند.

٤-۵-تأثیر کپسول‌های خالی شده بر مقاومت بتن

افزودن عوامل ترمیم کننده و/یا کپسول‌ها می‌تواند مقاومت مکانیکی نمونه بتن را کاهش دهد، زیرا بسیاری از مواد پلیمری/شیمیایی پیوندهای ضعیفی در زمینه بتن ایجاد می‌کنند، اگرچه عملکرد آن‌ها به‌عنوان ماده کپسول رضایت بخش است. همچنین پس از تخلیه عامل‌ترمیم کننده، کپسول‌های خالی شده به‌عنوان حفره‌های داخل ماتریکس عمل می‌کنند. بنابراین، دوز بالاتر در واقع می‌تواند منجر به کاهش بیشتر قدرت به دلیل ایجاد فضای خالی بیشتر شود. به‌عنوان مثال، وانگ و همکاران. (b۲۰۱۴) از میکرو کپسول‌های مبتنی بر ملامین با ابعاد ۵ میکرومتر در دوزهای مختلف (از ۱ تا ۵٪) استفاده کرد و با افزایش دوز کپسول تلفات مقاومت فشاری را ثبت کرد.

۵-۵-کارایی رهاسازی عامل شفابخش از کپسول

هنگامی که کپسول‌ها پاره شدند، انتظار می‌رود که عامل شفا دهنده آزاد شده و به‌سرعت در ماتریکس مستقر شود. از این نظر، کپسول‌های کروی می‌توانند بهتر از کپسول‌های استوانه‌ای باشند، زیرا اولی شکل یکنواخت‌تری دارد و اثرات مکش در انتهای بسته کپسول‌های استوانه‌ای، آزادسازی عامل التیام دهنده را برای این کپسول‌ها دشوار می‌کند. آزمایش‌هایی که توسط یونگ (۱۹۹۷) انجام شد، نشان داد که کپسول‌های کروی در مقایسه با کپسول‌های دراز، فاصله انتقال کمتری از مواد شفابخش در ترک‌ها را فراهم می‌کنند. با این حال، انتشار افزایش یافته عوامل شفابخش از کپسول‌های کروی می‌تواند به دلیل فرسودگی سریع مواد شفابخش مشکل ساز باشد (Mihashi et al. 2001). فنگ و همکاران (۲۰۰۸) گزارش داد که استفاده از اپوکسی به‌عنوان ماده شفابخش در داخل کپسول‌های کروی می‌تواند تنها چند ترک را به دلیل فرسودگی سریع مواد ترمیم بخشد. در مقابل، کپسول‌های استوانه‌ای بهبود قابل توجهی در بازیابی و خواص مکانیکی بهتر، مانند استحکام و دوام نشان دادند.

۶-۵-پایداری عوامل ترمیم دهنده

عوامل شفابخش مورد استفاده باید در طول زمان پایدار باشند تا ترک‌ها در مراحل بعدی عمر ساختمان بهبود یابد. بیشتر عوامل شفابخش تک جزئی با رطوبت یا هوا واکنش نشان می‌دهند. بنابراین، اگر حباب‌های هوا در داخل کپسول به دام افتاده باشد یا رطوبت از طریق دیواره کپسول پخش شود، عامل التیام دهنده ممکن است سخت شود و ثبات به خطر بیفتد (Li et al. 1998; Van Tittelboom and De Belie 2010). گرمایش در اثر قرار گرفتن در معرض نور خورشید همچنین ممکن است منجر به سخت شدن زودرس عامل شفابخش شود و بازیابی دوام و خواص مکانیکی را به خطر بیندازد.

۷-۵-قابلیت آب بندی؛ بازیابی دوام و مقاومت ماتریس بتن

خودترمیم کارآمد در بتن به این معنی است که دوام و مقاومت مکانیکی به‌طور کامل بازیابی شده یا نزدیک به نمونه اصلی است. اگر ترک‌ها و منافذ به‌طور مؤثر مسدود شوند، بازیابی خواص مکانیکی و دوام بالاست. به عبارت دیگر، توانایی آب بندی عامل‌ترمیم دهنده بر میزان بازیابی خواص بتن اصلی تأثیر می‌گذارد.

۸-۵-بازیابی مقاومت مکانیکی

قدرت عامل‌ترمیم دهنده باید برابر یا بیشتر از ماتریس میزبان برای بازیابی بیشتر قدرت باشد. ترمیم ترک با عامل‌ترمیم دهنده ضعیف‌تر از ماتریکس ممکن است مؤثر نباشد زیرا نقطه بهبود یافته یک ناحیه ضعیف و تمرکز تنش ایجاد می‌کند و ترک‌ها ممکن است تحت بارگذاری بیشتر شروع به انتشار کنند (White et al. 2001).

۹-۸-بازیابی دوام

ون تیتلبوم و همکاران (b۲۰۱۱) کاهش نفوذپذیری آب را برای ترک‌های ایجاد شده با عرض بین ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومتر اندازه گیری کرد. سیستم خودترمیم شامل لوله‌های شیشه‌ای یا سرامیکی با دو لوله قرار گرفته در کنار یکدیگر، یکی حاوی پیش پلیمر و دیگری حاوی شتاب دهنده و آب بود. نتایج نشان داد که با استفاده از لوله‌های شیشه‌ای، ضریب نفوذپذیری آب به‌طور قابل توجهی پس از بهبود کاهش یافت. برای لوله‌های سرامیکی، کاهش حتی بیشتر بود. این تفاوت ممکن است به دلیل آزاد شدن بیشتر ماده‌ترمیم کننده از لوله‌های سرامیکی باشد که می‌تواند با کشش سطحی بین شیشه و سرامیک توضیح داده شود. یانگ و همکاران (۲۰۱۱)

۱۰-۵-تکرارپذیری عمل خود درمانی

صرف نظر از تکنیک انتخاب شده، خودترمیم در بتن باید تحت بارگذاری خستگی مؤثر باشد. در این مطالعه، تکرارپذیری به عملکرد خودترمیم تحت سیکل‌های بارگذاری متعدد اشاره دارد. برخی از محققان از جمله ون تیتلبوم و همکاران. (b۲۰۱۱)، تائو (۲۰۱۱)، و یانگ و همکاران. (۲۰۱۱)، تلاش‌هایی را برای مطالعه تکرارپذیری رویکرد مبتنی بر کپسول با استفاده از کپسول‌های لوله‌ای و میکرو کپسول‌ها انجام داد. ون تیتلبوم و همکاران (b۲۰۱۱) بازیابی مقاومت و سختی را برای چرخه‌های بارگذاری چندگانه با لوله‌های حاوی PU به‌عنوان عامل‌ترمیم آزمایش کرد. ترک‌هایی به عرض حدود ۴۰۰ میکرومتر با اعمال بار ایجاد شدند، اگرچه برخی ترک‌ها به دلیل عمل الاستیک ملات و میلگردهای تقویت‌کننده بسته شد. بالاترین میانگین بازیابی استحکام تا حدود ۶۱٪ برای لوله‌های شیشه‌ای با قطر ۳ میلی متر برای سیکل بارگذاری اول مشاهده شد، در حالی که برای بارگذاری دوم، بالاترین بازیابی مقاومت حدود ۲۳٪ بود. به‌طور مشابه، سختی بازیابی شده در بارگذاری اول بیشتر بود (حدود ۶۴٪)، اما برای بارگذاری دوم به حداکثر ۳۴٪ کاهش یافت.

۱۱-۵-نیاز به تحقیقات بیشتر مرتبط با پایداری

به‌طور کلی کمبود کار و اطلاعات در مورد اثربخشی خوددرمانی در یک محیط کاربردی واقعی وجود دارد. در واقع، هدف این مطالعات همچنین باید چگونگی افزایش طول عمر و کاهش هزینه و همچنین تعیین مزایای زیست‌محیطی و اجتماعی ناشی از استقرار سیستم‌های بتنی خودترمیم شونده را بررسی کند. همچنین مطالعه این که چگونه توسعه مواد خودترمیم شونده برای افزایش طول عمر سازه‌های مهندسی عمران می‌تواند به کاهش تغییرات آب و هوایی کمک کند نیز مفید خواهد بود (Kua و Ashford 2004؛ Gunawansa et al. 2010؛ Kua and Koh 2012؛ Kua and Gunawansa. 2010؛ Kua 2014 و Ng و Mithraratne 2014).

٦-بحث و نتیجه گیری

در ادبیات، تمرکز زیادی بر روی خودترمیم خودکار شده است، اما این بررسی نشان داد که خودترمیم با کپسوله کردن پتانسیل ارائه خودترمیم باکیفیت بالاتر را دارد، از نظر گستره وسیع‌تری از عرض ترک که می‌تواند ترمیم یابد و پاسخ سریع‌تری داشته باشد. همان‌طور که بحث شد، رویکردهای متفاوتی برای خوددرمانی با کپسولاسیون وجود دارد که کیفیت آن را می‌توان بر اساس هشت معیار اثربخشی ارزیابی کرد. این ویژگی‌ها همچنین پیچیدگی موجود در تعیین بهترین ترکیبات برای خوددرمانی بهینه را برجسته می‌کند. حداقل، قبل از انتخاب روشی برای یک هدف خاص، عواملی مانند عرض ترک، نوع ترک، ماهیت فرآیند تشکیل ترک (یعنی پایدار یا پویا بودن آن) و مکان‌های کاربرد باید مشخص شود.

در میان مسائل دیگر، چندین چالش کلیدی برای سیستم خودترمیم مبتنی بر کپسول شناسایی شد. وجود کپسول‌های شیشه‌ای و لوله‌های ساخته شده از سرامیک یا شیشه می‌تواند در واقع ساختار بتن را تضعیف کند. همچنین داده‌های ناکافی در مورد تکرارپذیری فرآیند خودترمیم تحت بارگذاری چندگانه وجود دارد. وضعیت کپسولاسیون باکتری‌ها کمتر مشخص است. مهم‌تر از همه، هنوز اطلاعات ناکافی در مورد تأثیر شکل و اندازه کپسول بر اثربخشی خود درمانی وجود دارد. علاوه بر این، اگرچه بقای باکتری‌ها تا ۶ ماه نشان داده شده است، برای اینکه فناوری کپسوله‌سازی باکتری‌ها در ساختمان‌ها و سازه‌های مهندسی عمران کاربردی و مفید باشد، این بقا باید به‌طور قابل‌توجهی طولانی

شود. در نهایت، هنوز اطلاعات ناکافی در مورد بازیابی خواص مکانیکی بتن از خودترمیم مبتنی بر باکتری وجود دارد.

همچنین می‌توان از این بررسی نتیجه گرفت که دو مورد از مهم‌ترین عواملی که بر میزان کارآمدی یک تکنیک خودترمیم تأثیر می‌گذارد، عرض ترک و محافظت از میکرو کپسول‌ها است. حجم عامل ارمیم دهنده موجود در لوله‌ها یا میکرو کپسول‌ها محدود است. یکی از دلایلی که در بسیاری از موارد مورد مطالعه، خودترمیم نمی‌تواند آن‌طور که انتظار می‌رود مؤثر باشد، عدم کنترل بر تکثیر ترک است. این در واقع به این معنی است که یک ترک ایجاد شده تحت بارگذاری همچنان به انتشار خود ادامه می‌دهد، بنابراین باعث افزایش عرض و طول ترک حتی تحت بارهای کاهش می‌شود. تحقیقات بیشتر باید برای بررسی ابزارهای مختلف کنترل عرض ترک در حالی که از تکنیک‌های خودترمیم مناسب استفاده می‌شود، انجام شود. با توجه به توسعه مواد خودترمیم شونده در دهه گذشته، ممکن است انتظار عملی باشد که به‌زودی کاربرد گسترده‌تری از مواد خودترمیم شونده در ساختمان‌ها اجرا شود. با این حال، قبل از تحقق آن آینده، ابتدا باید به مسائل فنی و فنی برجسته پرداخته شود.

منابع

[1] ACI (American Concrete Institute). (2007). “Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structures.” Farmington Hills, MI.
[2] Fernandez, J. (2012). Material architecture, Taylor and Francis, Abingdon,
[3] U.K.
[4] Dakhil, F. H., Cady, P. D., and Carrier, R. E. (1975). “Cracking of fresh concrete as related to reinforcement.” ACI J., 72(8), 421–428.
[5] Cailleux, E., and Pollet, V. (2009). “Investigations on the development of self-healing properties in protective coatings for concrete and repair mortars.” Proc., 2nd Int. Conf. on Self Healing Materials, Chicago.
[6] Van Breugel, K. (2007). “Is there a market for self-healing cement-based materials.” Proc., 1st Int. Conf. on Self-Healing Materials, Springer, Netherlands
[7] van der Zwaag, S. (2007). “An introduction to material design principles: Damage prevention versus damage management.” Self healing materials, Springer, Netherlands, 1–18.
[8] Van Tittelboom, K., et al. (2016). “Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test.” Constr. Build. Mater., 107, 125–137. Neville, A. (2002). “Autogenous healing: A concrete miracle?” Concr. Int., 24(11), 76–82
[9] Ramm, W., and Biscoping, M. (1998). “Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete.” Nucl. Eng. Des., 179(2), 191–200
[10] Jacobsen, S., Marchand, J., and Boisvert, L. (1996). “Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete.” Cem. Concr. Res., 26(6), 869–881.
[11] Yang, Y., Lepech, M. D., Yang, E.-H., and Li, V. C. (2009). “Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles.” Cem. Concr. Res., 39(5), 382–390.

[12] Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Cabot, G., and Chanvillard, G. (2007). "Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis." Cem. Concr. Res., 37(4), 519–527.
[13] Li, W., Jiang, Z., Yang, Z., Zhao, N., and Yuan, W. (2013). "Self-healing efficiency of cementitious materials containing microcapsules filled with healing adhesive: Mechanical restoration and healing process monitored by water absorption." PloS One, 8(11), 1–8.
[14] Ter Heide, N., and Schlangen, E. (2007). "Self-healing of early age cracks in concrete." Proc., 1st Int. Conf. on Self Healing Materials, Springer, Dordrecht, Netherlands.
[15] Ter Heide, N. (2005). "Crack healing in hydrating concrete." Master's dissertation, Delft Univ. of Technology, Delft, Netherlands.
[16] Ter Heide, N., Schlangen, E., and Van Breugel, K. (2005). "Experimental study of crack healing of early age cracks." Proc., Knud Hojgaard Conf., DTU Byg, Tech. Univ. of Denmark, Lyngby, Denmark.
[17] Jacobsen, S., and Sellevold, E. J. (1996). "Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw." Cem. Concr. Res., 26(1), 55–62.
[18] Şahmaran, M., Keskin, S. B., Ozerkan, G., and Yaman, I. O. (2008). "Selfhealing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash." Cem. Concr. Compos., 30(10), 872–879.
[19] Kim, J., and Schlangen, E. (2011). "Self-healing in ECC stimulated by SAP under flexural cyclic load." Proc., 3rd Int. Conf. on Self Healing Materials, Univ. of Bristol, Bristol, U.K., 27–29.
[20] Snoeck, D., Van Tittelboom, K., Steuperaert, S., Dubruel, P., and De Belie, N. (2013). "Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers." J. Intell. Mater. Syst. Struct., 25(1), 13–24.
[21] Na, S. H., Hama, Y., Taniguchi, M., Katsura, O., Sagawa, T., and Zakaria, M. (2012). "Experimental investigation on reaction rate and self-healing ability in fly ash blended cement mixtures." J. Adv. Concr. Technol., 10(7), 240–253
[22] Sisomphon, K., Copuroglu, O., and Fraaij, A. (2011a). "Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a self-healing agent in blast furnace slag mortar." Heron, 56(1/2), 13–32
[23] Jonkers, H., and Schlangen, E. (2009). "Towards a sustainable bacteriallymediated self healing concrete." Proc., 2nd Int. Conf. on Self-Healing Materials, S. van der Zwaag, ed., Vol. 100, Springer, Netherlands.
[24] Dong, B., Wang, Y., Fang, G., Han, N., Xing, F., and Lu, Y. (2015). "Smart releasing behavior of a chemical self-healing microcapsule in the stimulated concrete pore solution." Cem. Concr. Compos., 56, 46–50.
[25] Thao, T. D. P. (2011). "Quasi-Brittle self-healing materials: Numerical modelling and applications in civil engineering." Ph.D. dissertation, National Univ. of Singapore, Singapore.
[26] Van Dam, T. J. (2005). "Guidelines for early-opening-to-traffic Portland cement concrete for pavement rehabilitation." No. 540, Transportation Research Board, Washington, DC.
[27] Asua, J. M. (2002). "Miniemulsion polymerization." Prog. Polym. Sci., 27(7), 1283–1346.
[28] Brown, E. N., White, S. R., and Sottos, N. R. (2005). "Retardation and repair of fatigue cracks in a microcapsule toughened epoxy composite—Part II: In situ self-healing." Compos. Sci. Technol., 65(15), 2474–2480
[29] Kessler, M., Sottos, N., and White, S. (2003). "Self-healing structural composite materials." Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf., 34(8), 743–753.
[30] Feng, X., et al. (2008). "Self-healing mechanism of a novel cementitious composite using microcapsules." Proc., Int. Conf. on Durability of Concrete Structures, Zhejiang Univ., Hangzhou, China
[31] Blaiszik, B., Caruso, M., McIlroy, D., Moore, J., White, S., and Sottos, N. (2009). "Microcapsules filled with reactive solutions for self-healin materials." Polymer, 50(4), 990–997.

[32] Pelletier, M., Brown, R., Shukla, A., and Bose, A. (2011). “Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent.” Technical Rep., Univ. of Rhode Island, Kingston, RI
[33] Li, V. C., Lim, Y. M., and Chan, Y.-W. (1998). “Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite.” Compos. Part B: Eng., 29(6), 819–827
[34] Aïssa, B., Therriault, D., Haddad, E., and Jamroz, W. (2012). “Self-healing materials systems: Overview of major approaches and recent developed technologies.” Adv. Mater. Sci. Eng., 2012, 17.
[35] Thao, T. D. P., Johnson, T. J. S., Tong, Q. S., and Dai, P. S. (2009). “Implementation of self-healing in concrete-proof of concept.” IES J. Part A: Civ. Struct. Eng., 2(2), 116–125
[36] Van Tittelboom, K., Tsangouri, E., Van Hemelrijck, D., and 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
[37] Huang, H., Ye, G., Leung, C., and Wan, K. (2011). “Application of sodium silicate solution as self-healing agent in cementitious materials.” Proc., Int. RILEM Conf. on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering, RILEM Publications SARL, Bagneux, France, 530–536.
[38] Huang, M., Jiang, L., Liaw, P. K., Brooks, C. R., Seeley, R., and Klarstrom, D. L. (1998). “Using acoustic emission in fatigue and fracture materials research.” JOM, 50(11), 1–14.
[39] Lee, H., Wong, H., and Buenfeld, N. (2010). “Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete.” Adv. Appl. Ceram., 109(5), 296–302.
[40] Li, M., and Li, V. C. (2011). “Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment.” ACI Mater. J., 108(3), 333–340.
[41] Dry, C. (1994a). “Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices.” Smart Mater. Struct., 3(2), 118–123.
[42] Dry, C. (2000). “Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete
[43] Mihashi, H., Kaneko, Y., Nishiwaki, T., and Otsuka, K. (2001). “Fundamental study on development of intelligent concrete characterized by self-healing capability for strength.” Trans. Jpn. Concr. Inst., 22,b 441–450.
[44] Wang, J., et al. (2015). “Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: A promising strategy for crack self-healing.” Front. Microbiol., 33(125016), 1088.
[45] Wang, J., De Belie, N., and Verstraete, W. (2012a). “Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete.” J. Ind. Microbiol. Biotechnol., 39(4), 567–577.
[46] Wang, J., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., and De Belie, N. (2014a). “Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete.” Constr. Build. Mater., 68, 110–119.
[47] Jonkers, H. (2011). “Bacteria-based self-healing concrete.” Heron, 56(1/2), 1–12.
[48] Jung, D. (1997). “Performance and properties of embedded microspheres for self-repairing applications.” Ph.D. dissertation, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, IL
[49] Waiching, T., Kardani, O., and Cui, H. (2015). “Robust evaluation of selfhealing efficiency in cementitious materials—A review.” Constr. Build. Mater., 81, 233–247.
[50] Kua, H. W. (2013a). “Attributional and consequential life cycle inventory assessment of recycling copper slag as building material in Singapore.” Trans. Inst. Meas. Control, 35(4), 510–520.
[51] Kua, H. W. (2013b). “The consequences of substituting sand with used copper slag in construction.” J. Ind. Ecol., 17(6), 869–879.
[52] Gunawansa, A., and Kua, H. W. (2014). “A comparison of climate change mitigation and adaptation strategies for