مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

جلد ۳- شماره ۶ - سال ۱۳۹۷

www.ElitesJournal.ir

بررسی دوام و خواص بتن باکتریایی

پریسا صالحی[۱*]، پگاه زارع[۲]، هوشنگ دباغ[۳]، مراحم آشنگرف[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه کردستان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه کردستان

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه کردستان

۴- دانشیار میکروبیولوژی صنعتی، گروه علوم زیستی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان

* Sa.parisa202@gmail.com

ارسال: دی ماه ۹۷ پذیرش: بهمن ماه ۹۷

چکیده

ترک خوردگی در سازه‌های بتنی یکی از معضلاتی است که بنا به دلایل مختلف در داخل بتن شکل می گیرد، در نتیجه نفوذپذیری افزایش یافته و راهی مناسب را برای ورود مایعات و گازها ایجاد می‌کند؛ همین امر باعث خوردگی آرماتورها و زوال سازه‌ی بتنی می گردد. از آن جایی که افزایش دوام بتن، برای توسعه‌ی پایدار لازم است؛ لذا رویکردهای خودترمیمی ممکن است به عنوان راه حلی مناسب مورد توجه قرار گیرند در این میان علاوه بر روش‌های معمول خودترمیمی که اغلب اساس شیمیایی دارند اخیرا روش‌های جدیدی با عنوان رسوب معدنی باکتریایی توجه ویژه‌ی محققین را به خود جلب کرده است. در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته رسوبات باکتری علاوه بر بهبود خواص مکانیکی بتن باعث افزایش دوام بتن در محیط‌های مخرب شده است. لذا در تحقیق حاضر مروری بر تاریخچه ی شروع و توسعه‌ی این فن‌آوری و جایگاه حال و آینده ی آن خواهد شد.

کلمات کلیدی: دوام، بتن باکتریایی،بتن خودترمیم، رسوب کلسیم کربنات.

۱- مقدمه

تقریبا ۸۰ درصد از زیرساخت‌های جهان از بتن مسلح ساخته شده است. تعمیر و نگه‌داری آن‌ها نیاز به یک سرمایه گذاری عظیم دارد که فقط چند کشور در جهان از عهده آن بر می‌آیند، درنتیجه به یک تلاش جهانی در زمینه‌ی فن‌آوری‌های پایدار و اقتصادی برای نگه‌داری این زیر ساخت‌ها نیاز است، که هزینه‌های زیست محیطی و اجتماعی به دنبال نداشته باشند [۱]. 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 بررسی شود [۲, ۳]. مواد ساختمانی نظیر بتن در معرض عمل هوازدگی، عوامل بیولوژیکی و شیمیایی و سایر شرایط مخرب می‌باشند [۳]. از مهم‌ترین این عوامل که موجب تخریب و انهدام سازه‌ها و یا به عبارتی، با ایجاد

ترک باعث کاهش دوام و استحکام آن‌ها می‌شوند عبارتند از: نفوذ نمک‌ها [۴]، حملات کلریدی و سولفاتی [۵, ۶]، عمل یخ زدگی [۷, ۸]، عکس‌العمل قلیایی سنگ‌دانه‌ها [۹] و کربناسیون [۱۰]، که همه این حملات باعث ایجاد ترک در سازه‌ها و کاهش عمر مفید آن‌ها می‌شوند.

تشکیل ترک در بتن فرآیندی است که به سختی می‌توان ازآن اجتناب کرد. ترک‌های با پهنای کمتر از ۰/۲ میلی‌متر و کوچک‌تر از آن معمولا غیرمهم در نظر گرفته می‌شوند، اگر چه این ترک‌ها روی خواص استحکامی سازه تاثیر گذار نیستند اما می‌توانند منجر به افزایش تخلخل و نفوذ کلریدها، سولفات‌ها، اسیدها و عوامل خورنده شوند، که در طولانی مدت باعث فساد و تخریب زمینه بتنی و خوردگی زودرس آرماتورهای بتنی می‌گردند. بنابراین دوام وپایداری طولانی مدت سازه کاهش می‌یابد [۲, ۳, ۱۱]. در تعدادی از تحقیقات انجام شده گزارش شده است که سازه‌های بتنی یک ظرفیت مشخص برای ترمیم این نوع از ترک‌ها دارند [۱۲, ۱۳]. لذا استفاده از گزینه‌های جایگزین از جمله بتن باکتریایی مورد توجه قرار گرفته است. در این روش جدید، برای اصلاح ساختاری سازه‌های آسیب دیده از یک فرآیند میکروبی که در آن‌ها فعالیت‌های متابولیکی منجر به رسوب کلسیم‌کربنات در قالب کلسیت می‌گردد، استفاده می‌شود که باعث ترمیم ترک‌ها و کاهش نفوذپذیری بتن خواهد شد. این پدیده رسوب کلسیت تحریک شده با باکتری یا به اختصار MICP[1] نامیده می‌شود [۱۴].

باکتری‌ها می‌توانند در حضور مواد مغذی مانند بافر فسفات یا اوره به صورت مداوم یک لایه کلسیت غیرقابل نفوذ روی سطح بتن ایجاد کنند. رسوب ایجاد شده، ساختار کریستالی درشتی دارد که به آسانی به شکل پوسته‌هایی به سطح بتن می‌چسبد. هم چنین pH عامل مهمی در فعالیت یا عدم فعالیت باکتری‌ها در محیط بتن می‌باشد [۳]. به‌طورکلی مفهوم بیوکلسیفیکیشن[2] در اوایل قرن بیستم آغاز شد. بوکت و همکاران [3]مشخص کردند،کلسیفیکیشن روندی معمول در خاک است و به صورت آزمایشگاهی شکل‌گیری کلسیت را با بعضی از باکتری‌های خاک‌زی انجام دادند [۱۵].

فیچر[4] به بررسی فعالیت اوره‌آز و تاثیر آن بر رسوب کلسیت پرداخت. که برای اولین بار از اصطلاح کربنات‌کلسیم‌میکروبی(MICP) استفاده کرد. سپس پی‌برد، که برای پرکردن خلل‌وفرج محیط‌های متخلخل می‌توان از کربنات‌کلسیم تولید شده توسط باکتری باسیلوس پاستوری[5] استفاده کرد [۱۶]. نخستین تحقیق در زمینه تعمیر بتن با MICP به وسیله گروه راما کریشنان در دانشکده صنعت و معدن داکوتای جنوبی آمریکا انجام شده است [۱۷]. بسیاری از تحقیقات در رابطه با تاثیر باکتری در زمینه‌های مختلف بتن از قبیل افزایش دوام مواد ساختمانی منتشر شده. کاربرد میکروارگانیسم های مختلف در پایداری این فن‌آوری در ساخت‌وساز مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفته است [۱۸, ۱۹]. همچنین فن‌آوری خودترمیمی باکتریایی با فرآیند خودترمیمی ذاتی بتن مقایسه شده است [۲۰].

پیشرفت‌های سریعی در پیداکردن علل ترک خوردگی بتن و استفاده از تکنیک‌های میکروبی برای ترمیم ترک‌ها انجام شده است. لی متایر[6]کاهش جذب آب را در نمونه‌های سنگ آهک به علت پوشش موثر کلسیت توسط باکتری‌ها گزارش کرد [۲۱]. راماچاندران و همکاران[7] افزایش مقاومت فشاری ملات سیمان را با استفاده از باکتری پاستوری گزارش کردند [۲۲]. کمبود پوشش‌های سطحی متعارف، توجه به درمان‌های جایگزین، برای بهبود دوام بتن را به خود جلب کرد؛ لذا دی مویانک و همکاران[8] رسوب کربنات باکتری را بر روی دوام نمونه‌های ملات با تخلخل‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که

[1] Microbially induced calcite precipitation
[2] Bio-calcification
[3] Boquet
[4] Fischer
[5] *Bacillus pasteurii*
[6] Le Metayer
[7] Ramachandran ., et al
[8] De Muynck, W., et al

جذب آب و نفوذپذیری گازها کاهش می‌یابد [۲۳]. آکال و همکاران[1] با استفاده از باکتری مگاتریوم، بهبود مقاومت و خصوصیات نفوذپذیری نمونه‌های بتنی و ملات خاکستر بادی را نشان دادند [۲۴]. در تحقیقی دیگر توزیع کلسیم‌کربنات را بر روی ظرفیت جذب آب نمونه‌های بتنی بعد از ترمیم سطح بتن به وسیله دو نوع باکتری را مورد تحقیق قرار دادند [۲۵]. رسوبات کربنات‌کلسیم به‌عنوان یک درزگیر میکروبی توانمندی بالای خود را در پرکردن ترک‌ها و شکاف‌های ریز در گرانیت‌ها، سنگ‌ها و ماسه نشان داده است [۱۳]. در سال ۲۰۱۰ جانکرز و همکاران[2] اثر عملکرد باکتری را به عنوان عامل خود ترمیم، برای ساخت بتنی پایدار بررسی کرده. آن‌ها مشاهده کردند که با افزودن اسپورهای باکتری به مخلوط بتن، قطر خلل‌وفرج در ماتریس سیمانی با افزایش سن بتن کاهش می‌یابد. در این فرآیند اسپورهای باکتری در حضور لاکتات‌کلسیم فعال شده و با تولید رسوبات کلسیت، حفرات موجود در بتن را پر می‌کنند [۲۶].

باکترهایی که به عنوان عامل خودترمیم در بتن استفاده می‌شوند؛ باید در زمان طولانی، ترجیحا در کل زمان عمر یک سازه قابلیت درزگیری ترک‌ها را داشته باشند [۲۷]. ونگ و همکاران[3] با استفاده از باکتری باسیلوس اسفریکوس[4] در مخلوط بتن مشاهده نمودند که به محض ایجاد ترک و ورود آب، فعالیت باکتری‌ها آغاز شده و در یک محیط کلیسمی قوی، رسوب کربنات‌کلسیم به وجود می‌آید و یک لایه کلسیتی نفوذ ناپذیر ترک‌ها را پر می‌کند، همچنین افزایش مقاومت خمشی وکاهش ضریب نفوذپذیری آب از دیگر نتایج آن‌ها بود [۲۸]. تحقیق آکال و همکاران در خصوص بررسی تاثیر عملکرد زیستی باکتری باسیلوس اسفریکوس بر روی دوام و خصوصیات میکرو سازه‌ای بتن است. از جمله نتایج این تحقیق می‌توان به بهبود نفوذپذیری، مقاومت فشاری و ترمیم ترک‌های سطحی بتن اشاره کرد [۲۹]. القمری[5] بر روی آغشته سازی،کپسوله سازی سنگ‌دانه‌های سبک و عملکرد خودترمیمی تحقیق کرد. قطر سنگ دانه‌ها بین ۴ تا ۸ میلی متر بود که با عامل خودترمیمی سیلیکات سدیم آغشته شده، بعد از ۲۸ روز نمونه‌های حاوی سنگ دانه‌های سبک آغشته به مواد خودترمیمی تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای ۸۰ ٪ بازیابی مقاومت داشته‌اند [۳۰].

شرایطی مانند دمای بالا، کاهش مواد مغذی و pH بالا، ممکن است مانع از تولید کربنات‌کلسیم توسط باکتری‌ها شود. این یافته جدید بینشی در مورد چگونگی شرایط چسباندن سیمان را فراهم می‌کند که بر روی پایداری میکروارگانیسم‌ها تاثیر می‌گذارد [۳۱]. در سال ۲۰۱۷ حسینی و همکاران به ارزیابی تأثیر دو نوع باکتری اسپوروسارسینا پاستوری[6] و باسیلوس سابتیلیس[7] با غلظت‌های مختلف سلولی در جذب آب چهار نوع سنگ‌دانه‌ی سبک بتن پرداختند. سنگ دانه‌ها با دیواره سلولی باکتری‌ها بهبود پیدا کرده‌اند، که در کل باعث افزایش دوام و بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن هم می‌شود [۳۲]. هم‌چنین حسینی در طی تحقیقات دیگری به بررسی اثرات اصلاح باکتریایی بر مقاومت فشاری، جذب آب و نفوذ پذیری کلرید در بتن سبک پرداخت. نتایج نشان داد که به طور متوسط ۱۰ درصد کاهش جذب آب، ۲۰ درصد افزایش مقاومت فشاری و ۲۰ درصد کاهش جذب کلرید اتفاق افتاده است [۳۳].

۲- مکانیزم عمل باکتری

[1] Achal., et al
[2] Jonkers., et al
[3] Wang., et al
[4] Bacillus Sphaericus
[5] Alghamri, et al
[6] Sporosarcina pasteurii
[7] Bacillus subtilis

بعضی از باکتری‌ها با تولید آنزیم اوره‌آز، واکنش هیدرولیز اوره را به کربنات و آمونیوم، کاتالیز می‌کنند. هنگامی که آنزیم اوره‌آز توسط باکتری در یک محیط غنی از کلسیم اتفاق می‌افتد، کربنات‌کلسیم به صورت کریستال‌های جامد رسوب می‌کنند. فرایند رسوب‌کلسیم به شرح زیر خلاصه می‌شود. ابتدا، اوره در رابطه(1) به صورت آنزیماتیک به آمونیاک و اسید کربامات هیدرولیز می شود سپس در رابطه(2)کاربامات ایجاد آمونیاک وکربنیک اسید تجزیه می‌شود:

$$CO(NH)_2 + H_2O \rightarrow H_2COOH + NH_3 \quad (۱)$$

$$H_2COOH + H_2O \rightarrow NH_3 + H_2CO_3 \quad (۲)$$

در ادامه آمونیاک طبق رابطه (3)و(4) یون‌های آمونیوم و هیدروکسید را تشکیل می‌دهد؛ و اسید کربنیک باعث ایجاد یون‌های بی‌کربنات می‌شود:

$$2NH_3 + 2H_2O \leftrightarrow 2NH_4^+ + 2OH^- \quad (۳)$$

$$H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+ \quad (۴)$$

در رابطه(5) یون‌های هیدروکسید pH را افزایش می‌دهند و موجب تغییر در تعادل بی‌کربنات درنتیجه منجر به تشکیل یون‌های کربناته می‌شود:

$$HCO_3^- + H^+ + 2NH_4^+ + 2OH^- \leftrightarrow CO_3^{-2} + 2NH_4^+ + 2H_2O \quad (۵)$$

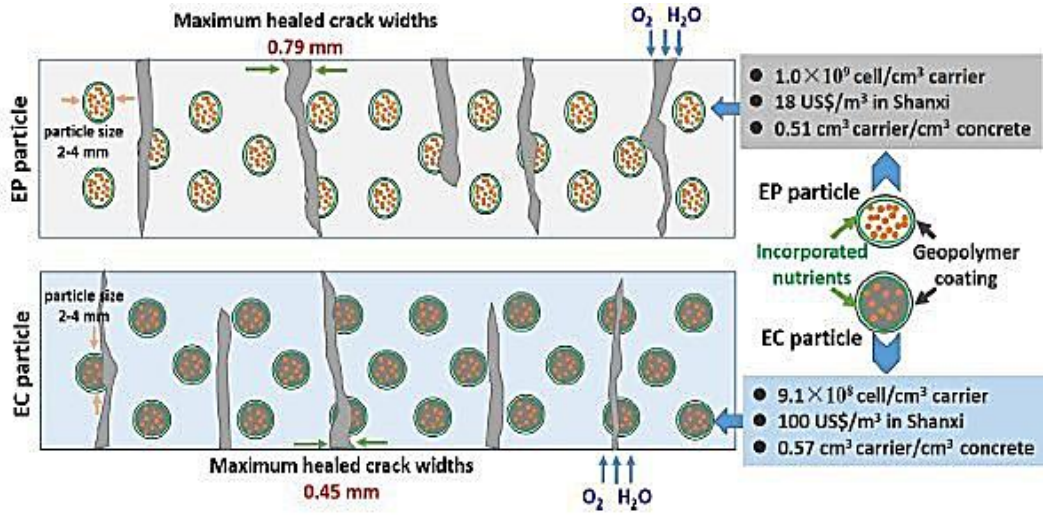
در نهایت، طبق رابه (6) در حضور یون‌های کلسیم، یون‌های کربنات به عنوان بلورکربنات‌کلسیم رسوب می‌کنند [۳۴]:

$$CaCa^{+2} + Co_3^{-2} \rightarrow Caco_3 \quad (۶)$$

در میان میکروارگانیسم‌ها، باکتری‌ها با بیشترین نسبت سطح به حجم و ایجاد رسوب روی دیواره‌های سلولی به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای استفاده در بتن شناخته شده اند. نوع باکتری غلظت مورد استفاده شرایط محیطی مانند دما pH و نوع محیط حاوی کلسیم در تولید رسوبات نقش به سزایی دارد در صورت بهینه بودن تمام پارامتر های ذکر شده رسوبات کلسیم کربنات کافی برای کنترل ترک ها و ترمیم بتن خواهیم داشت. به جز این موارد افزایش طول عمر میکروارگانیسم ها، برای افزایش میزان رسوبات، یکی دیگر از مسایل مورد توجه برای استفاده از باکتری در بتن بوده است. محققین تاکنون در نحوه‌ی به کار گیری باکتری در بتن تحقیقات متنوعی انجام داده‌اند از جمله روش‌های استفاده از باکتری در بتن می توان به عنوان عامل خودترمیم در اصلاح سطحی بتن در آب اختلاط بتن اشاره کرد.

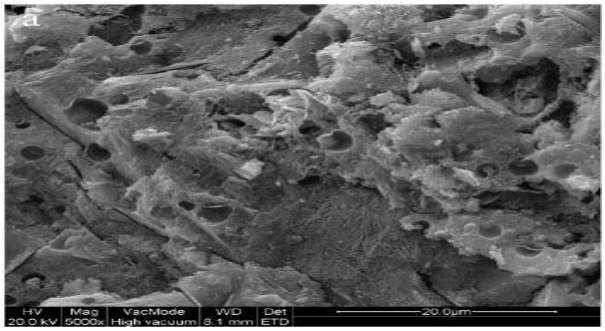
۳- عملکرد خودترمیمی

روش خودترمیمی با اضافه کردن باکتری نیز یکی از جدیدترین روش‌های ترمیم ترک در سازه‌های بتنی است. در این روش از باکتری‌های خاصی که مقاومت زیادی در برابر محیط‌های قلیایی دارنده استفاده می‌شود .این باکتری‌ها تا زمان شکل‌گیری ترک در بتن به حالت اسپور (اصطلاحاً در خواب) باقی می‌مانند و پس از ایجاد ترک شروع به فعالیت کرده و به مقدار زیادی رسوب کربنات کلسیم تولید می‌کنند به طوری که بتن قادر به ترمیم ترک‌های خود خواهد بود. طبق تحقیقات گزارش شده اموبولایزیشن یک رویکرد کارآمد برای بتن‌های خودترمیم مبتی بر باکتری است; که به صورت کپسول حاوی باکتری یا مواد مغذی به ماتریس بتن اضافه می‌شود تا ظرفیت تولید مواد معدنی باکتریایی با راندمان بالا در طی یک دوره‌ی زمانی حفظ شود. مراحل عملکرد این روش و ترمیم ترک در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است [۳۵].



شکل ۱ – عملکرد خودترمیمی با استفاده از روش اموبولایزیشن باکتری ها [۳۵]

نتایج آزمایش میکروسکوب الکترونیکی SEM در شکل ۲ نشان دهنده فعالیت باکتری به گونه‌ای که کریستال‌های کلسیت شکل گرفته ماتریس بتن و به خوبی قابل رویت هستند[۳۶].

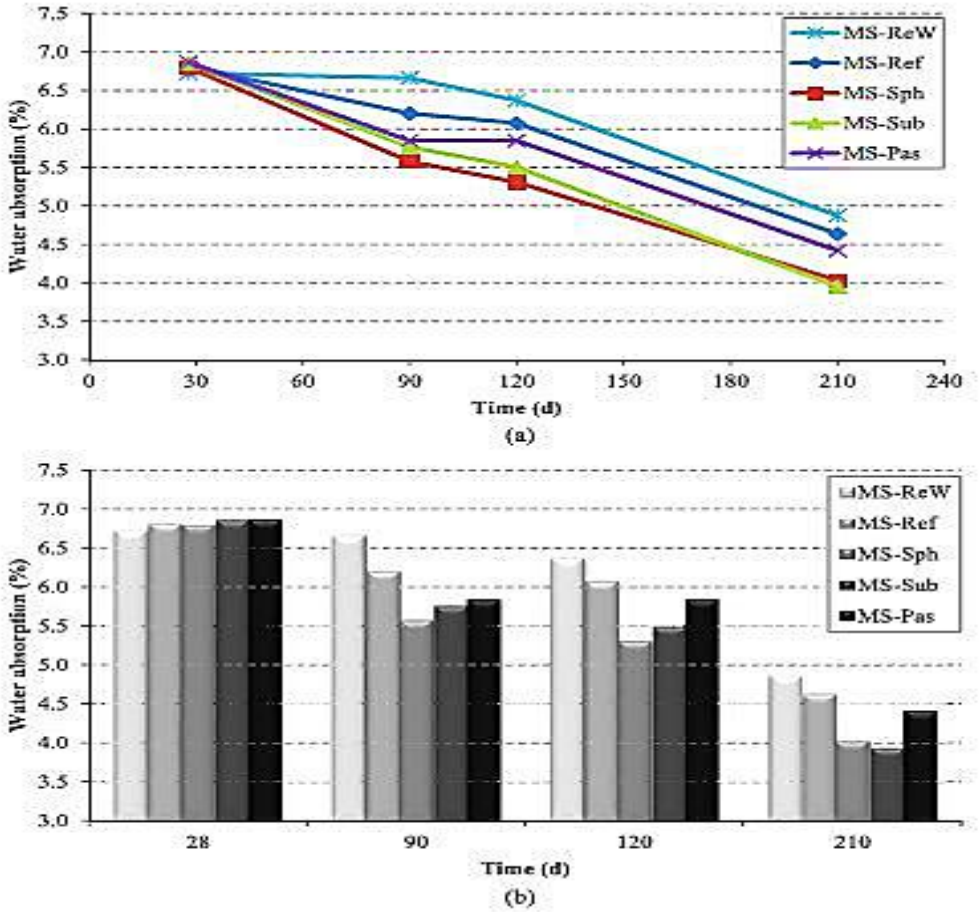


شکل ۲ – تصویر SEM رسوب کلسیم کربنات در ماتریس بتن [۳۶].

۴– تاثیر باکتری در دوام بتن در محیط های مخرب

خوردگی فولاد بتن‌های مسلح به دلیل جذب یون کلرید یکی از شایع‌ترین حملات محیطی است که موجب تخریب سازه‌های بتنی می‌شود میزان جذب یون کلرید به بتن عمدتا به ساختار منافذ داخلی بتن بستگی دارد. ساختار منافذ به نوبه خود به سایر عوامل مانند طرح اختلاط، شرایط نگه‌داری، درجه هیدراتاسیون، استفاده از مواد افزودنی، سیمان و روش ساخت بستگی دارد [۳۷, ۳۸]. نصوحیان و مستوفی نژاد تاثیر عملکرد باکتری روی سطح را برای محافظت در برابر نفوذ یون‌های سولفات ارزیابی کردند. درآزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT[1]) شاهد بهبود مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌کلر بوده‌ایم. به طوری که مقدار بار الکتریکی گذرانده شده از نمونه‌های بتنی حاوی باکتری ۱۱.۷ درصد کمتر از نمونه‌های کنترلی بوده است [۳۹]. همان‌طور که در شکل۳ نشان داده شده است جذب آب نمونه‌هایی که در محیط سولفاته قرار گرفته‌اند به طور مداوم در طول زمان برای همه گروه‌ها کاهش می‌یابد. همانطور که انتظار می رفت متوسط جذب آب نمونه‌های حاوی باکتری کمتر از نمونه‌های کنترلی بدون باکتری بوده است.

[1] Rapid Chloride Permeability Test



شکل ۳- جذب آب نمونه های بتن با و بدون باکتریایی در معرض محیط سولفاته در زمان های مختلف و سنین مختلف [۳۹]

۵- مقاومت فشاری

در اینجا به ذکر نتایج آزمایشگاهی محققان، حاصل از کاربرد این باکتری ها در مخلوط بتن و تأثیر آن‌ها برمقاومت نمونه‌های بتنی می پردازیم .ابعاد نمونه مکعبیmm ۱۰۰ و نمونه استوانه ایی با قطرmm۱۰۰و ارتفاعmm ۲۰۰ می باشد که ۲۸ روز در حوضچه آب قرار داشته اند. نتایج حاصله در جداول ۱ و ۲ قابل مشاهده است [۴۰].

جدول ۱ - نتایج آزمایش فشاری با و بدون اضافه کردن باکتری باسیلوس اسفریکوس

درصد افزایش مقاومت	مقاومت فشاری نمونه ی مکعبی بتنباکتریایی N/mm^2	مقاومت فشاری نمونه ی مکعبی بتن معمولی N/mm^2	روز
۳۰.۷۶	۲۵.۱۶	۱۹.۲۴	۳
۴۶.۱۵	۳۴.۵۸	۲۳.۶۶	۷
۳۲.۲۱	۴۵.۷۲	۳۴.۵۲	۲۸

جدول ۲ - نتایج آزمایش کششی با و بدون اضافه کردن باکتری باسیلوس اسفریکوس

درصد افزایش مقاومت	مقاومت فشاری نمونه ی مکعبی بتنباکتریایی N/mm^2	مقاومت فشاری نمونه ی مکعبی بتن معمولی N/mm^2	روز
۱۳.۷۵	۴.۳۰	۳.۷۸	۳
۱۴.۲۸	۵.۲۸	۴.۶۲	۷
۱۸.۳۵	۵.۷۴	۴.۸۵	۲۸

۶- نتیجه‌گیری

استفاده از باکتری در مهندسی برای اهداف گوناگون از جمله، اصلاح بیولوژیکی خاک‌های آلوده، تعمیر بناهای آهکی و تحکیم ماسه کاربرد داشته است. هم‌چنین در سازه‌های سیمانی به‌خصوص بتن و مصالح ساختمانی در سال‌های اخیر مورد توجه خاص محققین قرار گرفته است. گاهی عدم دوام بتن منجر به هزینه‌های تعمیراتی کلانی می‌شود. در نتیجه تعمیر ترک‌های به وجود آمده، کاهش خلل‌وفرج بتن با روش‌های مرسوم شیمیایی موجود نیازمند صرف وقت، هزینه کلان و دارای جنبه‌های مضر برای محیط زیست و سلامتی می‌باشد. بررسی ویژگی‌ها و دوام بتن در مقیاس نانو ذرات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا دست-یابی به روشی جدید برای ساخت بتنی هوشمند و دوست‌دار محیط زیست با فن‌آوری خودترمیمی که در محیط‌های مخرب و دور از دسترس قادر به نگه دار ی و ترمیم خود باشد مورد توجه می‌باشد. این روش در بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن بسیار موثر بوده است. چه بسا در آینده از این روش در بازسازی و تعمیر سازه‌ها، بتن ریزی در حجم زیاد و کار خارج از آزمایشگاه را شاهد باشیم. استفاده از این روش در کاهش هزینه تعمیر، نگه‌داری و افزایش عمر سازه‌های بتنی بسیار موثر خواهد بود. از این رو تهیه استانداری برای طرح اختلاط بتن باکتریایی مورد انتظار می‌باشد.

۷- مراجع

1. Reddy, M. S. (2013). Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. Frontiers in microbiology, 4, 314.

2. Sunil Pratap Reddy, S. (2010). A study on the performance of the bacterial concrete embedded wit Bacillus Subtilis.

3. Song, H.-W., & Saraswathy, V. (2007). Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-A. Int. J. Electrochem. Sci, 2, 1-28.

4. Kawadkar, K., & Krishnamoorthy, S. (1981). Behaviour of cement concrete under common salt solution both under hydrostatic and atmospheric pressures. Cement and concrete Research, 11(1), 103-113.

5. Zhang, M., Chen, J., Lv, Y., Wang, D., & Ye, J. (2013). Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate–chloride ions. Construction and Building Materials, 39, 26-32.

6. Li, F., Yuan, Y., & Li, C.-Q. (2011). Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack. Construction and Building Materials, 25(10), 3878-3885.

7.Shang, H.-s., & Song, Y.-p. (2008). Behavior of air-entrained concrete under the compression with constant confined stress after freeze–thaw cycles. Cement and Concrete Composites, 30(9), 854-860.

8.Jacobsen, S., Gran, H. C., Sellevold ,E. J., & Bakke, J. A. (1995). High strength concrete—freeze/thaw testing and cracking. Cement and concrete Research, 25(8), 1775-1780.

9.Wang, Y., Yu, G., Deng, M., Tang, M., & Lu, D. (2008). The use of thermodynamic analysis in assessing alkali contribution by alkaline minerals in concrete. Cement and Concrete Composites, 30(4), 353-359.

10.Song, H.-W., Kwon, S.-J., Byun, K.-J., & Park, C.-K. (2006). Predicting carbonation in early-aged cracked concrete. Cement and concrete Research, 36(5), 979-9.۸۹

11.Van Tittelboom, K., De Muynck, W., De Belie, N., & Verstraete, W. (2009). Bacteria protect and heal concrete and stone. Paper presented at the 1st WTA International PhD Symposium: building materials and building technology to preserve the built heritage International Association for Science and Technology of Building Maintenance and the Preservation of Monuments (WTA).

12.Aggelis, D., & Shiotani, T. (2007). Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements. Cement and Concrete Composites, 29(9), 700-711.

13.Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., & Verstraete, W. (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete. Cement and concrete Research, 40(1), 157-166.

14. De Muynck, W., De Belie, N., & Verstraete, W. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. Ecological engineering, 36(2), 118-136.

15. Boquet, E., Boronat, A., & Ramos-Cormenzana, A. (1973). Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon. Nature, 246(5434), 527-529.

16. Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO 3. Soil Biology and Biochemistry, 31(11), 1563-1571.

17. Bang, S. S., Galinat, J. K., & Ramakrishnan, V. (2001). Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized Bacillus pasteurii. Enzyme and microbial technology, 28(4), 404-409.

18. Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2013). Bacillus megaterium mediated mineralization of calcium carbonate as biogenic surface treatment of green building materials. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 29(12), 2397-2406.

19. Wang, J., Ersan, Y. C., Boon, N., & De Belie, N. (2016). Application of microorganisms in concrete: a promising sustainable strategy to improve concrete durability. Applied microbiology and biotechnology, 100(7), 2993-3007.

20. Wu, M., Johannesson, B., & Geiker, M. (2012). A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. Construction and Building Materials, 28(1), 571-583.

21. Le Metayer-Levrel, G., Castanier, S., Orial, G., Loubiere, J.-F., & Perthuisot, J.-P. (1999). Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. Sedimentary geology, 126(1-4), 25-34.

22. Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., & Bang, S. S. (2001). Remediation of concrete using micro-organisms. ACI Materials Journal-American Concrete Institute, 9 .

23. De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., & Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. Cement and concrete Research, 38(7), 1005-1014.

24. Achal, V., Pan, X., & Özyurt, N. (2011). Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation. Ecological engineering, 37(4), 554-559.

25. Kim, H., Park, S., Han, J., & Lee, H. (2013). Microbially mediated calcium carbonate precipitation on normal and lightweight concrete. Construction and Building Materials, 38, 1073-1082.

26. Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecological engineering, 36(2), 230-235.

27. Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2012). Improvement in strength properties of ash bricks by bacterial calcite. Ecological engineering, 39, 31-3.

28. Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Verstraete, W. (2012). Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. Construction and Building Materials, 26(1), 532-540.

29. Achal, V., Mukerjee, A., & Reddy, M. S. (2013). Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. Construction and Building Materials, 48, 1-5.

30. Alghamri, R., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016). Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. Construction and Building Materials, 124, 910-921.

31. Williams, S. L., Kirisits, M. J., & Ferron, R. D. (2017). Influence of concrete-related environmental stressors on biomineralizing bacteria used in self-healing concrete. Construction and Building Materials, 139, 611-618.

32. Balam, N. H., Mostofinejad, D., & Eftekhar, M. (2017b). Use of carbonate precipitating bacteria to reduce water absorption of aggregates. Construction and Building Materials, 141, 565-577.

33. Balam, N. H., Mostofinejad, D., & Eftekhar, M. (2017a). Effects of bacterial remediation on compressive strength, water absorption, and chloride permeability of lightweight aggregate concrete. Construction and Building Materials, 145, 107-116.

34. Al-Salloum, Y., Hadi, S., Abbas, H., Almusallam, T., & Moslem, M. (2017). Bio-induction and bioremediation of cementitious composites using microbial mineral precipitation–A review. Construction and Building Materials,154,857-876 .

35. Zhang, J., Liu, Y., Feng, T., Zhou, M., Zhao, L., Zhou, A., & Li, Z. (2017). Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. Construction and Building Materials, 148, 610-617.

36. Wang, J., Soens, H., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. Cement and concrete Research, 56, 139-152.

37. Vijay, K., Murmu, M., & Deo, S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete–A review. Construction and Building Materials, 152, 1008-1014.

38. Wang, J., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. Construction and Building Materials, 68, 110-119.

39. Nosouhian, F., Mostofinejad, D., & Hasheminejad, H. (2015). Influence of biodeposition treatment on concrete durability in a sulphate environment. Biosystems Engineering, 133, 141-152.

40. Gavimath, C., Mali, B., Hooli, V., Mallpur, J., Patil, A., Gaddi, D., . . . Ravishankera, B. (2012). Potential application of bacteria to improve the strength of cement concrete. Int. J. Adv. Biotechnol. Res, 3(1), 541-544.