تأثیر باکتری در خودترمیمی بتن زیستی با افزایش مقاومت فشاری

ابوالفضل نوری شهرآبادی*، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده فنی ومهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان

ابوالفضل حسنی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

بی‌تا بخشی، استاد دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: a_noori@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹ – پذیرش: ۱٤۰۰/۰۳/۰۷

چکیده

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح تولیدی در دنیا است. ترک‌خوردگی در بتن مسئله‌ی شایعی است که در اثر مقاومت کششی نسبتاً کم آن رخ می‌دهد. ترک‌های ایجاد شده در بتن، دلیل اصلی کاهش دوام و عمر مفید سازه‌های بتنی هستند. ترمیم مناسب و به‌موقع ریزترک‌های اولیه به‌منظور جلوگیری از گسترش آنها در بتن و کاهش هزینه‌های زیاد تعمیر و نگهداری، امری ضروری است. به همین منظور، روش‌های خودترمیمی توسعه یافته‌اند. افزودن میکروارگانیسم‌ها در نسبت‌های اختلاط بتن و تولید بتن زیستی یک استراتژی هوشمند و سازگار با محیط‌زیست برای ترمیم ترک‌های بتن است ویک موضوع جدید و نوآوری در صنعت بتن محسوب می‌شود. گونه‌های باکتریایی مقاوم در شرایط محیطی سخت و خشن بتن، نظیر باسیلوس‌ها، با تولید رسوب کربنات کلسیم طی یک فرآیند هیدراتاسیون مستمر، می‌توانند با پر کردن ریزترک‌های تازه تشکیل‌شده، بتن را ترمیم نمایند. هدف مقاله حاضر، شناسایی گونه‌ی باکتری مؤثر، و میزان تأثیر آن بر خواص مقاومتی بتن، به‌عنوان یک عامل ترمیم‌کننده است. نتایج حاکی از آن است که تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مقاومتی بتن زیستی با افزودن باکتری باسیلوس سوبتیلیس در غلظت $10^8\ Cells/ml$، مقاومت فشاری را ۲٤/۲٤ درصد افزایش داده و همچنین، دوام بتن را به کمک فرآیند خودترمیمی باکتریایی بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: خودترمیمی، بتن زیستی، ریزترک، رسوب کربنات کلسیم

۱. مقدمه

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح تولیدی در دنیا است. به‌طوری که شاید بتوان از آن به‌عنوان مهم‌ترین ماده ساختمانی موجود با کاربردی فراگیر نام برد. امروزه، مصالح اصلی بسیاری از سازه‌های کوچک و بزرگ مانند پل‌ها، تونل‌ها، سدها، دیوارهای حائل و حتی روسازی‌ها از جنس بتن است. از طرفی دیگر، نقاط ضعفی را می‌توان برای بتن برشمرد که گاه ممکن است رغبتی برای استفاده از سایر مصالح ساختمانی را به وجود آورد.

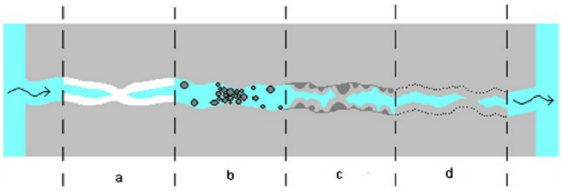
اگرچه گسترش سریع مخلوط‌های بتنی آماده یکی از نشانه‌های پیشرفت تکنولوژی بتن و بهبود کیفیت کلی آن است، اما مشکلات دیگری در این زمینه وجود دارد که مهم‌ترین آنها احتمال زیاد ترک‌خوردگی در بتن به علت مقاومت کششی کم آن است (ایهین‌یی‌چوکوو و همکاران، ۲۰۱۸). این مسئله، استفاده از فولاد در ناحیه‌ی کششی بتن را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. همچنین، تغییرات حجمی وابسته به زمان در اثر پدیده‌های جمع شدگی[1] و خزش[2] نیز با گذشت زمان ترک‌هایی را در سازه‌های بتنی به وجود می‌آورند. چنین ترک‌هایی ممکن است زمینه‌ی نفوذ آب، مایعات مضر یا یون‌های زیان‌آور نظیر سولفات‌ها، کلرایدها و کربنات‌ها را به داخل ساختار بتنی سازه‌ها فراهم آورند. با حذف این ترک‌ها، که از معایب اصلی بتن به شمار می‌روند، می‌توان از ورود مواد مخرب که باعث خوردگی آرماتورها[3] می‌شوند، جلوگیری به عمل‌آورده و مقاومت سازه‌های بتنی را حفظ نمود.

بسیاری از محققان، با الهام از طبیعت، مانند درمان طبیعی زخم یا بریدگی در گونه‌های زنده، توانسته‌اند از این ایده برای ساخت مصالح ساختگی مانند بتن استفاده کنند و بتن را به‌عنوان یک ماده هوشمند معرفی نمایند.

۲. بتن خودترمیم

بتن‌های خودترمیم[4] که به‌تازگی توسعه یافته‌اند، تحول جدیدی را در عرصه تکنولوژی بتن ایجاد نموده‌اند. تحقیقات اولیه پیرامون بتن خودترمیم به‌طور عمده روی سازه‌های نگهداری آب یا مخزن‌هایی که نشت از طریق ترک در آن‌ها موضوع مهمی بود، انجام گرفت. برای این منظور، روش‌های خودترمیمی مختلفی جهت بهبود ریزترک‌ها در بتن مورد مطالعه قرار گرفته است (ویجی و همکاران، ۲۰۱۷). پیشرفت‌های اخیر در زمینه بیوتکنولوژی و مهندسی عمران، موضوعاتی پیرامون رسوب کربنات کلسیم توسط برخی گونه‌های باکتریایی خاص را مطرح کرده است (جوشی و همکاران، ۲۰۱۷).

تحقیقات مختلف، جهت شناسایی ترمیم‌پذیری بتن توسط خودش با نتایج متفاوتی همراه بوده است. هوانگ و همکاران (۲۰۱۶) سه مکانیسم خودترمیمی ذاتی[5] شامل هیدراتاسیون مداوم سیمان غیرهیدراته، تبلور مجدد[6] هیدروکسید کلسیم و تشکیل کربنات کلسیم را معرفی نمودند. لی و همکاران (۲۰۱۷) رابطه‌ی بین ترکیبات سیمانی و خواص ترمیمی ترک‌ها، ناشی از هیدراتاسیون مداوم سیمان هیدراته نشده هنگام نفوذ آب از طریق ترک‌های سطحی، را بیان نمودند. میزان ترک‌های ترمیم-شده به میزان آب و میزان کربنات کلسیم تشکیل‌شده بستگی دارد. شکل ۱، فرآیند خودترمیمی بتن با استفاده از مواد سیمانی را نشان می‌دهد.



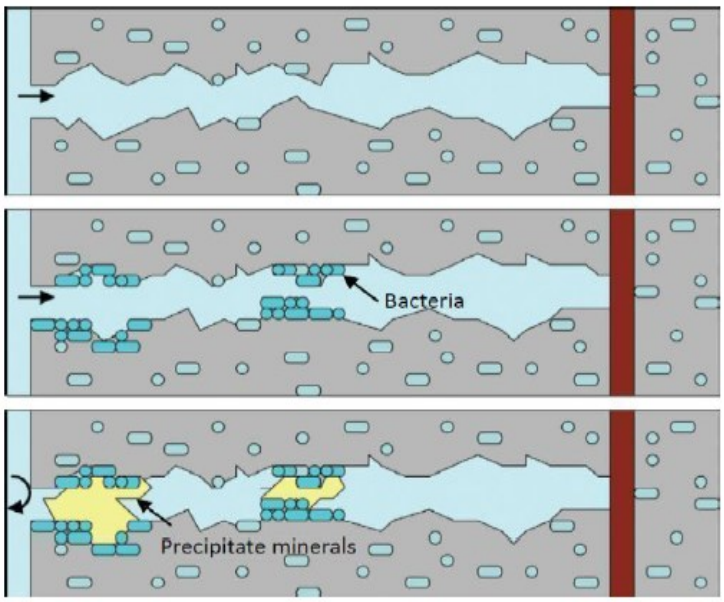
شکل ۱. فرآیند خودترمیمی بتن با استفاده از مواد سیمانی (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷)

[1]- Shrinkage
[2]- Creep
[3]- Corrosion reinforcement
[4]- Self- healing concrete
[5]- Autogenous self- healing
[6]- Recrystallization

هنگامی‌که عرض ترک‌ها کمتر از ۰/۲ میلی‌متر باشد، بتن می‌تواند در طول زمان خودش را به طور طبیعی ترمیم کند. اما برای ترک‌های با عرض بیشتر، راه‌کارهای ارائه شده توسط بشر به‌کار گرفته می‌شود (ساین و همکاران، ۲۰۱۸). رویکردهای مختلفی توسط محققان با ارائه راه-حل‌های عملی پیشنهاد گردیده که از مزایای عمده آن‌ها پر کردن ترک‌های با عرضی بیش از ۰/۱ میلی‌متر است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). این رویکردها را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی در بتن اعمال نمود که طیف وسیعی از کاربردها را با توجه به خودترمیمی طبیعی بتن شامل می‌شود.

۲-۱. بتن باکتریایی

یکی از انواع بتن زیستی، بتن باکتریایی[1] است که با افزودن انواع باکتری در بتن حاصل می‌شود. استفاده از باکتری‌های تولیدکننده رسوب کربنات کلسیم به‌منظور پر کردن ترک‌های ایجاد شده در بتن ایده‌ای بسیار نوآورانه است. این نوع باکتری‌ها که اکثرا به شکل مقاوم[2] تهیه می‌شوند، می‌توانند برای مدت طولانی (بیش از هزاران سال) بدون آب و مواد مغذی زنده بمانند. هنگام ایجاد ترک و نفوذ آب در ساختار بتن، باکتری‌های موجود که در حالت مقاوم هستند، فعال گشته و با تولید رسوب کربنات کلسیم ترک‌ها به مرور زمان بسته می‌شوند. این روش که در نتیجه واکنش‌های بیولوژیک در بتن رخ می-دهد، به‌صورت طبیعی و فاقد هرگونه آلودگی است (ایهین‌یی‌چوکوو و همکاران، ۲۰۱۸). شکل ۲، روند شماتیک ترمیم ترک توسط باکتری‌ها را نشان می‌دهد (جوشی و همکاران، ۲۰۱۷).

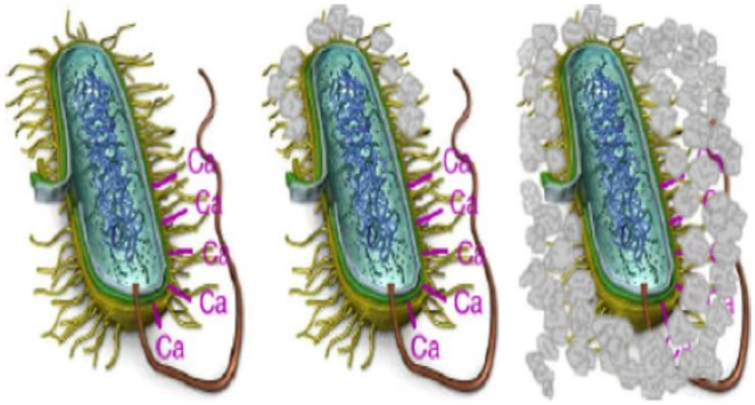


شکل ۲. روند شماتیک ترمیم ترک توسط باکتری‌های موجود در بتن (جوشی و همکاران ۲۰۱۷)

رسوب میکروبیولوژیک به عوامل متعددی از جمله مقدار کلسیم موجود در ساختار بتن و محیط خارجی، pH بتن، وجود کربن محلول و قابلیت دسترسی به محل-هایی که از طریق متابولیسم باکتری‌ها (معمولاً دیواره سلولی باکتریایی) قادر به تشکیل رسوب هستند، بستگی دارد (جوشی و همکاران، ۲۰۱۷). شکل ۳، تصویری از رسوب کربنات کلسیم در دیواره‌ی سلول باکتری را نشان می‌دهد.

[1]- Bacterial concrete

[2]- Spore



شکل ۳. تشکیل کربنات کلسیم روی دیواره سلول باکتری (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

هنگامی‌که باکتری مورد استفاده فعالیت خود را برای ترمیم ترک‌ها در بتن آغاز می‌کند، عامل مزاحم اصلی، محیط بسیار قلیایی بتن است که رشد باکتری‌ها را محدود می‌کند (ساین و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، باکتری‌های افزوده شده باید قادر به تحمل محیط قلیایی بتن باشند. همچنین، برای اطمینان از رسوب مؤثر مواد معدنی جهت ترمیم ترک‌ها باید مراقبت‌های لازم از باکتری‌ها صورت پذیرد (لی و پارک، ۲۰۱۷).

میکروارگانیسم‌های مختلفی توانایی ایجاد رسوب کربنات کلسیم را با استفاده از تجزیه اوره[1] دارند. در این میان، گونه‌های باکتری باسیلوس برای رسوب کربنات کلسیم روی سطح بتن عملکرد مناسب‌تری نشان دادند. مواد مغذی برای باکتری‌هایی که توانایی رسوب کلسیت را دارند شامل منابع کلسیم، فسفر و نیتروژن هستند. عوامل باکتریایی در بتن که در حالت خواب قرار دارند با نفوذ آب به داخل بتن شروع به فعالیت نموده و با مواد مغذی واکنش داده و رسوب کلسیت ایجاد می‌کنند (کایور و همکاران، ۲۰۱۲).

فرآیند میکروبیولوژیک تولید رسوب کربنات کلسیم باعث پر شدن ترک‌های ریز و به هم چسباندن مواد دیگری مانند شن و ماسه در بتن می‌شود (دو بلی، ۲۰۱۶). دخالت میکروارگانیسم‌ها در رسوب کلسیت می‌تواند دوام بتن را افزایش دهد. باکتری‌ها به‌عنوان یک عامل ترمیم‌کننده طولانی‌مدت عمل می‌کنند که این مکانیسم فرآیند میکروبیولوژیک تولید رسوب کربنات کلسیم[2] (MICCP) نامیده می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

در بتن خودترمیم‌شونده، تشکیل هرگونه ترک و نفوذ آب منجر به فعال شدن باکتری از حالت خواب (غیرفعال) می‌شود. با فعالیت متابولیک باکتری طی فرآیند خودترمیمی، کربنات کلسیم به داخل ترک‌های بتن رسوب می‌کند. هنگامی که ترک‌ها به‌طور کامل با کربنات کلسیم پر شوند، باکتری‌ها مجدداً به مرحله خواب برمی‌گردند. در ادامه نیز با شکل‌گیری هرگونه ترکی، باکتری‌ها مجدداً فعال می‌شوند و ترک‌ها را پر می‌کنند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

۳. مواد و مصالح مصرفی

در این پژوهش، نمونه‌های بتنی باکتریایی تهیه شده رده c25 مطابق شرایط محیطی شبیه‌سازی نزدیک به بتن باسیلوس گونه سوبتیلیس سازگاری بهتری نشان داد و طبق نتایج آزمایشگاهی در شرایط شبیه‌سازی بتن، میزان مقاومت و سازگاری این نوع باکتری مناسب‌تر حاصل گردید. سه نوع غلظت و یک نوع بدون باکتری جهت مقایسه تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. مواد و مصالح مصرفی مورد نیاز برای تولید بتن باکتریایی در این پژوهش شامل سنگدانه‌ها، سیمان، سرباره، آب و محلول

[1]- Urealysis
[2]- Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICCP)

باکتریایی است که در ادامه به تشریح هر یک پرداخته شده است.

۳-۱. سنگدانه‌ها

در این پژوهش، از سنگدانه شکسته کوهی به عنوان درشت‌دانه و سنگدانه شکسته رودخانه‌ای در بخش ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۲. سیمان

در این پژوهش، از سیمان پرتلند معمولی تیپ ۲ دلیجان استفاده گردید.

۳-۳. سرباره

سرباره مورد استفاده در این پژوهش، تولیدی شرکت سیمان سپاهان می‌باشد.

۳-٤. آب

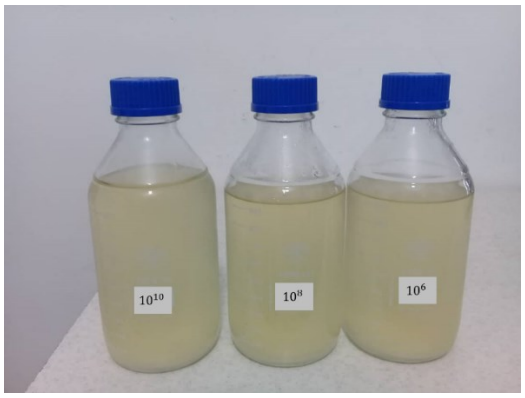
کل آب مخلوط بتن شامل آب جذب شده توسط سنگدانه‌ها برای رسیدن به شرایط اشباع با سطح خشک و همچنین آب آزاد برای انجام هیدراتاسیون سیمان و تأمین کارایی است. آب مصرفی، آب قابل شرب می‌باشد.

۳-۵. محلول باکتریایی

در این پژوهش، از باکتری باسیلوس گونه سوبتیلیس[1] در سه غلظت متفاوت $10^6\ cells/ml$ و $10^8\ cells/ml$ و $10^{10}\ cells/ml$ جهت تولید سه نمونه بتن باکتریایی مختلف استفاده شد.

شکل ٤، بطری‌های یک لیتری محلول نوترینت براث[2] (محیط کشت میکروبی) در غلظت‌های مختلف باکتریایی، به عنوان محیطی جهت کشت باکتری، را نشان می‌دهد که در آزمایشگاه باکتری‌شناسی تهیه گردید.

در تهیه بتن باکتریایی، از روش مستقیم افزودن باکتری‌ها در خمیر بتن استفاده شد. افزودن محلول براث باکتریایی منجر به تغییر نسبت آب به سیمان و در نهایت تغییر کارایی و خواص مقاومتی بتن باکتریایی می‌شود. به همین منظور، میزان آب مورد نیاز در نسبت‌های اختلاط بتن، مجموع میزان آب مورد نیاز به همراه محلول باکتریایی است.



شکل ٤. محلول براث باکتری باسیلوس سوبتیلیس در غلظت‌های $10^6\ Cells/ml$، $10^8\ Cells/ml$ و $10^{10}\ Cells/ml$

٤. روش انجام تحقیق

در این پژوهش، با توجه به نتایج بررسی‌های مشابه گذشته در خصوص تأثیر عامل خودترمیمی باکتریایی بر افزایش تراکم بتن به واسطه پرکردن ریزترک‌های اولیه (عمدتاً حرارتی)، آزمایش متداول فشاری در نظر گرفته شد که می‌تواند تأییدکننده تأثیر عامل خودترمیمی بتن باشد. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های استاندارد مکعبی، پس از تهیه مصالح مصرفی مورد نیاز با توجه به نسبت‌های اختلاط، به ساخت خمیر بتن، نمونه‌گیری و عمل‌آوری آن اقدام شد.

٤-۱. نسبت‌های مخلوط

با توجه به مصالح سنگدانه‌ای موجود، مدول نرمی

[1]- Bacillus Subtilis

[2]- Nutrient broth

۲/۸۲ برای ماسه و نسبت آب به سیمان ۰/۵، طرح‌های بسیاری با درصد مصالح مختلف بررسی گردید که در طرح نهایی، ۸۰۰ کیلوگرم ماسه،۸۰۰ کیلوگرم شن درشت‌دانه، ۳۵۰ کیلوگرم شن ریزدانه، ۲۲۷/۵ کیلوگرم سیمان، ۱۲۲/۵ کیلوگرم سرباره به جهت کمک در کاهش میزان قلیایی بتن و همچنین کاهش دمای اولیه بتن، که هر دو عامل مضر برای باکتری می‌باشد و ۱۷۵ لیتر آب، به عنوان بهترین نسبت شناسایی و به عنوان طرح منتخب در نظر گرفته شد.

برای تولید بتن باکتریایی، بطری‌های یک لیتری محلول باکتریایی جایگزین یک لیتر از حجم آب مصرفی در تولید بتن معمولی گردید. در این روش افزودن، باکتری بدون ایجاد لایه محافظ (اسپور) و به‌صورت مستقیم به بتن تازه افزوده شد که هدف آن ترمیم ریزترک‌های اولیه ایجاد شده به واسطه حرارت هیدراتاسیون اولیه است. شکل ۵، نحوه افزودن محلول باکتریایی به‌صورت مستقیم را نشان می‌دهد. میزان ماندگاری باکتری در مدت زمان ۷ روز با شرایط شبیه‌سازی شده بتن (pH تقریباً ۱۳ و با توجه به دمای بیشینه بتن که مشابه دمای محیط آزمایشگاهی است) مورد بررسی قرار گرفت و با در نظرگرفتن تعداد باکتری باقی‌مانده برای ادامه فعالیت ترمیم پس از اعمال شرایط محیط شبیه‌سازی شده، حداقل باکتری مورد نیاز در این پژوهش $10^6\ Cells/ml$ به‌دست آمد. بنابراین، نمونه‌های بتنی در غلظت‌های باکتریایی 0 (نمونه شاهد)، $10^6\ Cells/ml$، $10^8\ Cells/ml$ و $10^{10}\ Cells/ml$ تهیه شد.

شکل ۵. افزودن محلول باکتریایی به مخلوط بتنی تازه

برای مرتفع نمودن محدودیت فشار برشی سنگدانه‌ها، محلول باکتری در لحظه آخر به مخلوط مصالح اضافه گردید که کمترین آسیب به باکتری‌ها وارد گردد.

٤-٢. نمونه‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌ها

عمل نمونه‌گیری به طور مجزا در قالب‌های مکعبی و تیری شکل، در سه غلظت متفاوت باکتریایی و یک نمونه بتن معمولی، هر کدام ٦ نمونه، انجام گردید. پس از ٢٤ ساعت، قالب‌ها را باز کرده و به مدت ۷ الی ۲۸ روز در استخر آب مغروق نگهداری و آماده آزمایش شدند. شکل ٦، تعدادی از نمونه‌های بتنی قالب‌گیری

شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

شکل ٦. نمونه‌های بتن باکتریایی در قالب‌های مکعبی و تیری شکل استاندارد

٤-٣. آزمایش‌ها

به منظور ارزیابی مشخصات بتن سخت شده به‌واسطه ترسیب کربنات کلسیم، که موجب توپر شدن نمونه‌ها و پیش‌بینی افزایش مقاومت فشاری می‌شود، آزمایش مقاومت فشاری به روش بارگذاری وسط دهانه در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه انجام شد.

در این تحقیق، آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C39 انجام شده است. برای ساخت آزمونه‌های مقاومت فشاری از قالب‌های مکعبی فلزی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. برای هر طرح، ٦ آزمونه مکعبی ساخته شد که ۳ آزمونه در سن ۷ روزه و ۳ آزمونه در سن ۲۸ روزه پس از عمل‌آوری در دمای حدود ۲۳ درجه سلسیوس در استخر آب مورد آزمایش قرار گرفتند.

۵. نتایج آزمایش‌ها و بحث

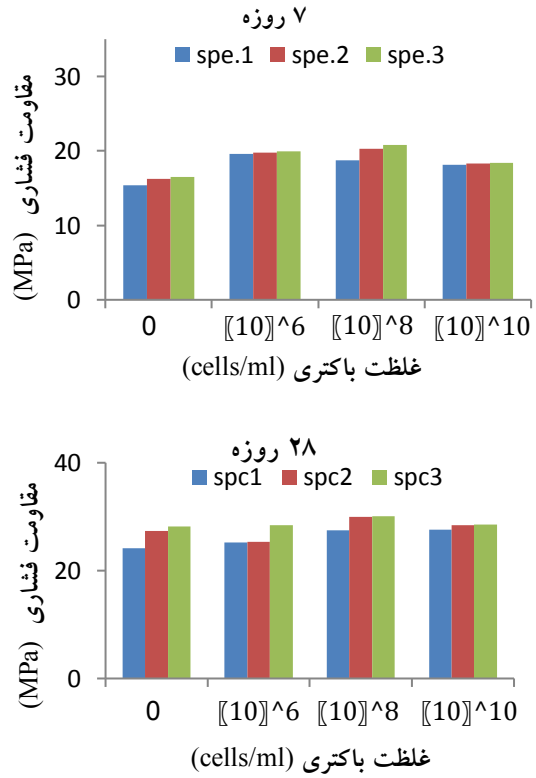
مقاومت فشاری با استفاده از دستگاه UTM روی نمونه‌های مکعبی با جابه‌جایی ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه و وزن ثابت ۱۸۰ کیلوگرم بر دقیقه مطابق شکل ۷ انجام گرفت. از هر غلظت باکتریایی، ٦ نمونه مکعبی در دو سن ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۱ قابل مشاهده است.

شکل ۷. آزمایش مقاومت فشاری

جدول ۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

سن نمونه (روز)	غلظت باکتریایی (Cells/ml)	مقاومت فشاری (Mpa)			میانگین مقاومت فشاری (Mpa)
		نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	
۷ روزه	۰	۱۵/۳۹۶	۱۶/۲۸۲	۱۶/۵۰۷	۱۹/۷۷٤
	10^6	۱۹/۶۰۸	۱۹/۷۳۶	۱۹/۹۷۹	۱۹/۹۵۶
	10^8	۱۸/۷۵۷	۲۰/۲۷۳	۲۰/۸۳۸	۱۸/۲۷۳
	10^{10}	۱۸/۱۲۳	۱۸/۳۰۳	۱۸/۳۹۳	۲۶/۵۵۲
۲۸ روزه	۰	۲٤/۱۳۷	۲۷/۳۳٤	۲۸/۱۸٤	۲۶/۳۳٤
	10^6	۲۵/۱۸۹	۲۵/۳۸٤	۲۸/٤۲۸	۲۹/۱۷۵
	10^8	۲۷/۵۲٤	۲۹/۹۲٤	۳۰/۰۷۶	۲۸/۱۷۲
	10^{10}	۲۷/۶۲۰	۲۸/۳۹۹	۲۸/٤۹۸	۱۶/۰۶۲

مقایسه نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی در غلظت‌های باکتریایی 0 (نمونه شاهد)، 10^6 $(Cells/ml)$، 10^8 $(Cells/ml)$ و 10^{10} $(Cells/ml)$

بر اساس نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری می‌توان بیان داشت که:

الف) نمونه‌های حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس در محدوده‌ی غلظت 10^8 $Cells/ml$ از بیشترین مقدار مقاومت فشاری در سنین، ۷ روزه و ۲۸ روزه برخوردار است.

ب) میزان افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه در بتن باکتریایی نسبت به نمونه شاهد در محدوده‌ی غلظت باکتریایی $10^8\ Cells/ml$ به ترتیب ۲٤/۲٤ درصد و ۹/۸۷ درصد است. بروز ترک‌های حرارتی اولیه و فعال شدن باکتری‌ها با ترسیب رسوب کربنات کلسیم در روزهای اولیه با توجه به رطوبت موجود در بتن را می‌توان یکی از دلایل اصلی افزایش بیشتر مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به ۲۸ روزه در مقایسه با نمونه شاهد برشمرد. بنابراین، می‌توان از این غلظت به عنوان غلظت بهینه محلول باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس نام برد.

همچنین، نتایج آزمایش XRD و مشاهده ترسیب کربنات کلسیم با پر کردن ترک‌های ریز نمونه‌های بتنی شکسته شده می‌تواند دلیلی بر افزایش مقاومت و کاهش قابلیت نفوذپذیری بتن‌های باکتریایی در برابر نفوذ مواد مخرب باشد. بنابراین، به‌کارگیری باکتری‌های مقاوم در محیط قلیایی بتن با قابلیت تولید رسوب کربنات کلسیم می‌تواند موجب افزایش مقاومت بتن و همچنین بهبود ترک‌های اولیه و بلندمدت در روسازی‌های بتنی در حضور رطوبت شود. نمونه ترسیب ایجاد شده در یک نمونه ۷ روزه گسیخته شده در شکل ۹ قابل مشاهده است. نتایج آزمایش XRD جهت تعیین نوع ترسیب ایجاد شده در شکل ۹ نشان‌دهنده تشکیل رسوب کربنات کلسیم در محل ترک‌های ایجاد شده می‌باشد که در دانشکده علوم پزشکی دانشگاه تربیت مدرس انجام گردید. شکل ترسیب انجام شده و حجم قابل قبول آن نشان‌دهنده فعالیت زیاد و سازگاری مناسب این‌گونه باکتری با محیط بتن را نشان می‌دهد.

شکل ۹. تشکیل رسوب کربنات کلسیم جهت ترمیم ترک-های بتنی

نتایج پژوهش حاضر حاکی از افزایش مقاومت فشاری قابل قبول ۲٤/۲٤ درصد در ۷ روز اولیه تولید بتن است که نشان‌دهنده تأثیر مناسب عامل خودترمیمی بتن زیستی می‌باشد. جهت مقایسه نتایج این پژوهش با نمونه‌های مشابه انجام شده‌که در سال ۲۰۰۸ با نمونه سوبتیلیس (گونه نامشخص) با غلظت 2.8×10^8 cells/ml انجام شده است میزان مقاومت کسب شده نسبت به نمونه‌های شاهد ۱۲٪ می‌باشد (جانکرز و اسچلانگن، ۲۰۰۸).

در این پژوهش، سعی بر آن شد که تأثیر باکتری در ترمیم ریزترک‌های اولیه، که عامل اصلی نفوذ مواد مضر و علت اصلی ترک‌های ثانویه در بتن بوده و اغلب به‌دلیل گرمازایی زیاد اولیه در بتن ایجاد می شود، مورد بررسی قرار گیرد.

۷. مراجع

Andalib, R., Majid, M. Z. A., Hussin, M. W., Ponraj, M., Keyvanfar, A., Mirza, J. and Lee, H. S. 2016. "Optimum concentration of Bacillus megaterium for strengthening structural concrete". Constr. Build. Mater., 118: 180-193.

Castanier, S., Le Métayer-Levrel, G., Perthuisot, J. P. 1999. "Calcium-carbonates precipitation and limestone genesis- the microbiogeologist point of view". Sediment. Geol., 126(1): 9-23.

De Belie, N. 2016. "Application of bacteria in concrete: A critical review". RILEM Technical Letters, 1: 56-61.

De Muynck, W., Cox, K., De Belie, N. and Verstraete, W. 2008. "Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete". Constr. Build. Mater., 22(5): 875-885.

Grabiec, A. M., Klama, J., Zawal, D. and Krupa, D. 2012. "Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition". Constr. Build. Mater., 34: 145-150.

Gupta, S., Dai Pang, S. and Kua, H. W. 2017. "Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents–A review". Constr. Build. Mater., 146: 419-428.

Huang, H., Ye, G., Qian, C. and Schlangen, E. 2016. "Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions". Mater. Design, 92: 499-511.

Iheanyichukwu, C. G., Umar, S. A. and Ekwueme, P. C. 2018. "A review on self-healing concerete using bacteria". Sustain. Struct. Mater., Int. J., 1(2): 12-20.

Joshi, S., Goyal, S., Mukherjee, A. and Reddy, M. S. 2017. "Microbial healing of cracks in concrete: A review". J. Indus. Microbiol. Biotech., 44(11): 1511-1525.

Kaur, N., Reddy, M. S. and Mukherjee, A. 2012. "Improvement in strength properties of ash bricks by bacterial calcite". Ecol. Eng., 39: 31-35.

Lee, Y. S., Kim, H. J. and Park, W. 2017. "Non-ureolytic calcium carbonate precipitation by Lysinibacillus sp. YS11 isolated from the rhizosphere of Miscanthus sacchariflorus". J. Microbiol., 55: 440-447.

Lee, Y. S. and Park, W. 2018. "Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete". Appl. Microbiol. Biotech., 102: 3059-3070.

Luo, M., Qian, C. X. and Li, R. Y. 2015. "Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete". Constr. Build. Mater., 87: 1-7.

Muhammad, N. Z., Shafaghat, A., Keyvanfar, A., Majid, M. Z. A., Ghoshal, S. K., Yasouj, S. E. M. and Shirdar, M. R. 2016. "Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review". Constr. Build. Mater., 112: 1123-1132.

Phung, Q. T., Maes, N., De Schutter, G., Jacques, D. and Ye, G. 2013. "Determination of water permeability of cementitious materials using a controlled constant flow method". Constr. Build. Mater., 47: 1488-1496.

Qiu, J., Qin, D., Tng, S. and Yang, E. 2014. "Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation". Constr. Build. Mater., 57: 144-150.

Siddique, R. and Chahal, N. K. 2011. "Effect of ureolyticbacteria on concrete properties". Constr. Build. Mater., 25(10): 3791-3801.

Siddique, R., Nanda, V. and Kunal, R. 2016. "Influence of bacteria on compressive strength and permeation properties of concrete made with cement baghouse filter dust". Constr. Build. Mater., 106: 461-469.

Singh, N., Ahmad, J. and Snober, S. M. 2018. "Assessment of ureolytic bacteria for self-healing concrete". Int. J. Recent Sci. Res., 9(3): 25350-25355.

Vijay, K., Murmu, M. and Deo, S. V. 2017. "Bacteria based self healing concrete– A review". Constr. Build. Mater., 152: 1008-1014.

Xu, J. and Yao, W. 2014. "Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent". Cement Concrete Res., 64: 1-10.

Zhang, J., Liu, Y., Feng, T., Zhou, M., Zhao, L., Zhou, A. and Li, Z. 2017. "Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete". Constr. Build. Mater., 148: 610-617.

Jonkers, H. M., &Schlangen, E. 2008. Development of a bacteria-based selfhealing concrete. In Proc. int. FIB symposium, vol. 1, pp 425-430.