

# فهرست

۱	بتن .....
۱	بتن شکل پذیر قابل ارتجاع .....
۲	بتن خود ترمیم .....
۵	فناوری نانو و روش هاس ساخت بتن های خود ترمیم .....
۶	استفاده از باکتری ها برای ساخت بتن های خود ترمیم - بتن زیستی .....
۹	بتن فیبری خود ترمیم شونده .....
۱۲	مطالعات آزمایشگاهی .....
۱۲	مواد اولیه .....
۱۲	در معرض شرایط محیطی قرار دادن .....
۱۳	بازیابی خواص مکانیکی .....
۱۳	بازیابی فرکانس تشدید .....
۱۴	بازیابی سختی .....
۱۹	محصولات خود ترمیمی .....
۲۰	روند خود ترمیمی .....
۲۱	مشخصات شیمیایی محصولات خود ترمیمی .....
۲۳	مزایای کاربرد .....
۲۳	استفاده از مواد نانو در ساخت میکروکپسول های خود ترمیم .....
۲۴	کپسول های استوانه ای پر شده با عوامل ترمیمی .....

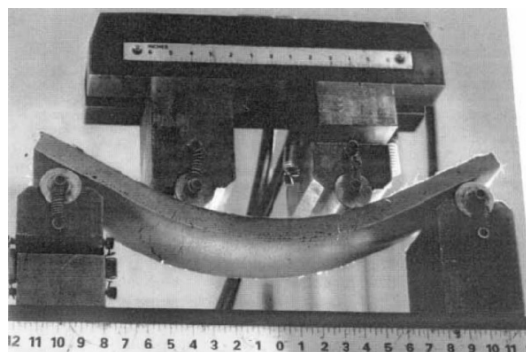
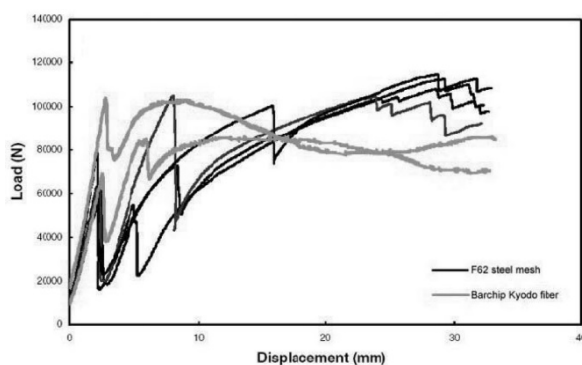
- تیرهای سیمانی با ویژگی های خود ترمیمی ..... ۲۵
- روش های آزمایشگاهی ..... ۲۷
- خمش ۴ نقطه ای ..... ۲۷
- تجزیه و تحلیل هبستگی تصاویر دیجیتالی ..... ۲۸
- آنالیز و بررسی امواج صوتی ..... ۲۸
- تست نفوذ پذیری آب ..... ۲۹
- بررسی و تحلیل پرتو نگاری ..... ۲۹
- استفاده از مواد نانو در ساخت شبکه مویرگی حاوی عوامل خود ترمیمی ..... ۳۲
- روش انتخابگر گرمایی ..... ۳۳
- استفاده از فیبر تو خالی ..... ۳۴
- نانو لوله های کربنی ..... ۳۵
- بتن آسفالتی متخلخل خود ترمیم شونده ..... ۳۶
- روش کپسولی ( پوششی ) ..... ۳۶
- حرارت زایی اندوکسیون ..... ۳۷
- نتیجه گیری ..... ۳۹

## بتن

بتن، سنگ مصنوعی ساخته دست بشر، مخلوطی از سیمان، آب و سنگدانه است و پر مصرف ترین ماده در جهان می باشد. در گروه جامدات هوشمند بودن بتن برای بشر ناشناخته بوده و انسان به درصد کمی از پیچیدگی های بتن پی برده است. با کسب علم و دانش لازم می توان عمر مفید سازه های بتنی را افزایش داده و خواص این ماده هوشمند را در سازه های بتنی با دوام، با عمر مفید زیاد همراه با طبیعت این کره خاکی گام به گام پیش برد. بتن معمولی ترد و شکننده بوده و نیروهای زلزله باعث شکست ناگهانی و فروریختن سازه های بتنی می گردد. با قرار دادن فولاد داخل بتن و مسلح کردن آن فولاد نیروهای کششی را تحمل نموده و از طرفی در خیلی از موارد نیروهای کششی به طور دقیق مخصوصاً در بارهای دینامیکی مشخص نمی باشد. ایران از نظر لرزه خیزی در منطقه فعال جهان قرار دارد. به گواهی اطلاعات مستند علمی و مشاهدات قرن بیستم یکی از پر خطرترین مناطق جهان در اثر زمین لرزه های پر قدرت محسوب می شود. به طور متوسط هر پنج سال یک زمین لرزه با آسیب های جانی و مالی بسیار زیاد در ایران رخ داده است. ژاپنی ها تحقیقات وسیعی را روی بتنی انجام داده اند که قبل از شکستن چندین برابر بتن معمولی مقاومت کششی را تحمل می نماید. در خصوص تامین نرمی و طاقت بتن در کشش و کنترل ترکها استفاده از الیاف پلیمری مورد توجه قرار گرفته است.

### • بتن شکل پذیر قابل ارتجاع (Elasto Plastic Concrete)

با اضافه کردن الیاف پلیمری به بتن مقاومت کششی، خمشی، برشی و سایشی بتن افزایش یافته و پیوستگی و یکپارچگی عالی در بتن ایجاد می گردد. بتن شکل پذیر قابل ارتجاع دارای قابلیت جذب انرژی زیادی بوده (شکل ۱ و نمودار ۲) و در مقابل زلزله، بارهای ضربه ای و نیروهای دینامیکی بسیار مقاوم می باشد.



الیاف پلیمری موجود در بتن شکل پذیر قابل ارتجاع، از ایجاد ترک در بتن پیشگیری نموده و باعث افزایش مقاومت بتن در مقابل خوردگی، افزایش دوام بتن، افزایش مقاومت در مقابل خستگی حیاتی بتن، افزایش مقاومت در مقابل تنشهای ناشی از چروک خوردگی بتن، افزایش پایداری در اثر آتش سوزی، شوک حرارتی و انفجار و افزایش مقاومت بتن در مقابل کاویتاسیون (Cavitation) می گردد.



کاربرد بتن شکل پذیر قابل ارتجاع با استفاده از الیاف پلیمری در دال و عرشه پلها، ترمیم سازه های بتنی، بتن پاششی، گذرگاههای فرودگاه، ورزشگاهها، سرریز سدها، تثبیت خاک، معادن، پوشش تونل TBM، سازه های دریایی، منهول، کانالها، لوله های بتنی، اسکله، دیوارهای برگشت، تزریق حفره های زیر زمینی، پوشش کانالها، استحکام رامپ، استخرها، مخازن بتنی، سقفهای ساختمانهای مسکونی، پیاده روها، مسیرهای عبور و مرور صنعتی و تجاری و پارکینگ، قطعات پیش ساخته، تاسیسات شیمیایی و غیره می باشد. بتن قابل ارتجاع فرم پذیر قبل از شکستن چندین برابر بتنی معمولی کشیده می شود و مقاومت کششی در نخستین ترک و مقاومت کششی نهایی بتن توسط الیاف پلیمری افزایش می یابد.

الیاف پلیمری آجدار موجود در بتن قابل ارتجاع فرم پذیر از انهدام تیرهای بتنی در اثر کشش قطری جلوگیری کرده و در برخی از آزمایشها کاربرد الیاف پلیمری مقاومت برشی تیرها را بیش از ۱۰۰ درصد افزایش می دهد.

### • بتن خود ترمیم (Self-Healing Concrete)

نانو ذرات سیلیس با ایجاد واکنش پوزولانی با کریستالهای هیدروکسید کلسیم  $\text{Ca(OH)}_2$  ژل متراکم یکپارچه و نامحلول هیدروکسید کلسیم سیلیکات (C-S-H) تشکیل و نانو سیلیس به علت داشتن سطح ویژه بسیار زیاد مانند هسته عمل کرده و چسبندگی بسیار قوی با سیمان هیدراته تشکیل می دهد. نانو سیلیس با هیدروکسید کلسیم واکنش نشان داده و از رشد بیشتر بلورهای هیدروکسید کلسیم جلوگیری و مانند پوزولانها ترکهای ریز و منافذ موین را پر کرده و در نهایت سبب تراکم ساختار سیمان و کاهش نفوذ پذیری و افزایش مقاومت دوام و عمر مفید سازه بتنی می گردد. پروفسور ویکتور لی در دانشگاه میشیگان در رابطه با خود ترمیمی بتن در پلها و جاده ها به نتایج جالبی رسیده است. به طوری که ترکهای ریز و منافذ موین در حد ۳۰ میکرون (یک سوم تار مو) در اثر آب و هوا خود ترمیم شده و بتن استحکام خود را دوباره به دست می آورد. خود ترمیمی بتن از ورود آب و نمک و یون کلر و مواد شیمیایی داخل سازه بتنی جلوگیری نموده و از خوردگی (Corrosion) فولاد و تخریب بتن پیشگیری خواهد کرد.

به طور کلی، انتظار عموم از زیر ساخت ها، خدمت پذیری طولانی نه تنها به مدت ۵۰ سال بلکه برای همیشه می باشد. با این وجود، بسیاری از زیر ساخت های احداث شده از قبیل ساختمان ها، سازه های بتنی و امکانات حمل و نقل که نیمه دوم قرن اخیر ساخته شده اند، به دلیل خرابی و اضمحلال مصالح، در انتهای دوره عملکردی و کاربردی خود قرار دارند. در طرف مقابل، رشد بسیار زیاد جمعیت شهری باعث افزایش تقاضای عمومی همراه با خدمت دهی به نیازهای خود در یک سطح سرویس بالا شده است. ون بروگل (۲۰۰۷) نموداری را که نشان دهنده کارایی سازه ها با گذشت زمان می باشد، نشان می دهد. خرابی تدریجی تا زمان فرا رسیدن اولین موعد تعمیر

و ترمیم ادامه می یابد. هر چند که هنوز نگرانی در مورد دوام زیرساخت های تحت تعمیر وجود دارد. اغلب تعمیر و ترمیم دوم، ده تا پانزده سال پس از تعمیر اول مورد نیاز می باشد. صرف هزینه های بیشتر در ابتدا به منظور رسیدن به کیفیت بالاتر صورت می گیرد. دوره نگهداری آزاد (بدون محافظت های خاص) طولانی تر شده و اولین تعمیر اصلی می تواند سال ها به تعویق بیفتد. بسیاری از دانشمندان و مهندسين در جستجوی مولفه های اصلی و مهم جهت طراحی سازه ها با دوام بالاتر و دوره نگهداری آزاد بیشتر و البته هزینه کمتر می باشند. جامعه هزینه های هنگفتی را به دلیل کیفیت پایین و دوام نامناسب بتن و راه ها و اثرات اکولوژی آن، هزینه کرده است. در اروپا، ۵۰٪ بودجه سالانه عمرانی، صرف بازسازی و بهسازی سازه های موجود می شود. در آمریکا، متوسط هزینه نگهداری و تعمیر پل حدود ۵,۲ میلیارد دلار می باشد. علاوه بر این، هزینه های ناشی از تراکم ترافیک بیش از ده برابر هزینه های مستقیم و هزینه تعمیر می باشد. همچنین بر اساس اطلاعات DEFRA، بیش از ۵۰٪ از انتشار  $CO_2$  در ارتباط با احداث ساختمان و به طور کلی صنعت ساختمان می باشد.

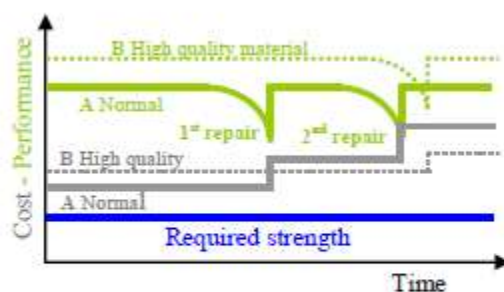


Figure 1. Performance and cost, including direct repair cost, versus elapse time for (A) normal and (B) high quality infrastructure. External economic parameter neglected (adapted from (Van Breugel 2007)).

طبق گفته ون بروگل (۲۰۰۷)، افزایش طول عمر زیرساخت ها، بدون شک باعث کاهش اثر فعالیت های انسانی بر دوام و ثبات زیست کره می شود. به عنوان مثال، دوره عمر بهبود یافته خدمت پذیری یک ابر سازه باعث کاهش تقاضا جهت احداث زیرساخت های جدید و به تبع آن کاهش استفاده از مواد خام می شود. بر همین اساس، باعث کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گاز  $CO_2$  می گردد. با توجه به مصالح، تلاش برای افزایش عمر دوره خدمت پذیری زیرساخت را می توان با استفاده از مصالح مرغوب شامل مواد خود ترمیم شونده، بهبود بخشید. طبیعت درس های بسیاری را در مورد مواد بیولوژیکی با توجه به قابلیت های خود ترمیمی موجود در آنها به منظور رسیدن به عملکرد قبلی ارائه می کند. طبق الگوی مدیریت خرابی مشاهده شده در طبیعت که توسط ون در زواگ (۲۰۰۷) ارائه شده است، بسیاری از دانشمندان از مواد خود ترمیم شونده که مدل کوچکی از خصوصیات یک سیستم بیولوژیکی می باشند، استفاده کرده اند. بسیاری از روش ها و تکنیک ها، بر اساس خصوصیات ذاتی متفاوت مصالح گوناگون توسعه یافته اند. با این وجود، ویژگی مشترک این مواد، قابلیت خود ترمیم شوندگی در برابر خرابی های موجود و بدین ترتیب بازسازی پیوسته عملکرد آنها می باشد. این موضوع باعث افزایش دوره عمر مصالح می شود. برای یک زیرساخت، حالت ایده آل، عدم پرداخت هیچ گونه هزینه جهت نگهداری و تعمیر می باشد، زیرا مصالح قادر به ترمیم خود می باشند که در شکل ۲ نیز نشان داده شده اند (ون بروگل ۲۰۰۷).

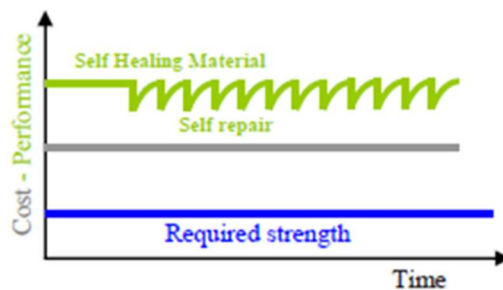


Figure 2. Performance and cost versus elapse time for structure built with self healing material. Inflation and interest ignored (adapted from (Van Breugel 2007)).

در گذشته، تحقیقاتی با موضوع خود ترمیمی بتن انجام شده است. نویل (۲۰۰۲) خلاصه مفیدی از تحقیقات خود درباره این موضوع را ارائه کرده است. او از روش اجرایی ترمیم خود به خودی در کاهش انتقال آب در ترک ها از قبیل لوله های آبی بتنی استفاده کرده است. همچنین نویل از تحقیق خود این طور نتیجه گرفته است که هیچ سازگاری در تحقیقات مختلف در مورد آنچه که در ترک ها هنگام وقوع خود ترمیمی رخ می دهد، وجود ندارد و بدین ترتیب انجام تحقیقات بیشتر مورد نیاز می باشد. تحقیقات اولیه در مورد اثر خود ترمیم شونده گی بتن بر روی سازه های حائل آبی و یا مخازن که نشأت از طریق ترک ها معضل اصلی این سازه ها به شمار می رود، انجام شده است (ادواردسن ۱۹۹۹، رین هارت و جوس ۲۰۰۳). در تحقیق ترهید (۲۰۰۵) و گرانر (۲۰۰۶)، توجه اصلی در مورد بازیابی خصوصیات مکانیکی ترک ها در روزهای اولیه ساخت بتن از طریق پیشرفت هیدراسیون ذرات سیمانی می باشد. ترهید (۲۰۰۵) مرور مناسبی بر دلایل مختلف خود ترمیمی خود به خودی (شکل ۳) ارائه می کند که طی آن یک ماده دارای ماهیت خود ترمیمی می باشد. از طرف دیگر، مصالح می توانند به گونه ای طراحی شوند که دارای یک ظرفیت خود ترمیم شونده گی باشند (اشلانگن و جوزف ۲۰۰۸). سپس ما آنها را به مصالح مستقل طبقه بندی می کنیم که مجدداً می توانند به حالت محرک و مقاوم تبدیل شوند. یک ماده دارای حالت مقاوم توانایی واکنش در برابر تحریکات خارجی را بدون نیاز به دخالت انسان دارا می باشد، در حالی که در حالت محرک ماده یا سازه به منظور کامل کردن فرآیند ترمیمی نیاز به دخالت دارند.

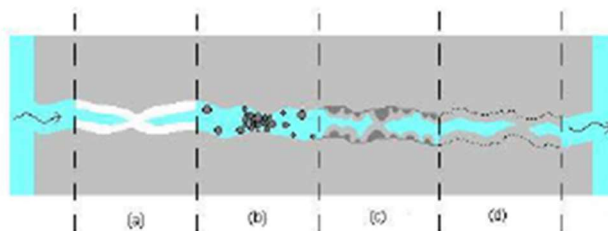


Figure 3. Possible causes of self healing: (a) formation of calcium carbonate or calcium hydroxide, (b) sedimentation of particles, (c) continued hydration, (d) swelling of the cement-matrix (Ter Heide 2005).

در ۵ سال اخیر استفاده از توانایی خود ترمیمی مصالح در مورد اکثر مصالح بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (ون در زواگ ۲۰۰۷، گاش ۲۰۰۸). برای مصالح سیمانی می توان از روش دیگری نیز بهره برد. در اولین نوع از روش ها از درزگیرهای کپسولی (محفظه ای) یا مواد چسبنده استفاده می شود (درای ۲۰۰۰). می توان مواد چسبنده را در فیبرهای کوتاه نگهداری کرد (نیشواکی ۲۰۰۶، جوزف ۲۰۰۸، جوزف و همکاران ۲۰۰۸). روش دیگر استفاده از یک عنصر انبساطی در بتن می باشد که باعث پر شدن خلل و

فرج های بتن و همچنین ترک ها به وسیله رسوبات کربنی می شود (هوسادا ۲۰۰۷ ، سیسومفون ۲۰۰۹) . استفاده از باکتری جهت برانگیختن مکانیزم خود ترمیم شونده گی به عنوان جایگزین اما محتمل در گروه های مختلف مورد مطالعه قرار می گیرد (بنگ ۲۰۰۱ ، یانکرز و اشلانگن ۲۰۰۷ ، دی مونیک ۲۰۰۸ ، ویکتور و یانکرز ۲۰۱۱) .

## فناوری نانو و روش های ساخت بتن های خود ترمیم شونده

در فناوری نانو مواد به اندازه هایی در مقیاس نانو کوچک شده و با دوباره سازی آن، به موادی با خصوصیات جدید، به صنعت عرضه می شوند. اکسیدهای مختلف نظیر نانو سیلیس ( $\text{nano-SiO}_2$ )، نانو اکسید آهن ( $\text{nano-Fe}_2\text{O}_3$ )، نانو اکسید آلومینیوم ( $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$ ) و نانو اکسید تیتانیوم ( $\text{nano-TiO}_2$ ) سبب بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن می شوند. به عنوان مثال نانو ذرات اکسید تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ ) در بتن، در اثر تابش نور فعال شده و خاصیت خود تمیز شونده گی توام با اضمحلال آلودگی هوا صورت می گیرد. (۱)

استفاده از این نانو مواد در سطوح خارجی ساختمان ها و جاده ها به ویژه در نقاط پر تردد و دارای آلودگی، سبب کاهش خسارات زیست محیطی و اقتصادی خواهد شد و از سال ۲۰۰۸ تاکنون در بسیاری از کشورهای پیشرفته مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه آن استفاده از اکسید تیتانیوم در ۷۰۰۰ متر مربع جاده های در میلان و کاهش ۶۰ درصدی سطح دی اکسید نیروژن هوا می باشد.



شکل ۱ استفاده از نانو ذرات  $\text{TiO}_2$  در بتن جاده های جهت خود تمیز شونده گی و کاهش آلودگی هوا

یکی از دغدغه های اصلی در هر سازه بتنی، کنترل و جلوگیری از بروز ترک خوردگی می باشد. ترک خوردگی در بتن ممکن است به صورت داخلی تحت تأثیر مصالح تشکیل دهنده خود بتن صورت گرفته و یا تحت اثر عوامل و محیط خارجی نظیر محیط های شیمیایی خورنده که دارای سولفات و کلرید بوده، نفوذ نمک ها و اسیدها، اثرات جوی و محیطی، تغییرات شدید دمایی و ضربات و بارهای وارد بر بتن ایجاد گردد. نه تنها این گونه ترک ها بلکه حتی ترک های ریز میکروسکوپی در ناحیه کششی بتن که امری بدیهی تلقی می شود در شرایطی ممکن است عملکرد سازه بتنی را مختل نماید. چرا که ترک ها مسیرهایی ساده برای نفوذ مواد خورنده نظیر

یون کلر، نفوذ نمک‌ها و اسیدهای مضر و یا پدیده کربناسیون در اثر نفوذ  $CO_2$  به همراه آب در بتن بوده و سبب خوردگی میلگردها و در نتیجه زوال عضو بتن آرمه می‌گردند. تاکنون تحقیقات زیادی برای کنترل و ترمیم ترک‌ها و محافظت در برابر خوردگی اعضای بتن آرمه صورت گرفته است. در حال حاضر روش‌هایی نظیر بازسازی عضو آسیب دیده، پوشش‌های مختلف شیمیایی و استفاده از مواد پرکننده ترک، روش‌های سنتی و متداول برای ترمیم ترک‌های قابل شهود در یک سازه بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فناوری نانو مواد به اندازه‌هایی در مقیاس نانو کوچک شده و با دوباره سازی آن، به موادی با خصوصیات جدید، به صنعت عرضه می‌شوند.

ورود تکنولوژی نانو به صنعت بتن با پیدایش کامپوزیت‌های خود ترمیم، تداعی کننده ساخت سازه‌های هوشمند با شناسایی خرابی و ترمیم اتوماتیک می‌باشد. این فناوری با الگوبرداری و الهام از مکانیزم ترمیم در بدن موجودات زنده و شبیه سازی آن در بتن، در حال توسعه می‌باشد. در ادامه از مهم‌ترین و کاراترین تکنولوژی نانو در عرصه خود ترمیمی بتن با بررسی چگونگی پاسخ خود ترمیمی در اثر صدمه ایجاد شده در بتن ارائه می‌گردد. در این گزارش برخی از پیشرفت‌های اخیر در مورد سه پروژه موجود در دانشگاه دلفت مورد بحث قرار می‌گیرد. بتن باکتریایی که در آب بندی ترک‌ها و افزایش دوام بتن نقش مهمی را ایفا می‌کند، مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس اثر ترمیمی ناشی از خرابی در مصالح تقویت شده فیبری با افزودن عناصر مختلف به مخلوط مورد بررسی قرار می‌گیرد. سومین پروژه در مورد بتن آسفالتی می‌باشد که در مورد آن دو روش هوشمند مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در یک مورد ذرات متخلخل شامل احیا کننده به منظور شروع فرآیند ترمیم شونده خودبه خودی مقاوم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مورد دیگر رشته‌های براده فولاد با قیر که دارای واکنش گرمایی با استفاده از یک دستگاه اندوکسیون می‌باشد، مخلوط می‌شوند. این گرمایی داخلی می‌تواند باعث تعمیر و ترمیم خرابی در مصالح گردد. این روش به صورت یک روش ترمیم شونده خودبه خودی محرک خواهد بود، به این دلیل که جهت شروع فرآیند، تحریک (بارگذاری) خارجی مورد نیاز است.

### • استفاده از باکتری‌ها برای ساخت بتن‌های خود ترمیم – بتن زیستی

روش دیگری به صورت تلفیقی از مواد طبیعی و نانو مواد جهت ترمیم هوشمند بتن توسعه یافته است. این روش با کمک نوع خاصی از باکتری‌های موجود در طبیعت که قادر به زیست در محیط قلیایی بالای بتن هستند، برای ساخت بتن خود ترمیم استفاده می‌شود. در این مقاله ظرفیت باکتری به عنوان یک ماده خود ترمیم شونده در بتن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هر چند که ایده افزودن باکتری در بتن ممکن است در ابتدا عجیب به نظر برسد، اما منظور از بررسی آن، ارزیابی میکروبیولوژی آن نمی‌باشد. باکتری‌ها تقریباً به طور طبیعی در همه جای کره زمین نه تنها بر روی سطح آن بلکه در اعماق آن مثل حضور در رسوبات و صخره‌ها در عمق بیش از ۱ km حضور دارند. گونه‌های مختلفی از باکتری‌های اکستروموفیل یعنی باکتری‌هایی که علاقه مند به حداکثر شدن می‌باشند، در محیط‌های خشک از جمله بیابان‌ها و همچنین درون صخره‌ها یافت می‌شوند. مشخصه باکتری‌های موجود در محیط خشک و یا گونه‌های باکتریایی مقاوم قلیایی، توانایی جهت تشکیل غشاهای درونی می‌باشد. این سلول‌های مخصوص که به وسیله یک فعالیت متابولیک بسیار ناچیز ایجاد می‌شوند، قادر به تحمل تنش‌های شیمیایی و مکانیکی می‌باشند و برای دوره‌های بیش از ۲۰۰ سال پایدار و مقاوم می‌باشند. در برخی از نشریات، کاربرد باکتری‌ها جهت تمیز کردن سطح بتن به اثبات رسیده است (مویک ۲۰۰۸) و همچنین افزایش مقاومت ملات ماسه - سیمان گزارش شده است (بنگ ۲۰۰۱). هر چند که نتایج قابل اطمینانی حاصل شده‌اند، مانع اصلی در مورد



مطالعات اخیر این است که باکتری و ترکیبات مورد نیاز برای رسوب معدنی می توانند تنها به صورت خارجی بر روی سطح سازه ها پس از وقوع ترک رخ دهند. الزام این موضوع به دلیل عمر محدود (از چند ساعت تا چند روز) فعالیت آنزیمی و امکان ادامه حیات گونه های باکتریایی اعمال شده می باشد. در این تحقیق، کاربرد باکتری غشائی مقاوم قلیایی جهت بهبود ظرفیت خود ترمیم شونده گی بتن مورد بررسی قرار می گیرد. مشخصه های مقاومت کششی و فشاری مخلوط اصلی (بدون افزودن باکتری) و بتن باکتریایی قابل تعیین می باشند (یانکرز و اشلنگن ۲۰۰۷). علاوه بر این، امکان ادامه حیات باکتری بدون تحرک در بتن تعیین می شود و در نهایت، ظرفیت رسوب کلسیتی بتن باکتریایی به وسیله تحلیل ESEM نشان داده می شود. در شکل ۴ کریستال های کلسیتی توسط رسوب باکتریایی نشان داده شده است.

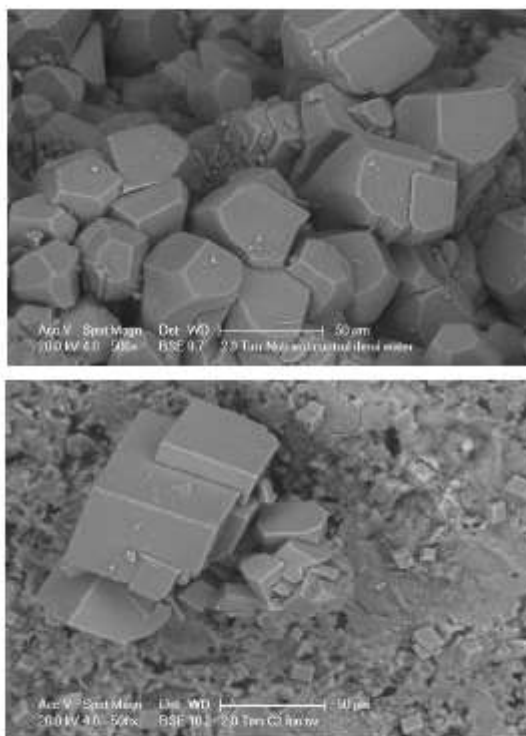


Figure 4. Biominerals observed by ESEM.

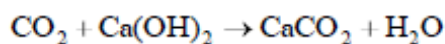
نتایج گسترده این مطالعه در قسمت دیگر منتشر شده است. تا به امروز نتایج اصلی این تحقیق به صورت آزمایشات انجام شده در باکتری های غشائی قلیایی در ترکیب با مخلوط بتن می باشد که باعث تشکیل رسوب کلسیم کربنات می شود. آب مورد نیاز جهت شروع فعالیت ساختار بتنی می تواند باعث تشکیل ترک های تازه شود. علاوه بر این، در مورد رسوبات معدنی، سلول های فعال نیاز به تشکیل زیرلایه های ارگانیک که می توانند به صورت متابولیک تبدیل به کربن غیر ارگانیک که قابل رسوب دهی با کلسیم آزاد موجود در کلسیم کربنات می باشد، دارند. کلسیم آزاد معمولاً در مخلوط بتن حضور دارد، اما کربن ارگانیک همواره در مخلوط حضور ندارد. در آزمایشات اولیه، کربن ارگانیک به صورت خارجی به عنوان قسمتی از محیط واکنش دهنده اعمال می شود، در حالی که به صورت ایده آل باید به عنوان قسمتی از مخلوط بتنی وارد واکنش شود. در این مورد تنها استفاده از آب جهت فعال سازی بتن باکتریایی غیر فعال مورد نیاز می باشد. با افزودن آب باکتری تبدیل کربن ارگانیک در مخلوط بتن به کلسیم کربنات می شود که باعث آب بندی ترک

های تازه تشکیل شده نیز می گردد. بنابراین استفاده از دو ترکیب ترمیم کننده زیست - شیمیایی متشکل از سلول های باکتری و ترکیب ارگانیک زیست سیمانی مناسب است . هم سلول ها و هم خوراک در مخزن متخلخل گسترش یافته غیر فعال می شوند. در این صورت سلول ها و باکتری ها در حین تولید و سخت شدگی بتن مورد حفاظت قرار گرفته و برای مدت طولانی تا زمان انجام خود ترمیم شوندگی زنده خواهند ماند .



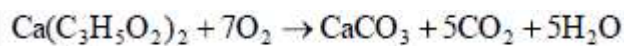
Figure 5. Cracked concrete specimens containing porous aggregates with food only (A) (top) and food plus bacteria (B) (bottom). The left figures are before and the right figures are after the healing.

صفحات بتنی آماده شده شامل سنگ دانه های متخلخل پر شده توسط ترکیب حاصل از باکتری و مخلوط می باشند. نمونه ها طی ۵۶ روز عمل آوری شده و سپس با استفاده از آزمایش بارگذاری شکافت کششی به منظور تشکیل ترک های جزئی مورد آزمایش قرار می گیرند. پس از تشکیل این ترک ها ، نمونه ها در توپک های نفوذ پذیر آزمایشی که طی آن آب از یک طرف نمونه به مدت ۲۴ ساعت به آن اعمال می شود ، قرار می گیرد. این نتایج در (یانکرز ۲۰۰۹) مورد بحث و بررسی قرار گرفته است . نتیجه این آزمایش نشان می دهد که ترمیم ترک ها در بتن باکتریایی بسیار کاراتر از بتن با ترکیبات مشابه اما بدون افزودن ماده ترمیم شونده بیوشیمیایی می باشد. دلیل این موضوع را می توان توسط فرآیندهای شیمیایی سخت در حالت کنترل و انجام فرآیندهای بیولوژیکی اضافی در بتن باکتریایی تفسیر نمود . در سطح ترک خورده بتن مورد آزمایش ، برخی از ترکیبات کلسیم کربنات به دلیل واکنش  $CO_2$  در ترک با کلسیم هیدروکسید موجود در مخلوط بتن طبق واکنش زیر ایجاد می شوند :

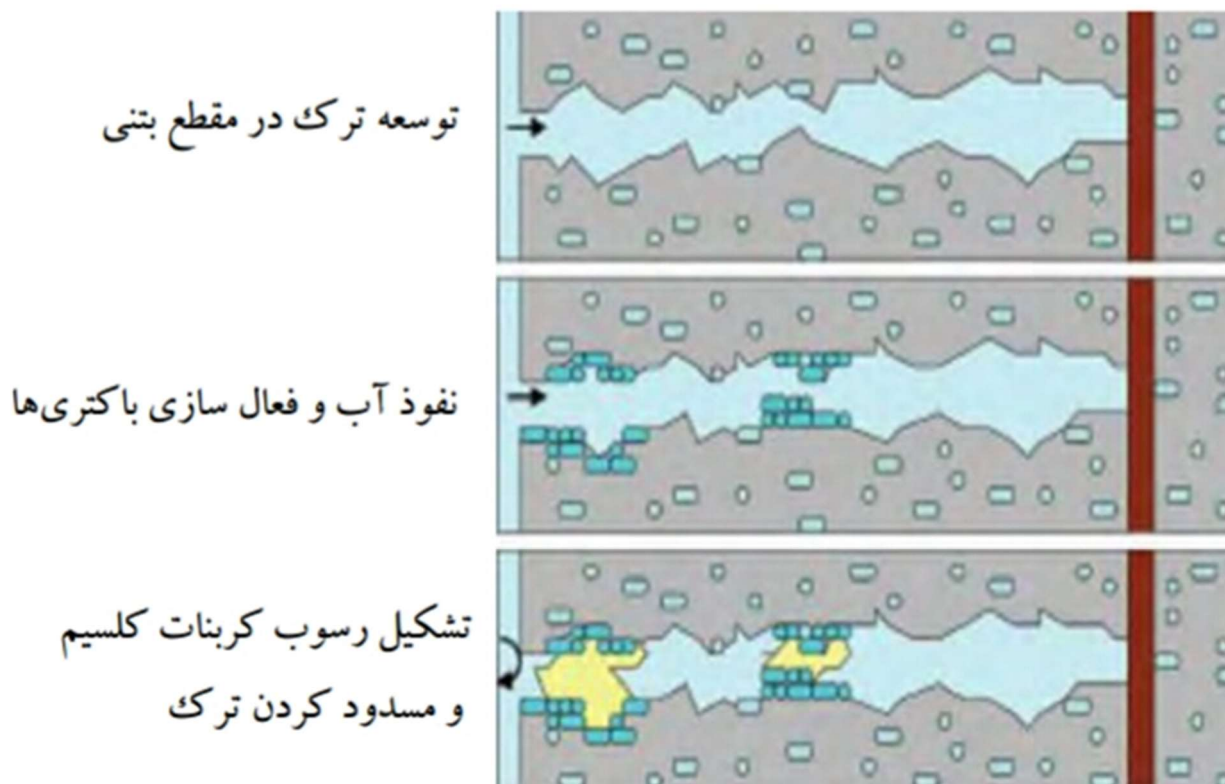


میزان کلسیم کربنات تولید شده در این حالت به دلیل میزان محدود  $CO_2$  ، ناچیز می باشد. از آنجایی که کانی پرتلندیت (کلسیم هیدروکسید) به صورت یک ماده معدنی محلول می باشد ، در حقیقت بیشتر ترکیبات ایجاد شده آنها در ترک ، در توده آب اصلی حل و پراکنده می شوند. هر چه قدر که میزان  $CO_2$  بیشتر باشد ، پورتلندیت حل شده به صورت رسوب به شکل کلسیم کربنات خواهد بود

، اما اندکی دور تر از ترک ایجاد می شود که در شکل ۵A نشان داده شده است. فرآیند خود ترمیم شونده گی در بتن باکتریایی به دلیل تبدیل متابولیک کلسیم توسط باکتری های موجود ، بسیار مفید می باشد :



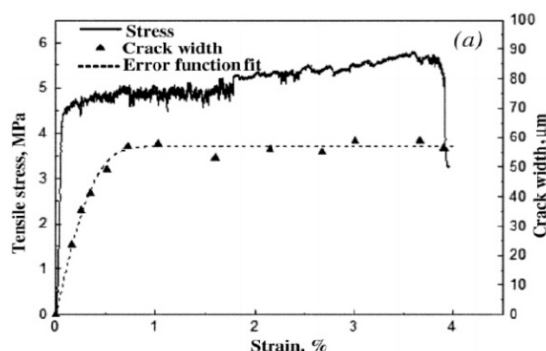
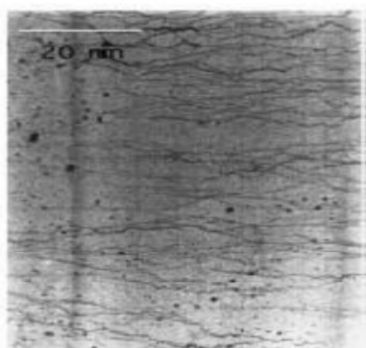
این فرآیند صرفاً کلسیم کربنات را به طور تولید نمی کند ، بلکه به صورت غیرمستقیم باعث ایجاد  $\text{CO}_2$  با پرتلدیت در سطح ترک می شود. در حالت آخر ، پرتلدیت در سطح ترک حل و یا از سطح آن پراکنده نمی شود ، اما به جای آن به صورت مستقیم در یک نقطه با  $\text{CO}_2$  تولید شده باعث ایجاد کلسیم کربنات اضافی می شود. این فرآیند باعث ایجاد آب بندی ترک همانند شکل ۵B می گردد. نتیجه این عمل این است که دو ماده ترمیم کننده بیوشیمیایی متشکل از سلول های باکتریایی و پیش ماده یو سیمانی ارگانیک که هر دو در فضای متخلخل ذرات رسی غیر فعال می شوند ، نشان دهنده یک جایگزین مناسب نسبت به مواد ترمیم کننده سیمانی و شیمیایی می باشد.



شکل ۲- ساز و کار ترمیم خرابی با استفاده از باکتری‌ها

• بتن فیبری خود ترمیم شونده

کامپوزیت های مهندسی بر پایه مصالح سیمانی یا بتن های الیافی شکل پذیر، یک نوع منحصر بفرد از کامپوزیت های سیمانی مسلح به الیاف توانمند هستند که از الیاف مصنوعی ( نظیر پلی اتیلن یا پلی وینیل ) با درصد حجمی متوسط (معمولاً ۲٪ حجم) و با سنگدانه های ریز ساخته می شوند. ECC ها با استفاده از میکرو مکانیک برای دستیابی به شکل پذیری کششی زیاد و ترک خوردگی های متعدد با عرض کم، با حجم الیاف متوسط بهینه سازی شده اند (۴). در شکل ۱ نمونه منحنی رفتاری بتن های ECC تحت اثر تنش کششی مستقیم نشان داده شده است. همانگونه در این شکل دیده می شود این بتن ها بر خلاف بتن های معمولی، پس از ترک خوردن مقاومت خود را از دست نمی دهند و قادر به تحمل تغییر شکل و کرنش کششی و ارائه رفتار سخت شدگی کرنشی می باشند. ظرفیت کرنش کششی نهایی ECC ها بیش از ۳٪ (چند صد برابر بتن عادی) می باشد و در عین حال عرض ترک ها را زیر  $60 \mu\text{m}$  نگه می دارند (۵). عرض بسیار کم ترک ها در نتیجه توانایی مواد ECC در توزیع سطحی ترک می باشد به گونه ای که با ثابت نگه داشتن عرض ترک، طول آن را افزایش می دهند (۴). برخلاف بتن معمولی یا بتن الیافی، این ویژگی ECC امکان کنترل عرض ترک را مستقل از نسبت آرماتور و ابعاد سازه فراهم می کند. با توجه به این ویژگی، عرض کم ترک در نمونه های آزمایشگاهی برابر با عرض ترک در سازه های تمام مقیاس می باشد (۳). با این خصوصیت انتظار می رود مواد ECC پتانسیل خوبی برای خود ترمیمی در شرایط محیطی مختلف داشته باشند، حتی زمانی که با چند درصد کرنش کشید می شوند.

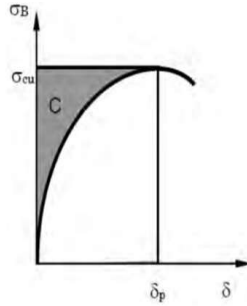


ایجاد ترک خوردگی های متعدد در نمونه ECC

نمونه منحنی تنش-کرنش و عرض ترک ECC تحت

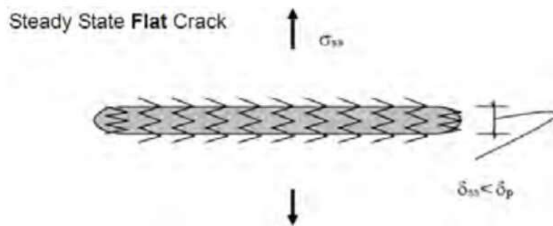
### اثر کشش یک محوره شکل ۱: رفتار بتن های ECC تحت کشش مستقیم

رفتار مصالح ECC را می توان از دیدگاه مکانیک شکست نیز بررسی نمود. بعنوان یک قانون کلی، در بتن های الیافی نحوه پلندی ۳ الیاف در ناحیه ترک خورده یکی از مهمترین پارامترها به شمار می آید. عموماً این رفتار بوسیله منحنی  $\sigma-\delta$  معرفی می گردد. این منحنی میانگین تنش کششی منتقل شده بوسیله الیاف در ناحیه ترک خورده ( $\sigma$ ) را در مقابل عرض بازشدگی ( $\delta$ ) در یک نمونه کششی نشان می دهد. این منحنی را می توان به عنوان یک فنر غیر خطی که دو وجه مقابل ترک را به هم متصل می نماید فرض کرد. منحنی  $\sigma-\delta$  رابطه بین خواص مکانیکی مواد، الیاف، ماتریس بتن و وجه انتقالی را با شکل پذیری مواد مرکب نمایان می سازد. در شکل ۲ این منحنی نشان داده شده است. جهت دستیابی به رفتار شکل پذیر در بتن های الیافی، این منحنی بایستی دو معیار شامل معیار مقاومتی و معیار انرژی را فراهم آورد.

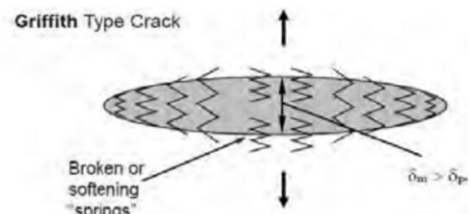


شکل ۲: منحنی  $\sigma-\delta$

جهت ایجاد پدیده ترک خوردگی متعدد نباید مقاومت ترک خوردگی ماتریس (شامل مقاومت نظیر اولین ترک) از حداکثر مقدار تنش پلبدی ( $\sigma_{CU}$ ) تجاوز نماید. تأمین این معیار تضمین می دهد تنش کششی وارده به مصالح بتنی بعد از ترک خوردگی توسط الیاف تحمل شود. این معیار به عنوان معیار مقاومتی شناخته می شود. بر اساس دومین معیار که بعنوان معیار انرژی شناخته می شود لازم است مود گسترش ترک با استفاده از انرژی گسترش ترک کنترل گردد. مود گسترش ترک خوردگی با کوچک یا بزرگ بودن انرژی تکمیلی در منحنی  $\sigma-\delta$  (قسمت C) کنترل می شود. کوچک شدن ناحیه انرژی تکمیلی در دو صورت به وقوع می پیوندد. اگر مقاومت ناحیه انتقالی ماتریس - الیاف ضعیف باشد، الیاف تحت اثر نیروی کم از ماتریس بیرون کشیده می شود و در نتیجه حد  $\sigma_{CU}$  در منحنی  $\sigma-\delta$  کم می شود. در حالت دیگر اگر ناحیه انتقالی ماتریس - الیاف بسیار قوی باشد، ناحیه ترک خورده توانایی باز شدن را ندارد و منجر به شکست در حد پائین  $\delta_p$  می شود. در هر دو صورت انرژی تکمیلی منحنی  $\sigma-\delta$  (قسمت C) کوچک می شود. تحلیل ها نشان می دهند زمانیکه انرژی تکمیلی در منحنی  $\sigma-\delta$  کوچک باشد گسترش ترک خوردگی از نوع Griffith می باشد (شکل ۳-الف). در این حالت میزان باز شدگی در حوزه میانی ترک ( $\delta_m$ ) از حد  $\delta_p$  فراتر رفته و الیاف در محدوده میانی قادر به باربری بیشتر نمی باشد و این امر منجر به بازتر شدن ترک ها در نوک ترک می شود. در این صورت ماده مرکب ظرفیت باربری خود را از دست می دهد و رفتار نرم شدگی از خود نشان می دهد. اما زمانیکه میزان انرژی تکمیلی بزرگ باشد، شکل ترک بصورت هموار و مسطح (Flat) باقی می ماند (شکل ۳-ب) و میزان باز شدگی در حوزه میانی از  $\delta_p$  کمتر می باشد. در این صورت ظرفیت تحمل تنش های کششی پایدار باقی می ماند. با پایدار ماندن ظرفیت باربری در این ترک و انتقال بار کششی توسط الیاف به ماتریس مجاور، ماتریس در محل دیگری دچار ترک خوردگی می شود لذا ترک خوردگی متعدد بدون افت میزان ظرفیت باربری کششی در مصالح حاصل خواهد شد (۴).



ب- گسترش ترک خوردگی از نوع هموار و مسطح (Flat)



الف- گسترش ترک خوردگی از نوع Griffith

شکل ۳: انواع مودهای گسترش ترک خوردگی

پارامترهایی که بر نوع منحنی  $\sigma-\delta$  تأثیر گذارند عبارتند از حجم الیاف، قطر، طول، مقاومت و مدول الیاف به علاوه پارامترهای تأثیر گذار در تعامل بین الیاف- ماتریس شامل واکنش‌های شیمیایی و خواص مهاري اصطکاکی. در مصالح بتنی شکل پذیر رفتار منحنی  $\sigma-\delta$  با کاهش اندازه سنگدانه و استفاده از الیاف مناسب کنترل شده است.

## • مطالعات آزمایشگاهی

دکتر لی و همکارانش خود ترمیمی ECC های قرار گرفته در معرض محیط های مختلف را مورد مطالعه قرار دادند دریافتند که در معرض چرخه های تر و خشک قرار دادن نمونه های ترک خورده، مؤثرترین روش برای افزایش خود ترمیمی است. چنین نشان داده شد که بازیابی فرکانس تشدید ۴ به طور مستقیم نشان دهنده بهبود خواص مکانیکی می باشد و بنابراین می تواند به عنوان روشی غیر مخرب برای تعیین میزان ترمیم مورد استفاده قرار گیرد (۳). در این مقاله بهبود فرکانس تشدید به منظور بررسی خود ترمیمی مورد استفاده قرار گرفته است و در ادامه ترکیب شیمیایی محصولات ترمیم گزارش شده است.

## • مواد اولیه

نسبت اختلاط ECC های استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است (۱).

جدول ۱: نسبت طرح اختلاط وزنی نمونه ECC

$\frac{W^*}{b}$	درصد وزنی اجزاء سازنده						نمونه ECC
	افزودنی	الیاف	آب	خاکستر بادی	ماسه	سیمان	
۰,۲۶۷	۰,۴	۱,۳	۱۶	۳۳	۲۲	۲۷	

\*نسبت وزنی آب به (سیمان + خاکستر بادی)

سیمان پرتلند معمولی تیپ ۱، ماسه سیلیسی خوب با اندازه دانه به طور متوسط  $110 \mu\text{m}$ ، خاکستر بادی طبیعی نوع F منطبق با الزامات ASTM C618، الیاف پلی وینیل الکل ۵ و ماده افزودنی کاهنده آب قوی ۶ استفاده شده است. الیاف پلی وینیل الکل دارای قطر متوسط  $39 \mu\text{m}$  و طول متوسط  $12 \mu\text{m}$  می باشند. مقاومت کششی  $1600 \text{ MPa}$ ، چگالی  $1300 \text{ kg/m}^3$ ، مدول الاستیسیته  $42.8 \text{ GPa}$  و حداکثر افزایش طول ۶٪ می باشد. به دلیل طبیعت شدیداً آب دوست پلی وینیل الکل، سطح الیاف با یک ماده روغنی برای کاهش مقاومت ناحیه انتقال الیاف- ماتریس پوشانده شده است.

## • در معرض شرایط محیطی قرار دادن

به منظور ایجاد سطوح مختلف آسیب دیدگی ناشی از میکرو ترک ها، تغییر شکل های کششی ۲، ۱، ۰،۵، ۰،۳، و ۳ درصد به نمونه ها اعمال شده است. نمونه ها با دو روش تحت چرخه های تر و خشک شدن قرار گرفته اند. در روش اول (CR1) نمونه های ECC به مدت ۲۴ ساعت در زیر آب ۲۰ درجه قرار گرفته اند و سپس بمدت ۲۴ ساعت در هوای  $21 \pm 1$  درجه آزمایشگاه خشک شده اند که طی آن هیچ اثر تغییر دما در نظر گرفته نشده است. این روش برای شبیه سازی چرخه محیط بیرون شامل روزهای بارانی و روزهای

بدون ابر استفاده شده است. در روش دوم (CR۲) نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در زیر آب ۲۰ درجه قرار گرفته اند و بمدت ۲۲ ساعت در گرم کن با دمای ۵۵ درجه قرار گرفته و در هوای  $21 \pm 1$  درجه آزمایشگاه برای مدت ۲ ساعت خشک شده اند. این روش برای شبیه سازی چرخه محیط بیرون شامل روزهای بارانی و روزهای آفتابی با دمای بالا استفاده شده است. [۳]

• **بازیابی خواص مکانیکی**

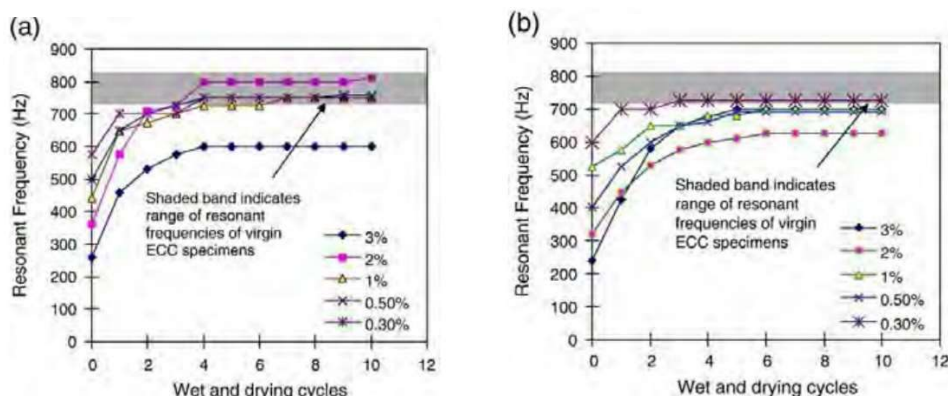
• **بازیابی فرکانس تشدید**

اندازه گیری فرکانس تشدید طولی بر اساس ASTM C۲۱۵ برای تأیید وجود خود ترمیمی و همچنین مقدار آسیب دیدگی و خود ترمیمی در مواد ECC، قبل و بعد از بارگذاری کششی برای نمونه ها در هر چرخه تر و خشک شدن انجام شده است. برای حذف اثر هیدراسیون بیشتر و تغییرات مقدار رطوبت در بهبود مقدار فرکانس تشدید و برای بررسی میزان واقعی بهبود فرکانس تشدید به سبب خود ترمیمی، نسبت RF با رابطه ۱ محاسبه شده است.

$$RF\ ratio = \frac{RF_{preload}}{RF_{virgin}} \times 100\%$$

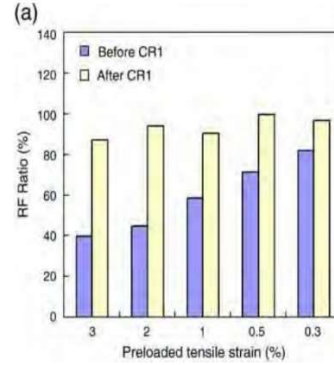
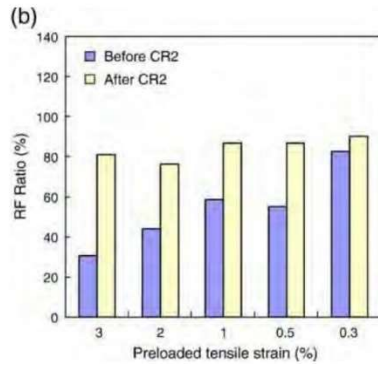
که  $RF_{preload}$  مقدار فرکانس تشدید برای نمونه های بارگذاری شده که تحت چرخه های تر و خشک شدن قرار گرفته اند و  $RF_{virgin}$  مقدار فرکانس تشدید برای نمونه های شاهد بارگذاری نشده که تحت همان شرایط قرار گرفته اند می باشد. بنابراین نسبت RF بدون اثر هیدراسیون بیشتر محاسبه شده است. نسبت RF برابر ۱۰۰٪ دلالت بر ترمیم کامل آسیب ناشی از ترک می کند.

تأثیر تعداد چرخه های تر و خشک شدن بر مقدار فرکانس تشدید در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است (۳). نوار رنگی محدوده  $RF_{virgin}$  را نشان می دهد. مطابق شکل بیشترین بهبود فرکانس تشدید قبل از ۴ تا ۵ چرخه اتفاق می افتد و بعد از آن تقریباً ثابت می شود. نمونه های مرتبط با کرنش کششی بالاتر به دلیل عرض ترک بیشتر و تعداد ترک های خیلی بیشتر، دارای فرکانس تشدید اولیه کمتری بعد از ترک خوردگی و نیز بازیابی فرکانس کمتری بعد از چرخه های تر و خشک شدن می باشند.



شکل ۴: میزان خود ترمیمی ECC تحت چرخه های تر و خشک شدن

(a) بازیابی فرکانس تشدید تحت CR۱ (b) بازیابی فرکانس تشدید تحت CR۲

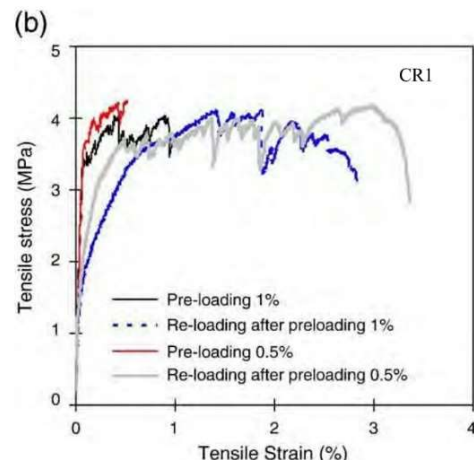
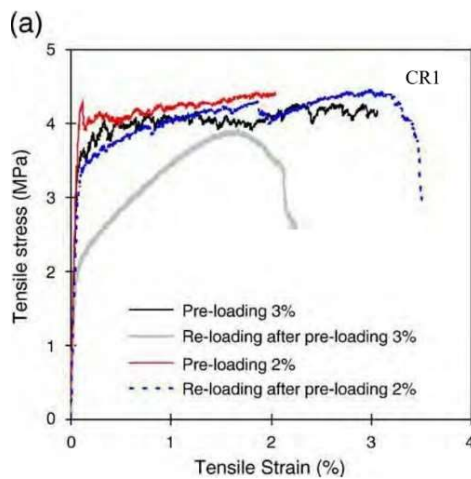


شکل ۵: مقدار خود ترمیمی ECC تحت چرخه های تر و خشک شدن  
(a) مقدار خود ترمیمی تحت CR1 (b) مقدار خود ترمیمی تحت CR2

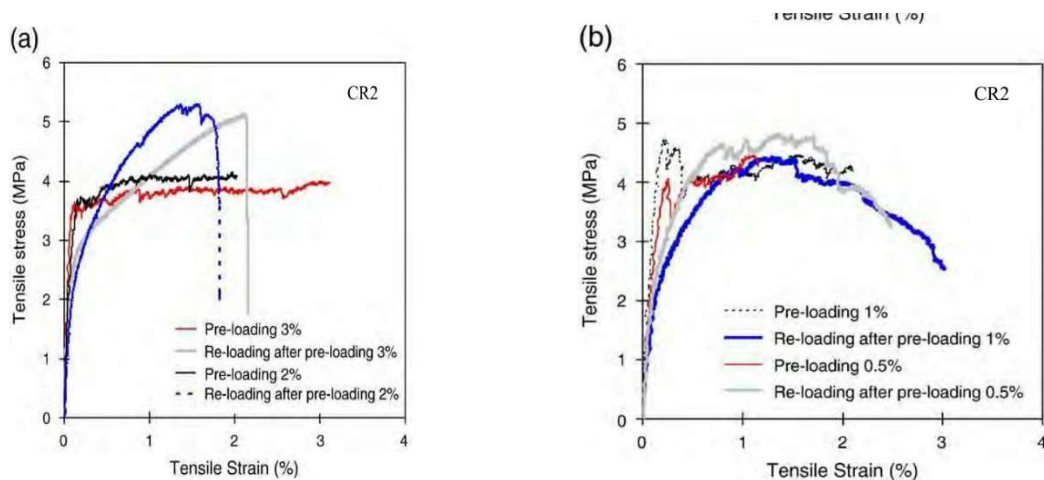
### • بازیابی سختی ECC

در شکل ۶ منحنی های تنش - کرنش نمونه های ECC تحت بارگذاری کششی و همچنین نمودار تنش - کرنش کششی نمونه های خود ترمیم یافته تحت ۱۰ چرخه CR1 و CR2 نشان داده شده است [۳]. در این شکل ها کرنش ماندگار ایجاد شده در مرحله پیش بارگذاری، در منحنی تنش - کرنش مرحله بارگذاری مجدد محاسبه نشده است که یک اندازه گیری محافظه کارانه از ظرفیت کرنش کششی نمونه های ترمیم یافته را می دهد. مقاومت نظیر اولین ترک، تقریباً در همه نمونه ها بعد از خود ترمیمی کمتر از نمونه بدون آسیب دیدگی می باشد. ظرفیت کرنش کششی بعد از خود ترمیمی برای سری آزمایش CR1 در محدوده ۱,۷٪ تا ۳,۱٪ و برای سری آزمایش CR2 در محدوده ۰,۸٪ تا ۲,۲٪ می باشد.

درجه حرارت بالاتر در چرخه های CR2 ممکن است سبب هیدراسیون سیمان و خاکستر بادی واکنش نداده و افزایش مقاومت ناحیه انتقال الیاف - ماتریس گردد که می تواند علت مقاومت نهایی بالاتر نمونه ترمیم شده باشد. همچنین همین اثر می تواند سبب افزایش در سختی ملات شده و تعداد ترک های متعدد را که عامل شکل پذیری کششی هستند کاهش دهد.

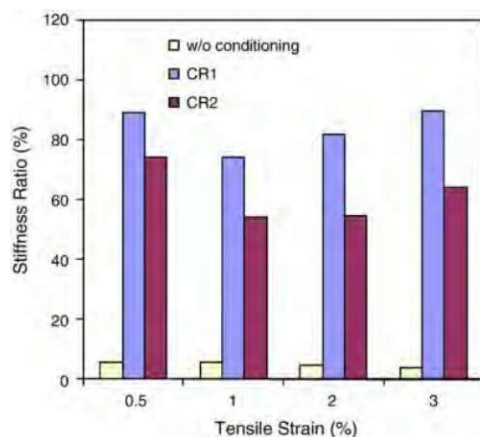






شکل ۶: منحنی های تنش- کرنش نمونه های پیش بارگذاری شده و دوباره بارگذاری شده بعد از ۱۰ چرخه (a) نمونه با پیش بارگذاری بیش از ۱٪ (b) نمونه با پیش بارگذاری کمتر از ۱٪

در شکل ۷ نسبت سختی کششی نمونه های ترمیم یافته تحت چرخه های CR<sub>1</sub> و CR<sub>2</sub> به سختی نمونه ترمیم نیافته نشان داده شده است (۳). مشاهده می شود که بازیابی سختی مواد برای هر دو روش اعمال شرایط محیطی محسوس می باشد. این نتایج تأیید می کنند که خود ترمیمی مواد ECC فقط سبب آب بندی ترکها نمی شود بلکه موجب بهبود خواص کششی نیز می گردد. نتایج بازیابی سختی کششی و بازیابی فرکانس تشدید که در نمونه های ECC خود ترمیم یافته مشاهده شد با هم سازگار می باشند و نشان می دهند که خود ترمیمی مشخصات مکانیکی ECC ها دست یافتنی است.



شکل ۷: بازیابی سختی ECC تحت شرایط محیطی مختلف

به غیر از افزایش نفوذپذیری، بسیاری از محققین در جستجوی اثبات بازگشت خصوصیات مکانیکی بتن در نتیجه استفاده از مواد خود ترمیم شونده در بتن بوده اند. بنابه برخی از مطالعات گذشته (ادواردسون ۱۹۹۹، ترهید ۲۰۰۵، رینهارت و جوس ۲۰۰۳)، عرض ترک ماده بتنی جهت رخ دادن خود ترمیم شوندگی در بتن بسیار حائز اهمیت می باشد. عرض مناسب ترک جهت انجام خود ترمیمی کمتر از

۲۰۰ μm و ترجیحا کمتر از ۵۰ μm مخصوصا برای خود ترمیم شوندگی بر مبنای افزایش هیدراسیون در بتن می باشد. البته در عمل، تشخیص چنین ترک های بسیار ریز در سازه های بتنی معمولی بسیار دشوار می باشد. جهت دستیابی به عرض ترک کنترل شده و مناسب، نوع جدیدی از ترکیبات سیمانی تقویت شده سخت شده کرنشی تحت عنوان ترکیبات سیمانی مهندسی (ECC) توسط لی و همکاران، او (۱۹۹۸) به ثبت رسیده است که طی ۱۵ سال اخیر به طور پیوسته توسعه و تکامل یافته است. ECC به صورت خود خواسته از تئوری میکرومکانیک جهت داشتن عرض ترک خود کنترل شده که به آرماتورهای فولادی یا ابعاد سازه ای ارتباط ندارد، استفاده کرده است. همچنین فیبرهای استفاده شده در ECC جهت انجام واکنش با ملات به منظور ممانعت از شکست های ترد موضعی در مورد خرابی های دارای ترک های مویی، سازمان یافته می باشد. ECC با عرض ترکی به اندازه ۳۰ میکرون ایجاد می شود. با توجه به کنترل مناسب عرض ترک، لی و همکارانش (۱۹۹۸) به بررسی رفتار خود ترمیم شونده ECC در شرایط مختلف پرداخته اند. در آزمایشات آنها، نمونه های ECC از پیش ترک خورده در معرض شرایط محیطی متفاوتی شامل نفوذ آب و غوطه وری در آب، چرخه های خیس و خشک شدن و انباشتگی کلریدی قرار می گیرند. خصوصیات مکانیکی انتقالی را می توان به طور گسترده مخصوصا برای نمونه های ECC از پیش بارگذاری شده به کرنش کششی کمتر از ۱٪ رساند. به جز عرض ترک کم، نسبت کم آب/ببند علاوه بر میزان قابل توجه خاکستر بادی در مخلوط، باعث ایجاد خود ترمیم شوندگی به وسیله هیدراسیون و فعالیت های پوزولانی می شود. رفتار خود ترمیم شوندگی SHCC از پیش ترک خورده (ترکیبات سیمانی با سخت شدگی کرنشی)، موضوع اصلی آزمایشات و تحقیقات در دانشگاه دلفت بوده است. SHCC ها توسط مواد دورریختنی موجود (سرباره های کوره ای آهن گدازی و پودر سنگ آهک) ساخته می شوند (کیان ۲۰۰۹). برای تیرهای SHCC از پیش ترک خورده دارای تغییر شکل بیش از ۲,۴mm با عمل آوری در آب و هوا به مدت ۲۸ روز، از آزمایشات خمش چهار نقطه ای استفاده می شود. نمونه غوطه ور در آب نشان دهنده ظرفیت تغییر شکل بالا و همچنین بازگشت سختی ناشی از مواد خود ترمیم شونده می باشد، در حالی که برای نمونه های عمل آوری شده در هوا چنین چیزی رخ نمی دهد. خصوصیا مکانیکی پس از خود ترمیم شوندگی در یک محیط دارای آب به حالت اولیه باز می گردند و ترک ها با مواد واکنش دهنده پر می شوند، شکل ۶. می توان از این بررسی، نتایج زیر را گرفت (کیان و همکاران ۲۰۰۹):

۱. برای نمونه های غوطه ور در آب، ظرفیت تغییر شکل پس از خود ترمیم شوندگی می تواند در مقایسه با نمونه های دست نخورده به حدود ۶۵٪ تا ۱۰۵٪ برسد، در حالی که این نسبت در بتن های عمل آوری شده در هوا حدود ۴۰٪ تا ۶۰٪ می باشد. علاوه بر این، سختی خطی اولیه نمونه خود ترمیم شده در مقایسه با نمونه عمل آوری شده در هوا به دلیل حضور مواد خود ترمیمی ایجاد شده در ترک و تقویت فیبرهای اتصالی، بسیار بیشتر می باشد.
۲. مشاهدات حاصل از ESEM و XEDS نشان می دهد که ترک های مویی غوطه ور در آب به وسیله کلسیم کربنات ترمیم می شوند. همچنین ESEM بیان می کند که مواد خود ترمیمی در هر دو وجه ترک و در میانه ترک رشد می کنند. این موضوع را می توان توسط تمرکز نسبتا بالای کلسیم هیدروکسید در نزدیکی سطح ترک به وسیله فرآیند پراکنده ساز حاصل از ماده سیمانی حجیم و سطح فرکتال تفسیر نمود.

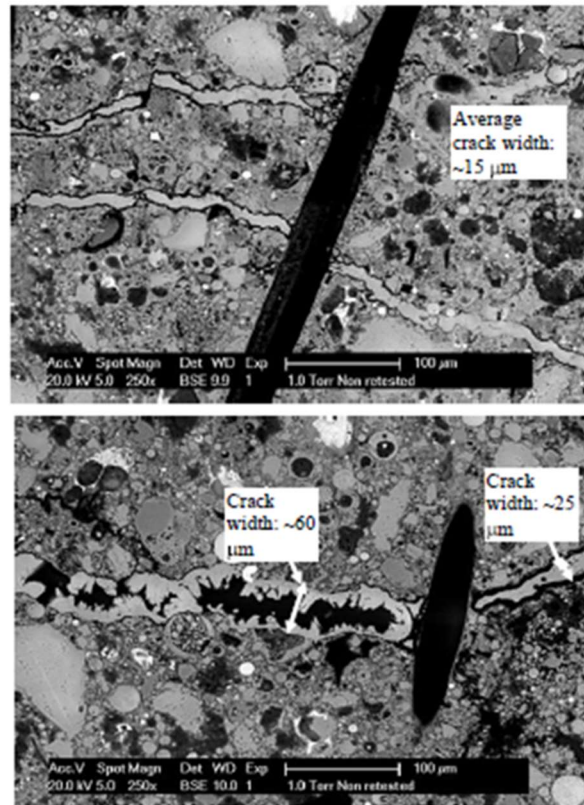


Figure 6. ESEM images of cracked SHCC samples cured in water.

۳. رفتار خود ترمیم شونده در SHOC بستگی زیادی به وجود سیمان غیرهیدراتی و دیگر مواد سیمانی جایگزین دارد. نسبت آب /سیمان کم و درصد زیاد مواد سیمانی باعث بروز رفتار خود ترمیم شوندگی می شود.

۴. ترک های مویی با عرض ترک کمتر در مخلوط های SHOC هنگام وقوع خود ترمیم شوندگی بر مبنای وقوع هیدراسیون ارجحیت دارند، به طوری که به مواد خود ترمیم شونده کمتری جهت پر کردن ترک نیاز دارند و برای مواد خود ترمیم شونده، رشد و انتشار از طریق دو وجه ترک بسیار راحت تر می باشد.

دو موضوع مهم دیگری که همچنان نیاز به بررسی بیشتر دارند، خود ترمیم شوندگی ترک های بزرگتر و عمل آوری نمونه ها در هوا می باشد. در شکل ۶ می توان دید که ترک های کوچک با عرض کمتر از  $15\mu\text{m}$  مشکلی جهت ترمیم ندارند. با این وجود قسمتی از ترک ها با عرض حدود  $60\mu\text{m}$  می توانند به وسیله مواد ترمیمی پر شوند. جهت کاهش عرض ترک، اثر اضافه کردن میکروفیبرها در ترکیبات سیمانی تقویت شده PVA - فیبری مورد بررسی قرار می گیرد. میکروفیبرها، رشته های ایجاد شده از براده های فولادی یا ذرات سنگی به طول حدود  $2\text{mm}$  و قطر متوسط  $8\mu\text{m}$  می باشند. این فیبرهای کوچک موجب توزیع ترک ها در مخلوط سیمانی و در نتیجه تشکیل ترک های کوچکتر و افزایش ظرفیت خود ترمیم شوندگی می شوند. دومین مورد منفی در مورد این فرآیند این است که مکانیزم خود ترمیم شوندگی حاصل از هیدراسیون تنها در حضور آب کارایی خود را دارد. جهت انجام خود ترمیم شوندگی در یک محیط خشک، دو روش در دست بررسی می باشد. فیبرهای گیاهی توخالی حاصل از حجم ذخیره بالای مایع می تواند به طور بالقوه

برای یک بتن خود ترمیم شونده جدید مورد استفاده قرار گیرد. ایده این روش ، استفاده از فیبرهای گیاهی به عنوان مخزنی برای مواد خود ترمیم شونده که می تواند آب یا چسب باشد ، است . هنگامی که ترکی به وقوع می پیوندد ، ماده خود ترمیم شونده در برابر ترک توزیع یا پراکنده می شود و در نهایت باعث خود ترمیمی ترک می شود. بر مبنای بررسی انجام شده ، این طور نتیجه گیری شده است که خود ترمیم شونده گی ترک ها با استفاده از فیبرهای اندود شده چوبی که توسط ماده خود ترمیمی پر می شود ، قابل انجام می باشد. قطر فیبرها حدود  $200\mu\text{m}$  و طول آن حدود  $10\text{mm}$  می باشد (سیرا بلتران و اشلنگن ۲۰۱۰) . به منظور کارکرد مناسب سیستم خود ترمیم شونده گی ، شکسته شدن فیبرها جهت توزیع مواد خود ترمیم شونده، بسیار مهم می باشد. در این بررسی ، فیبرهای چوبی در ابتدا به وسیله اندود پلی سیلیکونی آغشته شده و سپس با وسیله فلوئورسنت پر می شود و در نهایت به خوبی ترمیم می شود. سپس فیبرهای آغشته شده شکسته می شوند. ذرات فیبر چوبی اندودی تمایل دارند تا در یک حالت لایه لایه در امتداد طول شان گسیخته شوند ، ضمن این که نیروی فشاری منفی ایجاد شده توسط انتهای ترمیم شده چندان حائز اهمیت نمی باشد ، به طوری که ممکن است به صورت ترد در صفحه ترک گسیخته شوند (جوزف ۲۰۰۸) . در نتیجه ماده ترمیم شده می تواند با استفاده از ذرات فیبری شکافته شده در نواحی تحت خرابی ، رها شوند .

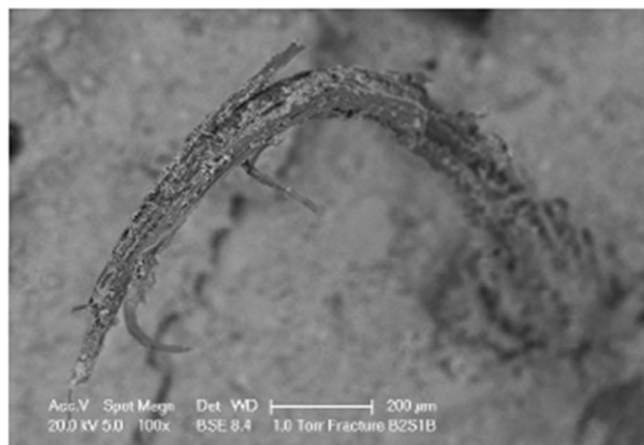


Figure 7. ESEM picture of a fibre-bundle broken in a delamination mode.

حالت بعد جهت ارتقای اثر خود ترمیم شونده گی در یک محیط خشک ، استفاده از پلیمرهای فوق جذبی (SAP) در مخلوط می باشد. SAP ها با استفاده از آب در حین فرآیند اختلاط پر می شوند و به شکل حباب های آبی در بتن که می توانند برای هیدراسیون سیمان و اثر خود ترمیمی در مرحله بعد مورد استفاده قرار گیرند ، شکل گیرند. SAP ها به عنوان یک افزودنی جهت تعدیل انقباض خود به خودی در بتن مورد استفاده قرار می گیرند (جنسن ۲۰۰۱) . ظرفیت خود ترمیمی SHCC ، به وسیله افزودن این SAP ها در نمونه های ترک خورده موجود در آب بهبود می یابد (آتونویلو ۲۰۰۹ ، زیویلوگو ۲۰۰۹) . با این جود این SAP می توانند برای نمونه های ترک خورده در هوا نیز به کار گرفته شوند. پس از وقوع اولین هیدراسیون ، منافذ آبی خالی می شوند . در این صورت هنگام ترک خوردگی یک ماده در مرحله بعد ، آبی وجود نخواهد داشت. اما پس از وقوع بارش بر روی سازه ، SAP های قرار گرفته در ناحیه ترک خورده دوباره پر شده و سپس به آرامی آب را به منظور انجام فرآیند خود ترمیمی رها می کنند. این حالت ، به صورت عملی و اجرایی نیز قابل انجام است که هم اکنون در دست بررسی می باشد (کیم و اشلنگن ۲۰۱۰) جهت بهینه کردن مکانیزم های خود ترمیم شونده در مصالح SHCC

از مدلی استفاده می شود (اشلنگن و همکاران ۲۰۰۹) که از فیبرهای مجزا استفاده کرده و می تواند ترک های توزیع شده و رفتار شکل پذیر را شبیه سازی نماید.

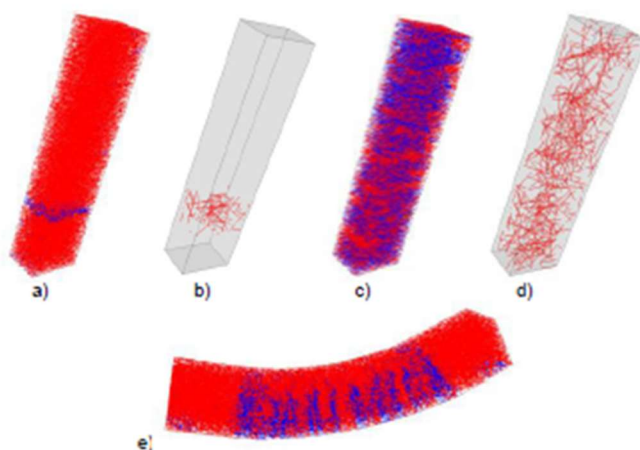
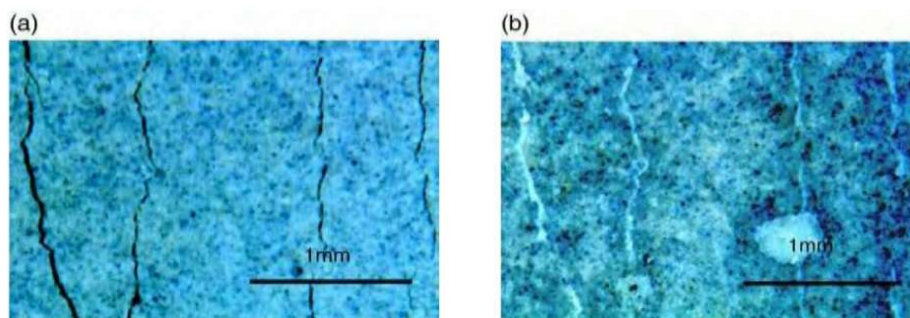


Figure 8. Simulations of SHCC material with fibres containing healing agent.

در شکل ۸، مثالی از شبیه سازی آزمایش کششی و آزمایشات چهار نقطه ای خمشی نشان داده شده است. در مدل شکل ۸a و ۸b، تنها از فیبرهای حاوی ماده خود ترمیم استفاده شده است. شکل ۸a نشان دهنده الگوی ترک خوردگی و شکل ۸b نشان دهنده آزاد شدن ماده ترمیمی از فیبرها می باشد. در شکل ۸c و ۸d از ماده ای هیبریدی شامل فیبرهای مکانیکی جهت کاهش عرض ترک و توزیع ترک ها و همچنین فیبرهای ترمیمی شامل ماده خود ترمیمی استفاده شده است. این طور نشان داده شده است که در حالت ترک خوردگی توزیع فیبرهای بسیار بیشتری در ماده فعال شده و ماده ترمیمی به شکل بسیار مناسب تر مورد استفاده قرار می گیرد. شکل ۸e نشان دهنده یک حالت تحت خمش در یک نمونه شامل فیبرها به همراه فیبرهای مکانیکی و ماده ترمیمی می باشد. از شبیه سازی ها به منظور بررسی میزان فیبرها و میزان ماده ترمیمی به صورت بهینه استفاده شده است.

#### • محصولات خود ترمیمی

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود محصولات خود ترمیمی با چشم غیر مسلح قابل رؤیت می باشند و به صورت رسوبات سفید رنگی در امتداد ترک ها ظاهر می شوند.

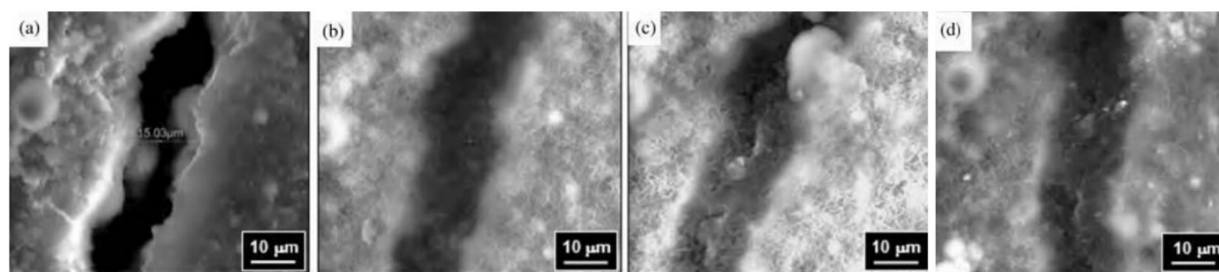


شکل ۸: میکرو ترک ها در ECC a قبل از خود ترمیمی (b) بعد از خود ترمیمی

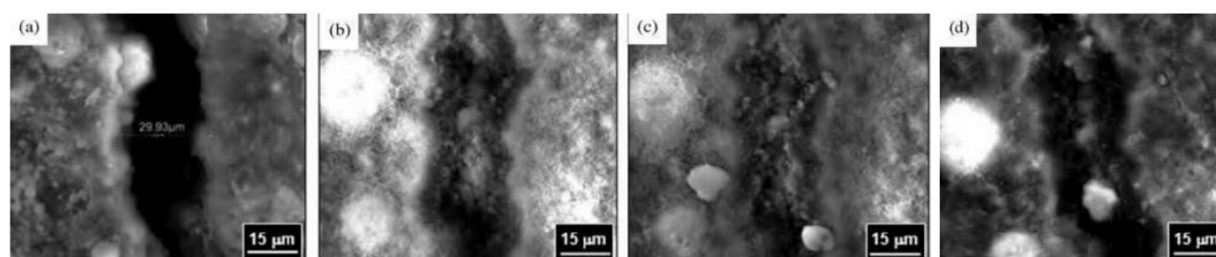
برای توصیف محصولات خود ترمیمی از میکروسکوپ الکترونی روبشی محیطی مجهز به یک سیستم طیف سنج پراکنده ساز انرژی ۷، میکروسکوپ الکترونی تراگسیلی ۸ و آنالیز پراش پرتو ایکس ۹ استفاده شده است.

### • روند خود ترمیمی

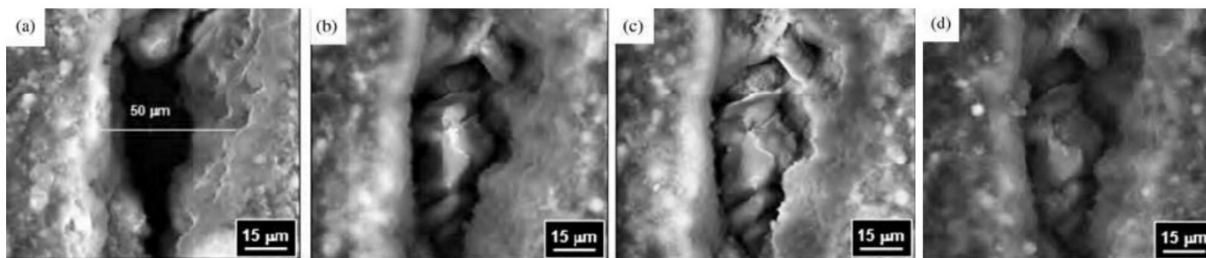
برای توصیف روند خود ترمیمی، نمونه ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی قبل و بعد از قرار گرفتن تحت چرخه های تر خشک شدن مشاهده شده اند. روند رشد محصولات خود ترمیمی در ترک های  $50 \mu\text{m}$ ،  $30 \mu\text{m}$ ،  $15 \mu\text{m}$ ، همچنین در سطح الیاف ها در شکل ۹ نشان داده شده است. در ترک های  $15 \mu\text{m}$  محصولات خود ترمیمی الیاف مانند در طرفین ترک مشاهده می شود که بعد از چرخه های بیشتر، این محصولات بسیار متراکم تر می شوند و ترک تقریباً به طور کامل بسته می شود. در ترک های  $30 \mu\text{m}$  بعد از یک چرخه ذرات سنگ مانند در زیر محصولات خود ترمیمی الیاف مشاهده می شوند و بعد از چرخه های بیشتر، محصولات خود ترمیمی الیاف مانند بسیار متراکم تر شده و تقریباً به طور کامل ترک را پلبندی می کنند. در خصوص ترک های  $50 \mu\text{m}$  مقدار کمی محصولات الیاف مانند در حال رشد در طرفین ترک مشاهده می شوند با این حال به طور کامل ترک را پلبندی کردند. همچنین برخی ذرات سنگ مانند در ترک مشاهده می شوند. به طور خلاصه، محصول اصلی خود ترمیمی در ترک های  $15 \mu\text{m}$  فاز الیاف مانند می باشد. در ترک های  $30 \mu\text{m}$  ذرات سنگ مانند و الیاف مانند مشاهده می شود و محصول خود ترمیمی کمتری در ترک های  $50 \mu\text{m}$  قابل مشاهده است. مطابق شکل (۹-د) محصولات ترمیم الیاف مانند بسیاری در حال رشد در سطح الیاف های PVA مشاهده می شود به طوری که بعد از ۱۰ چرخه تر و خشک شدن، این محصولات تشخیص الیاف های PVA را از ماتریس دشوار می سازد. رشد محصولات ترمیم در سطح الیاف ها ممکن است به سبب طبیعت آب دوست سطح PVA و یا وجود گروه های OH- که تشکیل  $\text{Ca(OH)}_2$  را آسانتر می کنند باشد.



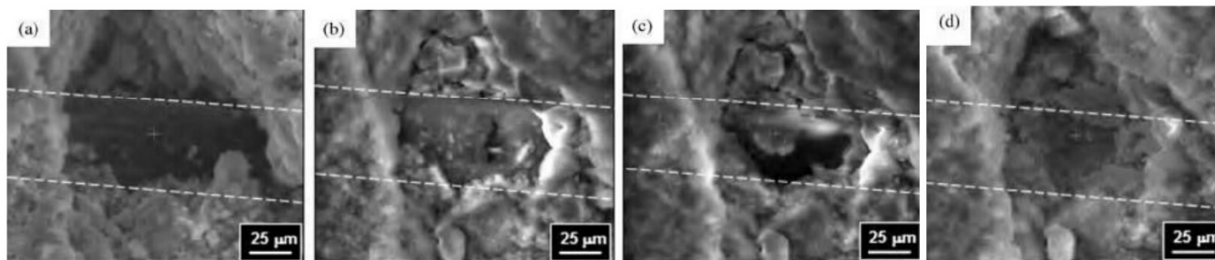
الف- تصاویر ذره بینی پوشش الکترونی از روند خود ترمیمی در ECC با عرض ترک  $15 \mu\text{m}$



ب- تصاویر ذره بینی پوشش الکترونی از روند خود ترمیمی در ECC با عرض ترک  $30 \mu\text{m}$



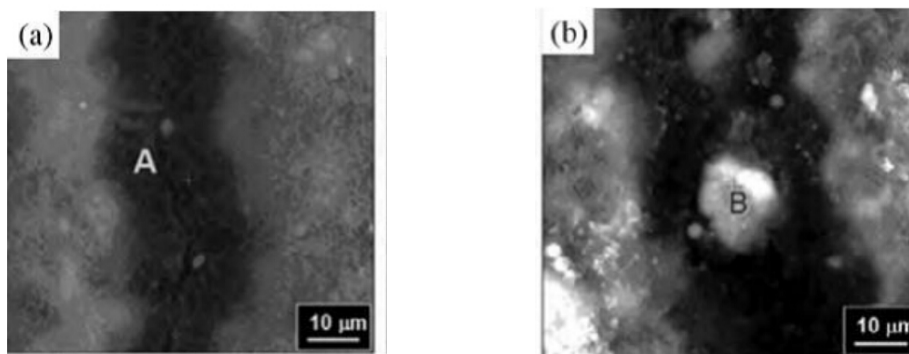
ج- تصاویر ذره بینی پوشش الکترونی از روند خود ترمیمی در ECC با عرض ترک  $50 \mu\text{m}$



د- تصاویر ذره بینی پوشش الکترونی از روند خود ترمیمی در ECC در سطح الیاف شکل ۹: تصاویر ESEM از روند خود ترمیمی: (a) قبل از خود ترمیمی (۰ چرخه)؛ (b) بعد از ۱ چرخه؛ (c) بعد از ۳ چرخه؛ (d) بعد از ۱۰ چرخه

#### • مشخصات شیمیایی محصولات خود ترمیمی

در شکل ۱۰ محصولات خود ترمیمی الیاف مانند و سنگ مانند توسط ESEM قابل تشخیص می باشند، برای بررسی ماهیت شیمیایی این محصولات از EDS استفاده شده است.



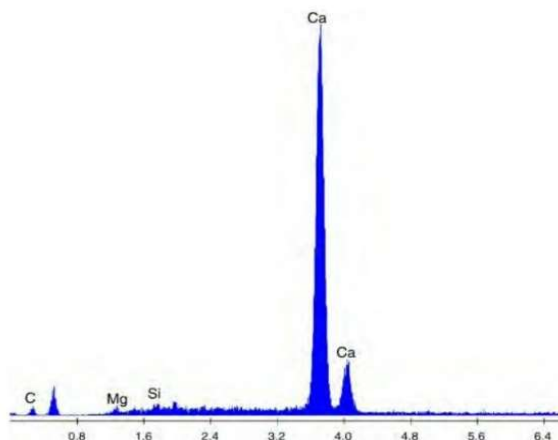
شکل ۱۰: (a) تصویر ESEM از محصول ترمیم الیاف مانند (b) تصویر ESEM از محصول ترمیم سنگ مانند

نتایج تجزیه عنصری ارائه شده در جدول ۲ نشان می دهد که محصول الیاف مانند ممکن است  $\text{C-S-H}$  و محصول سنگ مانند ممکن است  $\text{CaCO}_3$  باشد.

**جدول ۲: تجزیه عنصری EDS از محصول خودترمیمی A (الیاف مانند) و B (سنگ مانند)**

عنصر	A (at.%)	B (at.%)
C	۰	۹,۶ ± ۰,۹
O	۷۲,۹۰۰,۸	۶۲,۵۰۰,۳
Mg	۱۰,۳۰۰,۴	۵,۱۰۰,۴
Al	۲,۸۰۰,۱	۲,۱۰۰,۱
Ca	۹,۱۰۰,۶	۱۷,۳۰۰,۸

مقدار کمی از مواد ترمیمی سفید رنگ توسط تیغ از نمونه تراشیده شده و با استفاده از TEM-EDS تأیید شده است که  $\text{CaCO}_3$  می باشد. همچنین آنالیز پراش پرتو ایکس این پودر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بیشترین پیک مربوط به کلسیت است و بنابراین کلسیت اصلی ترین محصول بلورین موثر در فرآیند خودترمیمی می باشد.

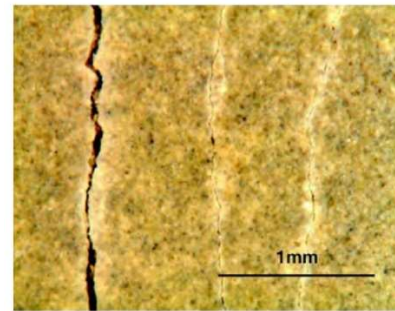
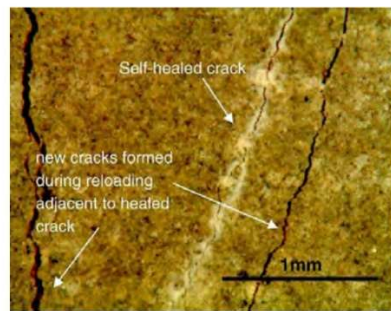


**شکل ۱۱: آنالیز پراش پرتو ایکس**

شکل ۱۲ یک نمونه ECC که پس از خود ترمیمی بواسطه چرخه CR1، تحت بارگذاری کششی مجدد قرار گرفته است را نشان می دهد. این نمونه قبل از قرارگیری در معرض چرخه های تر و خشک شدن، تا سطح کرنش ۲٪ بارگذاری شده بوده است. مشاهده می شود که اکثریت ترک هایی که در نمونه خود ترمیم یافته ایجاد می شوند تمایل دارند در مسیر ترک های قبلی منتشر شوند. این موضوع بدلیل ماهیت نسبتاً ضعیف تر بلورهای کرنات کلسیم در مقایسه با ماتریس سیمانی هیدراته شده می باشد. مقاومت پایین تر اولین ترک خوردگی در نمونه ترمیم یافته (شکل ۶) می تواند ناشی از این حقیقت باشد که ترک اول در بارگذاری مجدد نمونه



ترمیم یافته، از مواد خود ترمیم که مقاومت کمتری در مقایسه با ماتریس سیمانی هیدراته شده مجاور دارد شروع می شود. همچنین ترمیم ناقص نیز می تواند دلیلی برای مقاومت کمتر اولین ترک خوردگی باشد. با این حال این موضوع همیشه صدق نمی کند، مطابق شکل ۱۳ مشاهده می شود که ترک ها و مسیرهای ترک جدید در مجاورت ترک های خود ترمیم یافته قبلی ایجاد شده اند. وقوع این پدیده بستگی به مشخصات ماتریس مجاور ترک ترمیم یافته و کیفیت خود ترمیمی دارد. این پدیده می تواند تضمین کننده امکان بازیابی کامل خواص مکانیکی بواسطه خود ترمیمی در مواد ECC باشد [۳].



**شکل ۱۳: ننگ نگه داشته شدن ترک خود ترمیم بارگذاری بعد از چرخه های ترو یافته بواسطه ایجاد ترک های جدید در مجاورت آن**

**شکل ۱۲: ترک ها در مواد خود ترمیم به سبب خشک شدن**

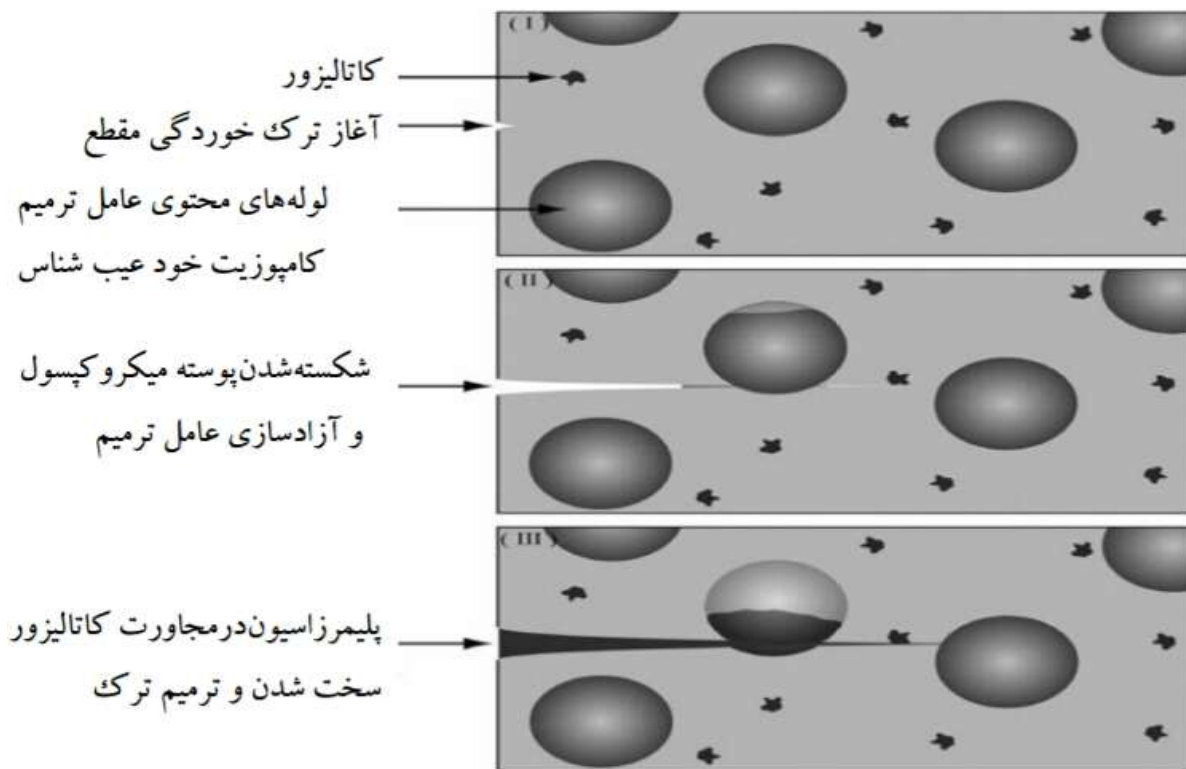
#### • مزایای کاربرد

یک پل یا جاده بدون نیاز به تعمیر و نگهداری را تصور کنید؛ تعمیراتی که نیازمند هزینه های سنگین بوده و علاوه بر ایجاد ترافیک و راه بندان حین عملیات بازسازی، سبب آلودگی محیط زیست نیز می شود. چنین زیر ساخت هایی یک گام به واقعیت نزدیک تر می شوند اگر بتن دارای قابلیت خود ترمیمی باشد. با استفاده از بتن خود ترمیم شونده می توان زیر ساخت هایی ایمن تر و با دوام تر ایجاد نمود که هزینه تعمیر و نگهداری کمتری داشته و دارای عمر خدماتی بیشتری می باشند و در مجموع هزینه ها را کاهش می دهند. همچنین استفاده از بتن خود ترمیم شونده با کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن کمتر سبب هماهنگی بیشتری بین ساخت و محیط زیست می شود (۶).

#### • استفاده از مواد نانو در ساخت میکروکپسول های خود ترمیم در بتن

در این روش با الهام گرفتن از نقش گلبول های قرمز در لخته شدن خون و ترمیم، کپسول های بسیار ریز حاوی مواد ترمیم کننده به بتن تزریق می شود. میکروکپسول حاوی عامل ترمیمی معمولاً از نوع ذرات پلیمر تعبیه شده در داخل کپسول و با پوشش کاتالیزور در بدنه ساخته می شود. میکروکپسول ها حین برخورد با ترک شکسته شده و در مجاورت کاتالیزور عمل پلیمرزاسیون صورت گرفته و با تشکیل ماده های سخت، ترک ترمیم می شود. (۱)

در واقع میکروکپسول های کروی همانند گلبول های قرمز و کاتالیزور نقش پلاکت در فرآیند لخته شدن خون به هنگام ترمیم یک بریدگی در پوست را شبیه سازی می کند. شکل ۱ مکانیزم ترمیم خرابی سیستم میکروکپسول را نشان می دهد.



شکل ۱- مکانیزم عملکرد میکروکپسول‌ها در ترمیم ترک

در سال‌های گذشته، در تحقیقات زیادی، به موضوع خود-ترمیم‌گری در مواد سیمانی پرداخته شده است. با اینکه بیشتر تحقیقات، بر نمونه‌های بتنی بسیار کوچکی انجام شده که با دقت بالا و با ترک‌های از پیش تعیین شده تهیه شده‌اند، این کارآیی ترمیم را می‌بایست پس از تماس کپسول‌ها با بتن در حال ترکیب و قالب‌گیری و برای ترک‌هایی مورد بررسی قرار داد که به صورت رندوم ظاهر می‌شوند. در این تحقیق، مقاومت مواد کپسوله‌سازی شکننده، از جمله پلی‌اورتان در برابر فرایند ترکیب و ساخت بتن، مورد مطالعه قرار گرفته است. روش‌های گوناگونی برای حفاظت از کپسول‌ها پیشنهاد و ارزیابی شده است. بعلاوه، الگوهای ترک واقعی، در تیرها و با کپسول‌های جاسازی شده شکل گرفتند. تکنیک‌های آزمایشی غیر مخرب از جمله ارتباط تصویر دیجیتال، تحلیل انتشار آکوستیک و پرتونگاری اشعه‌ی ایکس، برای ارزیابی بقای کپسول‌ها در برابر تشکیل ترک مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی کارآمدی ترمیم ترک‌ها از طریق انجام آزمایش نفوذ پذیری آب، نشانگر افزایش نفوذ پذیری آب بود که علت آن نیز خود-ترمیم‌گری تشخیص داده شد، اما کاملاً جلوی ورود آب به ترک‌ها گرفته نشد.

#### • کپسول‌های استوانه‌ای پر شده با عوامل ترمیمی

کپسول‌های کوتاه (۶۰ میلی‌متر) به طریق زیر با عامل ترمیمی پر می‌شدند. یک سر تیوب، با متیل متاکریلات (MMA) بتونه کاری می‌شد. بعد، کپسول‌های ستونی با یکی از اجزای عامل ترمیمی که بوسیله‌ی سرنگ و سوزن تزریق شده بودند پر می‌شدند. در حالی که نیمی از کپسول‌ها با پلیمر پلی‌اورتانی پر شده بودند، نیمی دیگر با ترکیبی از شتاب‌دهنده (۱۰ W%) و آب پر شده‌اند

برای ارتقای این قابلیت که این مواد کپسوله‌سازی شکننده به قالب‌گیری و ترکیب بتنی برسد، دو روش متفاوت مورد استفاده قرار گرفت تا از کپسول‌های کوتاه محافظت کند. در روش اول، یک سیم دور شیشه و یا کپسول‌های سرامیکی پیچیده شد که در بردارنده‌ی یکی از اجزای تشکیل دهنده‌ی عامل ترمیمی بود. از این طریق، سطحی سخت‌تر به دست می‌آمد. پس از آن، لایه‌ی نازکی از بتن (نسبت آب به سیمان ۰,۵) دور این زوج‌ها شکل می‌گرفت تا در برابر فشاری توده‌ها از آنها حفاظت کند.

مکانیزم دوم، حفاظت از مواد کپسوله‌سازی به عنوان میلگرد‌ها در خمیر سیمان (نسبت آب به سیمان ۰,۴) است. قالب‌هایی با ابعاد ۱۰ میلی‌متر × ۱۰ میلی‌متر × ۸۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا، لایه‌ای از خمیر سیمان در قالب قرار داده شد. در مرحله‌ی بعد، تیوب‌هایی که با اجزای تشکیل دهنده‌ی عامل ترمیمی پر شده بودند در بالای آن در مجاورت یکدیگر قرار گرفتند. پس از پر کردن کامل با خمیر سیمان، نمونه‌ها ارتعاش داده شدند. یک روز پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها از قالب در آمدند.

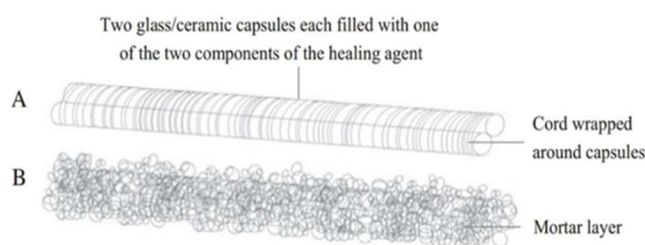


Fig. 1. Protection of the short glass and ceramic capsules by winding them with a cord (A) and providing a tiny mortar layer (B).

K. Van Tittelboom et al./Cement & Concrete Composites 57 (2015) 142–152

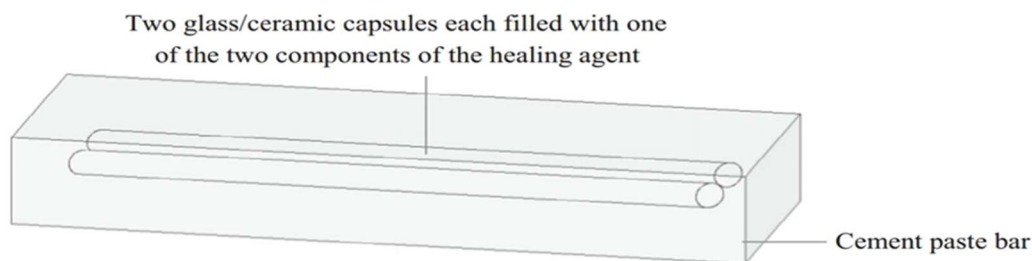


Fig. 2. Protection of the short glass and ceramic capsules by embedding them in a bar made from cement paste.

### • تیرهای سیمانی با (یا بدون) ویژگی‌های خودترمیمی

بتن ترکیب شده با سایر ترکیبات برای تهیه‌ی تیرها ساخته شدند. مقاومت فشاری بتن بر روی هسته‌هایی اندازه گرفته شدند که از تیرهای

۵۶ روزه گرفته شده بودند. مقاومت فشاری،  $58,6 \frac{N}{mm^2}$  و انحراف استاندارد،  $6,4 \frac{N}{mm^2}$  بود.

قالب‌های با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر × ۱۰۰ میلی‌متر × ۶۵۰ میلی‌متر برای قالب‌گیری تیرهای بتنی با و بدون ویژگی‌های خودترمیمی مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه بر فیبرهای فولادی با قطر ۰,۷۱ میلی‌متر که به ترکیب بتن اضافه شده بود، هر تیر با دو میلگرد فولادی قطر ۶ میلی‌متر که در ارتفاع ۱۰ میلی‌متر قرار گرفته اند تقویت می‌شدند.

**Table 2**  
Overview of the different test series under investigation.

Code	Encapsulation material	Capsule length (mm)	Protection mechanism	Amount of capsules	Total volume of encapsulated healing agent (ml)
REF	-	-	-	-	-
GLA_L_W <sup>a</sup>	Glass	400	-	3 × 2	17
GLA_S_W <sup>a</sup>	Glass	60	-	20 × 2	17
CER_S_W <sup>a</sup>	Ceramic	60	-	20 × 2	17
GLA_S_M <sup>a</sup>	Glass	60	Mortar layer	20 × 2	17
CER_S_M <sup>a</sup>	Ceramic	60	Mortar layer	20 × 2	17
GLA_S_C <sup>a</sup>	Glass	60	Cement paste bar	20 × 2	17
CER_S_C <sup>a</sup>	Ceramic	60	Cement paste bar	20 × 2	17

<sup>a</sup> First part of the code refers to the encapsulation material (GLA = glass, CER = ceramic), second part of the code refers to the capsule length (L = long, S = short) and third part of the code refers to the protection mechanism (W = without protection, M = mortar layer, C = cement paste bar).

برای مجموعه‌های آزمایشی از جمله کپسول‌های کوتاه (۶۰ میلی‌متر) و یا بلند (۴۰۰ میلی‌متر) بدون محافظ (GLA\_L\_W, GLA\_S\_W) و (CER\_S\_W)، قالب‌ها در دو مرحله‌ی متوالی با بتون ترکیب شدند. اول یک لایه بتون حدوداً ۱۰ میلی‌متری به کار گرفته شد. سپس کپسول‌ها به سیم‌های فولادی‌ای وصل شد که دور میلگرد‌های تقویتی پیچیده شده بودند. تمام تیوب‌ها با میلگرد‌های تقویتی موضع داده شدند و در مرکز منطقه‌ی میانی قرار گرفتند. پس از جای‌دهی تمام کپسول‌ها، قالب‌ها بیشتر با بتون پر شد.

در مجموعه‌های آزمایشی‌ای که در آن از تیوب‌های شیشه‌ای و یا سرامیکی احاطه شده با یک لایه بتن استفاده شده بود (GLA\_S\_M و CER\_S\_M)، کپسول‌ها در ته قالب جای‌داده شدند. مجدداً کپسول‌ها با میلگرد‌های تقویتی موضع داده شدند و در مرکز منطقه‌ی میانی قرار گرفتند. تیرهای این مجموعه‌ی تست در یک مرحله، با بتن پر شدند. به خاطر لرزش متعاقب، کپسول‌ها چند میلی‌متر از ته قالب بالا می‌آیند و در لایه‌ی پایین‌تر تیرها قرار می‌گیرند.

نمونه‌های متعلق به آخرین مجموعه‌ی آزمایشات (GLA\_S\_C و CER\_S\_C) مجدداً در دو مرحله قالب‌گیری شدند. نیمی از ترکیب بتن که برای قالب‌گیری این تیرها مورد استفاده قرار گرفته بود یک بار دیگر ترکیب می‌شوند تا کپسول‌هایی که در میلگرد‌های خمیر سیمان جای‌دهی شده بودند را توزیع کنند. در نمونه‌ی اول، ترکیب، با استفاده از ترکیب گرتن صورت گرفت، با وجود این، همانطور که نیمی از کپسول‌ها پس از ترکیب به نظر از کار افتاده می‌آمدند، در باقی نمونه‌های این مجموعه ترکیب کپسول‌ها با دست انجام شد. ترکیب بتن که شامل عامل ترمیمی کپسوله شده می‌شود در ابتدا در قالب ریخته شد. سپس، نیم دیگر ترکیب بتن (بدون کپسول) اضافه گردید. در این سری آزمایش، کپسول‌ها به صورت رندوم در نیمه‌ی پایینی تیرها توزیع شدند.

**Table 1**  
Composition of the concrete mix.

Material	Amount (m <sup>3</sup> )	
	(l)	(kg)
Sand 0/4	-	805
Aggregates 2/6	-	150
Aggregates 6/14	-	850
Cement CEM I 52.5 N	-	390
Water	-	188
Superplasticizer	1.5	-
Steel fibres	-	40

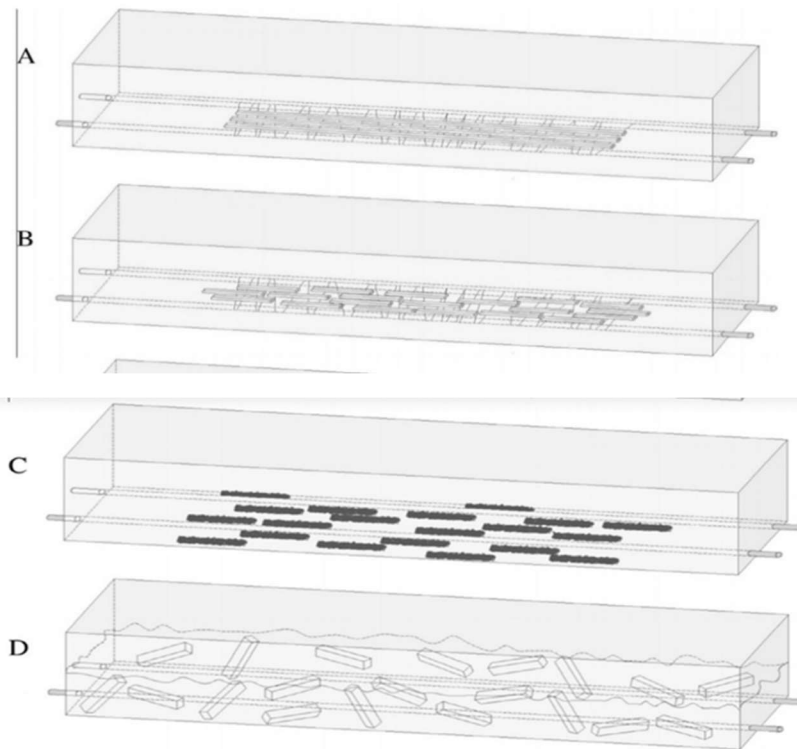


Fig. 3. Composition of beams with self-healing properties containing (A) long glass tubes attached to reinforcement, (B) short glass/ceramic capsules attached to reinforcement, (C) short glass/ceramic capsules surrounded by mortar layer and (D) short glass/ceramic capsules embedded in cement paste bar.

### • روش های آزمایشگاهی • خمش چهار نقطه ای:

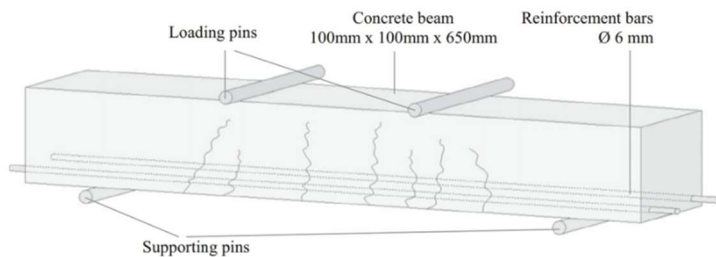


Fig. 4. Test setup of the four-point-bending test.

در روز ۱۴ هم ، چندین ترک به خاطر انجام آزمایش فوق بوجود آمدند، آزمایش را بوسیله ۴ میله فلزی که دو جفت آن در بالای تیر و به فاصله ی ۲۰۰ میلی متر که بار وارده را به تیر اعمال میکند و دو جفت دیگر آن در زیر تیر به فاصله ی ۵۰۰ میلیمتر و نقش مهار تیر را دارند قرار گرفت اند.

نرخ رشد ترک ها را در قسمت پایینی تیر کنترل کرده و قبل از آنکه بار را برداریم ، از ترک هایی که با دارای  $0,05 \frac{mm}{min}$  نرخ رشد هستند استفاده میکنیم تا زمانی که اندازه ی آنها به ۴ mm برسد و بعد از آنکه بار را برداشتیم تیر را معکوس کرده و به مدت ۲۴ ساعت اجازه میدهیم تا پلی اورتان ها (polyurethane) به عمل آوری برسند.

## • تجزیه و تحلیل هستگی تصاویر دیجیتالی (DIC)

در طول بارگذاری و برداشتن آن در جلو و زیر تیر فرمی از ترک ها و ترک های جزئی شکل میگردند که آنها را DIC مرتبط میکنیم.

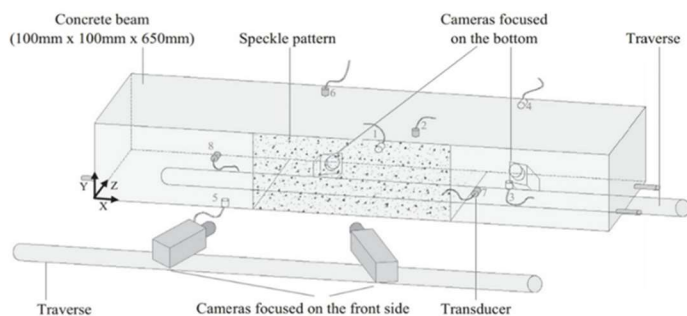


Fig. 5. Setup of the cameras used for DIC analysis and location of the AE transducers at each side of the beam.

DIC یک روش بررسی و تحلیل تصویری است که به با آن می توان مقدار تغییرات فرم هر نوع ترک را اندازه گیری کرد و این نوع ترک ها در نمای جلو و پایین تیر شکل میگیرند.

از چهار دوربین با رزولوشن  $2058 \times 2456$  پیکسل و دارای لنز  $23 \text{ mm}$  و دارای قابلیت پیمایشی هستند استفاده کرده

و روی پایه قرار میدهم. دو عدد از آنها را در جلوی تیر به فاصله  $200 \text{ mm}$  به گونه ای که عرض  $250 \text{ mm}$  ترک ها را پوشش دهد قرار میدهم. دو عدد دیگر را در زیر تیر به گونه ای که تصویری با عرض حدود  $130-150 \text{ mm}$  داشته باشیم قرار میدهم. در روش DIC از یک نور ملایم برای روشن نمودن و کیفیت بهتر عکس ها در زیر و جلوی تیر استفاده میشود.

در ابتدا، در روش خمش چهار نقطه ای تنظیمات در بین ها به گونه ای است که هر  $2$  ثانیه حدود  $20$  تصویر سه بعدی جداگانه بگیرند و از آنجایی که دوربین ها به دستگاه اعمال فشار به تیر وصل بوده بعد از اعمال نیروی بیشتر از  $500 \text{ N}$  عکس های بیشتری به ثبت رسیده و در سیستم آنالیز ما ثبت میشود.

## • آنالیز و بررسی امواج صوتی (AE)

این روش یک روش اساسی در تشخیص خرابی ها و ترک ها بوده و روش مناسبی برای شناسایی انتشار ترک ها و گسترش خرابی های

Table 3  
Coordinates of the AE sensor positions (for origin of coordinate system see Fig. 5).

Sensor number	Position		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	312	20	100
2	398	100	15
3	485	0	85
4	492	90	100
5	158	0	15
6	253	100	85
7	484	43	0
8	155	68	0

ترک ها در بتن و دیگر سازه های رایج استفاده کرد. در طول روش خمش چهار نقطه ای در تیری حاوی کپسول ترک ها و خرابی های زیادی به صورت پدیده بوجود میآیند (ترک های برشی در اطراف آرماتورها، شکست کپسول ها، باز شدن مجدد ترک ها در طی ترمیم آن ها و غیره). این موج ها به وسیله ی سنسور های تعبیه شده به سطح تیر ها فرستاده می شوند و با در اختیار داشتن سخت افزار هایی می توان تشخیص داد که ترک ها به صورت پدیده هستند یا خیر.

هشت سنسور عریض برای برای پرتاب امواج به سطح بتن و هشت کانال دریافت اطلاعات صوتی برای ضبط سیگنال ها جود دارد. بیشتر ترک ها در منطقه ی کاور بین بوده و چندین ترک در آنجا اتفاق افتاده است. در هنگامی که ما بارگذاری را اعمال میکنیم و عدم

بارگزاری داریم سیگنال ها را تقویت کرده که بتوانیم تعداد آنها، ضربه ها، زمان خیز، فرکانس، انرژی و غیره را به وسیله نرم افزار در هر لحظه ثبت و کنترل کنیم.

## • تست نفوذ پذیری آب

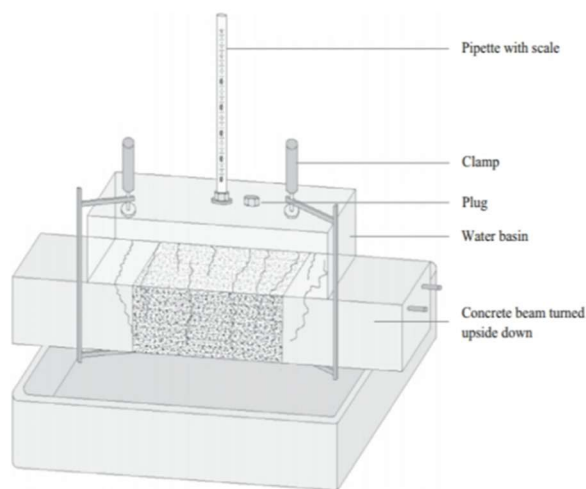


Fig. 6. Water permeability test setup.

پس از آنکه ترک ها شکل گرفتند و ترمیم شدند (انتظار ما به گونه ای است که مانند نمونه ی اولیه بشوند)، حال به کمک تست نفوذ پذیری مقدار آبی را که در بتن نفوذ میکند را اندازه گیری مینماییم. به کمک یک مخزن آب به ابعاد  $400 \times 100 \times 100$  mm که دارای دو سوراخ بوده که در یکی پیست پلاستیکی به قطر داخلی  $12$  mm و دیگری یک درپوش پلاستیکی که به کمک آن مخزن را آب مینماییم. قبل از اینکه در مخزن آب بریزیم سطح بین تیر و مخزن را به مدت  $30$  دقیقه با سیلیکم کشیده و

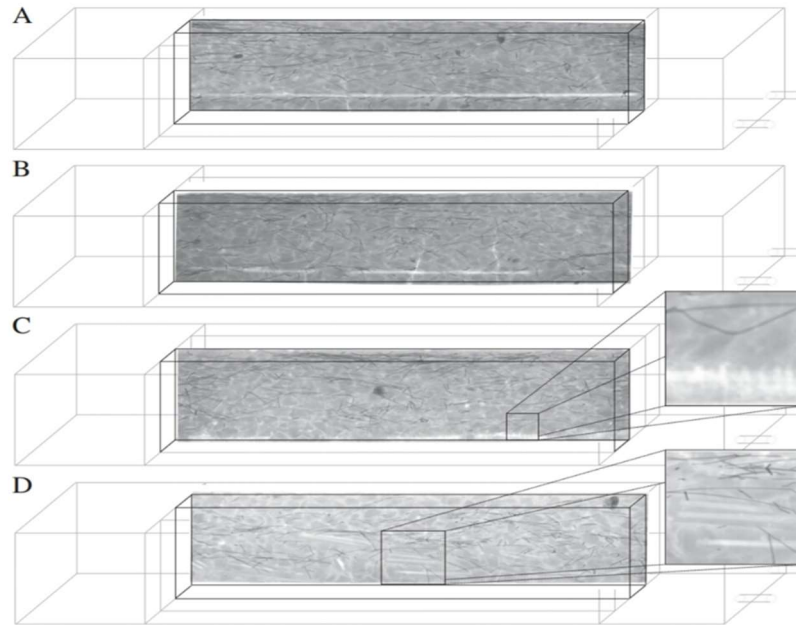
سپس مخزن را به وسیله دو گیره به تیر ثابت میکنیم. زمانی که مخزن و پیست کامل فیکس شدند، مخزن را پر از آب نموده و زمانی احتیاج داریم که این آب به داخل ترک ها نفوذ کند و سپس مقدار آبی که نفوذ نموده را به کمک پیست اندازه گیری میکنیم. ضریب نفوذ پذیری آب را به صورت زیر تعریف میکنیم:

$$K = \frac{a \cdot T}{A \cdot t} * \ln \left( \frac{h_0}{h_f} \right)$$

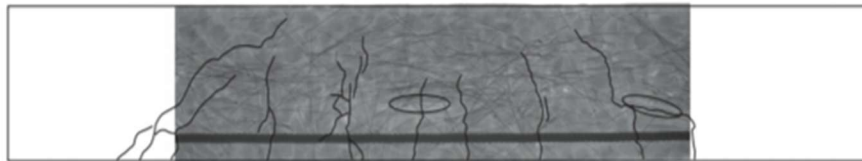
$a$  = مساحت مقطع پیست  $A$  = مساحت درگیر بین مخزن و تیر  $T$  = ارتفاع تیر  $t$  = زمان  $h_0$  و  $h_f$  = ارتفاع ابتدا و انتهای آب

## • بررسی و تحلیل پرتونگاری

بعد از انجام آزمایشات خمش چهار نقطه ای و تست نفوذ پذیری آب، تیر از دو طرفش کاهش سایز داشته و ما قطعه میانی به طول  $125$  mm را انتخاب میکنیم. و قسمت میانی را به قطعات برابر تقسیم میکنیم سپس به وسیله پرتوی X از هر قطعه عکس رادیوگرافی میگیریم (در دانشگاه جنت) و موقعیت کپسول ها را نمایان میکنیم.



**Fig. 7.** Radiographic images showing the position of the capsules within the beams in case (A) long glass tubes are attached to the reinforcement, (B) short glass/ceramic capsules are attached to the reinforcement, (C) short glass/ceramic capsules surrounded by a mortar layer are placed at the bottom of the mould and (D) short glass/ceramic capsules embedded in a cement paste bar are mixed in.



**Fig. 8.** Crack pattern and radiograph showing bending of shear crack due to limited bond between cement paste bar and concrete matrix. Some capsule locations and orientations are indicated by ellipses.

برای سری های GLA-L-W ترک ها از طول تیوپ ها عبور کرده و باعث ایجاد شکست در آنها شده است. برای سری های GLA/CER-S-W ، GLA/CER-S-M کپسول ها در هر قطعه در جلوی تیر باعث ایجاد یک محدوده ی پیوسته از کپسول ها شده است. بالنتیجه ترک های ایجاد شده که در کل عرض تیر ظاهر شده اند احتمالاً از یک یا چند کپسول عبور کرده و آنها را شکستند.

زمانیکه کپسول ها در GLA-S-C و CER-S-C قرار گرفته اند عامل ترمیمی در حجم بیشتر و یکسانی به رشد رسیده اند اگرچه کپسول های جلوی تیر در یک منطقه ی ادامه داری مشخص میشوند. تا زمانی که ترک ها از کپسول ها عبور کنند و ترک ها با کپسول ها مطابقت کند تا زمانی که سیمان چسبیده به میلگرد در برابر ترک ها مقاومت کرده و ترک را جذب میکند ، این اتفاق به طور واضح در رادیوگرافی مشاهده نمی شود، اما دلیل اینکه اغلب اوقات ترک ها بعد از میلگردها خم می شوند پیوند بین میلگرد و ملات بتن است که ضعیف میباشد. FIG 8

با توجه بیشتر به مقدار AE آزاد شده در آزمایش های ذکر شده ، مقدار انرژی در زمان بارگذاری چندین سطح افزایش داشته است که به خاطر شکستن کپسول ها می باشد و مجموع انرژی را به وسیله ۸ کانال ضبط کرده ایم و آنها در هر شکست کپسول میزان بار و زمان و محل کپسول را ثبت



می‌کند. انرژی که آزاد می‌شود از نمونه‌های اصلی مربوط به ترک‌های پدید آمده است که مربوط به شکست ملات، تغییر شکل میلگرد، بیرون آمدن فیبرهای فلزی است که مقدار آنها کمتر از ۱۰/۰۰۰ بوده.

در نمونه‌هایی که انل کپسول‌های محافظت شده و مواد قابل ترمیمی بوده شکست کپسول‌ها باعث ایجاد انرژی بیشتر از ۱۰/۰۰۰ شده است.

چندین کپسول در طی بارگذاری در این روش شکسته‌اند و زمانی که بیشتر از یک کپسول با یک ترک مشابه میشکند این مربوط است به اینکه اینها در نزدیکی هم واقع شده‌اند و زمانی که در هر کپسول شکست اتفاق می‌افتد و خاتمه‌ی آن بیشتر مربوط به الگوی توسعه‌ی ترک‌ها است و پخش شدن آن‌ها و ما میتوانیم پایه مربوط به شکست کپسول‌ها را بدانیم. اگرچه فرض کردیم که بیشتر کپسول‌ها در نزدیکی پایین تیر را با مقدار کمی از کپسول‌هایی که در فاصله‌ی میانی تیر قرار گرفته‌اند. این موضوع را در FIG ۹ نمایش داده ایم. و مقدار باری که هر تذک با آن شروع می‌شود در هر تیر متفاوت می‌باشد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت تیوپ‌های بلند بیشترین علت آن‌اند که کپسول‌ها بشکنند (۲۹ بار در FIG ۹) همان‌طور که تیوپ‌های ادامه‌دار نشان می‌دهد که احتمالاً بر اثر ضربه بوده اگرچه که، کپسول‌های زیادی شکستند در شکل GLA-L-W نشان داده می‌شود. تراوش و عملکرد عوامل ترمیمی دیده نمی‌شود و راندمان و بازدهی از عوامل ترمیمی مشاهده نمی‌شود.

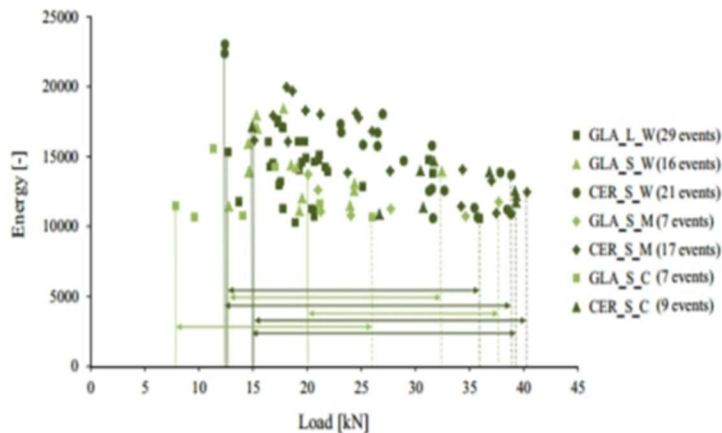
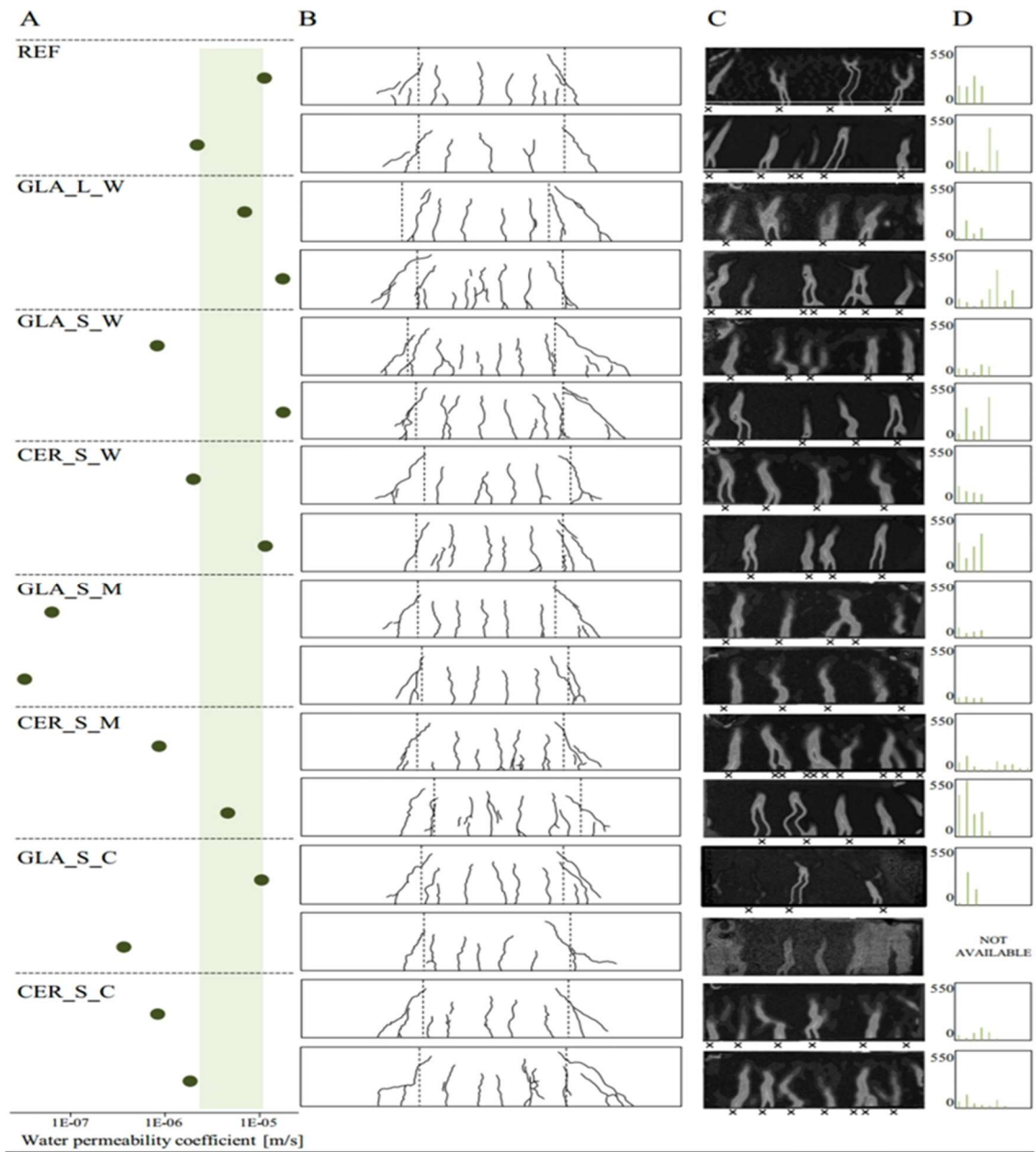


Fig. 9. Energy of the events caused by capsule breakage in function of the load level for each of the encapsulation methods. A continuous line is used to indicate the first capsule breakage, a dashed line is used to indicate the last capsule breakage.

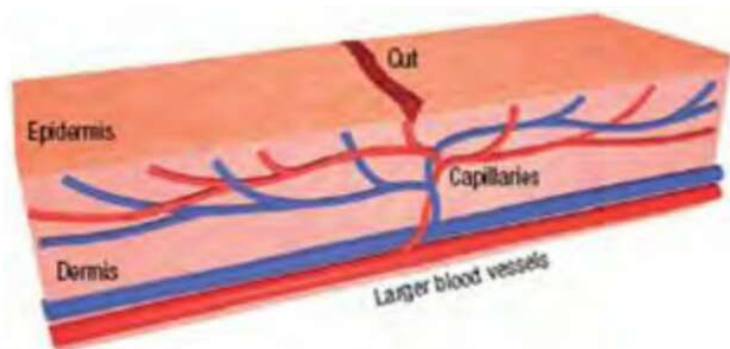


**Fig. 10.** (A) Water permeability coefficient  $k$  [m/s], the minimum and maximum  $k$ -value noted for the reference series is indicated by a shaded area, (B) crack patterns observed at the back of each beam and indication of the zone which was analyzed by DIC from the front side of the beam (dotted lines), (C) strain profiles obtained from DIC analysis at the front side of the beam at the end of unloading and (D) cracks widths [ $\mu\text{m}$ ] determined by DIC for the cracks indicated by a cross in part C.

### • استفاده از مواد نانو در ساخت شبکه مویرگی حاوی عامل ترمیم در بتن

در روش استفاده از میکروکپسول‌های خود ترمیم که در بخش ۳ به آن اشاره گردید، ممکن است با افزایش میزان میکروکپسول‌ها، همگنی و یکنواختی بتن تحت تأثیر قرار گیرد و کاهش مقاومت و طاقت قطعه بتنی را موجب گردد. بنابراین جهت بهبود عملکرد، نیاز به تزریق مایع ترمیم کننده از طریق یک سیستم هوشمند احساس می‌شود. در این راستا تحقیقات اخیر بیانگر امکان تعبیه شبکه مویرگی به صورت انتقال نانو مواد عامل ترمیم با تکیه بر خاصیت موینگی از منبع به محل خرابی و پلیمرزاسیون در مجاورت کاتالیزور و نتیجتاً

تشکیل ماده سخت و ترمیم ترک می‌باشد. [۴] تحقیقات آتی درصدد توسعه شبکه مویرگی در بتن حاوی عامل‌های ترمیم کننده، به صورت کاملاً هوشمند همانند سیستم بیولوژیکی خواهد بود. (شکل ۳)

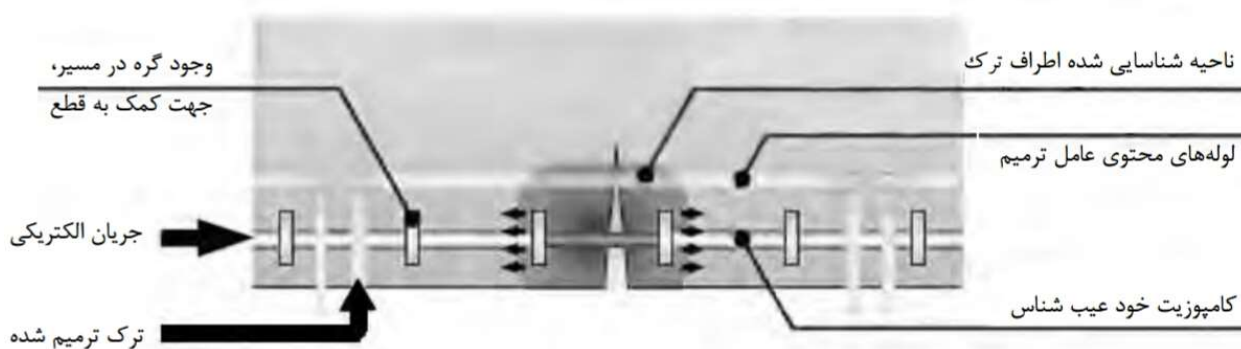


**شکل ۳- شبکه مویرگی جهت توسعه و تعبیه میکروکپسول‌ها با الهام از سیستم بیولوژیکی**

### • روش انتخابگر ناحیه گرمایی

در حال حاضر کاراترین و هوشمندترین سیستم‌های خود ترمیم، سیستم انتخابگر ناحیه گرمایی معرفی شده است. این سیستم از دو بخش اصلی تشکیل می‌گردد:

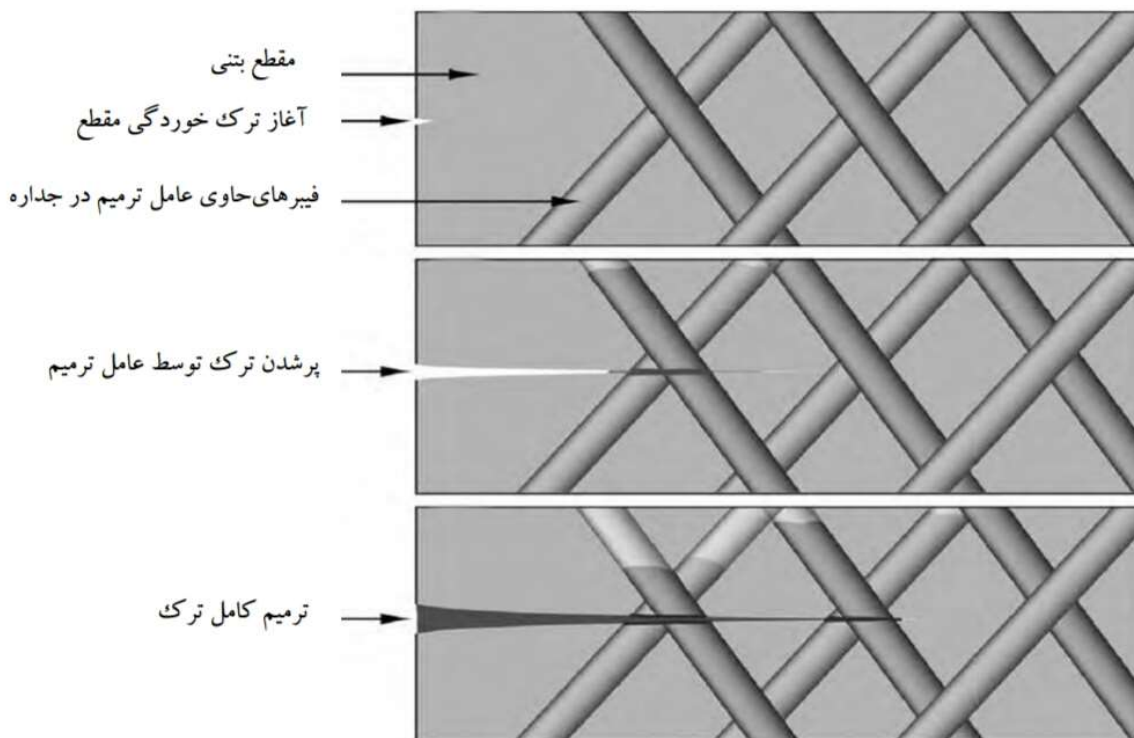
- ۱- کامپوزیت‌های خود عیب شناس که از فایبرها و نانو مواد هادی جریان الکتریسیته ساخته شده است که هم قابلیت یک کرنش سنج را داراست و هم به عنوان یک ماده عملکردی توانایی ثبت تاریخچه زمانی خرابی در سازه را دارا می‌باشد.
- ۲- بخش ترمیم کننده که به صورت لوله‌هایی از جنس مصالحی با خاصیت پلاستیک شوندگی در برابر گرما و محتوی نانو مواد عامل ترمیم است. به گونه‌ای که تا قبل از گسترش هر گونه ترکی از خروج عامل ترمیم جلوگیری می‌کند. زمانی که ترکی در قطعه رخ می‌دهد، بخش اول به صورت حسگر، کرنش جرنی در محل ترک را شناسایی کرده و با فرستادن پیام به بخش ترمیم کننده (مانند عملکرد نرون‌ها در بدن جانوران)، عامل ترمیم کننده آزاد شده و ترک را ترمیم می‌کند. مکانیزم فرستادن پیام به صورت قطع قسمتی از جریان در محدوده آسیب دیده و افزایش مقاومت الکتریکی و در نتیجه افزایش دما و ذوب پوسته محتوی عامل ترمیم می‌باشد (۵). شکل ۴ چگونگی فرآیند ترمیم را با این روش نشان می‌دهد. البته طراحی این سیستم که برای ترمیم از انرژی گرمایی جهت آزاد شدن عامل ترمیم محبوس شده در روکش استفاده می‌شود با حساسیت‌ها زیادی همراه است. به طوری که بالا رفتن دما در بتن نباید منجر به تبخیر آب درونی و از هم پاشیدن ساختمان درونی و یا هر فرآیند زیان آور دیگر برای خواص مقاومتی و عملکردی بتن گردد.



شکل ۴- مکانیسم ترمیم خرابی در سیستم انتخابگر گرمایی

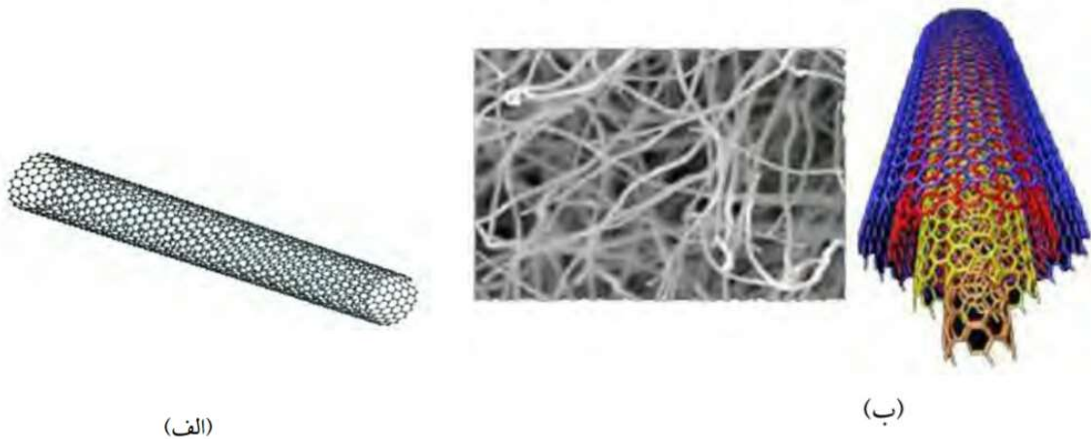
### • استفاده از فیبر توخالی

در این روش با به کارگیری رنگ‌های فلورسنت در عامل ترمیم کننده جاری در این الیاف‌ها، پدیده کبودشدگی در موجودات زنده شبیه سازی می‌گردد که خود نقش مهمی در تشخیص محل آسیب دیدگی دارد. در این روش نیز عامل ترمیم از فیبر نازک تو خالی آزاد می‌شود تا ترک‌های ایجاد شده را پر کند و ترک ترمیم گردد [۶]. مکانیزم ترمیم به روش فیبر تو خالی در شکل ۵ نشان داده شده است.



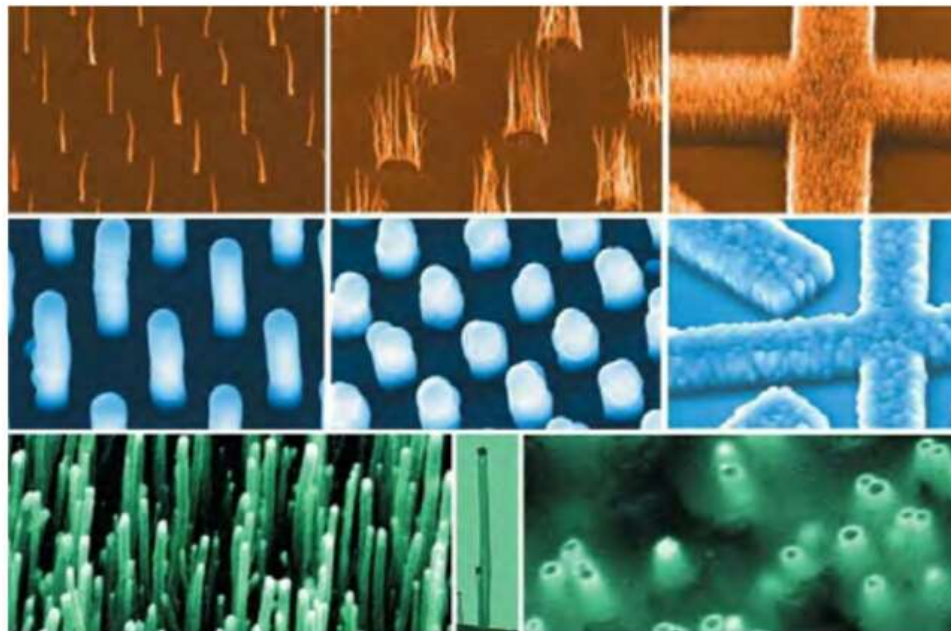
## • نانو لوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی (CNT) نوعی از کربن است که اولین بار در سال ۱۹۵۲ در روسیه کشف ولی به دست فراموشی سپرده شد. این ماده مجدداً در سال ۱۹۹۰ در حلقهٔ تکنولوژی نانو جایگاه ویژه‌ای پیدا کرد. نانو لوله‌ها به فرم استوانه‌ای و به صورت تک جداره و چند جداره تا طول چند میلیمتر تولید می‌شوند. (شکل‌های ۷ و ۸)



ب) نانو لوله‌های کربنی چند جداره

شکل ۷- الف) نانو لوله‌های کربنی تک جداره



شکل ۸ - نمونه‌هایی از CNT بزرگنمایی شده

با افزودن مقادیر کمی (حدود یک درصد وزنی) CNT به سیمان، خواص مکانیکی بتن بهبود قابل توجهی می‌یابد. از این نانو مواد در فرآیندهای خود ترمیمی بتن نیز استفاده می‌شود. البته مشکل اصلی که در استفاده از CNT در بتن وجود دارد اتصال نانو لوله‌ها به یکدیگر به صورت رشته و عدم چسبندگی کافی بین آن‌ها و بتن می‌باشد. [۹] تحقیقات برای بررسی نحوه استفاده از این مواد در فرآیند خود ترمیمی در حال انجام است.

### • بتن آسفالتی متخلخل خود ترمیم شونده

پس از گذشت چند سال، آسفالت حاوی پیندر توسط عوامل محیطی بالاخص به دلیل تابش اشعه UV از خورشید، صدمه دیده و کارایی خود جهت چسباندن و پیوند دادن دانه های سطحی را از دست می دهند. این موضوع باعث ایجاد ترک ها و امکان نفوذ رطوبت به لایه های زیرین و ایجاد ناهمواری های سطحی، چاله ها، آسیب و گسیختگی نهایی سازه ای می شود. در حال حاضر، هیچ راه حلی جهت بستن ترک ها در لایه رویه روسازی وجود ندارد. هنگامی که اثرات و علائم پیرشدگی مشخص می شود، درزگیرها که باعث محافظت از سطوح آسفالتی در برابر آسیب های محیطی می گردد، به سطح اعمال می شود. در زمان های دیگر هنگام احیای آسفالت همراه با قابلیت تغییر خصوصیات شیمیایی قیر، به سطح اعمال می شود. تمامی این فرآیندها می تواند باعث افزایش عمر آسفالت به مدت چند سال پیش از بهسازی و بازسازی لایه می شوند، هر چند از این جهت که صرفا در چند سانتیمتر اول لایه مورد استفاده قرار می گیرند و باعث کاهش مقاومت در برابر لغزش می شوند، دارای نقایصی می باشند. عموما این طور تصور می شود که راه های آسفالتی می توانند خود را ترمیم نمایند، اما این فرآیند در دمای محیط بسیار زمان بر بوده و صرفا هنگامی صورت می گیرد که هیچ بار ترافیکی بر روی سطح وجود نداشته باشد. همچنین این طور نتیجه گیری شده است که میزان خود ترمیمی هنگامی که ماده در معرض دماهای بیشتر در حین دوره آسایش قرار می گیرد، بیشتر می شود. (بونار ۱۹۸۲). بنابراین یک پروژه با بررسی میزان افزایش خود ترمیم شونده جاده آغاز می شود که روش خوبی جهت افزایش طول عمر روسازی می باشد. به جهت ساده سازی، می توان قیر را به عنوان یک روغن بسیار غلیظ در نظر گرفت. هنگامی که ترکی به وقوع می پیوندد، بسیار سریع بسته می شود اما هنگامی که میزان غلظت غیر کاهش یابد، بسیار سریع تر انجام می شود. در این مقاله دو ایده جدید مورد اشاره قرار رفته است: حرارت زایی بتن آسفالتی و میکروکپسول های پر شده توسط یک ماده خود ترمیم (گارسیا ۲۰۰۹). هر دوی این روش ها باعث افزایش میزان خود ترمیم شدگی بتن آسفالتی و در نتیجه افزایش عمر جاده می شوند.

### • روش کپسولی (پوششی)

قیر را می توان به صورت یک ماده دو فازی دارای یک فاز مایع و جامد می باشد. باگذشت زمان، فاز مایع اکسید شده، ناپدید شده و باعث خشک شدن و شکننده شدن آسفالت می شوند. به منظور دوری از این اتفاق، از رقیق کننده ها در سطح جاده هنگام بروز نشانه های پیرشدگی جاده استفاده می شود. مشکل این نوع آغشته سازی این است که سطحی بوده و فقط بر روی لایه های فوقانی روسازی موثر می باشد. به منظور حل این مشکل، بهترین روش اضافه کردن رقیق کننده و افزودنی های خاص به جاده از طریق مخلوط کردن کپسول ها با بتن آسفالتی می باشد در شکل ۹، نمایی از اثر کپسول ها بر روی بتن آسفالتی نشان داده شده است. هنگامی که ترک در نزدیکی کپسول رخ می دهد، کپسول شکسته شده و افزودنی های درون آن در تماس با قیر موجود در اطراف قرار می گیرد. سپس به

وسیله پراکننده سازی ، این افزودنی ها و قیر تخریب شده با یکدیگر مخلوط می شوند. سپس قیر احیا شده و ترک بسته می شود . با این روش استفاده از کپسول ها ، میزان خود ترمیم شوندگی افزایش می یابد.

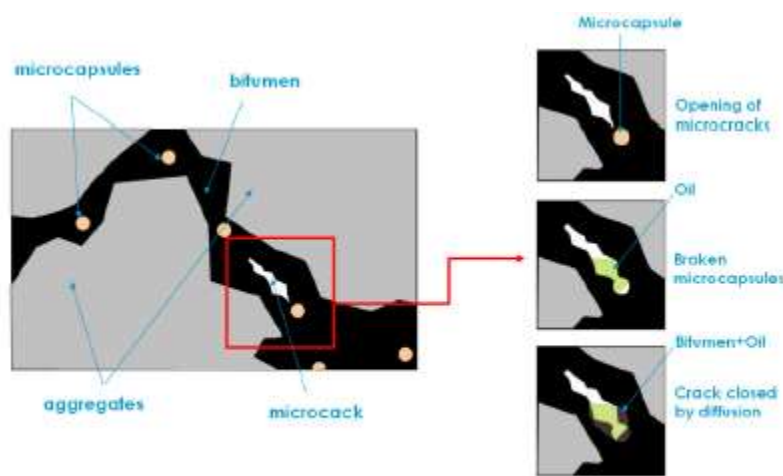


Figure 9. Schematic representation showing the working of encapsulated oil to heal cracks in asphalt concrete.

بسیاری از تحقیقات نحوه ایجاد این کپسول ها را بیان می کنند ، اما بتن آسفالتی برای عملکرد این کپسول ها محیط بسیار زنده ای می باشد. این کپسول ها باید در محیط های بسیار لزج قرار گیرند. آنها نباید با قیر واکنش دهند و باید در دمای ۱۸۰ درجه تحت تراکم قرار گیرند. و البته نباید مقاومت چندانی در برابر شکست از خود نشان دهند . تحقیقات جهت بهبود عملکرد این کپسول ها در دست انجام است .

## • حرارت زایی اندوکسیون

مبنای استفاده از روش دوم این است که حرارت ایجاد شده در آسفالت باعث افزایش میزان خود ترمیمی می شود. اولین پیش نیاز جهت انجام این روش ، رسانا بودن مصالح تشکیل شده آنها می باشد. در بسیاری از تحقیقات انجام شده در گذشته ، امکان رسانایی بتن و آسفالت با افزودن فیلرهای رسانای الکتریکی و فیبرها به اثبات رسیده است. دومین پیش نیاز جهت استفاده از این روش این است که فیبرها و فیلرها باید در یک مسیر حلقوی بسته به یکدیگر متصل شوند. در شکل ۱۰ ، تصویر شماتیکی از این سیستم نشان داده شده است. در ابتدا ترک های مویی در قیر به وقوع می پیوندند . اگر فیبرهای رسانا و فیلرها به میزان کافی اضافه گردند ، در اطراف ترک های مویی مدارهای بسته ایجاد می شود. حرارت هنگام ازدست دادن انرژی توسط ایجاد می شود و در نهایت قیر ذوب شده و ترک بسته می شود.

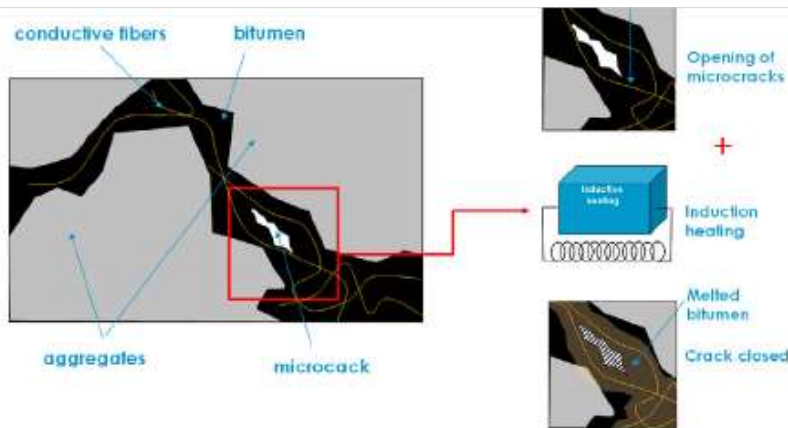


Figure 10. Schematic representation showing the system of using fibers heated with induction energy to heal cracks in asphalt concrete.

این تحقیق در سه مرحله انجام می شود. در ابتدا ترکیب بهینه ای از فیبرهای رسانا و فیبرها انتخاب می شود؛ سپس دمای مناسب جهت رسانایی الکتریکی فیبرها محاسبه می شود. در نهایت جهت ایجاد خود ترمیمی، نمونه ها به طور مکرر در سه نقطه تحت خمش شکسته می شوند و دوباره حرارت یافته و ترمیم می شوند. این طور نتیجه گیری شده است که فیبرهای رسانای الکتریکی کارایی به مراتب بیشتری نسبت به فیبرها هنگام افزایش رسانایی دارند. همچنین علی رغم ضروری نبودن رسانا بودن نمونه جهت حرارت زایی، حجم بهینه ای از فیبرها جهت انطباق با حرارت انتخاب می شوند. شکل ۱۱، نشان دهنده ظرفیت خود ترمیمی قیر می باشد. این شکل نشان دهنده منحنی های بار-تغییر شکل چهار نمونه و منحنی های تنش - کرنش نمونه ها پس از ۶ بار حرارت زایی، ترمیم شدگی و بارگذاری مجدد می باشد. جهت دوری از اثر خزش نمونه ها در دمای ۲۰- در طول آزمایش نگه داری شده اند. بنابراین نمونه ها دارای شکستگی ترد می باشند. در حین فرآیند ترمیم شدگی می توان مشاهده کرد که ترک ها ناپدید می شوند. در شکل ۱۱، مقاومت نمونه ها پس از ۵ بار ترمیم شدگی حدود ۷۰٪ حالت اولیه است. همچنین مدول الاستیک آنها بسیار نزدیک می باشد، اما شیب پس از گذشت از مقاومت نهایی در نمونه های ترمیمی تند تر می باشد. این موضوع منطقی است، زیرا ناحیه ترمیم شده، ناحیه ضعیفی بوده که در آن تمام فیبرها شکسته می شوند.

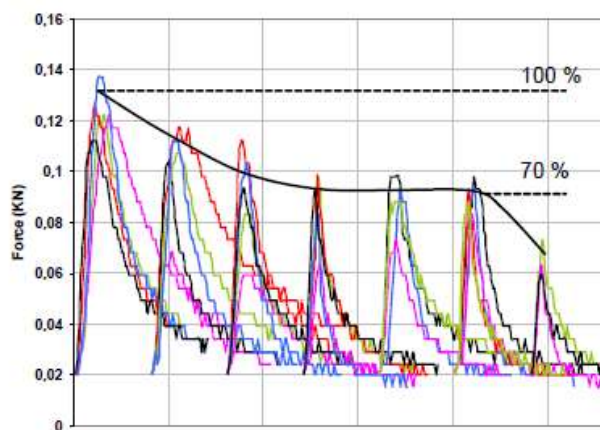


Figure 11. Force-deformation diagrams of bitumen specimen with steel-wool fibres loaded in 3 point bending, in 6 cycles of loading-heating and reloading.



## نتیجه‌گیری

در این گزارش روش های خود ترمیم شوندگی در مصالح مورد بحث و بررسی قرار گرفت. اولین قسمت ، استفاده از باکتری جهت ایجاد رسوبات کلسیتی در ترک های بتن بود. با استفاده از این روش می توان ترک های نسبتاً بزرگ در بتن مسلح را پر نمود. این روش باعث افزایش مقاومت بتن نمی گردد ، اما با پر کردن ترک ها ، مسیر آرماتورگذاری مسدود می شود. همچنین ورود و نفوذ مایعات و یون ها که به خوردگی آرماتور می شود ، محدود شده و باعث افزایش دوام سازه می گردد. همچنین این روش برای سازه های آبی مناسب می باشد. می توان ترک ها را بدین ترتیب پر کرده و اثر نشت را متوقف نمود. بتن باکتریایی در سازه های زیر زمینی که تعمیر و مرمت آن دشوار می باشد ، بسیار مناسب است.

نتایج این تحقیق نشان می دهد ECC به دلیل شکل پذیری کششی زیاد و کنترل عرض ترک، دارای مشخصاتی می باشد که سبب وقوع خود ترمیمی به دفعات می گردد. چرخه های تر و خشک شدن به خود ترمیمی کمک کرده و آنرا افزایش می دهند. استفاده از فرکانس تشدید به عنوان یک روش تست غیر مخرب منحصر بفرد برای تعیین سطح آسیب و میزان ترمیم بکار رفته است. بیشترین بازیابی فرکانس تشدید قبل از ۴ تا ۵ چرخه اتفاق می افتد. تأثیر دما در حین خود ترمیمی می تواند منجر به افزایش مقاومت نهایی و کاهش اندک ظرفیت کرنش کششی شود.

به منظور تضمین رفتار خود ترمیمی قابل توجه در مواد بر پایه مصالح سیمانی، عرض ترک باید کمتر از  $50 \mu\text{m}$  و ترجیحاً کمتر از  $30 \mu\text{m}$  کنترل شده باشد. بسته به عرض ترک، محصولات خود ترمیمی  $\text{C-S-H}$  و  $\text{CaCO}_3$  سنگ مانند می باشد. اصلی ترین محصول خود ترمیمی برای عرض ترک های  $50 \mu\text{m}$  می باشد.  $\text{CaCO}_3$  و  $\text{C-S-H}$  محصولات اصلی خود ترمیمی برای عرض ترک های  $30 \mu\text{m}$  می باشد. برای عرض ترک های  $50 \mu\text{m}$  محصولات خود ترمیمی کمتری مشاهده می شود با این حال ترک های با عرض کمتر از  $50 \mu\text{m}$  می توانند به طور کامل ترمیم شوند. پیشرفت هیدراتاسیون و تشکیل بلورهای  $\text{CaCO}_3$  دلایل اصلی پدیده خود ترمیمی می باشد. همچنین الیاف های پلی وینیل الکل در ECC مکان هایی را برای تشکیل هسته محصولات خود ترمیمی فراهم می کند که می تواند به خود ترمیمی در ECC کمک کند.

این بتن به گونه ای عمل می کند که به هنگام ایجاد ترک در آن، مقداری از مواد سیمانی هیدراته نشده که در درز ترک ها موجود است در مجاورت دی اکسید کربن و آب واکنش داده و لایه ی بسیار نازک سفید رنگی از کربنات کلسیم در امتداد ترک ها تشکیل شده و مانع از گسترش ترک می گردد و در واقع ترک ها را ترمیم می کند

و در نتیجه دوام، نفوذ پذیری و خواص مکانیکی بالقوه بهبود می یابد. کرنات کلسیم ترکیب بسیار مقاومی است که در طبیعت به وفور در استحکامات محکمی مانند لاک لاک پشت، حلزون و صدف یافت می شود. اگر چه هزینه اولیه این بتن حدود سه برابر بتن معمولی می باشد اما با استفاده از این بتن می توان زیر ساخت های ایمن تر با دوام تر ایجاد نمود که هزینه تعمیر و نگهداری کمتری داشته و دارای عمر خدماتی بیشتر و اثرات زیست محیطی کمتری می باشند.

در ترکیب کپسول های شیشه ای و یا سرامیک که توسط میلگرد خمیر سیمانی محافظت می گردند دارای پایین ترین میزان کارایی است. آنها از ترکیب با میکسر بتن به سلامت بیرون نمی آیند و ترکیب با دست نیز به احاطه عملی قابل اجرا نیست. علاوه بر این، زمانی که کپسول ها به طور رندوم و تصادفی توزیع شده اند، در مقایسه با سایر روش های کپسوله سازی، کپسول های بیشتری مورد نیاز است تا بتوان به همان میزان احتمال ورود ترک ها به کپسول ها دست یافت.

پرتونگاری های انجام شده نشان داد که هر دوی کپسول های شیشه ای و سرامیکی توانستند از فرآیند قالب گیری بدون محافظتی اضافه تر به سلامت خارج شوند. با وجود این، این روش تیرها می بایست در لایه های مختلف قالب گیری شوند. بعلاوه اینکه، در طول زمان قالب گیری باید احتیاط بسیاری به خرج داد تا از شکستن کپسول ها خودداری نمود.

بنابراین، روشی که در آن کپسول های احاطه شده با یک لایه بتن، پیش از قالب گیری در انتهای قالب جای گرفته اند به نظر بسیار مفیدتر می آید. این روش امکان قالب گیری تیرها را در یک لایه فراهم ساخت و در آن برای جلوگیری از شکستگی کپسول ها دقت آنچنانی نیاز نبود. علاوه بر این، تحلیل رادیوگرافی نشان داد که این کپسولها در نزدیکی سطح تیرها باقی ماندند تا در مراحل اولیه ی تشکیل ترک شکسته شده و بتونه کاری کرک را در سطح موجب شوند. زمانی که تیوب های ادامه دار جاسازی شدند، شکست کپسول، منجر به آزاد شدن عامل ترمیم کننده نشد زیرا نیروهای جذب کننده ی داخل تیوبهای با قطر ۳ میلی متر بسیار بالا بود. بنابراین، برای دستیابی به ویژگی های خود ترمیم گری، به کپسول های کوتاه نیاز است.

در تحقیق پیشینی که توسط ما صورت گرفت، کپسول های سرامیکی، در مقایسه با کپسول های شیشه ای عملکرد اندک بهتر از خود نشان دادند زیرا سرامیک در مقایسه با شیشه قابلیت این را دارد که توسط پلی اروتان مرطوب شوند. با جواين، این یافته را نمیتوان در اینجا از طریق آزمایش تأیید نمود. در این تحقیق، انحرافات بسیاری به عنوان پارامتر در مجموعه ی آزمایشات بوجود آمد؛ از جمله پهنای ترک، تعداد ترک ها و جایگاه کپسول به نسبت ترک، دیگر

تحت کنترل نبود. بخاطر همین انحرافات، توجه به تفاوت‌های موجود در میزان کارایی کپسول‌های شیشه‌ای و سرامیکی غیر ممکن به نظر می‌رسد.

میزان نفوذپذیری آب بتن ترک شده را می‌توان از طریق عامل ترمیم‌کننده‌ی کپسول شده کاهش داد اما کارآمدی ترمیم‌گری، بستگی زیادی به این عوامل دارد: **میزان ترک‌های تشکیل شده، پهنای افزایش یافته‌ی ترک و میزان ترک‌هایی که از کپسول‌ها عبور می‌کنند و باعث فیلتر شدن عامل ترمیم‌کننده می‌شوند.**

- به هر حال دستاوردهای روزافزون حاصل از فناوری نانو در زمینه‌های مختلف پزشکی، الکترونیک، صنایع و معادن، بیانگر وجود راهی بی‌انتها فرا روی محققین این عرصه است. در این میان صنعت ساختمان از جمله صنایع مرتبط و درگیر با بسیاری از صنایع دیگر است که در حال حاضر محققان تلاش‌های زیادی را در زمینه ورود فناوری نانو با رویکرد عملکرد هر چه بهتر و نیز تعامل هر چه بیشتر با محیط زیست انجام داده و درصدد هستند تا دستاوردهای خود را به صنعت ساخت عرضه نمایند.

- سالیانه بخش عظیمی از سرمایه‌های یک کشور به صنعت ساخت و ساز تعلق می‌گیرد، که این هزینه‌ها شامل تولید و ترمیم و تقویت سازه‌ها می‌باشد. بدیهی است شرایط خاص محیط، آلودگی‌های زیاد و مواد خورنده و شیمیایی موجود در محیط، تهدید کننده عملکرد سازه‌های عظیم مورد بهره‌برداری می‌باشد. بنابراین ساخت و ساز متناسب با نیاز و شرایط محیطی، توأم با دوام و طول عمر بالا از اهمیت بسزایی برخوردار است که تولید و توسعه روش‌های هوشمند خود ترمیمی بتن‌های خود ترمیم، تأثیر زیادی در افزایش ایمنی سازه‌ها همسو با اهداف توسعه پایدار خواهد داشت. البته هزینه‌های بالای کنونی محصولات نانو تکنولوژی، با تولید انبوه و ملحوظ کردن بازگشت سرمایه در دراز مدت به دلیل افزایش عمر مفید سازه و کاهش هزینه‌های بازرسی و تعمیر، از نظر اقتصادی قابل توجیه خواهد بود.

## مراجع

[١] Kan I.I., Shi H.S., Sakulic A.R., and Li V.C., "Self-Healing Characterization of Engineered Cementitious Composite Materials", ACI Materials Journal, V. ١٠٧, No. ٦, November-December ٢٠١٠.

[٢] Kenneth R.L., and Floyd O. S., "Autogenous Healing of Cement Paste", ACI Journal, Proceedings V. ٥٢, No. ٦, June ١٩٥٦, pp. ٥٢-٦٣.

[٣] Yang Y.Z., Lepech M., Yang E.H., and Li V.C., "Autogenous Healing of Engineered Cementitious Composites under Wet-Dry Cycles", Cement and Concrete Research, V. ٣٩, ٢٠٠٩, pp. ٣٨٢-٣٩٠.

[٤] Li V.C., "On Engineered Cementitious Composites (ECC) — A Review of the Materials and its Applications",

[٥] Li V.C., Wang S., Wu C., "Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)", ACI Materials Journal, V. ٩٨, ٢٠٠١, pp. ٤٨٣-٤٩٢.

[٦] University of Michigan News Service, "Self-healing concrete for safer, more durable infrastructure", <http://ns.umich.edu/>.

١- Kessler, M.R. and Sottos, N.R, and White, S.R., (٢٠٠٣), "Self- Healing Structural Composite Materials" Comp. A٣٤, PP ٧٤٣-٧٥٣.

٢- Jonkers, H.M. and Thijssen, A., (٢٠٠٨), "Application of Bacteria as Self-Healing Agent for the Development of Sustainable Concrete," Elsevier, ECOENG ١٤٥٠.

٣- Jonkers, H.M., (٢٠٠٧), "Self-Healing Concrete: A Biological Approach, " Springer, Material Science, ١٩٥-٢٠٤

٤- Toohey, K.S. and Sottos, N.R., (٢٠٠٧), "Self-Healing Materials with Microvascular Networks," Nat. Mat. ٦ , PP ٥٨١-٥٨٥.

٥- Nishiwaki, T. and Mihashi, H., (٢٠٠٦), "Development of Self- Healing System for Concrete with Selective Heating Aroud Crack," Journal of advanced concrete tec, vol. ٤ , NO. ٢, ٢٦٧-٢٧٥.

- ϕ- Jody, W. C., (۲۰۰۵), "A Hollow Fiber Reinforced Polymer Composite Encompassing Self-Healing and Enhances Samage Visibility," sciencesirect
- ν- itaraf S., Jamee M, Hoseininezhad M., Jandaghi Alae F.,(۲۰۰۹) "Properties of Poly-Vinyl Alcohol Engineered Cementitious Composites" Proceedings of the ۱st International Conference on Concrete Technology, Tabriz, Iran.
- λ- Termkhajornkit, P. and Nawa, T., (۲۰۰۹), "Self-Healing Ability of Fly Ash-Cement System," Elsevier, CemCon ۱۹۸-۲۰۳.
- ϑ- Zhi, Ge., (۲۰۰۸), "Application of Nanotechnology and Nano-materials in Construction," ۱st International Conference on Construction Countries, ۲۰۰۸.

## References

- [1] Sun L, Yu W, Ge Q. Experimental research on the self-healing performance of micro-cracks in concrete bridge. *Adv Mater Res* 2011;250-253:28-32.
- [2] Thao TDP, Johnson TJS, Tong QS, Dai PS. Implementation of selfhealing in concrete – proof of concept. *IES J Part A: Civil Struct Eng* 2009;2(2):116-25.
- [3] Tran Diep PT. Quasi-brittle self-healing materials: numerical modeling and applications in civil engineering. National University of Singapore; 2011.
- [4] Dry C. Design of self-growing, self-sensing, and self-repairing materials for engineering applications. In: Wilson AR, Asanuma, H., editor. *Smart materials conference*; 2001. p. 23-9.
- [5] Dry C. <<http://www.naturalprocessdesign.com>> 2005.
- [6] Dry C. Smart earthquake resistant materials (using time released adhesives for damping, stiffening, and deflection control). *Third ICIM/ECSSM*. Lyon, France; 1996. p. 958-67.
- [7] Dry C. Improvement in reinforcing bond strength in reinforced concrete with self-repairing chemical adhesives. *SPIE* 1997:44-50.
- [8] Dry C. Release of smart chemicals for the in-service repair of bridges and roadways. In: Aatre VK, Varadan VK, Varadan VV, editor. *Proceedings of symposium on smart materials, structures, and MEMS*; 1998. p. 140-4.
- [9] Dry C. Repair and prevention of damage due to transverse shrinkage cracks in bridge decks. In: Liu S-C, editor. *Proceedings of smart structures and materials*; 1999. p. 253-6.
- [10] Dry CM. Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. *Cem Concr Res* 2000;30(12):1969-77.
- [11] Kishi T, Ahn TH, Morita M, Koide T. Field test of self-healing concrete on the recovery of water tightness to leakage through cracks. In: Bond I, Varley R, editors. *3rd international conference on self healing materials*. Bath, UK; 2011. p. 297-8.
- [12] Van Tittelboom K, De Belie N, Van Loo D, Jacobs P. Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement Concr Compos* 2011;33(4):497-505.
- [13] Van Tittelboom K, De Belie N, Lehmann F, Grosse CU. Acoustic emission analysis for the quantification of autonomous crack healing in concrete. *Constr Build Mater* 2012;28(1):333-41.
- [14] Van Tittelboom K, Snoeck D, Vontobel P, Wittmann FH, De Belie N. Use of neutron radiography and tomography to visualize the autonomous crack sealing efficiency in cementitious materials. *Mater Struct* 2013;46:105-21.
- [15] Van Tittelboom K, De Belie N. Self-healing concrete: suitability of different healing agents. *Int J 3R's* 2010;1(1):12-21.
- [16] Pang SD, Tran Diep PT, Quek ST. Self-healing concrete structural elements. In: Bond I, Varley R, editors. *3rd international conference on self healing materials*. Bath, UK; 2011. p. 322-3.

- [17] Grosse CU, Ohtsu M. Acoustic emission testing. In: Basics for research – applications in civil engineering. Springer; 2008. p. 396.
- [18] Joseph C, Gardner DR, Jefferson AD, Lark RJ, Isaacs B. Self healing cementitious materials: a review of recent work. *Construct Mater* 2010;164(1):29–41.

- [19] Edvardsen C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Mater J* 1999;96(4):448–54.
- [20] Vandevorde D, Pamplona M, Schalm O, Vanhellemont Y, Cnudde V, Verhaeven E. Contact sponge method: performance of a promising tool for measuring the initial water absorption. *J Cultural Heritage* 2009;10(1):41–7.

Antonopoulou (2009). S Self healing in ECC materials with high content of different microfibers and micro particles. MSc Thesis. Delft University of Technology.

Bang S S, Galinat J K, Ramakrishnan V (2001). Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. *Enzyme Microb. Technol.* 28, 404-409.

Bonnaure F P, Huibers A H, Boonders A (1982). A laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.* 51. 104-128.

De Muynck W, Debrouwer D, De Belie N, Verstraete W (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement & Concrete Res.* 38, 1005–1014.

Dry C M (2000). Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. *Cement and Concrete Research* 30(12), pp. 1969-1977.

Edvardsen C (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, 96(4), 448-454.

Garcia A, Schlangen E & Ven M van de (2009a). Two ways of closing cracks on asphalt concrete pavements: microcapsules and induction heating. *Key engineering materials*, 417-418, 573-576.

Garcia A, Schlangen E, Ven M van de & Liu Q (2009b). Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and building materials*, 23, 3175-3181.

Granger S, Loukili A, Pijaudier-Cabot G, Behloul M (2006). Self healing of cracks in concrete: from a model material to usual concretes. *Proceedings of the 2nd international symposium on advances in concrete through science and engineering.* Quebec city, Canada, 11-13 September 2006.

Gosh S K (ed) (2008). *Self-healing materials; fundamentals, design strategies and applications.* Wiley.

Hosoda A, Kishi T, Arita H and Takakuwa Y (2007). "Self healing of crack and water permeability of expansive concrete". 1st international conference on self-healing materials. Noordwijk, Holland,

Jensen O M & Hansen P F (2001). Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background, *Cem. Concr. Res.* 31 (4) 647– 654.

Jonkers H & Schlangen E in Schmets A.J.M. & van der Zwaag S. (eds) *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*, 18-20 April 2007, Noordwijk aan Zee, The Netherlands, Springer 2007.

Jonkers, HM & Schlangen, E. (2009a). Bacteria-based self-healing concrete. *International journal of restoration of buildings and monuments*, 15(4), 255-265.

Jonkers, HM, Thijssen, A, Muijzer, G, Copuroglu, O & Schlangen, E. (2009b). Application of bacteria as

- Joseph C (2008). "Experimental and numerical study of fracture and self healing of cementitious materials". PhD thesis. Cardiff University.
- Joseph C, Jefferson A D and Lark R J (2008). "Lattice modelling of autonomic healing processes in cementitious materials". WCCM8 / ECCOMAS 2008. Venice. Italy.
- Kim JS & Schlangen E 2010. Super absorbent polymers to simulate self healing in ECC. In K. van Breugel, G. Ye & Y. Yuan (Eds.), 2nd international symposium on service life design for infrastructure (pp. 849-858). Rilem.
- Li VC, Lim YM and Chan YW (1998). "Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite." *Composites Part B: Engineering*. vol. 29(B). pp. 819-827.
- Neville A. (2002). Autogenous healing – A concrete miracle? *Concrete International*, November 2002.
- Nishiwaki T, Mihashi H, Jang B-K. & Miura K. (2006) Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 2 267-275.
- Qian S, Zhou J, de Rooij MR, Schlangen E, Ye G and van Breugel K (2009). Self-Healing Behavior of Strain Hardening Cementitious Composites Incorporating Local Waste Materials. *Cement and Concrete Composites*, 31 (2009) 613-621.
- Reinhardt H W, Joos M (2003). Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Cement and Concrete Research*. 33(7). 981-985.
- Schlangen E, Qian S & Liu H (2009). Simulation of Self Healing Capacity of Hybrid Fibre Material. 2nd International Conference on Self Healing Materials. Chicago.
- Schlangen E & Joseph C (2008). Self-healing processes in concrete. In SK Ghosh (Ed.), *Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications* (pp. 141-182). Weinheim: Wiley-vch.
- Sierra Beltran M G & Schlangen E (2010). Fibre-matrix interface properties in a wood fibre reinforced cement matrix. *Proceedings FramCoS7*. Jeju. Korea.
- Sisomphon K, Çopuroğlu O and Fraaij A L A (2009). Durability of Blast-Furnace Slag Mortars Subjected to Sodium Monofluorophosphate Solution Curing. *Proc. 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*. Nagoya Japan.
- Ter Heide N (2005). Crack healing in hydrating concrete. MSc-thesis, Delft University of Technology. The Netherlands.
- Ter Heide N, Schlangen E & van Breugel K (June 2005). "Experimental Study of Crack Healing of Early Age Cracks", In *Proceedings Knud Højgaard conference on Advanced Cement-Based Materials*. Technical University of Denmark.
- Tziviloglou E (2009). Self-healing in ECC materials with low content of different microfibres and micro-particles. MSc Thesis. TU Delft.
- Van Breugel K (2007). "Is there a market for self-healing cement-based materials?". 1st international conference on self-healing materials. Noordwijk. Holland.
- Van der Zwaag S (ed) 2007. *Self healing materials : an alternative approach to 20 centuries of materials science*, Dordrecht. Netherlands. Springer.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.