

اصلاح و ترمیم بتن با به کارگیری باکتری‌های محافظ

معصوم امرایی^۱، جلیل فلاح مهرآبادی^۲، حمیدرضا بهاروندی^۳

۱- کارشناسی ارشد بیوتکنولوژی مولکولی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

amraee_ma@yahoo.com

۲- استادیار پژوهشکده علوم و فناوری زیستی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

Jalil.fallah@gmail.com

۳- دانشیار مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی

مالک اشتر

hrbahar@ut.ac.ir

چکیده

ایجاد ترک در بتن یک فرآیند شایع در بتن به دلیل استحکام کششی ضعیف بتن می‌باشد. پایداری و دوام سازه‌های بتنی به دلیل این ترک‌ها و عیوب به دلیل نفوذ آب و گاز به درون سازه‌ها کاهش می‌یابد. این گازها و آب حاوی عناصر مضر و خطرناک جهت پایداری و دوام سازه هستند. اگر این ترک‌ها توسعه پیدا کرده و به آرماتورهای فولادی برسند نه تنها بتن از بین می‌رود بلکه این آرماتورها نیز از بین می‌روند و خورده می‌شوند. خورده شدن آرماتورهای فولادی توسط عوامل خوردنده باعث کاهش شدید در استحکام سازه می‌شود. جهت حل این مشکل راه حل‌های گوناگونی ابداع شده است. البته این روش‌ها با وجود مزایای دارای معایب و ناکارآمدی‌هایی نیز مانند وجود اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی بین این مواد، بتن و خطرات زیست محیطی می‌باشند. به دلایل ذکر شده مبحث استفاده از گزینه‌های جایگزین مورد توجه قرار گرفته است. یک مکانیسم امکان‌پذیر جدید که در مقیاس آزمایشگاهی در حال بررسی و توسعه است، فن‌آوری‌های برپایه استفاده از رسوب مواد معدنی حاوی باکتری‌ها می‌باشد. این فن‌آوری نوظهور بوده و مورد توجه فراوان مراکز تحقیقاتی بتن و سیمان می‌باشد. بتن باکتریایی براساس قابلیت رسوب دهی کلسیت بوسیله باکتری‌ها طراحی و ساخته می‌شود. این پدیده رسوب کلسیت تحریک شده با باکتری یا به اختصار MICP^۱ نامیده می‌شود. رسوبات کربنات کلسیم بعنوان یک درزگیر میکروبی توانمندی بالای خود را در پر کردن ترک‌ها و شکاف‌های ریز در گرانیب-ها و سنگ‌ها و ماسه اثبات کرده‌اند بنابراین روش ترمیم ترک در بتن باکتریایی می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب و دوست‌دار محیط زیست ارائه شود. در حال حاضر این فن‌آوری در حال توسعه و تحقیق به عنوان یک روش هوشمند خود ترمیم‌شونده در بتن می‌باشد. در تحقیق حاضر مروری بر تاریخچه شروع و توسعه این فن‌آوری و جایگاه حال و آینده آن خواهد شد.

کلمات کلیدی: بتن‌های کامپوزیتی، بتن‌های باکتریایی، سازه‌های بتنی، آرماتورهای فولادی، ترمیم ترک

¹ Microbially induced calcite precipitation

۱- مقدمه

یکی از مهمترین و متداولترین مصالح ساختمانی، بتن^۲ است که به علت دارا بودن خواصی از جمله شکل خمیری قبل از گیرش، مقاومت خوب در برابر آتش سوزی، دسترسی آسان به مصالح و مقاومت فشاری خوب آن استفاده از آن را با مقبولیت عمومی روبرو کرده است [۲۰]. بتن از پر مصرفترین مواد در ساخت سازه‌ها می‌باشد علی‌رغم تنوع سازه‌ها محدودیت‌هایی برای بتن، این ماده ارزشمند ساختمانی شناخته شده است [۲]. استحکام کششی ضعیفی دارد و مقاومت اندکی در برابر ترک دار شدن دارد. تحقیقات متوالی و زیادی در مراکز تحقیقاتی دنیا انجام شده است که هدف عمده این تحقیقات پیشنهادات اصلاحی برای غلبه بر این کاستی‌های بتن بوده است [۳]. از میان این زمینه‌ها مبحث افزایش عمر سازه‌های بتنی از اهمیت و جایگاه خاصی برخوردار می‌باشد که افزایش دوام می‌تواند از دو جنبه جلوگیری از ایجاد ترک و ترمیم ترک در صورت ایجاد آن بررسی شود که در این تحقیق مبحث دوم از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد [۳ و ۴]. مواد ساختمانی نظیر بتن در معرض عمل هوازدگی، عوامل بیولوژیکی و شیمیایی و سایر شرایط مخرب می‌باشد [۴]. از مهمترین این عوامل که موجب تخریب و انهدام سازه‌ها و یا به عبارتی کاهش دوام و استحکام آنها با ایجاد ترک می‌شوند عبارتند از: نفوذ نمک‌ها [۵]، حملات کلریدی [۶ تا ۸]، حملات سولفاتی [۹ تا ۱۱]، عمل یخ زدگی [۱۲ تا ۱۴]، نمکهای ذوب یخ [۴]، عکس‌العمل قلیایی سنگدانه‌ها [۱۵ و ۱۶] و کربناسیون [۱۷ تا ۱۹]، که همه این حملات باعث ایجاد ترک در سازه‌ها و کاهش عمر مفید آنها می‌شوند. تشکیل ترک در بتن فرآیندیست که به سختی می‌توان از آن اجتناب کرد. برای مثال وجود تنش‌های کششی پسماند در بتن باعث ایجاد ترک می‌شود. تنشهای بزرگ بالقوه، باعث کاهش پایداری و دوام سازه‌ها شده و بنابراین باید تعمیر شوند. ترک‌های با پهنای کمتر از ۰/۲ میلی‌متر و کوچکتر از آن معمولاً غیر مهم در نظر گرفته می‌شوند اگر چه این ترک‌ها روی خواص استحکامی سازه تأثیر گذار نیستند اما می‌توانند منجر به افزایش تخلخل و نفوذ پذیری کلریدها، سولفات‌ها، اسیدها و عوامل خوردنده شده که در طولانی مدت باعث فساد و تخریب زمینه بتنی و خوردگی زودرس آرماتورهای بتنی می‌شوند. بنابراین دوام و پایداری طولانی مدت سازه کاهش می‌یابد [۳، ۴ و ۲۰]. در تعدادی از تحقیقات انجام شده گزارش شده است که سازه‌های بتنی یک ظرفیت مشخص برای ترمیم این نوع از ترک‌ها دارند [۲۱-۲۵]. ظرفیت واقعی ترمیم ریز ترک‌ها وابسته به ترکیب شیمیایی بتن می‌باشد. بویژه مخلوط‌های با سیمان بالا خواص خود ترمیم ترک قابل ملاحظه‌ای دارند که ناشی از باقی ماندن مقداری از سیمان اولیه به صورت واکنش نکرده (هیدراته نشده) در بتن می‌باشد که با نفوذ آب این سیمان هیدراته نشده واکنش داده و ترک‌ها را پر می‌کند. این فرآیند در مورد همه بتنهای سنتی اتفاق افتاده ولی توان خودترمیمی آن محدود به ترک‌های با عرض کمتر از ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد. برای رخداد این فرآیند شرایطی می‌بایست در بتن ایجاد شود که ایجاد این شرایط در بتن در اثنای ایجاد ترک دشوار است به عنوان مثال ذرات ریز سیمان باید در معرض سطح ترک در مواجهه با آب قرار بگیرند که احتمال رخداد آن اندک است یا مخلوط بتن باید حاوی مقادیر بالای سیمان باشد که این موضوع به دلیل قیمت بالای سیمان و کاهش استحکام بتن کمتر از آن استفاده می‌شود. به دلایل ذکر شده مبحث استفاده از گزینه‌های جایگزین از جمله بتن باکتریایی مورد توجه قرار گرفته است.

۲- بدنه اصلی

تا کنون در عمده تحقیقات جهت رسیدن به استحکام از مواردی نظیر خاکستر، سرباره کوره بلند، دوده سیلیس، متاکالوئن و مواد مشابه به عنوان افزودنی به بتن استفاده شده است. اخیراً فن‌آوری جدیدی با عنوان رسوب معدنی باکتریایی ابداع شده است که این رسوب از فعالیت‌های متابولیکی میکروارگانیسم‌های خاص در بتن منشاء شده و باعث بهبود دوام و پایداری و خواص بتن در طولانی مدت می‌شود. این فرآیند می‌تواند در داخل یا خارج سلول میکروبی یا حتی با فاصله از آن در داخل زمینه بتنی اتفاق بیافتد. اغلب فعالیت این نوع از باکتری‌ها مبتنی بر تغییر در شیمی محلول موجود در محیط فعالیت باکتری جهت ایجاد فوق اشباع و رسوب مواد معدنی می‌باشد. استفاده از این فن‌آوری (زیست معدنی) در بتن منجر به ایجاد پتانسیل جدیدی برای انجام ابداعات در زمینه‌ی تولید نوع جدیدی از بتن به عنوان بتن باکتریایی شده است. بتن باکتریایی براساس قابلیت رسوب دهی کلسیت بوسیله باکتری‌ها طراحی و ساخته می‌شود. این پدیده رسوب کلسیت تحریک شده با باکتری یا به اختصار MICP نامیده می‌شود [۲۶]. رسوبات کربنات کلسیم بعنوان یک درزگیر میکروبی توانمندی بالای خود را در پر کردن ترک‌ها و شکاف

² Concrete

های ریز در گرانیته‌ها و سنگ‌ها و ماسه اثبات کرده‌اند [۲۰]. فن‌آوری رسوب کلسیت با استفاده از باکتری یک فرایند جذاب و ارزشمند محسوب می‌شود. عمده این جذابیت ناشی از عدم ایجاد آلودگی زیست محیطی و طبیعی بودن این فناوری می‌باشد. این فن‌آوری می‌تواند برای بهبود استحکام فشاری و سختی نمونه‌های بتنی ترک دار یا سازه‌های بتنی تحت تنش ترک دار استفاده شود [۲۷]. نخستین تحقیق در زمینه تعمیر بتن با MICP به وسیله گروه راما کریشان در دانشکده صنعت و معدن داکوتای جنوبی امریکا انجام شده است. MICP تکنیکی است که از یک شاخه بزرگتر از علم بنام بیو مینرالیزیشن یا زیست معدنی می‌آید [۲۸]. فرایندی که در آن یک موجود زنده یا باکتری جامدات معدنی تولید می‌کند. باکتری‌ها می‌توانند به صورت مداوم تولید یک لایه کلسیت فوق العاده غیر قابل نفوذ روی سطح بتن ایجاد کند رسوب ایجاد شده ساختار کریستالی درشتی دارد که به آسانی به شکل پوسته‌هایی به سطح بتن می‌چسبد علاوه بر توانایی تولید و رشد مداوم، این لایه‌ها فوق العاده غیر قابل نفوذ در مقابل آب هستند. آنها در مقابل نفوذ عوامل مضر (کلریدها، سولفات‌ها، دی‌اکسیدکربن) به داخل بتن مقاومت کرده و بنابراین مقدار تاثیر این عوامل زیان بار بر بتن کاهش می‌یابد. به دلیل توانایی ذاتی ایجاد رسوب مداوم کلسیت به وسیله باکتری، این نوع بتن باکتریایی می‌تواند بعنوان یک زیست ماده هوشمند برای ترمیم بتن در نظر گرفته شود [۴]. MICP شامل یک سری واکنش‌های پیچیده بیوشیمی بوده و کارایی آن می‌تواند به مقدار زیادی بوسیله عواملی نظیر تخلخل محیط و تعداد سلول‌های موجود و حجم مواد مغذی اضافه شده تحت تاثیر قرار بگیرد [۴]. بافر فسفات یا اوره و ماده حاوی کلسیم مانند کلرید کلسیم (CaCl_2) می‌تواند به عنوان مواد مغذی خیلی خوب و مناسب استفاده شوند. باکتری در حضور این مواد مغذی رسوب کلسیت را ایجاد می‌کند. اسیدیته یا pH عامل مهمی در فعالیت یا عدم فعالیت باکتری‌ها در محیط بتن می‌باشد به عنوان مثال، مقدار بهینه pH یا اسیدیته محیط برای رشد باسیلوس پاستوری در حدود نه است. قلیایی بالای محیط بتن با pH حدود ۱۲ بزرگترین عامل تأخیر انداز در رشد باکتری است اما به هر حال پاستوری این توانایی را دارد که یک اندوسپور ایجاد کند که در مقابل شرایط سخت مقاومت کند [۳ و ۴]. سیمان یا بتن اصلاح شده میکروبی به یک زمینه جدید تحقیقاتی مهم در مورد مواد سازه‌های پر مصرف تبدیل شده است. بستن ترک‌ها در سطح بتن بوسیله رسوب مواد معدنی در حالتی که این باکتری‌ها اسپری شوند یا به صورت دستی به سطوح ترک اعمال شده‌اند مشاهده شده است در واقع در مطالعاتی که در آن این باکتری‌ها به صورت دستی و یا خارجی به سازه‌های ترک دار اعمال می‌شوند را نمی‌توان فرآیند خود ترمیمی دانست [۴]. در پاره‌ای از تحقیقات از باکتری‌ها به صورت افزودنی به بتن استفاده شده است. در یک مطالعه اسپورهای یک باکتری مقاوم با قلیا از گونه باسیلوس به یک مخلوط بتن به عنوان عامل خود ترمیمی اضافه شده است (شکل ۱). این اسپورها با ورود آب از طریق ترک فعال شده و مقدار فراوانی از ماده معدنی بر پایه کربنات کلسیم تولید و ترک را پر می‌کنند. این ماده معدنی از تبدیل مواد آلی اولیه‌ای که به عنوان غذای باکتری به بتن اضافه شده است توسط باکتری ایجاد می‌شود. در مطالعه مذکور گزارش شده که این فرآیند خود ترمیمی صرفاً بصورت محدود برای بتن‌های تازه (۷ روز هیدراته شده) قابل استفاده است باکتری‌ها حداکثر می‌توانند به مدت ۲ ماه در بتن قابلیت زیست داشته و فعال باشند. در این تحقیق اسپورهای باکتری و مواد آلی اولیه قبل از اختلاط به ذرات رس اضافه شده و این مخلوط به بتن اضافه می‌شود. اینگونه فرض می‌شود که حفاظت اسپورهای باکتری‌ها در دانه‌های سبک وزن متخلخل انجام می‌شود و دوره دوام و قابلیت خود ترمیمی آنها هنگامیکه در بتن وارد می‌شوند افزایش می‌یابد [۲۰]. باکتری که به عنوان عامل خود ترمیم کننده در بتن قرار است استفاده شود باید دارای خصوصیات باشد. این باکتری باید قادر باشد تا در زمان طولانی ترجیحاً در کل زمان عمر یک سازه قابلیت درزگیری ترک‌ها را داشته باشد [۲۸]. مکانیسم اساسی ترمیم ترک باکتری بر این پایه است که باکتری‌ها بعنوان یک کاتالیزور عمل می‌کنند. مواد اولیه آغازگر را به یک پرکننده مناسب تبدیل می‌کنند. مواد تولید شده جدید نظیر مواد معدنی بر پایه کربنات کلسیم که رسوب می‌کنند. باید به عنوان یک نوع سیمان زیستی عمل کرده و به طور مؤثری ترک‌های ایجاد شده را ببندند. بنابراین برای یک قابلیت خود ترمیم کننده مناسب هم باکتری‌ها و هم ماده آغازگر بایستی در زمینه بتن موجود باشند وجود این مواد اضافه شده به بتن نباید خواص مورد نظر بتن را عوض کند باکتری‌هایی که بتوانند شرایط محیط بتن را تحمل کنند در طبیعت موجود و مربوط به یک دسته ویژه از باکتری‌های تشکیل دهنده اسپور مقاوم به قلیا می‌باشند. مشخصه جالب این باکتری تولید سلول‌هایی با دیواره‌های ضخیم کروی مشابه بذر گیاهان است. این اسپورها به صورت سلول‌های نهفته در بتن قابلیت زیست داشته و می‌توانند تنش‌های شیمیایی و مکانیکی محیط بتن را تحمل کنند. در محیط خشک این باکتری‌ها میتوانند برای بیش از ۵۰ سال زنده بمانند [۲۹]. متأسفانه زمانی که این باکتری‌ها مستقیم به بتن اضافه می‌شوند عمرشان محدود به یک یا دو ماه می‌باشد. کاهش در عمر اسپورهای باکتری‌ها از چند دهه (محیط خشک) به چند ماه (در بتن) می‌تواند ناشی از هیدراتاسیون مداوم سیمان بتن باشد که نتیجه این هیدراتاسیون تشکیل حفرات با اندازه کمتر از یک میکرومتر در زمینه بتن و کوچکتر از اندازه اسپور باکتری‌هاست. نکته مهم دیگر این است که افزودن مواد آغازگر زیست آلی- معدنی به بتن موجب کاهش خواص بتن نگردد در تحقیقات گذشته مشخص شده است که این مواد نظیر عصاره مخمرها، پپتون و استات کلسیم موجب کاهش شدید استحکام فشاری بتن می‌شوند تنها نکته استثناء مربوط به لاکتات کلسیم است که موجب ۱۰ درصد افزایش استحکام نسبت به نمونه اولیه می‌شود [۲۹].

۲-۱- انواع باکتری‌های استفاده شده در بتن

انواع باکتری‌هایی که تا کنون در زمینه کاربرد آنها در بتن باکتریایی تحقیق شده است. شامل موارد زیر می‌باشد:

- با سیلوس پاستوری
- با سیلوس اسفریکوس
- اشیشیا کلی
- باسیلوس سوبتیلیس

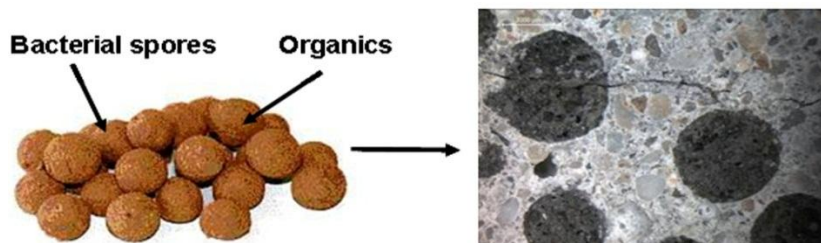
از باکتری‌های قید شده در بالا در ساخت بتن باکتریایی استفاده شده است و اکثر آنها در فرایندی که تولید رسوبات کلسیتی می‌کند وارد شده و باعث بهبود خواص بتن شده است. این فرایند رسوب دهی با تحریک باکتریایی یا به اختصار MICP نامیده می‌شود ایجاد رسوبات کربنات کلسیم توسط بسیاری از باکتری‌ها انجام شده و یک فرایند شایع در میان بسیاری از باکتری‌هاست و از این رو به دلیل ارزش علمی آن توسط بسیاری از محققین بررسی شده است [۳ و ۴].

۲-۲- مکانسیم عمل باکتری‌ها

تولید کربنات کلسیم زیست معدنی یک فرآیند شایع در میان موجودات زنده از باکتری‌ها گرفته تا مهره‌داران است [۳۰]. ظرفیت زیست معدنی شدن پروکاریوتها و یوکاریوتها متفاوت بوده و مانند سایر فرآیندهای زیست معدنی شدن، زیست معدنی شدن کلسیم کربنات می‌تواند با دو مکانسیم متفاوت انجام پذیرد

- معدنی شدن کنترل شده زیستی
- معدنی شدن القاء شده زیستی

در معدنی شدن کنترل شده زیستی، موجود زنده فرآیند (هسته ای شدن و رشد ذرات معدنی) را تا مراحل آخر کنترل می‌کند. ذرات معدنی تشکیل شده ترکیب و یا رو یا داخل زمینه آلی یا در مکان‌های مشخص وابسته به سلول و معمولا درون سلولی رسوب می‌کنند [۳۱]. معدنی شدن کنترل شده زیستی کلسیم غالباً با تشکیل بافت‌های چند سلولی یوکاریوتی همراه و منجر به تولید ساختارهای پیچیده و تخصصی مانند صدف‌ها، دندان‌ها و اسکلت‌ها می‌شود. در مقایسه، معدنی شدن القاء شده زیستی معمولا در یک محیط باز انجام می‌شود و عقیده بر آن است که ساختار سلولی تخصص یافته یا مکانسیم مولکولی ویژه ای را شامل نمی‌شود. رسوب کربنات کلسیم به وسیله باکتری‌ها عموماً به صورت تحریک یا تقویت شرایط ایجاد رسوب بوده و شکل و نوع ماده معدنی تولید شده عمدتاً وابسته به شرایط محیطی می‌باشد. رسوب کربنات کلسیم یک پدیده رایج زیستی در طبیعت بوده و بیانگر یک سری از فرآیندهای رسوب کلسیم کربنات شیمیایی- زیستی- زمین شناسی است. که مهمترین جلوه آن در طبیعت ایجاد رسوبات کربنات کلسیم و تشکیل سنگ‌های آهکی است [۳]. مکانسیم‌های مختلفی برای روشن ساختن نقش باکتری‌ها در ایجاد رسوبات آهکی مطرح شده است. بر اساس تحقیقات انجام شده در این زمینه پذیرفته شده است که این فعالیت باکتری‌ها می‌تواند تحت تاثیر پارمترهای شیمیایی- فیزیکی محیطی قرار بگیرد و نیز می‌تواند وابسته به فعالیت متابولیک و ساختار سطحی سلول باشد. فعالیت‌های متابولیک باکتری‌های هتروتروفیک توسط بعضی از محققین به عنوان مکانسیم غالب در ایجاد رسوبات کربنات کلسیم مطرح شده است. در کل مسیرهای متابولیکی مناسب برای افزایش pH قلیایی محیطی می‌تواند در حضور یون کلسیم موجب رسوب کربنات کلسیم شود. سطوح باکتریایی نیز نقش مهمی را در ایجاد رسوب کلسیم بازی می‌کنند. به علت حضور چندین گروه باردار منفی در سطح باکتری، در یک محیط با pH خنثی یونهای فلزی باردار مثبت می‌توانند به سطوح باکتری متصل شوند این موضوع می‌تواند شرایط جوانه زنی ناهمگن (هتروژن) را تشدید کند. عمدتاً رسوب کربنات روی سطح خارجی سلول باکتری با لایه بندی پی در پی توسعه یافته و باکتری در نهایت در بلورهای کربنات در حال رشد گیر می‌افتد. به هر حال نقش واقعی باکتری‌ها در فرآیند معدنی شدن کلسیم هنوز قابل بحث است. کاربرد های مطرح رسوب کربنات کلسیم بوسیله باکتری شامل زمینه‌های مواد، تصفیه خاک، حذف آلودگی‌های جامد معدنی خاک و درز بندی و حذف ترک‌ها در سنگ‌ها و سایر مواد متخلخل سنگی است. تولید کربنات کلسیم معدنی بوسیله باکتری همچنین بعنوان یک ابزار جدید در حفاظت ستون‌های آهکی مطرح شده است [۳۱]. در تعدادی از تحقیقات انجام شده به منظور بررسی افزایش طول عمر باکتری در محیط بتن و تاثیر عوامل، اثر اسپور باکتری و ترکیب ماده اولیه معدنی بیو ارگانیک در این افزایش عمر بررسی شده است. دریافته شده است که حفاظت اسپورهای باکتریایی با غیر متحرک کردن آنها داخل ذرات خاک رس با تخلخل بزرگ قبل از افزودن آنها به مخلوط بتن باعث افزایش طول عمر باکتری می‌شود (شکل ۱) [۲۹].



شکل ۱- مخلوط خود ترمیم حاوی ذرات خاک رس (تصویر چپ) همراه با اسپورهای باکتری و ماده لاکتات کلسیم (تصویر راست) نمونه حاوی ذرات خاک رس توزیع شده در ساختار بتن [۲۹].

براساس تحقیقات انجام شده مشخص شده است که رسوبات کربنات کلسیم باکتریایی بر خلاف رسوبات کربنات کلسیم (با آب آهک) بسیار چسبنده بوده و سازگاری بیشتری با بتن دارند. در مجموع بر فرآیند شیمیایی رسوب کربنات کلسیم چهار عامل کلیدی تأثیر گذار هستند:

- ۱- غلظت کلسیم
- ۲- غلظت کربن معدنی حل شده (DIC)
- ۳- pH
- ۴- در دسترس بودن مکان هایی برای جوانه زنی رسوب اولیه.

ایجاد رسوب کربنات کلسیم نیازمند غلظت های کافی از کلسیم و یون کربنات در حدی است که اکتیویته یون محصول (IAP) متجاوز از ثابت حلالیت (KSO) در معادله ۱ و ۲ می باشد از مقایسه IAP با مقدار (KSO) مقدار (Ω) سیستم تعریف می شود. اگر Ω > ۱ باشد سیستم موفق اشباع شده و رسوب گذاری انجام می شود.



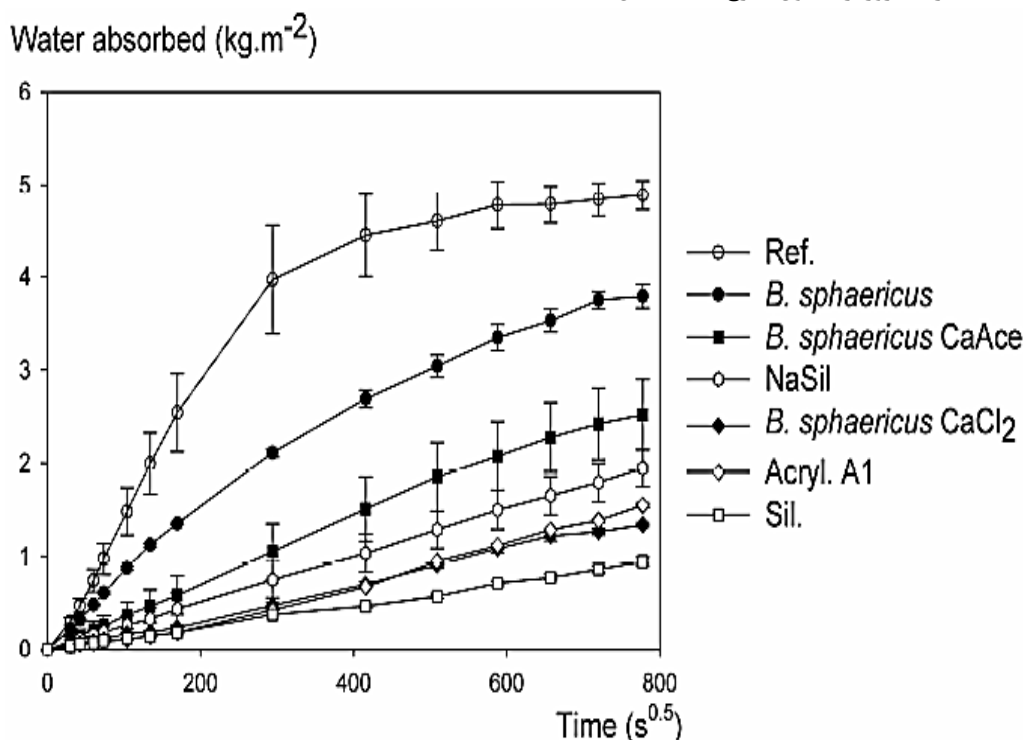
$$\Omega = \frac{(Ca^{+2})(Co_3^{-2})}{kso} \quad \text{معادله ۲:}$$

میکروارگانیسم ها می توانند تمام پارامتر های ذکر شده در بالا را تغییر دهند که اینکار را می توانند به تنهایی یا با دیگر عوامل انجام دهند به هر حال بعنوان یک قانون اولیه، فرض شده است که آنها توانایی لازم برای فعالیت در یک محیط قلیایی همراه با انجام فعالیت های گوناگون فیزیولوژی خود داشته باشند. علاوه بر ایجاد تغییر در محیط توسط باکتری ها، آنها می توانند کربنات کلسیم را با ایجاد مکان هایی برای جوانه زنی آن و یا افزایش غلظت موضعی کلسیم رسوب دهند [۲۰].

۲-۳- مروری بر تحقیقات انجام شده

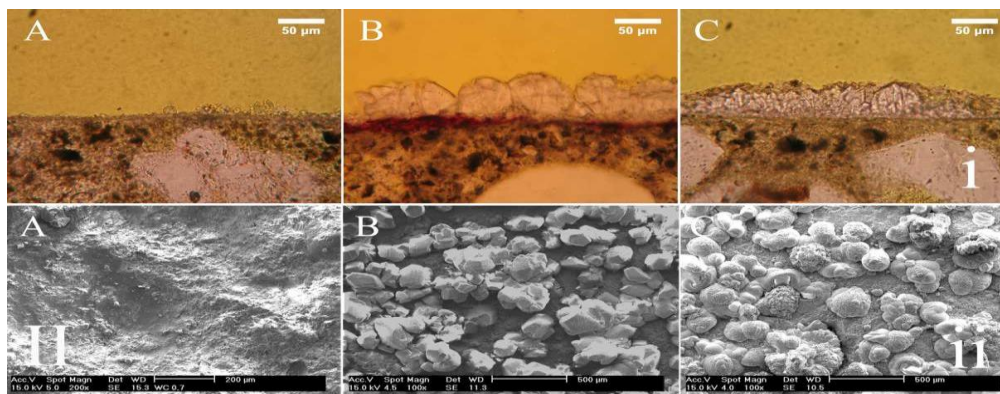
گروه تحقیقاتی ادلف [۳۲] از تکنیک باکتریایی (MICP) برای ایجاد رسوب برای حفاظت سنگ های تزئینی استفاده نمودند آنها با اعمال این باکتری ها بروی سطوح سنگ این کار را انجام دادند. بعد از آن از این فناوری در تحقیق های گوناگون جهت حفاظت سنگ های تزئینی استفاده شد. در دانشگاه Ghent تیم تحقیقاتی شامل گروه های Verstraete و Belie از فرایند هیدرولیز میکروبی اوره به عنوان یک روش برای ایجاد لایه حفاظتی کلسیت روی سنگ آهک استفاده کردند [۳۳]. هیدرولیز اوره نسبت به سایر روش ها دارای مزایایی مانند کنترل پذیری آسان و امکان تولید مقادیر بالای رسوب در دوره زمانی کوتاه می باشد. البته اگر چه فعالیت اوره آزی در میان بسیاری از میکرو ارگانیسم ها شایع است اما عمدتاً میکروارگانیسم نزدیک به گونه باسیلوس اسفریکوس استفاده می شوند [۲۰]. هدف ابتدایی تحقیق توسط گروه Dick برای تعیین عوامل کلیدی مؤثر بر اجرای عملیات رسوب بیولوژیکی بود [۳۴]. بدین منظور، ابتدا نرخ جذب آب سنگ های آهکی عمل نشده و عمل شده بررسی شد. عوامل کلیدی برای ارزیابی می بایست براحتی قابل استفاده و اجرا بوده و بتوان آنها را با دقت مناسب مورد ارزیابی قرار داد. برای این منظور از پتانسیل زتا به عنوان روشی برای ارزیابی استفاده شده است که این پتانسیل یک متغیر قوی دارای بالاترین میزان پیش بینی جهت ارزیابی عملکرد میکروارگانیسم ها می باشد. تاثیر این متغیر بر حسب تغییرات مقدار جذب آب نمایش داده می شود. پتانسیل زتا یک میزان از پتانسیل لایه الکتریکی سطح سلولی می باشد و بنابراین یک عامل مهم در چسبندگی و جذب سطحی باکتری ها می باشد. بدلیل پتانسیل زتای مثبت کربنات کلسیم و پتانسیل بالای زتای منفی باکتری براحتی این دو در کنار هم نگه داشته می شوند. فاکتور اساسی دیگر جهت ارزیابی نرخ فساد یا تجزیه اوره می باشد. باکتری ها با قابلیت بالای تجزیه اوره، وابستگی شدید

به اوره دارند. این موضوع باعث افزایش قابلیت و کارایی می شود. با در نظر گرفتن فرآیند های ذکر شده در بالا دو گونه از باکتری باسیلوس اسفریکوس برای ادامه آزمایشات در نظر گرفته شدند این دو گونه می توانند نرخ جذب آب را به میزان ۵۰٪ کاهش دهند. در ادامه تحقیق گروه De Muynck فرآیند رسوب باکتریایی را توسط باسیلوس اسفریکوس بروی بتن حاوی سیمان پرتلند با درصد تخلخل متفاوت بررسی کردند [۳۵]. برخلاف آزمایشات انجام شده توسط گروه Dick، این آزمایشات در دمای ۲۸°C در شرایط غیراستریل انجام شد [۳۴]. نمونه های بتنی در یک محلول حاوی یک محیط کشت یک روزه از باسیلوس اسفریکوس حاوی $10^7 \frac{\text{سلول}}{\text{ml}}$ غوطه ور شدند. بعد از آن نمونه های بتنی به یک محیط حاوی مقادیر زیاد کلسیم منتقل شدند. این نمونه ها بعد از سه روز از محلول خارج شدند (شکل ۲) [۲۰].



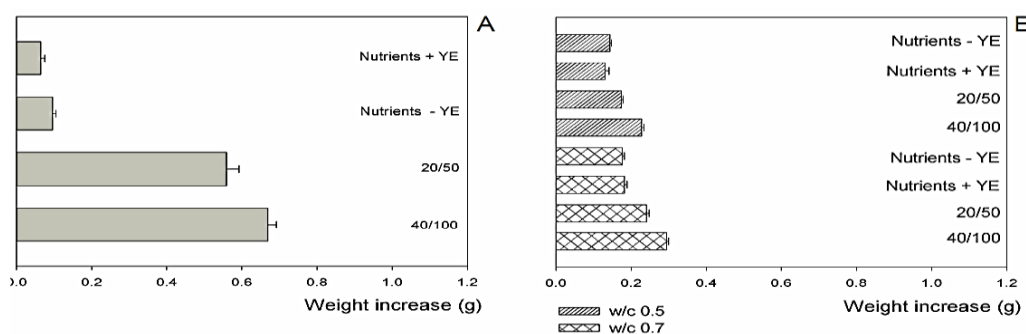
شکل ۲- تاثیر عملیات سطحی روی مقدار جذب آب بر حسب زمان عملیات شامل رسوب باکتریایی با باسیلوس اسفریکوس بدون منبع کلسیم، با استات کلسیم یا کلرید کلسیم، یک نمونه با سیلیکات سدیم (NASil)، آکریلات و ماده ضد آب سیلان (Sil) [۲۰].

براساس نظر محققین مذکور اعمال عملیات رسوب بیولوژیکی یا باکتریایی باعث کاهش قابل ملاحظه جذب آب شده و لذا باعث افزایش مقاومت نمونه های بتنی به نفوذ دی اکسید کربن، کلر، یخ زدگی و آب شدن می شود. این موضوع در مورد نمونه های با تخلخل بالا یا نسبت آب به سیمان بالاتر (W/C) بیشتر مشهود می باشد. علاوه بر آن نتایج مشابهی برای نمونه های حاوی باکتری با سایر روش های محافظت سطحی مانند اعمال سیلان، سیلوکسان، سیلیکات و آکریلات بدست آمده که نشان دهنده کارایی مناسب این روش می باشد. با آنالیز میکروسکوپی مقاطع بتن مشاهده شد که یک لایه از بلور های به ضخامت ۴۰-۱۰ میکرو متر سطح را پوشانده است و در بعضی از مناطق محیط می باشد. ادامه تحقیقات با اعمال کلرید کلسیم به عنوان منبع کلسیم انجام شده است. با توجه به طبیعت مخرب یون کلر برای دوام و پایداری آرماتور های فولادی در محیط بتن انتخاب مواد جایگزین نظیر استات کلسیم نیز مورد توجه قرار گرفته است در حالتی که از کلرید کلسیم استفاده می شود، مورفولوژی بلور های تشکیل شده کربنات کلسیم به صورت رومبو هدرال می باشد. درحالتیکه از استات کلسیم استفاده شود بلور های کروی تشکیل می شدند ولی در مجموع از نظر ترمیم ترک هیچ گونه تفاوتی در استفاده از منابع کلسیم متفاوت (کلرید کلسیم و استات کلسیم) وجود ندارد. بنابراین به نظر محققین با توجه به این موضوع و سازگاری بهتر استات کلسیم با محیط بتن و آرماتور های فولادی بهتر است از استات کلسیم به عنوان منبع کلسیم در محیط بتن استفاده شود (شکل ۳) [۲۰].



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی مقاطع نمایش دهنده لایه های کریستالهای کربنات روی نمونه عملیات شده با باکتری و کلرید کلسیم (B)، یا باکتری و استات کلسیم (C)، نمایش نمونه عملیات نشده (A) [۲۰].

مقدار کربنات کلسیم وابسته به ساختار حفرات ماده می باشد برای نمونه های سنگ آهک مشخص شده است که مقدار افزایش وزن ناشی از ایجاد رسوب، سه برابر بیش از سنگ دانه های معمولی در بتن می باشد. به همین دلیل در محیط بتن با توجه به میزان کمتر رسوبات می بایستی مقادیر بیشتری از باکتری و اوره جهت حصول به مقادیر کافی از رسوب کربنات کلسیم اضافه نمود. علاوه بر آن با افزایش مقدار تخلخل که وابسته به نسبت W/C (آب به سیمان) در بتن می باشد. نمونه های ($W/C = 0.7$) مقادیر بیشتری از رسوب نسبت به نمونه های با تخلخل ($W/C = 0.5$) ایجاد می کنند (شکل ۴) [۲۰].



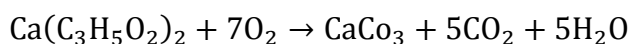
شکل ۴- تاثیر نوع ماده (A) آهک، (B) سیمان) روی افزایش وزن نمونه های با عملیات باکتریایی یکسان. کد x/y نمایش دهنده اعمال باکتری به اندازه x و y مقدار اوره و نمک کلسیم در باکتری، YE عصاره مخمر رانشان می دهند [۳].

گروه تحقیقاتی یونکر برای اثبات کارایی یا عدم کارایی بتن حاوی باکتری تحقیقاتی انجام داد. فرآیند کربناسیون بتن با ایجاد ترک، فرآیندی بسیار مخرب است که در طی آن pH بتن کاهش می یابد حجم عمده ای از خواص بتن ناشی از pH بالا یا خواص قلیایی آن است. درون حفرات بتن محلول هیدروکسید کلسیم وجود دارد با ایجاد ترک، باقیمانده سیمان هیدراته نشده، هیدراته شده و تولید هیدروکسید کلسیم می کند. این هیدروکسید کلسیم با دی اکسید کربن محلول در آب و گاز رسوخ کرده به بتن، واکنش داده و تولید کربنات کلسیم می کند که رسوب می کند، با ادامه فرآیند، این هیدروکسید کلسیم از درون بتن (از طریق ترک) به بیرون تراوش نموده و تولید رسوب کربنات کلسیم می کند. اگر ترک ها ریز باشند بتن می تواند خود را ترمیم کند ولی در صورتی که ابعاد ترک ها از یک حدی بزرگتر باشد دیگر بتن توان خود ترمیمی نخواهد داشت و هیدروکسید کلسیم ارزشمند بتن که مشخصه خواص منحصر به فرد بتن است بدون آب رسوخ می کند و با کاهش قلیایی بتن خواص آن از دست می رود. در صورت وجود آرماتور های فولادی در بتن، این آرماتور ها بوسیله قلیای بتن محافظت می شوند. با کاهش قلیایی بتن و کاهش pH آن این حفاظت از بین رفته و خورده می شوند تولید محصولات خوردگی با افزایش حجم همراه بوده و باعث ایجاد ترک های جدید در بتن و تخریب شدید آن می شود. فرآیند مصرف و حذف هیدروکسید کلسیم بر اساس واکنش زیر صورت می پذیرد. معادله ۳ این واکنشها را بیان می کند:



در شکل های ۵-A و ۵-B ایجاد این رسوبات در دهانه ترک نمایش داده شده است. وجود باکتری‌ها و ایجاد رسوب کربنات کلسیم بدلیل اینکه این رسوبات در داخل ترک انجام شده و کلسیم موجود در قلیای بتن را مصرف نمی کند بسیار ارزشمند و از کارایی بالایی برخوردار می باشد در این فرآیند لاکتات کلسیم یا سایر منابع کلسیم (به وسیله اکسیژن) توسط باکتری به کربنات کلسیم تبدیل می شوند این ماده بعنوان تغذیه باکتری به بتن اضافه می شود (معادله ۴).

(۴)



دی اکسید کربن تولیدی توسط باکتری نیز در فرآیند بستن ترک مجدداً وارد می شود. این دی اکسید کربن با ذرات سیمان واکنش نکرده (هیدراته نشده) واکنش داده و مطابق معادله یک تولید کربنات کلسیم در سطوح داخلی ترک و لذا ترمیم ترک می کند وجود این رسوب باعث تشدید و تقویت رسوب گذاری کربنات کلسیم بوسیله باکتری می شود. با مقایسه این نتایج با نتایج خود ترمیم شونده بتن در عدم حضور باکتری پس از ۲ ماه مشاهده می شود که حداکثر ۳۳ درصد ترمیم ترک ها ناشی از فرآیند مصرف هیدروکسید کلسیم بتن بوده است. در حضور باکتری و لاکتات این مقدار به ۱۰۰٪ افزایش می یابد که این اثر ناشی از تأثیر مضاعف فرآیند مصرف هیدروکسید کلسیم و لاکتات توسط باکتری و تولید کربنات کلسیم و CO_2 مجدداً با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و تولید رسوبات کربنات کلسیم بیشتر در داخل حفرات و ترک می نماید (شکل ۵) [۲۹].



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری A- نمونه ترک دار اولیه، B- نمونه باکتریایی. نمونه سمت چپ قبل از فعالیت باکتری و نمونه سمت راست بعد از فعالیت باکتری می باشد. رسوب کربنات کلسیم در دهانه ترک به وضوح در نمونه حاوی باکتری مشهود است [۲۹].

گروه تیتل بوم روش ترمیم متدوال بتن با روش رسوب باکتریایی را مقایسه کرده است. تعدادی از نمونه های ترک دار برای مقایسه با رزین اپوکسی ترمیم شدند تعدادی از نمونه های ترک دار نیز بوسیله باکتری باسیلوس اسفریکوس مطابق با جدول (۱) ترمیم شدند. عملیات باکتریایی گوناگونی جهت ترمیم ترک روی نمونه انجام شد. بزرگترین عامل باز دارنده در موقع استفاده از باکتری جهت ترمیم بتن مقداری قلیایی بالای بتن بوده که مانع رشد باکتری می شود بنابراین از ژل سیلیکا در این تحقیق به منظور محافظت باکتری از قلیایی بتن و غیر متحرک کردن آن استفاده شد. علاوه بر آن از این ژل به عنوان پرکننده ترک نیز استفاده شد. بعد از آن نمونه ها در یک محلول حاوی کلسیم و اوره قرار گرفتند هدف از این کار تأمین مواد اولیه جهت فعالیت باکتری و ایجاد رسوبات کربنات کلسیم می باشد [۲۰].

جدول ۱- فناوری‌های سنتی و غیر سنتی استفاده شده برای ترمیم ترک‌ها [۲۰].

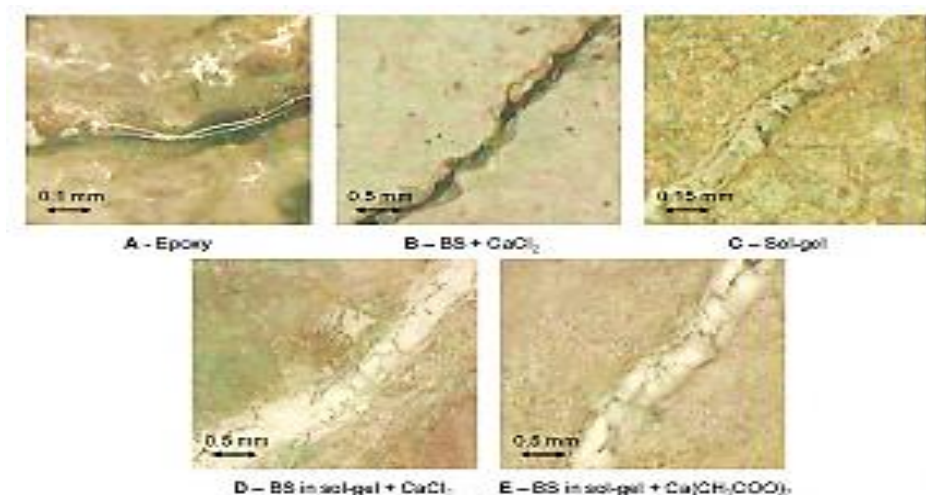
Type	Description					
A) Traditional						
Epoxy	Injection of 2-component epoxy resin into the crack					
B) Non-traditional	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
Sol-gel		x				
BS+CaCl ₂				x	x	
BS in sol-gel+CaCl ₂			x		x	
BS in sol-gel+Ca(CH ₃ COO) ₂			x			x
Autoclaved BS in sol-gel+CaCl ₂	x		x		x	
Autoclaved BS in sol-gel+Ca(CH ₃ COO) ₂	x		x			x

[1] Autoclaving of the bacteria

[2] Injection of silica gel into the crack

[3] Injection of silica gel in combination with *Bacillus sphaericus* into the crack[4] Submersion of the samples into a *Bacillus sphaericus* culture[5] Submersion of the samples in a solution of CaCl₂ and urea[6] Submersion of the samples in a solution of Ca(CH₃COO)₂ and urea

در تعدادی از نمونه‌ها از استات کلسیم به عنوان منبع تأمین کلسیم استفاده شد. نمونه‌ها در این تحقیق هم با باکتری زنده فعال و هم با باکتری مرده اتوکلاوی ساخته شدند این موضوع برای حصول اطمینان از اینکه ترک‌ها فقط به وسیله ژل سیلیکا و جرم زیستی ترمیم نمی‌شوند و اثبات اینکه ترمیم ترک ناشی از فعالیت باکتری هاست انجام شد. کارایی هر کدام از روش‌ها بوسیله اندازه‌گیری میزان نفوذ آب انجام شد. در شکل (۲) ضریب نفوذ آب برحسب عرض ترک نمایش داده شده است [۲۰]. تمام نمونه‌ها به جز نمونه (BS + CaCl₂) باعث کاهش نفوذ پذیری آب در مقایسه با نمونه اصلاح نشده شدند. در حالتیکه باکتری‌ها در برابر قلیایی بتن محافظت نشده بودند. (BS + CaCl₂) آنها قادر به تولید کافی رسوب کربنات کلسیم برای ترمیم و بستن ترک‌ها نبودند که این موضوع تأیید کننده این است که حفاظت باکتری در برابر قلیایی بتن با ژل سیلیکا ضروری و لازم است اصلاح بتن با فرآیند Sol-gel نتایج متوسط در برداشت. در حالت استفاده از BS در حضور (CaCl₂ + sol - gel) یا استات کلسیم مقادیر کمی از نفوذ پذیری برای آب مشاهده شد و نتایجی برابر با ترمیم بتن با اپوکسی مشاهده شد. با توجه به خوردن یون کلر و یکسان بودن اثر کلرید کلسیم و استات کلسیم می‌توان اینگونه استنتاج کرد که استفاده از استات کلسیم مقدم بر کلرید کلسیم بوده و منطقی‌تر می‌باشد. در حالت استفاده از باکتری غیر فعال (مرده) اتوکلاوی با سیلیکا ژل مشاهده شد که نفوذ پذیری به مقدار زیادی کاهش یافته که ناشی از تأثیر سیلیکا ژل در ترمیم و پرکردن ترک می‌باشد. در حالت استفاده از باکتری اکتیو مقدار نفوذ پذیری آب بشدت کاهش یافته که نمایانگر تأثیر باکتری در ایجاد کربنات کلسیم و بنابراین کاهش نفوذ پذیری می‌شود. در حالتیکه فقط از sol-gel استفاده شود مقدار کاهش نفوذ پذیری اندکی مشاهده می‌شود در این حالت وقتی sol-gel به داخل ترک تزریق می‌شود به دلیل انقباض ژل در حین خشک شدن ترک‌هایی در زمینه ژل ایجاد شده و لذا نفوذ آب افزایش می‌یابد در صورت استفاده از سیلیکا ژل و باکتری غیر فعال (اتوکلاوی) به دلیل غوطه‌وری مجدد مخلوط در محلول کلسیم و اوره این ترک‌ها ایجاد نمی‌شدند و لذا کارایی آن در مقایسه با سل ژل (sol-gel) بدون باکتری بیشتر است. حال اگر از باکتری زنده اضافه شود بواسطه ایجاد کربنات کلسیم و بستن ترک‌ها، کارایی بسیار زیاد شده و نفوذ آب بشدت کاهش می‌یابد. این گویا و توضیح دهنده کار آبی برتر و از رشمند کاربرد سیلیکاژل و باکتری به صورت هم‌زمان می‌باشد [۲۰]. نمونه‌هایی که برای آزمایش نفوذ آب استفاده شدند بوسیله آزمایش چشمی (آزمون بصری) نیز ارزیابی شدند. ترک‌های ترمیم شده بوسیله میکروسکوپ استریو عکس برداری شدند و کارایی ترمیم ترک هر روش مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت (شکل ۶) [۲۰]. شکل ۶-A یک ترک ترمیم شده با اپوکسی را نشان می‌دهد با توجه به شکل مشاهده می‌شود که ترک به طور کامل با اپوکسی پر شده است. شکل ۶-B یک ترک که بوسیله BS + CaCl₂ ترمیم شده است نشان داده شده است در این حالت با توجه به اینکه باکتری در مقایسه بتن و قلیایی بالای آن حفاظت نشده است رسوبات کربنات کلسیم باکتریایی تولید نشده است در شکل ۶-D و ۶-E باکتری همراه با ژل سیلیکا استفاده شده است مشاهده می‌شود که ترک‌ها ترمیم و پر شده است. در حالتیکه فقط sol-gel استفاده می‌شود در حین خشک شدن ترک‌هایی ایجاد می‌شود فلذا حفاظتی کامل نمی‌تواند ایجاد کند (شکل ۶-C) برای حالتیکه sol-gel+CaCl₂ یا استات کلسیم استفاده شود و در محلول اوره _ کلسیم بعد از پر کردن ترک‌ها توسط ژل و باکتری غوطه‌ور شود، در این حالت رسوب کربنات کلسیم به وسیله باکتری ایجاد شده و ترک‌ها کاملاً به وسیله رسوب پر می‌شوند. (شکل ۶-D و ۶-E) [۲۰].



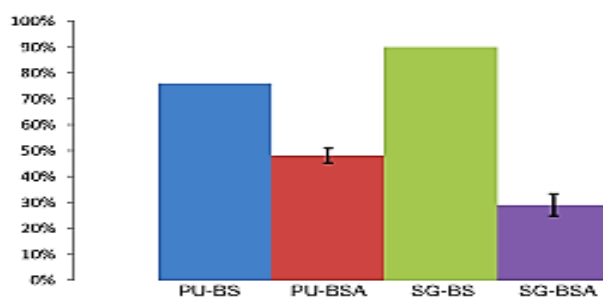
شکل ۶- تصاویر ترکهای ترمیم شده با مواد متفاوت مطابق زیر نویس اشکال [۳].

مکانیسم خود ترمیمی، مکانیسمی است که در آن در صورت ایجاد هر گونه ترک به صورت خود به خود بدون دخالت خارجی تعمیر و مرمت شود لذا برای داشتن چنین سیستمی لازم است که عامل ترمیم کننده در داخل زمینه وجود داشته باشد و در زمان نیاز آزاد شود. در این تحقیق از شیشه بورو سیلیکات با قطر داخلی ۳ میلیمتر و طول ۳۰ میلی متر به عنوان یک محفظه جهت نگه داری مواد خود ترمیم کننده استفاده شد. زمانی که به باکتری ها مواد مغذی نرسد آنها از بین می روند قبل از اینکه ترکی در بتن ایجاد شود و لذا هیچگونه رسوبی در صورت ایجاد ترک تشکیل نخواهد شد. در یک تحقیق برای حل این مشکل از اسپور به جای میکرو ارگانیزم زنده استفاده شد. اسپور ها زنده بوده اما به صورت سلول نهفته هستند و می توانند در این حالت برای سالیان متمادی تا ۵۰ سال حتی در شرایط نامناسب به حیات خود ادامه دهند. این موضوع به دلیل دیواره های ضخیم خارجی آنهاست. به منظور بررسی اینکه رسوب کربنات کلسیم توسط اسپور زنده انجام می شود از اسپور مرده اتوکلاوی نیز استفاده شد. علاوه بر این منظور بررسی اینکه آیا سیلیکا ژل نیز می تواند به صورت دائم باعث پایداری و ترمیم خود به خود ترک شود یا نه آزمایشاتی با این ماده نیز انجام شد. علاوه بر سیلیکا ژل از فوم پلی یورتان نیز به عنوان پر کننده ترک استفاده شد. این فوم علاوه بر نقش حفاظت اسپور در برابر محیط قلیایی بتن نقش پر کننده را نیز بر عهده دارد. زمانی که از سیلیکا ژل به عنوان ماده تثبیت کننده و نگهدارنده باکتری استفاده می شود از لوله شیشه ای دو بخشی استفاده شده است. یک بخش با اسپور های باسیلوس اسفریکوس همراه با لواسیل (Levasil) و بخش دوم با محلول اوره، مخمر و نیترات کلسیم مانند شکل ۷-۲۰ پر می شود. هنگام ایجاد ترک، لوله مذکور شکسته شده و لواسیل در مجاورت نیترات کلسیم شروع به تشکیل ژل می کند. اسپور ها در ژل پخش و در تماس با اوره و مخمر قرار می گیرند این تماس باعث فعال شدن اسپور شده و نقش غذای باکتری را این مواد به عهده دارند، نیترات کلسیم دو نقش اساسی را بازی می کنند اول به عنوان منبع تأمین کلسیم و دوم به عنوان یک پذیرنده الکترون (به دلیل نبودن اکسیژن و غلظت کم آن در ترک). لذا بعد از مدتی از شروع تماس فرایند به صورت خود به خود شروع می شود. در صورت استفاده از فوم پلی یورتان به عنوان ماده نگهدارنده باکتری، سه لوله شیشه ای تهیه می شود. لوله اول با محلول اسپور های باسیلوس اسفریکوس، لوله دوم با ترکیب PU_B از پلی یورتان و لوله سوم با ترکیب Pu_A، اوره، مخمر و نیترات کلسیم پر می شود. با شکست لوله ها و تماس مواد با هم فوم پلی یورتان تشکیل می شود. با تشکیل این فوم و طبیعت گسترش یابنده همراه با افزایش حجم آن باعث می شود که ترک ها پر شده و مواد نیز از لوله ها بیرون کشیده شوند. باکتری های خارج شده از لوله منتشر شده در فوم با مواد مغذی و منبع کلسیم تماس پیدا کرده و می توانند رسوب کربنات کلسیم را تشکیل دهند. بعد از اینکه مواد ذکر شده در بالا در لوله ها قرار گرفتند انتهای لوله به وسیله چسب بسته می شود و حالا آماده اضافه شدن به محیط بتن هستند [۲۰]. نمونه های بتنی با نسبت آب به سیمان برابر نیم (۰/۵) و ابعاد 60 × 60 × 220mm تهیه شدند. برای پر کردن قالب ابتدا یک لایه به ضخامت ۱۰mm از بتن داخل قالب ریخته شده و سپس کپسول های لوله ای شکل به صورت دوتایی تا سه تایی (بسته به ترکیب) درون این لایه قرار گرفتند. در مراحل بعد نیز لایه هایی مشابه مراحل اول قرار می گیرد تا قالب پر شود. بعد از ایجاد ترک، نمونه در شرایط محیط و رطوبت نسبتاً زیاد نگهداری شدند. بعد از یک هفته با فعال شدن اسپور ها، نمونه ها مجدداً تحت آزمایش خمش سه نقطه قرار گرفتند [۲۰].



شکل ۷- کیسولهای حاوی مواد متفاوت (A) سیلیکاژل، (B) فوم پلی یورتان استفاده شده برای غیر متحرک کردن مواد باکتریایی پر کننده ترک [۲۰].

به منظور ارزیابی کارایی و راندمان هر کدام از فرایندهای بالا، تغییرات استحکام به عنوان پارامتر سنجش در نظر گرفته شد. استحکام نمونه‌ها قبل و بعد از خود ترمیمی با هم مقایسه شد. شکل ۸ نشان می‌دهد که یک تفاوت فاحش در تغییرات استحکام خمشی ما بین نمونه‌های حاوی اسپور زنده و مرده مشاهده می‌شود. در حالیکه اگر از اسپور مرده همراه با فوم پلی یورتان استفاده شود. بازگشت استحکام خمشی به میزان ۵۰٪ حالت اولیه مشاهده می‌شود. در حالیکه اگر از اسپور زنده در همین شرایط استفاده شود بازگشت استحکامی در حد ۷۶٪ استحکام اولیه بدست می‌آید. که این ناشی از رسوب کربنات کلسیم و لذا ترمیم ترک‌ها می‌باشد که باعث افزایش ۳۲ درصدی در استحکام خمشی می‌شود [۲۰]. این فن آوری بسیار برتر از کاربرد تنهائی باکتری یا ژل می‌باشد. در صورت استفاده از باکتری بدون تثبیت در ژل سیلیکا، تشکیل رسوب کربنات کلسیم بسیار محدود و اندک می‌باشد. و در عمل نیز تشکیل رسوب مشاهده نشده است. در صورت استفاده از ژل سیلیکا به تنهائی نیز این ژل ترک خورده و قابلیت ترمیم مناسب و حفاظت بتن را ندارد.



شکل ۸- تغییرات استحکام ناشی از فرآیند خود ترمیمی بتن با پلی یورتان سیلیکا ژن، باسیلوس اسفریکوس، و با باسیلوس اسفریکوس مرده (اتوکلاوی) [۲۰]

۳- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر از باکتری‌ها به نحو موثری برای حفاظت سازه‌های بتنی و یا ترمیم مجدد آن‌ها استفاده شده است در این تحقیقات تعداد زیادی باکتری‌های مفید و مقاوم به محیط قلیایی بتن شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که از این میان دو گونه پاستوری و باسیلوس اسفریکوس از ارزش و اهمیت بالاتری برخوردار هستند عمده ترین مشکل در زمینه کاربرد باکتری برای حفاظت بتن مرتبط با نگهداری و زنده نگه داشتن باکتری در قلیای بتن می‌باشد در این زمینه نیز روش‌های گوناگونی ابداع شده است که در این بین استفاده از میکرو کیسول‌های حاوی باکتری که حاوی اسپورها یا باکتری غیر فعال و ترکیبات مغذی برای فعالیت مجدد باکتری است از اهمیت بیشتری برخوردار است این میکرو کیسول‌ها علاوه بر امکان حفظ باکتری برای ده‌ها سال در قلیای بتن باعث افزایش استحکام و بهبود خواص مکانیکی بتن نیز می‌شوند. از میان مواد مغذی مختلف پیشنهاد شده برای تغذیه و ایجاد رسوب زیستی، اوره بهترین گزینه شناخته شده است. هیدرولیز اوره بی شک سریع‌ترین راه برای تولید یون-های بی کربنات و در نتیجه رسوب کربنات کلسیم می‌باشد زیرا هیدرولیز اوره بسیار سریع است و تنها به یک آنزیم بستگی دارد در نتیجه هیچ مواد مغذی اضافی برای نگهداری فعالیت طولانی مدت باکتری نیاز نبوده و از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است. گام بعدی در تحقیقات در مورد استفاده از باکتری‌های تولید کننده کربنات کلسیم باید یک ارزیابی کمی و کیفی از روش‌های مختلف تحت شرایط یکسان باشد علاوه بر ارزیابی عملکرد حفاظتی تاثیر ترمیم در جنبه‌های بصری نیز باید بررسی شود از این رو نقش دقیق این میکرو ارگانیسم‌ها و مسیر متابولیسمی آن‌ها می‌تواند در میان پارامترهای دیگر به تشخیص اثر بخشی کمک کند. گسترش دانش در این عوامل بی شک به ارزش افزوده ترمیم کمک خواهد کرد همچنین باعث می‌شود درمان در سطح سازگار زیست محیطی با اثر محافظتی بالا انجام شود [۲۶].

Abstract

Crack formation in concrete is a common process due to the weak tensile strength of the concrete. Stability and durability of the concrete decreases because of water and gases, penetrating into the structures through these cracks. If these cracks develop and reach to the steel rebars, not only the concrete but also these rebars will be corroded. Corrosion of the steel rebars by corroding agents causes an intense reduction in the structure stability. For solving this problem, a variety of solutions have been developed, which have disadvantages such as difference in the coefficients of thermal expansion between these materials despite other advantages. For these reasons, using other options is considered. One new possible mechanism, being tested in the laboratory scale, is a technology based on using mineral deposits containing bacteria. This novel technology is the focus of many concrete and cement research centers. Bacterial concrete is designed and developed based on the precipitation ability of calcite by bacteria. This phenomenon is called calcite precipitation stimulated by bacteria or MICP in brief. Calcium carbonate precipitates have proved their ability as a microbial sealant to fill the cracks and the gaps in Granites, stones and sand. Therefore, bacteria can be introduced as a proper environment friendly substitution. In the present, this technology is being studied as a smart self-repairing method in concrete. In this study, the history of the beginning and development of this technology and its present and future position is discussed.

Key words: Composite concrete, Bacterial concrete, Concrete structures, steel rebars, Crack repairmen.

۴- مراجع

- [۱] نوبل، آدام، تکنولوژی بتن، ترجمه: رمضان پور، علی اکبر، شاه نظری، محمدرضا، انتشارات علم و صنعت، ۱۳۸۶.
- [2] Shuaib, H.A., et al, Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete, 30, 6, 92-119, 1985.
- [3] Sunil Pratapreddy, S., A study on the performance of the bacterial concrete embedded with bacillus subtilis, PH.D theseis, Jawaher lal Nehru Technology University, Kukatpally, Hyderabad, India, March 2010.
- [4] Song, H.W., et al, Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-A review, Int. J. Electrochem. Sci., 2, 1-27, 2007.
- [5] Kawadkar, K. G., et al, Behaviour of cement concrete under common salt solution both under hydrostatic and atmospheric pressures, Cement and Concrete Research Volume 11, Issue 1, Pages 103–113, 1981.
- [6] Zhang, M., et al, Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate–chloride ions, Construction and Building Materials, Volume 39, Pages 26–32, 2013.
- [7] Sotiriadis, K., et al, The effect of chlorides on the thaumasite form of sulfate attack of limestone cement concrete containing mineral admixtures at low temperature, Construction and Building Materials, Volume 43, Pages 156–164, 2013.07.19.
- [8] Li, F., et al, Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack, Construction and Building Materials Volume 25, Issue 10, Pages 3878–3885, 2011.
- [9] Bassouni, M.T., et al, Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading, Cement and Concrete Research, Volume 39, Issue 3, Pages 206–226, 2009.
- [10] Idiart, A.E., et al, Chemo-mechanical analysis of concrete cracking and degradation due to external sulfate attack: A meso-scale model, Cement and Concrete Composites, Volume 33, Issue 3, March 2011, Pages 411–423, 2011.
- [11] Nabil, M., et al, Durability of metakaolin concrete to sulfate attack, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 9, Pages 1727–1734, 2006.

- [12] Shang, H.S., et al, Behavior of air-entrained concrete under the compression with constant confined stress after freeze-thaw cycles, *Cement and Concrete Composites* Volume 30, Issue 9, October 2008, Pages 854–860, 2008.
- [13] Laoubi, K., et al, Creep and durability of sand-coated glass FRP bars in concrete elements under freeze/thaw cycling and sustained loads, *Cement and Concrete Composites* Volume 28, Issue 10, November 2006, Pages 869–878, 2006.
- [14] Jacobsen, S., et al, High strength concrete — Freeze/thaw testing and cracking, *Cement and Concrete Research*, Volume 25, Issue 8, Pages 1775–1780, 1995.
- [15] Bleszynski, R., et al, Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions, *Advanced Cement Based Material*, Volume 7, Issue 2, Pages 66–78, 1998.
- [16] Wang, Y., et al, The use of thermodynamic analysis in assessing alkali contribution by alkaline minerals in concrete, *Cement and Concrete Composites*, Volume 30, Issue 4, Pages 353–359, 2008.
- [17] Song, H.W., et al, Predicting carbonation in early-aged cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 36, Issue 5, Pages 979–989, 2006.
- [18] Matsushita, F., et al, Carbonation degree of autoclaved aerated concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 11, Pages 1741–1745, 2000.
- [19] Talukdar, S., et al, Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change – Part 1: Experimental results and model development, *Cement and Concrete Composites*, Volume 34, Issue 8, Pages 924–930, 2012.
- [20] K. Van Tittelboom, W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete, Bacteria protect and heal concrete and stone.
- [21] Aggelis, D.G., et al, Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements, *Cement and Concrete Composites*, Volume 29, Issue 9, Pages 700–711, 2007.
- [22] Tittelboom, K.V., et al, Use of bacteria to repair cracks in concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 40, Issue 1, Pages 157–166, 2010.
- [23] Song, X.F., et al, A method to repair concrete leakage through cracks by synthesizing super-absorbent resin in situ, *Construction and Building Materials* Volume 23, Issue 1, Pages 386–391, 2009.
- [24] Issa, C.A., et al, Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 21, Issue 1, January 2007, Pages 157–163, 2007.
- [25] Aggelis, D.G., et al, Longitudinal waves for evaluation of large concrete blocks after repair, *NDT & E International*, Volume 44, Issue 1, Pages 61–66, 2011.
- [26] Muynck, W.D., et al, Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review, *Ecological Engineering*, Volume 36, Issue 2, Pages 118–136, 2010.
- [27] Achal, V., et al, Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation, *Ecological Engineering*, Volume 37, Issue 4, Pages 554–559, 2011.
- [28] Dhani, N.K., et al, Improvement in strength properties of ash bricks by bacterial calcite, *Ecological Engineering*, Volume 39, February 2012, Pages 31–35, 2012.
- [29] H. M. Jonkers, 'Bacteria-based self-healing concrete', *HERON* Vol. 56, No. 1, 2011.
- [30] Kim, H.K., et al, Microbially mediated calcium carbonate precipitation on normal and lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 38, Pages 1073–1082, 2013.
- [31] C. Barabesi, A. Galizzi, G. Mastromei, M. Rossi, E. Tamburini, and B. Perito, " Bacillus subtilis Gene Cluster Involved in Calcium Carbonate Biomineralization_ " *Journal of bacteriology*, 2007, p. 228–235, Vol. 189, No. 1.
- [32] Adolphe J. P., Loubière J. F., Paradas J., Soleilhavoup F. 1990. Procédé de traitement biologique d'une surface artificielle. European patent 90400G97.0.
- [33] De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. 2010. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. *Ecol. Eng.* 36:118–136.
- [34] Dick J., et al. 2006. Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species. *Biodegradation* 17:357–367.