ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰ زمان چاپ: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰

بررسی و تحلیل بهبود دوام و اصلاح ترک های سازه های بتنی توسط عملیات بیوژنیک

امیر شاطری

دانشجوی مقطع کارشناسی پیوسته مهندسی برق موسسه آموزش عالی آپادانا شیراز

Amir.sh۱۹۷۷۹۹@gmail.com

چکیده

رسوب کربنات کلسیم ناشی از میکروبی یک فرآیند بیولوژیکی طبیعی است که کاربردهای مختلفی در اصلاح و بازسازی طیف وسیعی از مصالح ساختمانی دارد. در مطالعه و مقاله حاضر نقش باکتری باسیلوس sp در مورد خواص دوام و اصلاح ترک در سازه های سیمانی مورد مطالعه قرار گرفت. "Biocement" القا شده توسط باسیلوس sp منجر به کاهش بیش از ۵۰ درصدی تخلخل نمونه‌های ملات می‌شود، در حالی که نفوذپذیری کلرید بتن از «متوسط» به «بسیار کم» تغییر می‌کند که با آزمایش نفوذپذیری سریع کلرید نشان داده می‌شود. این باکتری با موفقیت ترک های شبیه سازی شده اعماق شامل ۲۷,۲ میلی متر در ملات سیمان را با افزایش مقاومت فشاری تا ۴۰ درصد نسبت به کنترل بهبود بخشید. نتایج به وضوح نشان داد که رسوب کربنات کلسیم ناشی از میکروبی می تواند برای مصالح ساختمانی مختلف برای اصلاح ترک ها و افزایش دوام استفاده شود.

کلمات کلیدی: بیوسمان، باسیلوس sp، خود ترمیمی، اوره آز، ناشی از میکروب، بارش کلسیت، تخلخل، تست نفوذ سریع کلرید

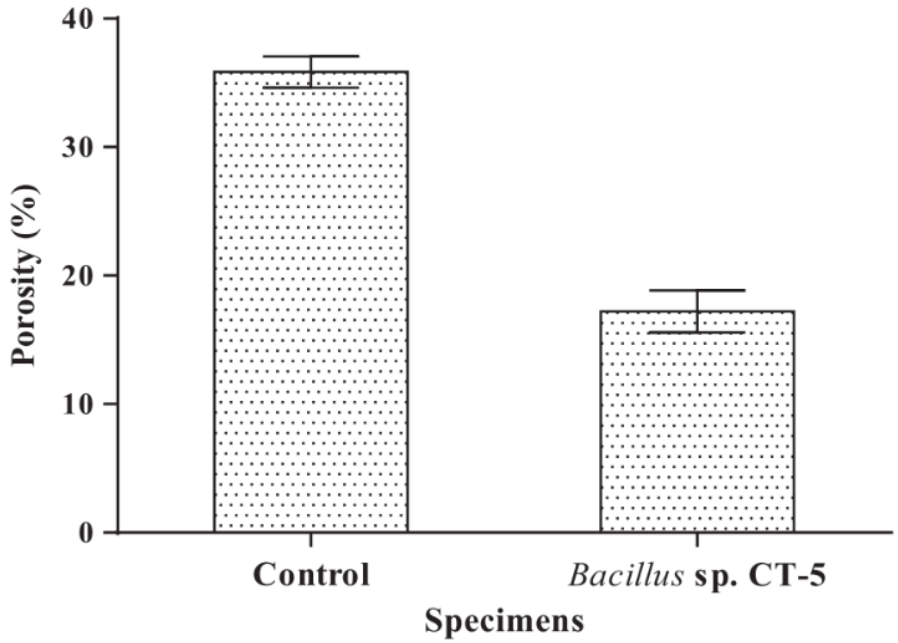
۱- مقدمه

بیشتر جمعیت جهان شهرنشین می شوند و در نتیجه استفاده از بتن در سراسر جهان به سرعت در حال افزایش است. این ماده در حال حاضر پرمصرف ترین ماده ساخت بشر در جهان است زیرا نسبتاً ارزان است و مواد اولیه آن (ماسه / شن / آب) به راحتی در دسترس است. با این حال، دوام بتن ممکن است به دلیل بسیاری از عوامل ساخته شده توسط انسان و پیامدهای طبیعی به خطر بیفتد. انتقال مایعات تهاجمی از جمله آب و مواد مضر به داخل بتن باعث تخریب مواد سیمانی می شود. بنابراین، آرماتورها در معرض محیط خورنده قرار می گیرند و زوال آن تسریع می شود. بنابراین، ترمیم ترک‌های بتن می‌تواند به طور موثر عمر مفید سازه‌ها را افزایش دهد [۱]. ساختار منافذ بتن اجازه نفوذ مواد شیمیایی مضر را می دهد. بتن همچنین به دلیل عوامل متعددی مانند انقباض، گرمای بیش از حد و آب، ذوب یخ، تنش های کششی و خزش مستعد ترک خوردن است. ترک خوردگی از طریق

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

ورود آسان رطوبت و یون‌هایی که با آرماتورهای موجود در بتن واکنش می‌دهند و تنش‌های انبساطی ایجاد می‌کنند که منجر به پوسته شدن می‌شود، تخریب بیشتر را تسریع می‌کند. در حال حاضر، اصلاح ترک ها از طریق اعمال پوشش سطحی عمدتاً با استفاده از پلیمرهای مصنوعی انجام می شود. چنین موادی سمی و گران هستند. آنها همچنین از مسائلی مانند سازگار نبودن با محیط زیست، حساس به اشعه ماوراء بنفش، تخریب با افزایش سن، نیاز به نگهداری مداوم و ترک خوردگی به دلیل انبساط حرارتی متفاوت رنج می برند [۲،۳]. گاهی اوقات در مناطقی که امکان تعطیلی کارخانه وجود ندارد یا برای انسان خطرناک است، نمی توان تعمیر کرد. یک سیستم ترمیم خودزا که ترک‌ها را با موادی مشابه بتن اصلاح می‌کند و به جای عملیات سطحی، در داخل ترک عمیق‌تر می‌شود، سود زیادی خواهد داشت. در سال های اخیر، "Biocement" که از باکتری های قلیایی دوست، بستر و محلول های یون کلسیم تشکیل شده است، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. برای اتصال ذرات سست به رسوب کربنات کلسیم ناشی از میکروبی (MICP) در اطراف ذرات منفرد و در تماس ذره-ذره متکی است [۱،۳]. فرآیند MICP به باکتری های تولید کننده اوره آز که در طبیعت در همه جا وجود دارند بستگی دارد. در طول فعالیت اوره آز میکروبی، ۱ مول اوره به صورت درون سلولی به ۱ مول آمونیاک و ۱ مول کاربامات هیدرولیز می شود که به طور خود به خود هیدرولیز می شود و ۱ مول اضافی آمونیاک و اسید کربنیک تشکیل می دهد [۴]. این محصولات متعاقباً در آب متعادل می شوند و بی کربنات و ۲ مول یون آمونیوم و هیدروکسید تشکیل می دهند و باعث افزایش pH و تشکیل یون های کربنات می شوند. در نهایت این واکنش منجر به رسوب کربنات کلسیم در اطراف سلول های باکتری در حضور یون های کلسیم می شود.



شکل ۱. اندازه گیری تخلخل کل نمونه های ملات شاهد و مقایسه آنها با نمونه های تهیه شده با Bacillus sp CT-۵

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

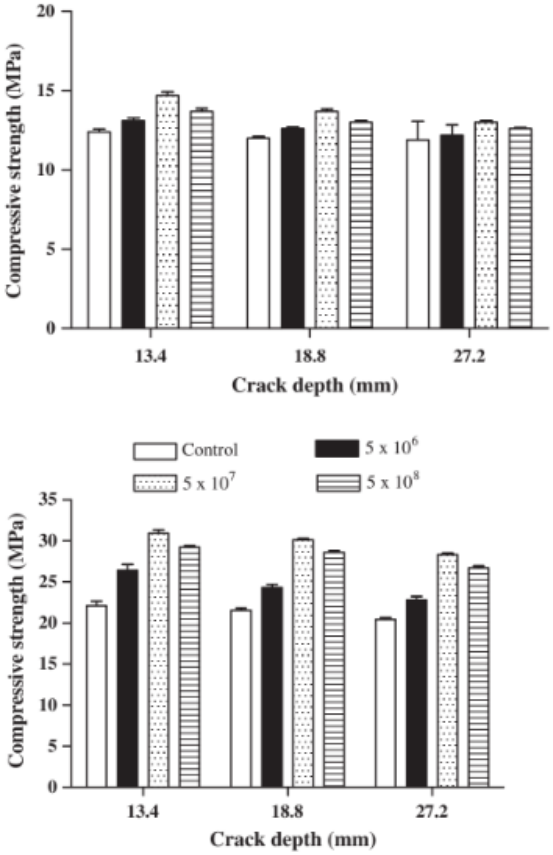
ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

واکنش های کلی را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

(۱)

$$CO(NH_2)+H_2O \rightarrow NH_2COOH + NH_3NH_2COOH + H_2O$$
$$\rightarrow NH_3 + H_2CO_3H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+ 2NH_3 + 2H_2O \leftrightarrow 2NH_4^+ + 2OH^- HCO_3^- + H^+ + 2NH_4^+ + 2OH^-$$
$$\leftrightarrow CO_3^{2-} + 2NH_4^+ + 2H_2OCa^{2+} + Cell \rightarrow Cell - Ca^{2+} Cell - Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow Cell - CaCO_3^-$$

Biocement به عنوان یک محصول متابولیک جدید با تأثیر مثبت در مهندسی عمران و ساختمان در نظر گرفته شده است. نشان داده شده است که دوام مصالح ساختمانی، تحکیم ستون های شنی، و تعمیر بناهای سنگ آهکی و بتن را افزایش می دهد [۵-۱۳]. از این فرآیند می توان در ترمیم ترک ها نیز استفاده کرد. در مطالعه حاضر، ما توانایی بیوسمانتاسیون یک سویه باکتریایی باسیلوس sp را نشان می‌دهیم. CT-۵ برای آب بندی ترک ها. سویه باکتریایی برای کاهش تخلخل و همچنین نفوذپذیری کلرید از مواد مبتنی بر سیمان استفاده شد. بعداً این کرنش در ترک های بتن اعمال شد. مقاومت فشاری اندازه‌گیری و با نمونه‌هایی که با سلول‌های باکتریایی تیمار نشده بودند مقایسه شد. علاوه بر این، فرآیند MICP با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تجسم تشکیل رسوبات کلسیتی در شکاف‌های روی یا اطراف سلول‌های باکتریایی مورد ارزیابی قرار گرفت.



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شکل ۲. مقاومت فشاری مکعب های ملات در: (a) ۷ روز و (b) ۲۸ روز با ترک های پر شده با غلظت های مختلف Bacillus sp CT-۵.

۲- روش های تجربی

۲-۱- میکروارگانیسم ها و شرایط کشت

باسیلوس sp؛ CT-۵ در سراسر مطالعه حاضر استفاده شد. این سویه قبلاً از سیمان جدا شده و روی محیط Agar Nutrient پی اچ ۸,۰ در آزمایشگاه نگهداری شده بود [۱۴]. محیط زیست براث اوره (NBU) (۸ گرم براث مواد مغذی، ۲ درصد اوره و ۲۵ میلی مولار کلسیم کلسیم) برای رشد باکتری استفاده شد [۱۵]. کشت باکتری در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد تحت شرایط تکان دادن (۱۳۰ دور در دقیقه) کشت شد.

۲-۲- تهیه مکعب ملات سیمان

یک قالب مکعبی با ابعاد ۷۰,۶ میلی متر در ۷۰,۶ میلی متر در ۷۰,۶ میلی متر طبق استاندارد IS ۴۰۳۱ (۱۹۸۸) تهیه شد. شن و ماسه رودخانه طبیعی تمیز، خشک، به خوبی درجه بندی شده محلی به عنوان سنگدانه ریز استفاده شد. سیمان پرتلند معمولی مطابق با دفتر استاندارد هند ۸۱۱۲ (BIS) استفاده شد. نسبت سیمان به ماسه ۱ به ۳ (از نظر وزن) و نسبت آب به سیمان ۰,۴۷ بود. ماسه و سیمان به طور کامل با کشت رشد یافته جدایه باکتریایی با OD۶۰۰ ۱,۰ مخلوط شدند. نسبت آب به کشت باکتری نیز در ۰,۴۷ حفظ شد. مکعب ها در دستگاه ارتعاشی ریخته گری و فشرده شدند. پس از قالب گیری، تمام نمونه ها در محیط NBU در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی گراد) تا زمان تست فشرده سازی در روزهای ۷ و ۲۸ پخت شدند. رسانه ها در یک بازه زمانی منظم ۷ روزه پر شدند. نمونه های کنترل (بدون باکتری) نیز به روش مشابه تهیه شد.

۲-۳- تخلخل کل

مکعب های ملات Al۱ (۷۰,۶ میلی متر در ۷۰,۶ میلی متر در ۷۰,۶ میلی متر) به مدت ۲۴ ساعت در آب لوله کشی غوطه ور شدند قبل از اندازه گیری جرم خشک سطح اشباع از آب و جرم آنها در آب. هر نمونه روی یک پایه مش در حدود ۱۰۰ میلی لیتر آب در هر نمونه قرار می گیرد. این شرایط تضمین می‌کند که تمام طرف‌های نمونه در معرض آب بوده و آب کافی برای اشباع کامل وجود دارد. توده خشک سطح اشباع شده با آب با برداشتن هر نمونه از آب، پاک کردن آب اضافی با یک حوله مرطوب و وزن کردن بلافاصله بخش تعیین شد. جرم آن در آب با قرار دادن نمونه خشک سطح اشباع شده با آب در یک سبد سیمی غوطه ور در آب تعیین شد. جرم بخش با کم کردن جرم سبد موجود در آب به تنهایی از جرم سبد موجود در آب با بخش موجود در آن محاسبه شد. پس از اتمام توزین، نمونه ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند تا تمام آب قابل تبخیر خارج شود. این بازه زمانی از پایش جرم آب از دست رفته با زمان از ۱۰ نمونه مشابه تعیین شد. وزن مجدد این نمونه های خشک شده توده خشک کوره را فراهم می کند. از تمام این اندازه‌گیری‌ها، تخلخل کل (P) برای هر نمونه به صورت زیر محاسبه شد:

$$P(\%) = \frac{(m_{sat} - m_{dry})}{(m_{sat} - m_{water})} \times 100 \qquad (۲)$$

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

در جایی که m_{sat} توده خشک سطحی اشباع از آب است، m_{water} جرم معلق در آب و m_{dry} جرم خشک کوره است.

۲-۴- تست نفوذپذیری سریع کلرید (RCPT)

این آزمایش مطابق با ASTM C۱۲۰۲ [۱۶] با استفاده از ابزار PROOVE'it (دانمارک) انجام شد. نمونه های بتن استوانه ای با قطر ۱۰۰ میلی متر و ضخامت ۵۰ میلی متر با و بدون Bacillus sp CT-۵ تهیه شد. نسبت سیمان / ماسه / سنگدانه درشت ۱:۱,۳۲:۳,۲۹ بود. پس از قالب گیری، تمامی نمونه ها به مدت ۲۸ روز در محیط NBU کیور شدند و سپس تست نفوذپذیری کلرید انجام شد. تمام نمونه ها به مدت ۱۲ تا ۱۶ ساعت در هوا خشک شدند و در معرض اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت قرار گرفتند. کل باری که از نمونه ها عبور کرد در پایان ۶ ساعت تعیین شد (بر حسب کولن بیان می شود). نفوذپذیری کلرید به طور مستقیم با بار عبوری متناسب است.

۲-۵- تست ترمیم ترک

مکعب ها (۷۰,۶میلی متر در ۷۰,۶ میلی متر در ۷۰,۶ میلی متر) با یک برش در مرکز برای شبیه سازی یک ترک ارائه شدند. عرض برش به طور متوسط ۳,۰ میلی متر (۰,۱۱۸ اینچ) و عمق ها ۱۳,۴، ۱۸,۸ و ۲۷,۲ میلی متر [۰,۵۲۷، ۰,۷۴، و ۱,۰۷ اینچ] بود. ترک های موجود در مکعب ها با سلول های باکتریایی همراه با ماسه الک شده طبیعی اصلاح شدند. مسدود شدن میکروبی ترک های بتن با غلظت های مختلف سلول های باکتریایی (۵×۱۰^{۶}، ۵×۱۰^{۷} و ۵×۱۰^{۸} سلول در هر میلی لیتر) مخلوط با ماسه مورد بررسی قرار گرفت. ترک‌های نمونه‌های شاهد با ماسه و آب الک شده طبیعی پر شدند. هر دو مجموعه مکعب در محیط های حاوی اوره و کلسیم کلسیم به مدت ۷ و ۲۸ روز پخت شدند. محیط پس از فاصله زمانی ۷ روز جایگزین شد. رسوب کربنات کلسیم به صورت دوره ای به صورت بصری کنترل شد. در پایان نوردهی، مکعب ها از نظر فشرده سازی مورد آزمایش قرار گرفتند و همچنین بر روی میکروسکوپ های الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

۲-۶- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

نمونه ها از ناحیه ترک تلفیقی برداشته شدند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق به طور کامل خشک شدند. مسدود شدن میکروبی ترک های بتن توسط SEM (Zeiss EVO-۵۰؛ Carl Zeiss؛ Oberkochen، آلمان) در ولتاژهای شتاب دهنده از ۱۵ تا ۳۵ کیلو ولت مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها قبل از بررسی توسط SEM با پوشش Sputtercoating Emitech K۵۷۵ Emitech، Ashford، بریتانیا پوشیده شدند. تمام آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد و داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GraphPad Priism (نسخه ۴,۱) (نرم‌افزار GraphPad، Inc.، La Jolla، کالیفرنیا، ایالات متحده آمریکا) با تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) تجزیه و تحلیل شدند.

جدول ۱. توزیع کلاس نفوذپذیری بر اساس گزارش RCPT کنترل و Bacillus sp. نمونه های بتن اصلاح شده با CT-۵.

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

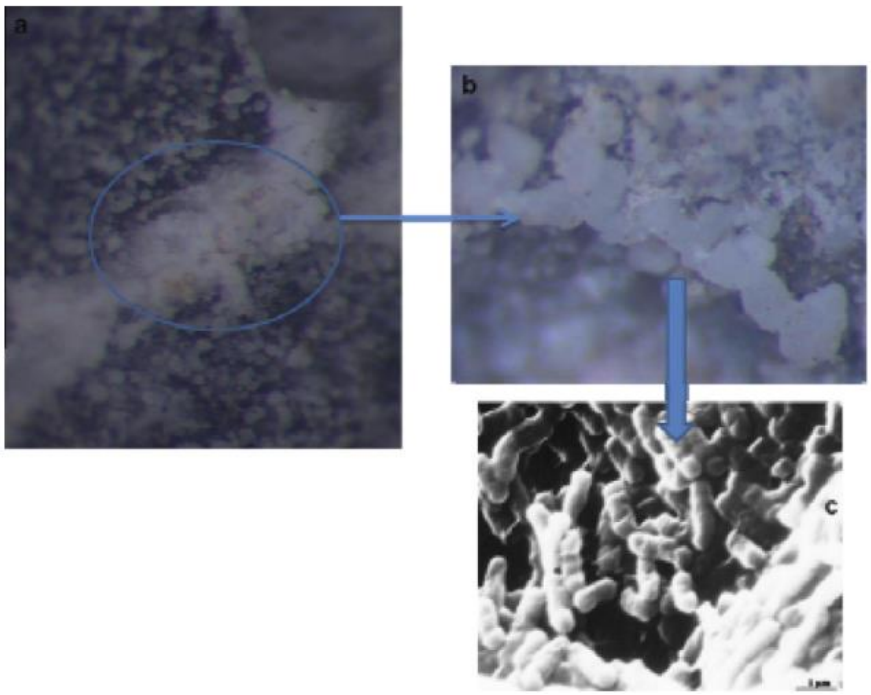
ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

کلاس نفوذپذیری	میانگین شارژ	۳	۲	۱	رفتار
در حد متوسط	۳۱۷۷,۰۰	۳۳۹۶	۳۲۴۵	۲۸۹۰	کنترل باسیلوس
خیلی کم	۹۷۵,۳۳	۱۰۸۵	۸۱۸	۱۰۲۳	sp

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بیوسمانتاسیون و تخلخل

بیوسمانتاسیون به وضوح بر روی نمونه های ملات تیمار شده با سلول های باکتریایی به شکل رسوب در طول پخت مشاهده شد. هنگامی که نمونه های ملات با استفاده از Bacillus sp تهیه شدند، بیش از ۵۰ درصد کاهش در تخلخل یافت شد. CT-۵ (شکل ۱). رسوب لایه ای از کریستال های کربنات کلسیم روی سطح باعث کاهش نفوذ می شود [۵]. کاهش جذب آب منجر به کند شدن روند هوازدگی می شود. یک لایه نازک ترمیم کننده کلسیت می تواند به عنوان یک پوست کلسیتی طبیعی روی سطح بتن عمل کند. اندازه گیری تخلخل کل نیز نشان دهنده ظرفیت جذب آب نمونه ها است. استفاده از باکتری ها و منبع کلسیم می تواند منجر به تشکیل یک لایه محافظ بر روی مواد سیمانی شود و آنها را از تخریب محافظت کند [۷]. بسیاری از گزارش‌ها همچنین تأیید می‌کنند که استفاده از باکتری‌ها می‌تواند به کاهش نفوذپذیری آب بتن کمک کند [۱،۱۷-۱۹]. لایه کلسیت که از نظر بیولوژیکی توسط فعالیت یورولیتیک تولید می شود، منافذ سطح بتن را مسدود می کند تا تخلخل را کاهش دهد.



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شکل ۳. تصویر میکروسکوپی از: (a) ناحیه اصلاح شده ترک، (b) بخش بزرگ شده منطقه اصلاح شده ترک که بارش کلسیت را نشان می دهد، و (c) میکروگراف الکترونی که باکتری های میله ای شکل را نشان می دهد که در ناحیه اصلاح شده ترک جاسازی شده اند.

۳-۲- تست نفوذپذیری سریع کلرید (RCPT)

RCPT بر اساس ASTM C۱۲۰۲ [۱۶] انجام شد. عملکرد نمونه های تهیه شده با سلول های باکتریایی با نمونه های شاهد مقایسه شده است (جدول ۱). RCPT سهولت عبور بار الکتریکی بتن را اندازه گیری می کند و نشانه ای از مقاومت آن در برابر نفوذ یون کلرید را نشان می دهد. نوع کلاس نفوذپذیری برای نمونه های بتن شاهد متوسط بود در حالی که وقتی نمونه ها با Bacillus sp CT-۵، "بسیار کم" بود. برای نمونه شاهد، میانگین بار عبوری ۳۱۷۷ درجه سانتیگراد بود، در حالی که برای نمونه تهیه شده با سلولهای باکتریایی، بار عبوری ۹۷۵,۳ درجه سانتیگراد بود. کاهش در این مقدار بار کل نشان دهنده مقاومت بهتر در برابر نفوذ یون کلرید و نفوذپذیری کمتر است. نفوذپذیری کمتر کلرید نمونه های حاوی سلول های باکتریایی در نتیجه ریزساختار متراکم تر ناشی از MICP است. واکنش باکتریایی ممکن است باعث کاهش منافذ مویرگی و مسدود شدن منافذ شود که باعث کاهش انتقال یون کلرید در بتن می شود. بهبود سطح مشترک خمیر سیمان سنگدانه توسط MICP نیز ممکن است در کاهش نفوذپذیری یون کلرید نقش داشته باشد. همچنین مشاهده شد که جریان پس از ۱ دقیقه در نمونه های شاهد ۷۰,۶۷ میلی آمپر بود در حالی که برای نمونه های تهیه شده با Bacillus sp CT-۵ ۳۳,۶۷ میلی آمپر بود. جریان به طور قابل توجهی بالاتری که پس از ۱ دقیقه در نمونه های کنترل عبور می کند، نشانگر این است آنها ممکن است اجازه دهند یون های کلرید بیشتری از خود عبور کنند. دوام بتن مسلح به شدت به محافظت از آرماتورهای فولادی با پوشش بتنی بستگی دارد. برای کنترل تخلخل بتن، نسبت آب به چسب در سطح پایینی حفظ می شود. با این حال، نسبت آب به چسب کم می تواند بر کارایی، گرمای هیدراتاسیون و انقباض بتن تأثیر منفی بگذارد. MICP گزینه ای برای بهبود دوام سازه های بتنی با کنترل تخلخل از طریق رسوب کلسیت فراهم می کند. هر دو بتن تازه و قدیمی را می توان با این روش درمان کرد. همچنین میزان نفوذ کلرید به بتن تحت تأثیر ظرفیت اتصال کلرید بتن است. نتایج آزمایشگاهی ثابت کرد که MICCP می تواند مقاومت نفوذپذیری سطح را تا حد زیادی بهبود بخشد و با تولید یک لایه محافظ در برابر حمله یون های مضر بر روی سطح مواد مبتنی بر سیمان مقاومت کند [۱۰]. علاوه بر این، نتایج نشان داد که لایه کربنات کلسیم به دست آمده در شرایط فعالیت باکتریایی بالا، غلظت مناسب $Ca^{۲+}$ و افزودن $Ca^{۲+}$ قبل از اوره به مخلوط واکنش، می تواند مقاومت نفوذ آب یا اسید یا کلرید سطح نمونه را به طور قابل توجهی بهبود بخشد.

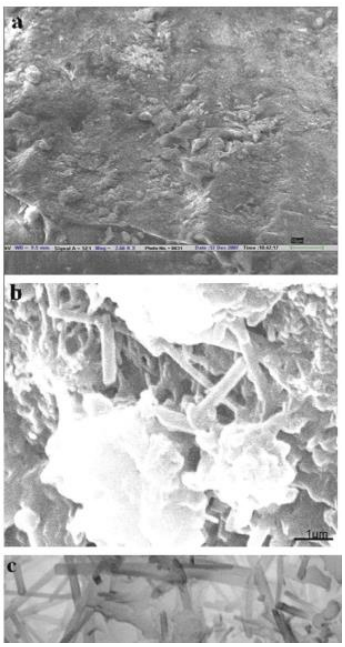
۳-۳- توانایی ترمیم ترک سلول های باکتریایی و مقاومت فشاری

مقاومت فشاری مکعب ملات سیمان با شبیه سازی ترک‌های اعماق مختلف برای تعیین تأثیر آن بر مقاومت بتن مورد آزمایش قرار گرفتند. ترک ها با شن و ماسه و کشت باکتری ترمیم شدند. مقاومت فشاری برای مکعب های ملات که حاوی سلول های میکروبی بدون توجه به غلظت سلول های استفاده شده بود به طور قابل توجهی افزایش یافته بود، اما غلظت ۵۱۰۷ - سلول در میلی متر مکعب برای القای حداکثر مقاومت فشاری یافت شد. همانطور که انتظار می رفت، مقاومت فشاری کلی مکعب های

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

ملات سیمان پرتلند با افزایش عمق ترک بدون توجه به حضور میکروارگانیسم ها کاهش یافت. مشاهدات مشابهی توسط Ramachandran و همکاران گزارش شده است. [۱۱]. همچنین می توان گزارش کرد که اثر ترکیبی اسپورهای باکتریایی زنده و لاکتات کلسیم تعبیه شده در کپسول های رسی متخلخل به طور قابل توجهی رسوب مواد معدنی را بر روی سطوح ترک افزایش داده و منجر به بهبود ترک ها با حداکثر عرض ۰,۴۶ میلی متر می شود. Pacheco-Torgal و Labrincha [۲۱] همچنین پیشنهاد کردند که بیومرینالیزاسیون یک تکنیک ترمیم ترک با سمیت کم است. تفاوت مقادیر آزمایش بین نمونه‌های کنترل فاقد سلول‌های باکتریایی و نمونه‌های ترک مملو از سلول در شکل ۲ نشان داده شده است. افزایش قدرت در حضور Bacillus sp CT-۵ در مکعب های تهیه شده با ترک ۱۳,۴ میلی متری که اصلاح میکروبی آن مقاومت فشاری را تا ۴۰ درصد نسبت به کنترل افزایش داد، بیشترین اهمیت را داشت. اصلاح میکروبی مقاومت فشاری عمیق ترین ترک (۲۷,۲ میلی متر) را ۳۷ درصد در ۲۸ روز افزایش داد. صرف نظر از عرض ترک، مقاومت فشاری به طور قابل توجهی در روزهای ۷ و ۲۸ هنگامی که با ۵۱۰۷ سلول در هر میلی‌متر مکعب باسیلوس sp اصلاح شد، بهبود یافت (شکل۲). افزایش مقاومت فشاری ملات های ترمیم شده تا ۲۸ روز ممکن است به رفتار سلول های میکروبی در ماتریس ملات نسبت داده شود. در طول دوره پخت اولیه، اگرچه سلول‌های میکروبی مواد مغذی دریافت می‌کردند، اما به دلیل محیط کاملاً جدید برای میکروب‌ها، رشد ممکن است مناسب نباشد [۱]. همچنین این احتمال وجود دارد که به دلیل محیط نامناسب سیمان، چه به دلیل PH بالا و چه به دلیل وجود عناصر سمی در آن، سلول های باکتری در حالت غیر فعال بوده و با افزایش دوره پخت، با محیط سازگار شده و شروع به رشد کنند. پس از رشد سلول، کربنات کلسیم (کلسیت) روی سطح سلول و همچنین درون ماتریکس ملات سیمان رسوب می‌کند. هنگامی که بسیاری از منافذ ماتریکس مسدود شدند، جریان مواد مغذی و اکسیژن به سلول‌های باکتری متوقف شد و در نهایت سلول‌ها یا مردند یا به اندوسپور تبدیل شدند [۱۱]. فرآیند MICP این پتانسیل را دارد که خاصیت خود ترمیمی را برای مواد مبتنی بر سیمان فراهم کند. خود ترمیم ترک ها شامل فرآیند مکانیکی ارائه شده توسط سلول های باکتری، فرآیندهای شیمیایی تحت کنترل آنزیم اوره آز باکتریایی و فرآیند فیزیکی توسط رسوب کربناته است. پس از تشکیل ترک، هاگ باکتری ها می توانند در تماس با رطوبت و مواد مغذی جوانه بزنند و شروع به استفاده از منابع کلسیم کنند (مثلاً $CaCl_2$). در طول فعال شدن باکتری ها، اکسیژن مصرف می شود و کلسیم کلرید محلول به کربنات نامحلول ($CaCO_3$) تبدیل می شود. این کربنات ترک ها را آب بندی می کند (شکل ۳ را ببینید).



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شکل ۴. میکروگراف‌های الکترونی روبشی که رسوب میکروبیولوژیکی کلسیت را در ترک‌های بتن نشان می‌دهند: (a) ماتریس ملات سیمانی تهیه‌شده بدون باکتری، (b) نمونه گرفته شده در نزدیکی سطح ترک اصلاح‌شده، نشان‌دهنده بلورهای کلسیت با Bacillus sp میله‌ای شکل. CT-۵، و (c) نمونه گرفته شده از بیشتر قسمت های داخلی شکاف نشان دهنده بارش کلسیت با چند سوراخ خالی میله ای است که توسط سلول های باکتری قرار گرفته است.

۴-۳- ارزیابی ریزساختار

برای تعیین تأثیر MICP بر ریزساختار، هر دو نمونه شاهد و MICP تحت میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش بر روی نمونه های جمع آوری شده از مکعب های ملات آزمایش شده در ۲۸ روز انجام شد. هیچ بارندگی در نمونه های شاهد مشاهده نشد (شکل a۴). در نمونه‌های حاوی سلول‌های باکتریایی، یک رسوب کلسیتی شفاف در ناحیه اصلاح‌شده ترک مشاهده شد. کریستال های کلسیت در اطراف ذرات شن رشد کردند. اثر باکتری های میله ای شکل به وضوح روی کریستال ها قابل مشاهده بود. شایان ذکر است که گونه‌های باسیلوس دارای ساختار میله‌ای معمولی هستند. SEM نشان داد که کریستال های $CaCO_3$ روی ترک ها رسوب کرده اند. در نتیجه، شن و ماسه توسط کریستال های $CaCO_3$ سیمان شد که شبیه سازی سیمان شدن دانه های سیمان در بتن معمولی است. سیمان شدن منجر به افزایش مقاومت فشاری شد. با مشاهدات دقیق تر، مشخص شد که کریستال های کربنات کلسیم به خوبی در نزدیکی سطح ترک رشد کرده اند (شکل b۴). آنها دارای لبه های مشخص و تیز بودند که نشان دهنده رشد کامل کریستال ها بود. نواحی داخلی ترک‌ها غلظت کمتری از کریستال‌های کلسیت را نشان دادند و حضور باکتری‌ها نیز نسبتاً کمتر بود. همانطور که در شکل c۴ مشاهده شد، کریستال های کلسیت با سوراخ های میله ای شکل دیده شدند که احتمالاً فضای اشغال شده توسط باکتری ها در داخل ترین ناحیه است. باکتری حاضر یک بی هوازی اختیاری است که در حضور اکسیژن بهتر رشد می کند [۲۲]. بنابراین، با کاهش عرضه اکسیژن، غلظت آنها نیز کاهش می یابد.

۴- نتیجه گیری

در مقاله و مطالعه حاضر اثربخشی رسوب کربنات کلسیم ناشی از میکروبی در ترمیم ترک‌های مصالح ساختمانی نشان داده شده است. فرآیند آب بندی ترک استحکام و دوام سازه های ساختمان را افزایش می دهد. منجر به کاهش نفوذپذیری آب و یون کلرید می شود. همچنین ذرات ماسه را به هم متصل می کند و مانند سیمان عمل می کند. این فرآیند می‌تواند فناوری‌های موجود را که سمی و حساس به اشعه UV هستند، بهبود بخشد. علاوه بر این، سیستم کنونی این پتانسیل را دارد که توانایی خود ترمیمی را در ساختارها به ارمغان بیاورد.

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

منابع و مراجع

۱. Achal V, Mukherjee A, Reddy MS. Microbial concrete – a way to enhance the durability of building structures. J Mater Civil Eng ۲۰۱۱;۲۳:۷۳۰–۴.

۲. Reddy MS, Achal V, Mukherjee A. Microbial concrete, a wonder metabolic product that remediates the defects in building structures. In: Satyanarayana T, Johry BN, Prakash A, editors. Microorganisms in environmental management: microbes and environment. USA: Springer Publishers; ۲۰۱۲. p. ۵۴۷–۶۸.

۳. Dhami NK, Mukherjee A, Reddy MS. Biofilm and microbial applications in biomineralized concrete. In: Seto J, editor. Advanced topics in biomineralization. InTech Publishers; ۲۰۱۲. p. ۱۳۷–۶۴.

۴. Burne RA, Chen RE. Bacterial ureases in infectious diseases. Microbes Infect ۲۰۰۰;۲:۵۳۳–۴۲.

۵. Achal V, Mukherjee A, Reddy MS. Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures. J Ind Microbiol Biotechnol ۲۰۱۱;۳۸:۱۲۲۹–۳۴.

۶. De Muynck W, De Belie N, Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. Ecol Eng ۲۰۱۰;۳۶:۱۱۸–۳۶.

۷. De Muynck W, Debrouwer D, De Belie N, Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. Cem Concr Res ۲۰۰۸;۳۸:۱۰۰۵–۱۴.

۸. Gollapudi UK, Knutson CL, Bang SS, Islam MR. A new method for controlling leaching through permeable channels. Chemosphere ۱۹۹۵;۳۰:۶۹۵–۷۰۵.

۹. Jonkers HM, Thijssen A, Muyzer G, Copuroglu O, Schlangen E. Application of bacteria as self- healing agents for the development of sustainable concrete. Ecol Eng ۲۰۱۰;۳۶:۲۳۰–۵.

۱۰. Qian CX, Wang JY, Wang RX, Cheng L. Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO۳ by Bacillus pasteurii. Mater Sci Eng C ۲۰۰۹;۲۹:۱۲۷۳–۸۰.

۱۱. Ramachandran SK, Ramakrishnan V, Bang SS. Remediation of concrete using micro-organisms. ACI Mater J ۲۰۰۱;۱:۳–۹.

۱۲. Tiano P, Biagiotti L, Mastromei G. Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. J Microbiol Methods ۱۹۹۹;۳۶:۱۳۸–۴۵.

۱۳. Rong H, Qian CX, Li LZ. Study on microstructure and properties of sandstone cemented by microbe cement. Constr Build Mater ۲۰۱۲;۳۶:۶۸۷–۹۴.

۱۴. Achal V, Mukherjee A, Reddy MS. Isolation and characterization of urease producing and calcifying bacteria from cement. J Microbiol Biotechnol ۲۰۱۰;۲۰:۱۵۷۱–۶.

۱۵. Achal V, Mukherjee A, Basu PC, Reddy MS. Strain improvement of Sporosarcina pasteurii for enhanced urease and calcite production. J Ind Microbiol Biotechnol ۲۰۰۹;۳۶:۹۸۱–۸.

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

۱۶. ASTM C۱۲۰۲. Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration. West Conshohocken, PA: ASTM International; ۲۰۰۵. p. ۶.

۱۷. Van Tittelboom K, De Belie N, De Muynck W, Verstraete W. Use of bacteria to repair cracks in concrete. Cem Concr Res ۲۰۱۰;۴۰:۱۵۷–۶۶.

۱۸. Wang J, Van Tittelboom K, De Belie N, Verstraete W. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. Constr Build Mater ۲۰۱۲;۲۶:۵۳۲–۴۰.

۱۹. De Muynck W, Cox K, De Belie N, Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. Constr Build Mater ۲۰۰۸;۲۲:۸۷۵–۸۵.

۲۰. Wiktor V, Jonkers H. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. Cem Concr Compos ۲۰۱۱;۳۳:۷۶۳–۷۰.

۲۱. Pacheco-Torgal F, Labrincha JA. Biotech cementitious materials: some aspects of an innovative approach for concrete with enhanced durability. Constr Build Mater ۲۰۱۳;۴۰:۱۱۳۶–۴۱.

۲۲. Achal V, Mukherjee A, Reddy MS. Biocalcification by Sporosarcina pasteurii using Corn steep liquor as nutrient source. Ind Biotechnol ۲۰۱۰;۶:۱۷۰–۴.