

اصول اجرایی در تولید بتن خود ترمیم شونده

نانو لوله های کربنی (Carbon Nano Tubes)

یک نوع از ذرات نانو که خواص قابل اشاره ای دارد نانوتیوب کربن (CNT) است و در حال حاضر تحقیقاتی روی تاثیرات مثبت اضافه کردن CNT به بتن برای ایجاد بتن خود ترمیم شونده در دنیا در دست انجام است.

اضافه کردن مقادیر کم CNT به سیمان ، می تواند خواص مکانیکی نمونه هایی را که از دو فاز اصلی سیمان پرتلند و آب تشکیل شده، بهبود بخشد که یکی از این مهمترین خواص آن خود ترمیمی می باشد.

نانو لوله های 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 حلقه ی تکنولوژی نانو جایگاه ویژه ای پیدا کرد. نانوتیوب ها به فرم استوانه ای و به صورت تک جداره (Single Walled Nano Tubes) و چند جداره (Multy Walled Nano Tubes) تا طول چند میلیمتر تولید می شوند.

دسته شدن تیوب ها با هم و دیگری فقدان جاذبه مولکولی بین آنها و تنه اصلی از جمله مشکلات اضافه کردن نانوتیوب های کربن به هر ماده است. به عبارتی اتصال نانو لوله ها به یکدیگر به صورت رشته ای است و این عدم چسبندگی کافی بین آنها و بتن است که از جمله مشکلات این روش به شمار می رود.

فیبر توخالی Hollow Fiber

درای و سوتوس در سال ۱۹۹۲ روی روش آزادسازی شیمیایی ذخیره شده در فیبرهای میان تهی تحقیق کردند که در ابتدا در مواد سیمانی برای تغییر و بهبود ویژگی هایی مثل نفوذ پذیری ، تعمیر ترک ها و جلوگیری از خوردگی و انعطاف پذیری استفاده می شد. در این روش با به کارگیری رنگ های فلورسنت در عامل ترمیم کننده ی جاری در این الیاف ها ، پدیده ی کبودشدگی در موجودات زنده شبیه سازی می شود که خود نقش مهمی در تشخیص محل آسیب دیده دارد. به اینصورت که عامل ترمیم از فیبر نازک تو خالی آزاد میشود تا ترک های ایجاد شده را پر کند و ترک ترمیم گردد.

کامپوزیت سیمانی مهندسی (Engineered Cementitious Composite ECC)

بتن سیمانی مهندسی (ECC) ساخته می شود ، الهام گرفته از بهبود جراحی و جراحت وارده بر موجود زنده است. بدین ترتیب که با ترمیم مداوم ترکهای ریز حاصله ، اجازه ی گسترش ترک و ایجاد شکاف عمیق را نمی دهد ، حتی اگر قطعه ی بتنی آسیب دیده بارها تحت بارگذاری قرار گیرد. در واقع مهم ترین مشخصه سیمان مهندسی که با به کارگیری نانو مواد ساخته می شود این است که فقط امکان بروز ترک های مویی با عرض حداکثر ۶۰ میکرومتر نزدیک به هم ، به جای ترک های عمیق در بتن حاصله را خواهد داشت. به عبارتی بتن های جدید (ECC) در مقایسه با بتن معمولی انعطاف پذیری بسیار قابل توجهی دارند. عملکرد بتن هایی که با استفاده از کامپوزیت های به صورت حسگر ، کرنش جزئی در محل ترک را شناسایی می کند و با فرستادن پیام به بخش ترمیم کننده (مانند عملکرد نرون ها در بدن جانوران) (عامل ترمیم کننده ی آزاد می شود و ترک را ترمیم می کند. مکانیزم فرستادن پیام به صورت قطع قسمتی از جریان در محدوده ی آسیب دیده ، افزایش مقاومت الکتریکی و در نتیجه افزایش دما و ذوب پوسته ی محتوی عامل ترمیم است.

البته طراحی این سیستم که برای ترمیم از انرژی گرمایی جهت آزاد شدن عامل ترمیم محبوس شده در روکش استفاده می شود با حساسیت های زیادی همراه است. به طوریکه افزایش دما در بتن نباید منجر به تبخیر آب درونی و از هم پاشیدن ساختمان آن شود. تحقیقات نشان می دهد استفاده از پوزولان خاکستر بادی در کنار ECC عملکرد آن را بسیار بهبود می بخشد.

خاکستر بادی با هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 اصل از فرآیند هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ژل سفید رنگی تولید می کند که قادر به دوختن ترک های مویی و خود ترمیمی است. این نوع بتن خود متراکم برای حفاظت بتن های مسلح در محیط های خورنده ، نظیر محیط های کلریده که امکان نفوذ یون کلر محلول موجود در آب از طریق ریزترک ها و خوردگی آرماتورها و کاهش مقاومت کلی بتن مسلح وجود دارد ، بسیار حائز اهمیت است.

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 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 ، نفوذپذیری و خواص مکانیکی بالقوه بهبود میابد.

ظرفیت کرنش کششی نهایی ECC ها بیش از ۳ درصد (چند صد برابر بتن عادی) می باشد و در عین حال عرض ترک ها را زیر 0.06 mm نگه می دارد. 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 میدهد.

بر خلاف 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. 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 کشیده می شود.

اصول طراحی در تولید بتن خود ترمیم شونده

– میکرو کپسول های پر شده Microencapsulated Healing Agent

این روش با الهام گرفتن از نقش گلبول های قرمز در لخته شدن خون و ترمیم ، کپسول های حاوی نانو مواد ترمیم کننده به بتن تزریق می شود. این میکرو کپسول های کروی نازک که از مایع ترمیم کننده Agent Healing پر شده اند اصولاً از نوع Dicyclopentadiene می باشد.

این میکرو کپسول ها حین برخورد با ترک شکسته شده ، عامل ترمیم داخل ترک رها شده و با کاتالیزور برخورد می کند. به این ترتیب عمل پلیمرزاسیون صورت گرفته و با تشکیل ماده ای سخت ، ترک ترمیم می شود. عکس العمل شیمیایی بین عامل ترمیمی و کاتالیزور ماده را ترمیم و از رشد ترک جلوگیری می کند.

مکانیزم ترمیم ترک در سیستم میکرو کپسول:

کاتالیزور، آغاز ترک خوردگی مقطع و لوله های محتوی عامل ترمیم (I)

شکسته شدن پوسته نازک میکرو کپسول در اثر رسیدن ترک، آزاد سازی عامل ترمیم و نفوذ آن به درون ترک (II)

پلیمرزاسیون در مجاورت کاتالیزور، سخت شدن و در نهایت ترمیم ترک (III)

از آنجایی که خرابی در یک سازه بتنی با تشکیل ترک های ریز ، انتشار و عریض شدن آنها صورت پذیرد لازم است از کپسول های کوچکی با ابعاد حدود ۱۰۰ میکرومتر برای ترمیم ترک های ریز اولیه و جلوگیری از گسترش آنها استفاده کرد. علاوه بر آن جداره میکروکپسول ها باید خیلی نازک باشد تا به محض رسیدن ترک به دیواره ، میکروکپسول به راحتی شکسته و عمل ترمیم آزاد شود. این سیستم مزیت هایی چون عمر مفید طولانی ، تکمیل پلیمریزاسیون در چند دقیقه و پر شدن ترکهای عرضی از مواد دارد.

از آزمایش های مختلف استنتاج می شود هرچه سیستم به سمت حالتی پیش برود که عامل ترمیم به همراه کاتالیزور یا به بیانی واقعی تر مایع ترمیم کننده پلیمرزاسیون شده، از یک منبع خارجی به داخل ترک های بتن به صورت خودکار توسط یک سیستم هوشمند تزریق شود ، شاهد افزایش درصد ترمیم نمونه خواهیم بود. این حالت زمینه پیدایش روش شبکه مویرگی را فراهم خواهد ساخت.

– انتخابگر ناحیه ی گرمایی (Selective Heating)

یکی از هوشمند ترین سیستم های خود ترمیم که در نمونه های بتنی مورد توجه قرار گرفته است سیستم انتخابگر ناحیه گرمایی است. این روش به عنوان کارترین سیستم که در اکثر اوقات ۱۰۰ درصد را برای ترمیم به خود اختصاص می دهد شناخته می شود. این سیستم از دو بخش اصلی تشکیل شده است :

۱ – کامپوزیت های خود عیب شناس Composite Diagnosis-Self که از فایبرها و مواد هادی جریان الکتریسیته ساخته شده اند که هم قابلیت های یک کرنش سنچ را دارا هستند و هم به عنوان یک ماده ی عملکردی ، توانایی ثبت تاریخچه ی زمانی خرابی در سازه را دارند. در حقیقت بخش اول به عنوان حسگر یا چشم نمونه ، هر جا ترکی اتفاق بیفتد آن را شناسایی می کند و با فرستادن پیام به جز ترمیم کننده (همانند عملکرد نورن ها در بدن جانوران) این بخش را فعال کرده ، سیستم ترمیم کننده درصد رفع خرابی برمی آید.

۲ – بخش ترمیم کننده pipe Film Organic Plasticity-Heat که محتوی نانو مواد عامل ترمیم و به صورت لوله هایی از جنس مصالحی با خاصیت پلاستیک شوندگی در برابر گرما است. به گونه ای که تا قبل از گسترش هرگونه ترکی از خروج عامل ترمیم جلوگیری می کند.

زمانی که ترکی در قطعه رخ می دهد ، بخش اول به صورت حسگر، کرنش جزئی در محل ترک را شناسایی می کند و با فرستادن پیام به بخش ترمیم کننده عامل ترمیم کننده ای آزاد می شود و ترک را ترمیم می کند. مکانیزم فرستادن پیام به صورت قطع قسمتی از جریان در محدوده ی آسیب دیده ، افزایش مقاومت الکتریکی و در نتیجه افزایش دما و ذوب پوسته ی محتوی عامل ترمیم است.

این سیستم به صورت تکمیل شده می تواند با مانیتور کردن اطلاعات عیب شناس ، نمایش و کنترل فرآیند تخریب را در خارج از سازه در اختیار عوامل بیرونی انسانی قرار دهد که خود تحول عظیمی را در صنعت بهسازی و ترمیم بتن در سازه های حساس در پی خواهد داشت.

- ساخت شبکه مویرگی

در ترمیم به روش میکروکپسول ، میکروکپسول ها حین برخورد با ترک شکسته می شوند ، در مجاورت کاتالیزور عمل پلیمرزاسیون صورت می گیرد و با تشکیل ماده ای سخت ، ترک ترمیم می گردد.

ساخت شبکه مویرگی؛ شبکه مویرگی جهت توسعه و تعبیه میکروکپسول ها با الهام از سیستم بیولوژیکی

در این روش ممکن است با افزایش میزان میکروکپسول ها ، همگنی و یکنواختی بتن تحت تأثیر قرار گیرد و کاهش مقاومت و طاقته ی بتنی را موجب شود. بنابراین جهت بهبود عملکرد، نیاز به تزریق مایع ترمیم کننده از طریق یک سیستم هوشمند احساس می شود. تحقیقات اخیر بیانگر امکان تعبیه ی شبکه ی مویرگی Micro Vascular Network به صورت انتقال نانو مواد عامل ترمیم با تکیه بر خاصیت مویبندی از منبع به محل خرابی و پلیمرزاسیون در مجاورت کاتالیزور و نتیجتاً تشکیل مادهی سخت و ترمیم ترک می باشد. تحقیقات آتی درصدد توسعه ی شبکه ی مویرگی در بتن حاوی عامل های ترمیم کننده ، به صورت کاملاً هوشمند همانند سیستم بیولوژیکی است.

- بتن خود ترمیم شونده با باکتری Bacteria

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 باکتری های موجود در طبیعت که قادر به زیست در محیط قلیایی بالای بتن هستند ، برای ساخت بتن خود ترمیم استفاده می شود.

دسته هایی از هاگ های پرهاقت باکتری متعلق به گروه باسیل ها هستند. نمونه این باکتری موسوم به باسیلوس است که در دریاچه های دارای خاصیت قلیایی در کشورهای روسیه و مصر به مدت طولانی قادر به زیست بوده اند. این باکتری ها به همراه منبع تغذیه شان در گلوله های کوچک از جنس سرامیک تعبیه شده و به صورت سوسپانسیون در آب بتن قرار داده می شوند تا از فعالسازی نا بهنگام در مخلوط بتن خیس جلوگیری شود.

این بتن با کمک باکتری موجود در میکروکپسول و در صورت تزریق آب قابلیت خود ترمیمی پیدا می کند. میکروکپسول با در میان گرفتن و محافظت از باکتری مواد مغذی و لاکتات کلسیم را برای رشد آن تامین می کند. باکتری ها تا زمان شکل گیری ترک ، به صورت پیش فعال یا به اصطلاح خواب در بتن باقی می مانند و سپس در اثر گسترش ترک و نفوذ آب به مقطع ، فعال شده و در اثر واکنش با ترکیبات بتن ، رسوب سخت کربنات کلسیم تولید و به وسیله آن منافذ ترک بسته خواهد شد.

زمانی که آنها شروع به تغذیه می کنند آب را حریرانه می بلعند و به مقدار فراوانی سنگ آهک بلورین تولید می کنند که به سرعت باعث پرشدن منافذ و سوراخها می شود. از خصوصیات قابل توجه این بتن جدید عمر سازه را تا ۵۰ درصد افزایش داده و نیاز به تعمیرات دوره ای را کاهش می دهد ، همچنین می تواند از زنگ زدگی فولاد داخل بتن جلوگیری بعمل آورد و نیز:

فعال شدن هیدرولیز به دلیل رسیدن آب به باکتری ها در اثر ترک خوردن و نفوذ آب به درون نمونه

تشکیل رسوب کربنات کلسیم در صورت وجود یون های Ca^{+2} به مقدار کافی

بسته شدن ترک ها توسط رسوب کربنات کلسیم و جلوگیری از نفوذ پذیری

انتخاب نوع باکتری که به صورت سوسپانسیون در بخشی از بتن وارد می شود مهمترین پارامتر طراحی در این سیستم است. در این راستا ضروری است باکتری منتخب:

قابلیت زنده ماندن برای مدت زمان طولانی در محیط قلیایی بتن با PH در حدود ۱۱ تا ۱۳ را داشته باشد.

از مقاومت مکانیکی کافی برای زمان میکس برخوردار باشد.

باعث کاهش مقاومت اولیه و نهایی بتن نشود.

در یک سری آزمایشات بر روی جذب آب به منظور تعیین میزان نفوذ پذیری نمونه های ترمیم شده توسط باکتری انجام داده است که نتایج آن در شکل زیر ذکر شده است.

میزان جذب آب برای نمونه ترمیم شده با باکتری و نمونه شاهد

تاثیر درمان باکتری در طول دوره زمان ۱۶۸ ساعت برای جذب آب در حدود ۶ برابر نمونه شاهد است که تأیید کننده تشکیل رسوب کلسیم در حضور باکتری می باشد. نقطه قابل توجه سرعت زیاد رسیدن به جذب آب مطلوب و اختلاف کم در میزان جذب آب در زمان های بیش از ۱۰ ساعت برای نمونه های باکتریایی است. این مطلب نشان دهنده تاثیر بالای تشکیل حتی یک لایه کلسیت در برابر میزان جذب آب می باشد. برای اطمینان از تشکیل لایه های کلسیت از آنالیز کیفیت سنجی پرتو اشعه ایکس استفاده می شود. برخی از نمونه هایی که تحت درمان باکتری قرار گرفتند، نمایش دهنده دو سطح I و II است. سطح I بیانگر ماتریس سیمانی معمولی و سطح II بیانگر رسوبات برجسته کربنات کلسیم و تشکیل الیه های ضخیم و نفوذ ناپذیر است.

بتن خود ترمیم شونده

ویژگی جالب این نوع باکتری ها این است که آنها قادر به تشکیل تخم هایی هستند که این نوع تخم ها سلول های کروی با دیواره ضخیم مشابه با دانه های گیاه هستند. این نوع تخم ها زیست پذیرند اما غیر فعال و قادر به تحمل تنش های مکانیکی و شیمیایی می باشد و می توانند در حالت خشک برای بیش از ۵۰ سال زنده بمانند.

بتن خود ترمیم شونده به روش باکتری

زمانی که تخم های باکتری به طور مستقیم به طرح اختلاط بتن اضافه می شوند طول عمر آنها محدود به یک یا دو ماه است. به منظور افزایش اساسی طول عمر و کارایی بتن های حاوی باکتری، تاثیر تخم های باکتری و به طور همزمان عدم تحرک ترکیبات ارگانیک زیست معدنی پیشرو (کلسیم لاکتات) در ذرات رس با تخلخل بالا مورد آزمایش قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که حفاظت و نگهداری تخم های باکتری به وسیله بی حرکت کردن یا عدم تحرک ترکیبات ارگانیک درون ذرات رس با تخلخل بالا قبل از اضافه کردن به اختلاط بتن در حقیقت به طرز قابل چشمگیری سبب افزایش طول می شود.

لازم به ذکر است که تا قبل از کشف باکتری مذکور از محصولات باکتری معدنی برای ترمیم ترک در بتن استفاده می شد. که به دلیل لزوم تهیه دستی این باکتریها در محل آسیب دیده توسط نیروی انسانی و تولید ماده سمی آمونیاک در اثر واکنش این باکتری ها با ترکیبات بتن، دوام و توسعه چندان نیافت در مطالعات بعدی به این نتیجه رسیدند که دیگر ترکیبات زیست معدنی پیشرو همچون شیره مخمر، پپتون و

کلسیم استات باعث کاهش چشم گیری در مقاومت فشاری می شود. تنها استثنا در این مورد کلسیم الکتات است که باعث افزایش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری در مقایسه با دیگر نمونه های کنترلی می شود. جهت تضمین شروع سریع ترمیم ترک ها بکار بردن کلسیم لاکتات و باکتری که میتواند سبب تبدیل متابولیک این ترکیب شود به نظر گزینه مطلوب یا بهترین روش می باشد. آزمایشات حاکی از آن است که زیست پذیری تخم های باکتری از ۲ تا بیش از ۶ ماه وقتی که به صورت محافظت شده به ذرات رس منبسط متخلخل (لیکا) اضافه می شود در مقایسه با اضافه کردن مستقیم (غیر محافظت شده) افزایش پیدا می کند.

تحقیقات بیشتر در این زمینه به منظور انتخاب باکتری مناسب که قابلیت زنده ماندن و فعال شدن را در محیط بتن و در طول زمان بهره وری داشته باشد و نیز کمترین اثر منفی بر خواص رفتاری و مقاومتی بتن اعمال کند همچنان ادامه دارد. نتیجه گیری کلی نشان می دهد که دو نماینده پیشنهادی زیست شیمی بهبود دهنده مرکب از تخم های باکتری و ترکیبات پیشرو ارگانیک cement-bio مناسب که از لیکا به عنوان منبعی برای ذخیره آب استفاده می کنند، گزینه امید بخش از لحاظ زیستی و مقاومتی هستند؛ به خصوص در مواردی که قسمت هایی از سازه بتنی قابل بازرسی و تعمیر دستی نمی باشند. با این وجود قبل از تحقق هر کاری نیازمند بهینه سازی تکمیلی سیستم پیشنهادی نیز می باشد. مقدار مورد نیاز عامل ترمیم کننده باید به وسیله تکنیک های حاضر کمینه شود؛ هم به جهت صرفه اقتصادی و هم به جهت کاهش عواقبی چون پایین آمدن مقاومت فشاری.

نتایج

با بهره گیری از نانوتکنولوژی و تولید مواد در مقیاس نانو می توان به بتن هوشمندی دست پیدا کرد که به محض ایجاد ترک، محل ترک را شناسایی کرده و درصد ترمیم آن برآید. در این مقاله در خصوص هریک از روش هایی که دانشمندان تاکنون برای ساخت و تولید این بتن هوشمند که امروزه به عنوان بتن خود ترمیم شونده شناخته می شود، بحث جامعی به عمل آمد. نتایج حاکی از آن است که انواع روش های موجود به دو دسته اصول اجرایی و اصول طراحی تقسیم می شود. اصول اجرایی روش هایی هستند که از مرحله آزمایش و ساخت اولیه خارج شده و می توانند وارد مرحله پروژه شوند و اصول طراحی نیز شامل روش هایی هستند که در حال تحقیق و آزمایش در محیط آزمایشگاهی می باشند.

ساخت کامپوزیت سیمانی مهندسی از جمله روش هایی است که در عصر حاضر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این بتن از نظر ظاهری مشابه بتن معمولی است اما در برابر ایجاد ترک ۵۰۰ برابر مقاوم تر، از نظر وزنی ۴۰٪ سبک تر و عمر مفید آن بسیار بیشتر از بتن معمولی است.

اگرچه هنوز بررسی های دراز مدت لازم است تا کارایی این ماده به طور کامل مشخص شود ولی مطالعات مقایسه ای انجام شده نشان می دهد با استفاده از این کامپوزیت می توان به صرفه جویی های قابل توجهی دست یافت. نانو لوله های کربنی به دلیل عدم چسبندگی بین آنها و بتن در روند ساخت بتن خود ترمیم دارای مشکل هستند اما بطور کلی می تواند خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشد. با توجه به تحقیقات بدست آمده مشخص شد که فیبر توخالی نیز قابلیت بسیار خوبی در تعمیر ترک ها، جلوگیری از خوردگی و همچنین تشخیص محل آسیب دیده دارد. طبق آزمایشات انجام شده که در مقاله ذکر شد؛ به این نتیجه رسیدیم که باکتری در اختلاط بتن با تولید رسوب کلسیم کربنات منجر به بسته شدن ترک ها و جلوگیری از نفوذ پذیری می شود.

بتن دارای باکتری عمر سازه را تا ۵۰٪ افزایش، نیاز به تعمیرات دوره ای را کاهش می دهد و از زنگ زدگی فولاد داخل بتن جلوگیری می کند. یکی از راههای جلوگیری از اتلاف منابع آب در کشاورزی، استفاده از مصالح مناسب در پوشش کانال ها برای جلوگیری از تلفات و افزایش راندمان انتقال و توزیع آب می باشد. با توجه به حجم بالای مصرف آب در کشاورزی، ضروری است در مناطق مختلف پوشش کانال های موجود از لحاظ کاهش تلفات و استفاده مناسب از منابع آب انتخاب گردد. عوامل بسیاری سبب تخریب بتن و ایجاد ترک در آن و در نتیجه

هدر رفت و اتلاف آب در آن می شوند. به همین دلیل پوشش بتنی کانال های آبیاری در خیلی از موارد با مشکلات ترک خوردگی و تخریب مواجه می گردد. اگر چنانچه عوامل تخریب و راه های ترمیم ذکر شده در سازه هدف مشخص گردد، از این مصالح استفاده بهینه به عمل خواهد آمد، کارایی سازه در آن ایجاد و فرایند خود ترمیمی اتفاق می افتد در نتیجه از تلفات آب به میزان زیادی جلوگیری خواهد شد. همچنین دیگر لازم به هزینه های مکرر برای ترمیم سازه به روش سنتی نیست و استحکام و عمر مفید سازه نیز بیشتر خواهد شد. در آخر درمیابیم که اگرچه هزینه اولیه تولید و ساخت انواع بتن خود ترمیم شونده بیشتر از بتن معمولی است اما استفاده از روشهای جایگزین روش سنتی که در این مقاله به شرح آنها پرداختیم، راه هایی می باشند که علاوه بر کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری بتن برای محیط زیست مضر نبوده، به دوام و عملکرد بتن کمک کرده و عمر مفید بتن را افزایش می دهد.

گردآوری: ملیکا محبی

منابع :

۱. منافی، ا. و مدنی، ح. و نوروزی فر. م. ح. (۱۳۹۴). "اثر خودترمیم شونده گی در بتن به وسیله باکتری"، دومین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه های عمرانی، گروه آموزش و پژوهش شرکت مهندسی بارو گستر پارس و شرکت مهندسی مشاور پرهون آبراهه، سمنان.

Li, V.C., and Yang, E. (2007) " Self healing in concrete materials. In Self healing materials", An alternative –approach to 20 centuries of materials science (ed. S. van der Zwaag), pp. 161
Springer, the Netherlands

۳. میرزایی، آ و جدیدی میانداستی، ا و منتظری صاحب، ف. (۱۳۹۰)، " خودترمیمی در بتن با استفاده از فناوری نانو – ترک خوردگی در بتن"، اولین کنفرانس بین المللی بتن های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب، شرکت آب و فاضالب استان گیلان، رشت.

Sev, A and Ezel, M. (2014), "Nanotechnology Innovations for the Sustainable Buildings of the Future", International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, vol 2, pp.225-225

۵. بیطرف، س و گنجی خیبری، ا. (۱۳۹۰)، "نقش فرایند خودترمیمی در بتن های ناتراوا"، اولین کنفرانس بین المللی بتن های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب، شرکت آب و فاضالب استان گیلان، رشت

Toohey, K.S. and Sottos, N.R., (2007), "Self-Healing Materials with Microvascular Networks", Nat. Mat. 6
., PP 581-585

Williams, H.R. and Trask, R. and Bond, I.P, (2007), "Self-Healing Composite Sandwich Panels," Smart Mat. Struct.16 , PP 1198-1207

۸. میری، م و مجروحی سردرود، ج. (۱۳۹۶) "بتن خودترمیم شونده جایگزینی مناسب برای ترمیم بتن به روش های سنتی"، دومین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، معماری و مدیریت بحران، دانشگاه عالمه مجلسی، تهران

Gaurao ,P.S and Nikhil ,P.M and Ankush ,D.B and Swati J.B and Archana ,J.L ,(2016), " Smart Concrete – A New Technology ", International Journal of Engineering Research and General Science,vol 4,pp. 488-492

Singla, N and Sanjay K. Sharma, (2016), " Bacterial Concrete- A Novel Biotechnical Application in . Construction Sector ", The Research Journal (TRJ): A Unit of I2OR,vol 9, pp.144-148

۱۱. عرفانی جزئی، م و میرشاه زاده، ل. (۱۳۹۸) " بتن خودترمیم شونده تحولی در صنعت ساخت و ساز"، ماهنامه دانش نما، ۲۰۶-شماره ۲۰۸

Kumar, D and Viswanath, G ,(2015), " Investigation on Bacterial Cement Composites ", International Journal of Computer Engineering In Research Trends, Vol 2, Issue 12, pp. 1002-1007

Zhi, Ge., (2008), "Application of Nanotechnology and Nano-materials in Construction" , Conference on Construction Countries

۱۴. عرفانی جزئی، م. (۱۳۹۱) " تولید سازه های بتنی هوشمند با قابلیت خودترمیم شوندگی، دستاورد فناوری نانو در صنعت ساخت و ساز"، اولین کنفرانس ملی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

Termkhajornkit, P. and Nawa, T., (2009), "Self-Healing Ability of Fly Ash-Cement System," Elsevier, CemCon 198-203

۱۶. زارعیان، م و مرشد، ر. (۱۳۹۰) " بتن خودترمیم شونده"، سومین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

Yang Y.Z., Lepech M., Yang E.H., and Li V.C. (2009), "Autogenous Healing of Engineered Cementitious Composites under Wet-Dry Cycles", Cement and Concrete Research, V. 39, pp. 382- 390

Nishiwaki, T. and Mihashi, H., (2006), "Development of Self Healing System for Concrete with Selective Heating Aroud Crack," Journal of advanced concrete tec,vol.4 , No.2, 267-275

Toohey, K.S. and Sottos, N.R., (2007), "Self-Healing Materials with Microvascular Networks," Nat. Mat. 6 , PP 581-585 20. Achal V., Mukherjee A., Reddy M.S., (2010) "Microbial Concrete: A Way to Enhance Durability of Building Structures", Second International Conference on Sustainable Construction Material and Technology. ISBN 978-1-4507-1490-7

Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., and Schlangen, E. (2010) , “ Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete” ,*Ecological Engineering* 36(2): 230-235

Sunil Pratap reddy, S. (2010), “ A study on the performance of the bacterial concrete embeded with .bacillis subtilis” , PH.D theseis, Jawaher lal Nehru Technology University, Kukatpally, Hyderabad, India

Song, H.W., et al. (2007) , “Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-A review ”, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2 , 1-27

۲۴. بهراملو، و فیروزفر، م و محجوب، م. (۱۳۹۰) ” مسائل و مشکلات پوشش بتنی کانال های آبیاری ” ، نشر مدیریت هماهنگی ترویج کشاورزی، سازمان جهاد کشاورزی استان همدان، همدان.