

تأثیر باکتری اسپوروسارسینا و خاکستر بادی بر توانایی خود ترمیم‌شوندگی بتن

محمود صادق پور

گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران.

محمدرضا برادران*

گروه مهندسی عمران، مرکز میمند، دانشگاه آزاد اسلامی، میمند، ایران.

چکیده

در مقاله حاضر تأثیر باکتری بر روی خود ترمیم‌شوندگی بتن‌های حاوی خاکستر بادی مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت ارزیابی از باکتری اسپوروسارسینا با چهار غلظت مختلف استفاده شده است. در بتن دارای خاکستر بادی، از خاکستر بادی معادل ۲۰ درصد وزنی سیمان طرح اختلاط استفاده شده است. به منظور ارزیابی و کنترل نمونه‌ها از آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب از جمله آزمایش اولتراسونیک در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، آزمایش نفوذ ناپذیری و جذب آب در سن ۲۸ روزه و آزمایش مقاومت فشاری در سن ۷ و ۲۸ روزه استفاده شده است. جهت ارزیابی تأثیر باکتری بر روی خود ترمیم شدن ترک‌های بتن، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نوری، ترک‌های بتن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد غلظت 10.46×10^6 مناسب‌ترین غلظت باکتری اسپوروسارسینا جهت تولید کلسیت و پر شدن خلل و فرج‌های بتن توسط محصولات هیدراته ترکیبات کلسیم و سیلیکون می‌باشد. غلظت مذکور منجر به افزایش ۳۶ درصدی مقاومت فشاری در نمونه‌های دارای خاکستر بادی و ۳۰ درصدی در نمونه‌های بدون خاکستر بادی گردید. همچنین نتایج حاصل نشان داد افزایش غلظت باکتری، در مقاومت فشاری، جذب آب، نفوذ ناپذیری و سرعت امواج اولتراسونیک تغییرات محسوسی ایجاد نمی‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بتن خود ترمیم‌شونده، باکتری، اسپوروسارسینا، خاکستر بادی.

* نویسنده مسئول: mr.baradaran@iau.ac.ir

۱- مقدمه

اسپورسارسینا بر روی مواد و مصالح مختلف از جمله سنگ‌دانه‌ها، خاک، بتن و ... توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲]- [۲۸]، تأثیر باکتری مذکور بر روی بتن‌های دارای خاکستر بادی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در مقاله حاضر از باکتری اسپورسارسینا با غلظت‌های مختلف جهت ارزیابی خودترمیم-شوندگی بتن‌های دارای خاکستر بادی و مقایسه آن با بتن‌های معمولی استفاده شده است.

دو روش کلی جهت استفاده از باکتری در بتن وجود دارد. در روش اول با کتری‌ها به صورت کپسول‌هایی به طرح اختلاط بتن افزوده می‌گردد [۲۹]. در این روش باکتری‌ها در اثر فرایند هیدراتاسیون و همچنین در حین اختلاط زنده خواهند ماند و می‌توان بیان داشت اکثریت باکتری‌ها در فرایند خودترمیم‌شوندگی نقش خواهند داشت [۳۰]. در روش دوم باکتری‌ها به آب اختلاط اضافه و در حین فرایند اختلاط به مخلوط بتن اضافه می‌گردد. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد اگرچه تعدادی از باکتری‌ها در فرایند اختلاط بتن از بین خواهند رفت اما باکتری‌های بسیاری زنده خواهند ماند و در فرایند خودترمیم‌شوندگی بتن شرکت خواهند کرد [۳۱]. این روش از نظر اجرایی کاربردی‌تر می‌باشد و همچنین از نظر اقتصادی مناسب‌تر است. در مقاله حاضر از روش دوم جهت تولید بتن‌های خودترمیم‌شونده استفاده شده است. به این صورت که چهار غلظت مختلف از باکتری به آب طرح اختلاط اضافه شده و در فرایند تولید بتن به بتن اضافه می‌گردد. یکی از مصالح کاربردی دیگر که در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد خاکستر بادی است [۳۲]. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد استفاده از خاکستر بادی منجر به بهبود پارامترهای مقاومتی و دوام بتن می‌گردد. در مقاله حاضر تأثیر غلظت‌های مختلف باکتری بر روی بتن‌های معمولی و بتن‌های حاوی خاکستر بادی مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت مقایسه و ارزیابی پارامترهای مختلف از جمله مقاومت فشاری، نفوذپذیری، جذب آب مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین از آزمایش غیر مخرب اولتراسونیک جهت کنترل وضعیت بهبود آزمون‌ها استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- باکتری

باکتری‌های مختلفی جهت تولید کربنات کلسیم و پر کردن ترک‌ها

امروزه بتن به علت دوام، سهولت ساخت، دردسترس بودن و همچنین اقتصادی بودن، یکی از پرکاربردترین مواد مورد استفاده در سازه‌ها محسوب می‌شود [۱]. از این جهت تولید بتن‌های با کیفیت و ماندگار می‌تواند نقش به‌سزایی در جلوگیری از اتلاف منابع معدنی و کاهش آلودگی محیط زیست داشته باشد [۲].

محققین مختلف با اضافه کردن افزودنی‌های متفاوت همواره به دنبال افزایش دوام و بهبود خواص بتن هستند. استفاده از مواد افزودنی در بتن، منجر به افزایش بهره‌وری و دامنه کاربرد آن می‌گردد. همچنین استفاده از افزودنی‌های مجاز می‌تواند طول عمر مفید سازه‌های بتنی را افزایش دهد [۳-۵]. استفاده از بتن‌های خودترمیم‌شونده در سازه‌های بتنی علاوه بر حفظ محیط زیست منجر به افزایش طول عمر مفید سازه می‌گردد. [۶].

بتن خودترمیم‌شونده بتنی است که در صورت ایجاد ترک‌های ذاتی و یا ترک‌های ناشی از عوامل محیطی در اعضای بتنی قادر باشد بدون دخالت از خارج بصورت خودکار خود را ترمیم کند. در سال‌های اخیر محققین بسیاری بر روی بتن‌های خودترمیم‌شونده تحقیق نموده‌اند و روش‌ها و راهکارهای مختلفی را جهت تولید بتن‌های خودترمیم‌شونده ارائه داده‌اند [۷-۱۲]. ترک‌های ایجاد شده در بتن در طول بهره‌برداری از سازه‌های بتنی امری غیر قابل اجتناب می‌باشد. یکی از مهم‌ترین علت تخریب سازه‌های بتنی به وجود آمدن ترک‌ها و نفوذ مواد مضر و آب به درون بتن و خوردگی آرماتورها می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان داشت ترک‌های ایجاد شده در اعضای بتنی یکی از عوامل بسیار مهم در تخریب سازه‌های بتنی است. با کنترل ترک‌ها می‌توان عمر سازه را افزایش داد و علاوه بر آن از صدمات احتمالی جلوگیری کرد [۱۳-۱۵].

یکی از روش‌های کنترل ترک‌ها در سازه‌های بتنی استفاده از بتن‌های خودترمیم‌شونده می‌باشد. همان‌طور که بیان شد روش‌های مختلفی جهت تولید بتن‌های خودترمیم‌شونده وجود دارد از جمله این روش‌ها، استفاده از مواد میکروبیولوژیکی می‌باشد [۱۶]. محققین مختلف باکتری‌های مختلف و متنوعی را جهت تولید بتن‌های خودترمیم‌شونده مورد ارزیابی قرار داده‌اند. از جمله باکتری‌های تأثیرگذار می‌توان به باکتری‌های خانواده باسیلوس شامل سابتیلیس و مگاتریوم و همچنین خانواده پاستوری نظیر اسپورسارسینا اشاره کرد. [۱۷-۲۱]. با توجه به اینکه تأثیر باکتری

باکتری سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، جهت کشت ابتدا ۲۰ میلی لیتر سوسپانسیون تهیه شده به ۱۰۰ میلی لیتر محیط نوترینت برات حاوی القا کننده اسپور اضافه گردید و در اینکوباتور شیکر دار با سرعت ۲۰۰ rpm و دمای ۳۰ درجه سانتی گراد به مدت ۷۲ تا ۹۶ ساعت قرار داده شد. پس از رشد کامل، ۱۰۰ میلی لیتر سوسپانسیون باکتری به ۱/۵ لیتر محیط جدید اضافه و تحت شرایط مشابه در اینکوباتور شیکر دار قرار داده شد تا رشد کامل و کدورت مناسب حاصل گردد.

مشخصات رقت‌های مختلف مورد آزمایش در جدول ۲ بیان شده است. با توجه به جدول ۲ رابطه میان OD₆₀₀ و تعداد باکتری در رقت‌های مورد نظر، پس از شمارش تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر پلیت و داشتن میزان جذب نوری در طول موج 600 نانومتر مشخص می‌گردد.

جدول ۲- تعداد کلنی در رقت‌های متوالی باکتری اسپوروسارسینا

رقت	OD ₆₀₀	کلونی (×۱۰ ^۸) (Cell/ml)
۱-۱۰	۰.۲۶۵	۶.۵۷
۲-۱۰	۰.۲۳۰	۵.۷
۳-۱۰	۰.۲۲۰	۵.۴۵
۴-۱۰	۰.۱۹۸	۴.۹
۵-۱۰	۰.۱۴۸	۳.۶۷
۶-۱۰	۰.۰۱۹	۰.۴۷۱

منحنی استاندارد باکتری مطابق شکل ۲ ترسیم شده است. با استفاده از این نمودار می‌توان تعداد باکتری متناظر با هر OD را محاسبه کرد. بر اساس نتایج بیان شده غلظت‌های مختلف باکتری جهت استفاده در طرح اختلاط تعیین خواهد شد. همان‌طور که بیان شد جهت تعیین غلظت بهینه باکتری مذکور از چهار غلظت مختلف استفاده شده است.

۲-۲- مصالح بتن

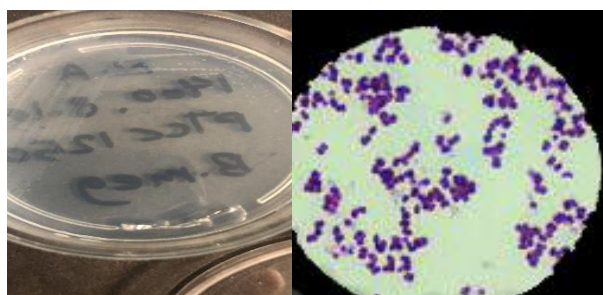
در مقاله حاضر از سیمان پرتلند معمولی تیپ دو استفاده شده است. مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده و مشخصات شیمیایی سیمان و خاکستر بادی استفاده شده در جدول ۳ و ۴ نشان داده شده است. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در جدول ۵ نشان داده شده است.

در بتن معرفی شده‌اند [۱۱]. در مقاله حاضر از باکتری خانواده پاستوری و سویه اسپوروسارسینا جهت ارزیابی استفاده شده است. باکتری مورد مطالعه از مرکز کلکسیون قارچ و باکتری سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران بصورت آمپول لیوفلیزه تهیه گردید. کد اختصاصی این باکتری در مرکز یادشده PTTC1645 می‌باشد. سویه مورد استفاده در شرایط کشت با دمای ۳۰ درجه سانتی گراد و شرایط هوایی کشت داده شد. شرایط اختصاصی محیط کشت این باکتری در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- محیط کشت اختصاصی باکتری

مقدار	اجزاء تشکیل دهنده
۵ گرم	پپتون
۳ گرم	بیت اکسترکت
۵ گرم	کلرید کلسیم
۱۵ گرم	آگار
۲۰ (درصد)	اوره
۱ لیتر	آب مقطر

محیط کشت باکتری شامل نوترینت برات، نوترینت آگار، کلرید منگنز، کلرید کلسیم، سولفات منیزیم و اوره می‌باشد جهت رنگ‌آمیزی از کیت رنگ‌آمیزی گرم و اسپور استفاده گردید. جهت تأمین شرایط تولید اسپور از نتایج تحقیقات ردی و همکاران و همچنین دورگا و همکاران استفاده گردید [۳۳-۳۴]. آزمون رنگ‌آمیزی شده باکتری اسپوروسارسینا پاستوری در شکل ۱- الف و کلنی خالص در نوترینت آگار در شکل ۱-ب نشان داده شده است.



شکل ۱- باکتری اسپوروسارسینا پاستوری

بعد از تهیه باکتری اسپوروسارسینا از مرکز کلکسیون قارچ و

جدول شماره ۶ در نظر گرفته شده است [۳۵]. نسبت آب به سیمان در تمام طرح‌ها ۰.۵ در نظر گرفته شده است. جهت ساخت آزمونه‌ها ابتدا مواد خشک به مدت ۱ دقیقه با سرعت کم در مخلوط‌کن نشان داده شده در شکل ۴ مخلوط شدند. سپس ۹۰ درصد آب به آرامی به مخلوط خشک اضافه گردید و به مدت ۴ دقیقه اختلاط انجام گرفت. بعد از آن باقیمانده آب که با غلظت‌های مختلف باکتری مخلوط شده بودند اضافه و اختلاط یک دقیقه دیگر جهت توزیع یکنواخت باکتری در مخلوط ادامه یافت تا نهایتاً بتن مورد انتظار ساخته شود.

برای هر سری از طرح اختلاط جهت بررسی خصوصیات مقاومتی، دوام و خود ترمیم‌شوندگی ۸ آزمونه مکعبی با ابعاد ۱۵ در ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر بر اساس استاندارد ASTM ساخته شد [۳۶].

جدول ۵- مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده

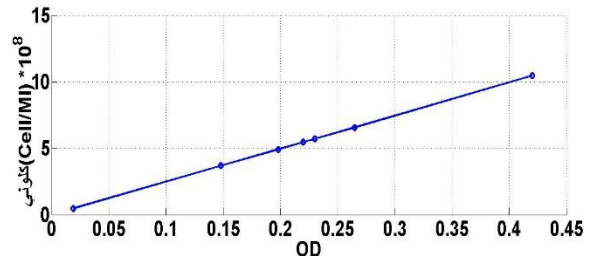
مشخصات		مقادیر
مشخصات	ریز دانه	درشت دانه
وزن مخصوص	۲.۵۸	۲.۱۵
مدول نرمی	۲.۱۸	۵.۵۷
وزن جرمی	۱۶۷۲	۱۵۹۸



شکل ۳- خاکستر بادی، سیمان، سنگ‌دانه، باکتری



شکل ۴- اختلاط مصالح



شکل ۲- نسبت تعداد باکتری اسپوروسارسینا در رقت‌های متوالی

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده

مقدار	مشخصات فیزیکی
۳۰۰۰	بلین (%)
۱۶۰	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۲۲۰	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۲۴	مقاومت فشاری ۳روزه (مگا پاسکال)
۳۵.۵	مقاومت فشاری ۷روزه (مگا پاسکال)
۴۹	مقاومت فشاری ۲۸روزه (مگا پاسکال)
۳.۱	وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)
۳۰	غلظت نرمال (درصد)

جدول ۴- مشخصات شیمیایی سیمان و خاکستر بادی مورد استفاده

درصد وزنی (%)		عناصر
سیمان	خاکستر بادی	
۲۱	۶۲	SiO ₂
۵	۱۸	Al ₂ O ₃
۳.۱۲	۴.۸	Fe ₂ O ₃
۱	۰+۲.۱	K ₂ O+Na ₂ O
۶۲	۷.۱	CaO
۲.۴۴	۲.۸	MgO
۳.۱۲	۰.۲	SO ₃
۰	۰.۳۶	TiO ₂

۳-۲- طرح اختلاط

جهت بررسی خصوصیات خود ترمیم‌شوندگی بتن با استفاده از باکتری اسپوروسارسینا و همچنین تأثیر این باکتری بر روی آزمونه‌های دارای خاکستر بادی، چهار غلظت مختلف باکتری مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳ مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط را نشان می‌دهد. طرح اختلاط بتن بر اساس آیین نامه ACI و مطابق

جدول ۶- طرح اختلاط آزمون‌های ارزیابی شده

کد آزمون	سیمان (Kg/m ³)	خاکستر بادی (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	ریزدانه (ماسه) (Kg/m ³)	درشت دانه (شن) (Kg/m ³)	باکتری (Cell/ml)
P	۴۱۳	۰	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	۰
PSP4	۴۱۳	۰	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	10.46×10^4
PSP5	۴۱۳	۰	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	10.46×10^5
PSP6	۴۱۳	۰	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	10.46×10^6
PSP7	۴۱۳	۰	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	10.46×10^7
PF	۳۳۰.۴	۸۲.۶	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	۰
PFSP4	۳۳۰.۴	۸۲.۶	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	10.46×10^4
PFSP5	۳۳۰.۴	۸۲.۶	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	10.46×10^5
PFSP6	۳۳۰.۴	۸۲.۶	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	10.46×10^6
PFSP7	۳۳۰.۴	۸۲.۶	۲۰۶.۵	۸۷۷.۶۹	۹۲۶.۵۶	10.46×10^7

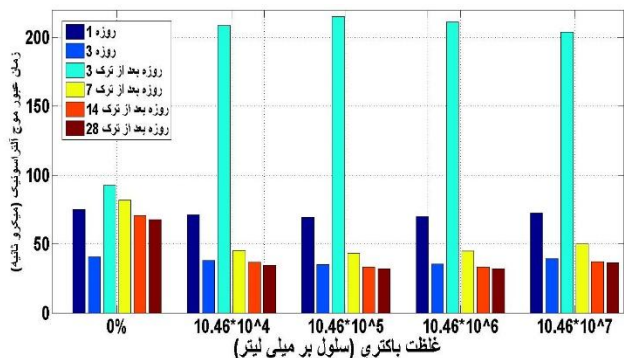
۳- نتایج و بحث

جهت بررسی میزان تأثیر باکتری‌ها بر خودترمیم‌شوندگی بتن، یک آزمون از هر سری طرح اختلاط در سن سه روزه با استفاده از دستگاه تعیین مقاومت فشاری تحت بار حدود سی درصد بار گسیختگی قرار گرفت و ترک‌هایی در آزمون ایجاد شد. جهت ارزیابی کیفیت خودترمیمی ترک‌ها، زمان عبور امواج اولتراسونیک در آزمون‌ها قبل از ایجاد ترک و بعد از ایجاد ترک در سنین ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تعیین گردید. نتایج حاصل در شکل ۶ نشان می‌دهد آزمون‌های حاوی باکتری در مقایسه با آزمون‌های ساده تغییرات بسیار محسوس در سن بعد از سه روز پس از ترک داشته‌اند. با توجه به شکل ۶، تغییرات سرعت موج اولتراسونیک در آزمون PFSP6 و PFSP5 نسبت به سایر آزمون‌ها محسوس‌تر می‌باشد که نشان دهنده تأثیر بیشتر باکتری با غلظت 10.46×10^6 و غلظت 10.46×10^5 نسبت به سایر غلظت‌ها می‌باشد. این تغییر محسوس ناشی از فعالیت باکتری‌ها بعد از ایجاد ترک و تولید کلسیت و پر شدن خلل و فرج‌ها می‌باشد.

جهت بررسی و مشاهده نتایج حاصل از هر طرح اختلاط و تأثیر غلظت‌های مختلف باکتری‌ها آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذپذیری، جذب آب انجام گرفت. همچنین جهت کنترل و ارزیابی میزان خودترمیم‌شوندگی بتن و تأثیر باکتری بر روی بتن ساده و بتن حاوی خاکستر بادی تست اولتراسونیک از سن یک روزه انجام گرفت. زمان عبور موج اولتراسونیک به صورت مداوم طی ۲۸ روز توسط دستگاه اولتراسونیک بتن اندازه‌گیری گردید.

۳-۱- آزمایش اولتراسونیک

آزمایش اولتراسونیک بتن از جمله آزمایش‌های غیر مخرب بتن می‌باشد. جهت ارزیابی کیفیت بتن آزمون‌های ترک خورده و آزمون‌های غیر ترک خورده بر اساس سرعت موج آلتراسونیک مورد ارزیابی قرار گرفتند [۳۷]. جهت انجام تست اولتراسونیک از دستگاه اولتراسونیک کنترلرژ مدل مدل E4800-58 استفاده شده است. شکل ۵ نحوه انجام این آزمایش را نشان می‌دهد.



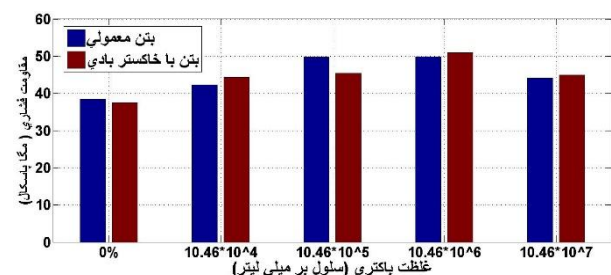
شکل ۶- تغییرات سرعت امواج اولتراسونیک نمونه‌های ۲۸ روزه



شکل ۵- آزمایش اولتراسونیک بتن

۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری

آزمونه‌های ساخته شده جهت تعیین مقاومت فشاری در سن ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه شکسته شدند. نتایج حاصل از مقاومت فشاری آزمونه‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است. جهت ارزیابی و بررسی مقاومت فشاری آزمونه‌ها، یک آزمونه در سن ۷ روزه، یک آزمونه در سن ۱۴ روزه و سه آزمونه در سن ۲۸ روزه مورد ارزیابی مقاومت فشاری قرار گرفتند [۳۸]. میانگین سه آزمونه شکسته شده در سن ۲۸ روزه به‌عنوان مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نظر گرفته شده است. شکل ۷ مقاومت فشاری نمونه‌های مورد ارزیابی را در سن ۲۸ روزه برای آزمونه‌های مکعبی نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری آزمونه‌ها با اضافه شدن باکتری به طرح اختلاط است. همان‌طور که در نمودار شکل ۷ مشاهده می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های دارای باکتری با غلظت $10^6 \times 10.46$ بیشترین مقدار مقاومت فشاری را از خود نشان داده اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد این غلظت از باکتری در نمونه‌های ساده حدود ۳۰ درصد و در نمونه‌های دارای خاکستر بادی حدود ۳۶ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌های بدون باکتری دارند. همچنین افزایش غلظت باکتری منجر به افزایش مقاومت فشاری نخواهد شد و درصد بهینه استفاده از باکتری اسپوروسارسینا در طرح اختلاط با غلظت باکتری $10^6 \times 10.46$ می‌باشد. علت اصلی افزایش مقاومت پر شدن حفرات خالی با کلسیت ایجاد شده در اثر فعالیت باکتری‌ها می‌باشد. نتایج حاصل نشان دهنده تأثیر بیشتر باکتری بر روی افزایش مقاومت فشاری آزمونه‌های دارای خاکستر بادی است.



شکل ۷- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه

درصد افزایش مقاومت در سن ۲۸ روزه برای نمونه‌های بدون خاکستر بادی نسبت به نمونه شاهد (کد P) و برای نمونه‌های دارای خاکستر بادی نسبت به نمونه شاهد دارای خاکستر بادی (کد PF) برای غلظت‌های مختلف باکتری در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها

تغییرات	۲۸ روزه	۷ روزه	کد آزمونه
%	(مگا پاسکال)	(مگا پاسکال)	
---	۳۸.۵	۲۵.۴	P
---	۳۷.۵	۲۴	PF
۱۰	۴۲.۳	۲۷	PSP4
۱۸	۴۴.۳	۲۸.۶	PFSP4
۲۹	۴۹.۸	۲۷.۸	PSP5
۲۱	۴۵.۴	۳۱	PFSP5
۳۰	۴۹.۹	۲۸.۹	PSP6
۳۶	۵۰.۹	۳۱.۸	PFSP6
۱۵	۴۴.۱	۲۹	PSP7
۲۰	۴۵	۳۰	PFSP7

نتایج حاصل از تحقیقات برخی از محققین در تأثیر باکتری بر روی مقاومت فشاری بتن در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- تأثیر باکتری بر روی مقاومت فشاری بتن [۱۱]

نام باکتری (غلظت)	مقاومت فشاری	مقاومت فشاری
	۲۸ روزه	۷ روزه
سابتیلیس (33mg/ml)	---	۱۵.۶ درصد افزایش
سابتیلیس (0.33mg/ml)	---	۱۴.۸ درصد افزایش
سابتیلیس (3.3mg/ml)	بدون تغییر	بدون تغییر
سابتیلیس (33.33mg/ml)	بدون تغییر	کاهش مقاومت
اسپوروسارسینا (10 ⁵ Cells/ml)	---	۳۵ درصد افزایش
مگا تریوم (30*10 ⁵ Cfu/ml)	---	۲۴ درصد افزایش

۳-۳- جذب آب

سه آزمونه مکعبی با ابعاد ۱۵ در ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر جهت انجام آزمایش جذب آب انتخاب شدند. این آزمایش بر اساس استاندارد BS EN 12390 و ASTM C642 انجام شد [۳۹-۴۰]. درصد جذب آب آزمونه‌ها در شکل ۸ و جدول ۹ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد درصد جذب آب در آزمونه‌های دارای خاکستر بادی به طور میانگین ۵ درصد کمتر از آزمونه‌های

عمق نفوذ آب کمتر است. این آزمایش بر اساس استاندارد BS انجام گرفته است [۴۲]. جهت انجام این آزمایش از دستگاه تست نفوذپذیری مطابق شکل ۹-الف استفاده شده است. آزمون‌ها بعد از ۲۸ روز عمل آوری در دستگاه آزمایش نفوذپذیری قرار گرفتند و طبق استاندارد BS به مدت ۷۲ ساعت تحت فشار ۵ بار قرار داده شدند. پس از گذشت ۷۲ ساعت آزمون‌ها توسط جک بتن شکن به دو قسمت از محل نفوذ آب شکسته و عمق نفوذ آب تعیین گردید.



(الف)

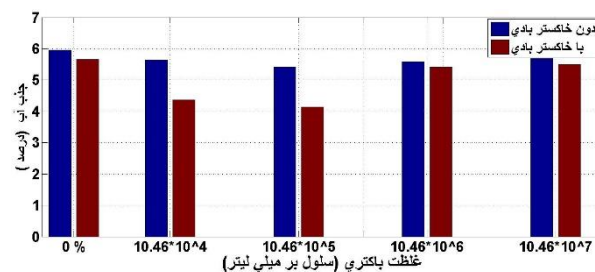


(ب)

شکل ۹- آزمایش نفوذپذیری

عمق نفوذ آب برای هر آزمون در شکل ۹-ب نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد عمق نفوذ آب در نمونه‌های دارای باکتری نسبت به نمونه‌های بدون باکتری کمتر شده است که نشان دهنده تأثیر نفوذ ناپذیر شدن آزمون‌های دارای باکتری اسپوروسارسینا می‌باشد. همچنین غلظت $10^6 \times 10^6$ نسبت به سایر غلظت‌ها عمق نفوذ آب کمتری در بین نمونه‌های دارای خاکستر بادی و هم در بین نمونه‌های بدون خاکستر بادی از خود نشان داده است. نتایج حاصل در شکل ۱۰ نشان می‌دهد با افزایش غلظت باکتری عمق نفوذ آب در نمونه‌های بدون خاکستر بادی نسبت به

معمولی می‌باشد. همچنین تأثیر باکتری بر کاهش جذب آب در آزمون‌های دارای خاکستر بادی به میزان ۱۳ درصد بیشتر از آزمون‌های بدون خاکستر بادی است. کمترین درصد جذب آب مربوط به نمونه PFSP5 می‌باشد. درصد تغییرات جذب آب از هر دو استاندارد تقریباً با یکدیگر برابر است اما درصد جذب آب در استاندارد ASTM حدود ۴/۲ درصد بیشتر از استاندارد BS می‌باشد. شکل ۸ نشان می‌دهد درصد جذب آب آزمون با غلظت $10^5 \times 10^6$ نسبت به سایر غلظت‌ها کمتر است. همچنین غلظت مذکور نسبت به سایر غلظت‌ها در تولید محصولات هیدراته ترکیبات کلسیم و سیلیکات و پر شدن خلل و فرج‌ها نقش بیشتری دارد. مشابه سایر آزمایشات انجام شده با افزایش بیشتر غلظت باکتری تغییرات محسوسی در درصد جذب مشاهده نگردید.



شکل ۸- نمودار جذب آب آزمون‌های ۲۸ روزه

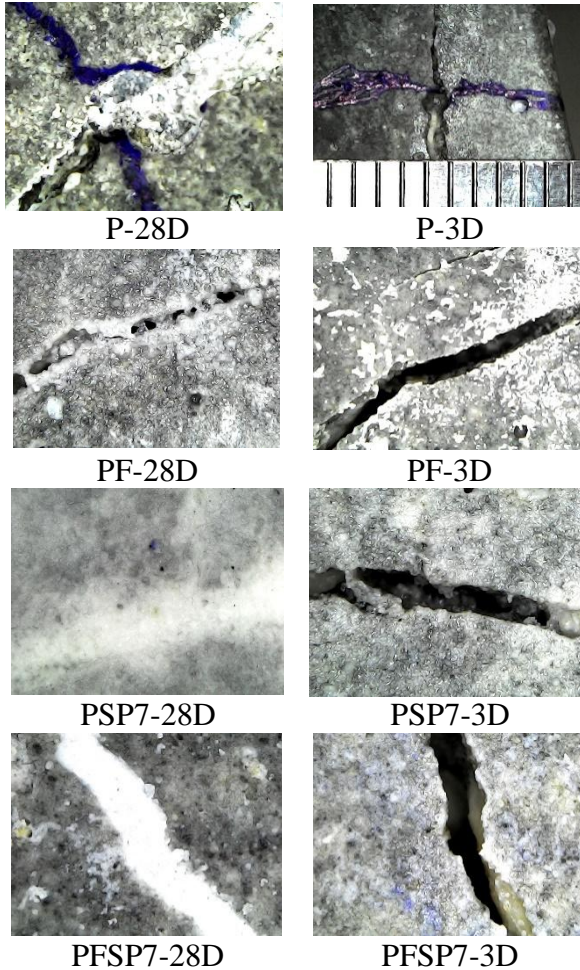
جدول ۹- درصد جذب آب آزمون‌ها در سن ۲۸ روزه

کد آزمون	BS	ASTM
P	۵.۹۵	۶.۲
PF	۵.۶۶	۵.۰۸
PSP4	۵.۶۵	۵.۷۹
PFSP4	۴.۳۷	۴.۹۵
PSP5	۵.۴۲	۵.۷۵
PFSP5	۴.۱۴	۴.۶۷
PSP6	۵.۵۹	۵.۸۳
PFSP6	۵.۴۱	۵.۷۳
PSP7	۵.۶۸	۵.۹
PFSP7	۵.۵	۵.۸

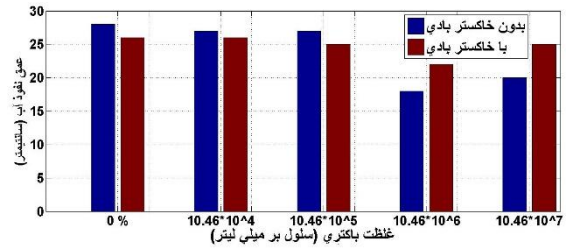
۳-۴- نفوذ ناپذیری

آزمایش نفوذپذیری یکی از آزمایش‌های دوام محسوب می‌شود. هدف از انجام این آزمایش تعیین عمق نفوذ آب تحت فشار در بتن می‌باشد [۴۱]. هرچقدر که بتن دارای خلل و فرج کمتری باشد

در شکل ۱۲ نشان دهنده تولید کلسیت در آزمون‌ها می‌باشد. همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است آزمون با کد P در چند قسمت خاص دارای هیدرات‌های اترینگیت و محصولات هیدراته ترکیبات کلسیم و سیلیکات می‌باشد.



نمونه‌های دارای خاکستر بادی کاهش یافته است که تأثیر منفی باکتری در غلظت‌های بالا را بر روی نمونه‌های دارای خاکستر بادی نسبت به نمونه‌های بدون خاکستر بادی نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نمودار عمق نفوذ آب در نمونه‌ها پس از ۲۸ روز

۳-۵- عکس‌ها

جهت ارزیابی آزمون‌ها و همچنین تأثیر باکتری بر روی ترمیم ترک‌ها عکس‌هایی با میکروسکوپ نوری و همچنین عکس‌هایی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از آزمون‌ها گرفته شده است. شکل ۱۱ عکس‌های گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد. بعد از ایجاد ترک در سن سه روزه و همچنین بعد از گذشت ۲۸ روز عکس‌هایی جهت ارزیابی گرفته شده است که به ترتیب با پسوند 3D و 28D در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تصاویر نشان دهنده عدم ترمیم قابل توجه ترک در آزمون با کد P بعد از گذشت زمان می‌باشد. در آزمون مذکور تنها درون عمق ترک تا حدودی محصولات هیدراته ترکیبات کلسیم تولید شده است.

محصولات بیان شده در اثر فرایند هیدراته شدن سیمان می‌باشد. همچنین آزمون دارای خاکستر بادی با کد PF پس از گذشت زمان درون ترک تا حدودی محصولات هیدراته ترکیبات کلسیم تولید شده است اما کل عمق ترک ترمیم نیافته است. بعد از ارزیابی سایر آزمون‌های دارای غلظت‌های مختلف باکتری، مشاهده گردید که غلظت $10^6 \times 10.46$ نسبت به سایر آزمون‌ها ترمیم‌شوندگی بهتری را از خود نشان داده است. آزمون‌های دارای این غلظت با کدهای PSP6 و PFSP6 در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. تصاویر نشان دهنده ترمیم کامل ترک می‌باشد.

مهم‌ترین عامل در پر شدن ترک‌ها و ترمیم یافتن آنها کلسیت ایجاد شده می‌باشد. نتایج حاصل از عکس‌های گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از جزئی از بتن نشان دهنده تولید کلسیت در ساختار داخلی آزمون‌ها است. قسمت‌های سفید رنگ

گسترده‌گی تولید کلسیت‌ها در آزمون با کد PF نشان دهنده تولید محصولات با دوام‌تر توسط خاکستر بادی می‌باشد. همچنین نتایج حاصل نشان دهنده تأثیر بسیار زیاد باکتری اسپوروسارینا با غلظت $10^6 \times 10.46$ در تولید کلسیت است.

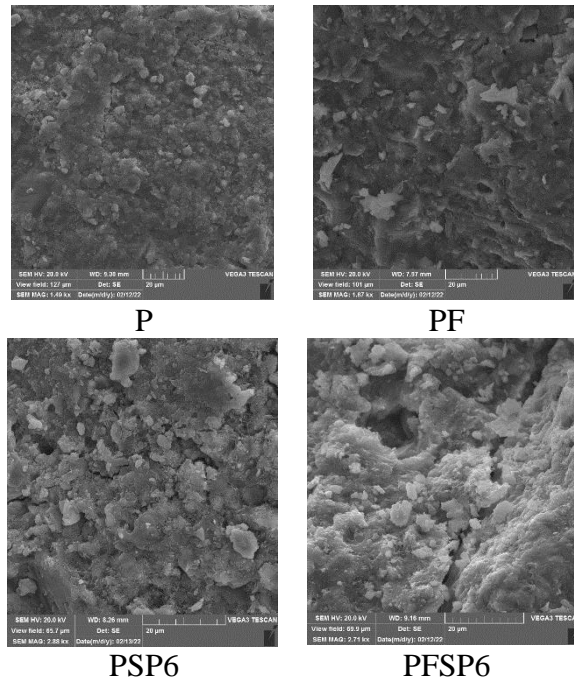
جهت آنالیز آزمون‌ها طیف سنجی انرژی پراکنده پرتو اشعه ایکس (EDS) نیز انجام شده است. طیف سنجی مواد نشان دهنده مواد تشکیل شده در اثر فرایند هیدراتاسیون سیمان و همچنین کلسیت‌های ایجاد شده توسط باکتری‌ها می‌باشد. نتایج EDS نشان دهنده مقدار مواد تولید شده در فرایند هیدراتاسیون می‌باشد. این مقادیر در نمودار شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان دهنده وجود محصولات هیدراته اولیه هستند که از مقادیر

خاکستر بادی و باکتری، نشان‌دهنده تولید کلسیت و پر شدن خلل و فرج‌های بتن توسط محصولات هیدراته ترکیبات کلسیم و سیلیکون می‌باشد. وجود محصولات یاد شده در آنالیز طیف سنجی انرژی پراکنده پرتو اشعه ایکس مشخص گردید. همچنین هیدرات‌های اترینگیت و سیلیکات‌های کلسیم عامل تأثیر گذار در خود ترمیم شونده‌گی بتن توسط خاکستر بادی و حاصل فعالیت باکتری‌ها می‌باشند. از بین غلظت‌های مختلف باکتری اسپوروسارسینا، مناسب‌ترین غلظت جهت ترمیم بتن و بهبود پارامترهای مقاومتی و دوام، غلظت 10.46×10^6 می‌باشد. آزمایش اولتراسونیک بتن بر روی نمونه‌های ترک خورده نشان داد ترمیم ترک‌ها در بتن دارای باکتری با غلظت 10.46×10^6 و 10.46×10^7 نسبت به سایر نمونه‌ها رشد بیشتری را نشان داده است. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و نفوذ ناپذیری نشان داد غلظت 10.46×10^6 بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه و کمترین عمق نفوذ آب را در بین نمونه‌ها داشته است. به گونه‌ای که افزایش مقاومت فشاری در غلظت یاد شده در نمونه‌های بدون خاکستر بادی حدود ۳۰ درصد و در نمونه‌های دارای خاکستر بادی حدود ۳۶ درصد مشاهده گردید. همچنین افزایش غلظت باکتری بیشتر از غلظت یاد شده، منجر به افزایش مقاومت فشاری نگردید. در نتایج حاصل از آزمایش جذب آب مشاهده گردید کمترین درصد جذب آب در بین نمونه‌های ارزیابی شده به غلظت 10.46×10^5 در نمونه دارای خاکستر بادی می‌باشد. همچنین وجود باکتری در طرح اختلاط منجر به کاهش حدوداً ۱۳ درصدی جذب آب نمونه‌ها گردید. بر اساس نتایج آزمایشات انجام شده مناسب‌ترین غلظت، جهت بهبود هم‌زمان پارامترهای مقاومتی و دوام از بین غلظت‌های مختلف باکتری اسپوروسارسینا، غلظت 10.46×10^6 پیشنهاد می‌گردد.

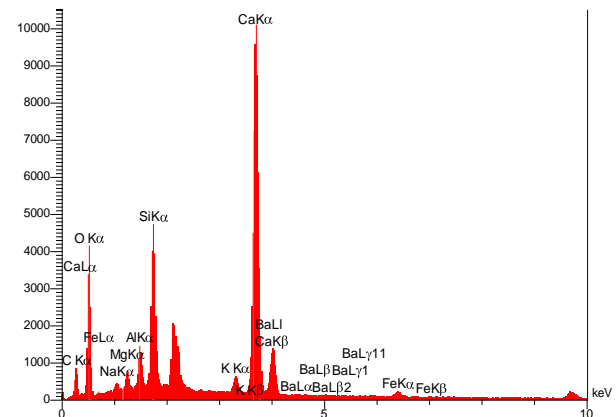
۵- مراجع

- [1] Li. W, Lin. X, Bao. D. W, Xie. Y. M, A review of formwork systems for modern concrete construction, Structures, Volume 38: 52-63, 2022.
 [2] Mohan. M, Rahul. A. V, van Dam. B, Zeidan. T, Schutter. G. D, Tittelboom. K. V, Performance criteria, environmental impact and cost assessment for 3D printable concrete mixtures, Resources, Conservation and Recycling, Volume 181:106255, 2022.
 [3] Aspiotis. K, Sotiriadis. K, Ntaska. A, Macova. P, Badogiannis. E, Tsvivilis. S, durability assessment

زیادی اکسیژن (O)، کربن (C)، کلسیم (Ca)، سیلیکون (Si) و مقادیر کمتر سدیم (Na)، آلومینیوم (Al)، منیزیم (Mg)، آهن (Fe) تشکیل شده است. وجود Ca و Si در شکل ۱۳ نشان‌دهنده پیوند های C-S-H در طرح اختلاط است.



شکل ۱۲- عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روشی SEM شکل ۱۲- عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روشی SEM (۲۸ روزه)



شکل ۱۳- آنالیز طیف سنجی انرژی پراکنده پرتو اشعه ایکس (۲۸ روزه)

۴- نتیجه گیری

در مقاله حاضر تأثیر خاکستر بادی و باکتری اسپوروسارسینا در ترمیم ترک‌های بتن و تأثیر آن بر پارامترهای مقاومتی و دوام مورد ارزیابی قرار گرفت. تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های حاوی

- [15] Peng. C, Wu. Q, Shen. J, Mo. R, Xu. J, Numerical study on the effect of transverse crack self-healing on the corrosion rate of steel bar in concrete, *Journal of Building Engineering*, Volume 41:102767, 2021.
- [16] Sri Durga. C. S, Ruben. N, Rama Chand. M. S, Indira. M, Venkatesh. C, Comprehensive microbiological studies on screening bacteria for self-healing concrete, *Materialia*, Volume 15:101051, 2021.
- [17] Sohail. M. G, Disi. Z. A, Zouari. N, Al Nuaimi. N, Kahraman. R, Gencturk. B, Rodrigues. D. F, Yildirim. Y, Bio self-healing concrete using MICP by an indigenous *Bacillus cereus* strain isolated from Qatari soil, *Construction and Building Materials*, Volume 328:126943, 2022.
- [18] Feng. F, Chen. B, Sun. W, Wang. Y, Microbial induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization, *Construction and Building Materials*, Volume 280:122460, 2021.
- [19] Su. Y, Zheng. T, Qian. C, Application potential of *Bacillus megaterium* encapsulated by low alkaline sulphoaluminate cement in self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 273:121740, 2021.
- [20] Nguyen. T, Ghorbel. E, Fares. H, Cousture. A, Bacterial self-healing of concrete and durability assessment, *Cement and Concrete Composites*, Volume 104:103340, 2019.
- [21] Chen. B, Sun. W, Sun. X, Cui. C, Lai. J, Wang. Y, Feng. J, Crack sealing evaluation of self-healing mortar with *Sporosarcina pasteurii*: Influence of bacterial concentration and air-entraining agent, *Process Biochemistry*, Volume 107:100-111, 2021.
- [22] Hosseini Balam. N, Mostofinejad. D, Eftekhari. M, Effects of bacterial remediation on compressive strength, water absorption, and chloride permeability of lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 145:107-116, 2017.
- [23] Omoregie. A, Palombo. E, Ong. D, Nissom. P, A feasible scale-up production of *Sporosarcina pasteurii* using custom-built stirred tank reactor for in-situ soil biocementation, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, Volume 24:101544, 2020.
- [24] Xiangliang Pan. V, Daoyong Zhang. O, Biomineralization based remediation of as (III) contaminated soil by *Sporosarcina ginsengisoli*, *Journal of Hazardous Materials*, Volumes 201:178-184, 2012.
- [25] Fu. Q, Wu. Y, Liu. S, Lu. L, Wang. J, The adaptability of *Sporosarcina pasteurii* in marine of self-healing in ordinary Portland cement concrete containing chemical additives, *Construction and Building Materials*, Volume 305:124754, 2021.
- [4] Hassanpour. M, Hassanpour. M, Rezaie. M, Salajegheh. E, Iqbal. M. R, Khandaker. M. U, Bradley. D. A, Studies of the mechanical and neutron shielding features of concrete by incorporation of green additive materials: Experimental and numerical study, *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 191:109846, 2022.
- [5] Mokhtar. M. M, Morsy. M, Taha. N. A, Ahmed. E. M, Investigating the mechanical performance of nano additives reinforced high-performance concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 320:125537, 2022.
- [6] Shashank. B. S, Kumar. K. P, Nagaraja. P. S, Fracture behavior study of self-healing bacterial concrete, *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [7] Khadiyal. S, Rawat. A, Kumar Das. S, Garg. N, Bacterial concrete: A review on self-healing properties in the light of sustainability, *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [8] Tang. Y, Xu. J, Application of microbial precipitation in self-healing concrete: A review on the protection strategies for bacteria, *Construction and Building Materials*, Volume 306:124950, 2021.
- [9] Reddy. K. M, Ramesh. B, Macrin. D, Effect of crystalline admixtures, polymers and fibers on self-healing concrete - a review, *Materials Today: Proceedings*, Volume 33:763-770, 2020.
- [10] Jogi. K. P, Lakshmi. T. V. S, Self-healing concrete based on different bacteria: A review, *Materials Today: Proceedings*, Volume 43:1246-1252, 2021.
- [11] Reddy. Y. P. V, Ramesh. B, Prem Kumar. L, Influence of bacteria in self-healing of concrete - a review, *Materials Today: Proceedings*, Volume 33:4212-4218, 2020.
- [12] Zhang. W, Zheng. Q, Ashour. A, Han. B, Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review, *Composites Part B: Engineering*, Volume:189:107892, 2020.
- [13] Zhang. L. V, Nehdi. M. L, Suleiman. A. R, Mehdizadeh Allaf. M, Gan. M, Marani. A, Tuyan. M, Crack self-healing in bio-green concrete, *Composites, Engineering*, Volume 227:109397, 2021.
- [14] Algaifi. H. A, Abu Bakar. S, Alyousef. R, Mohd Sam. A. R, Wan Ibrahim. M. H, Shahidan. S, Ibrahim. M, Salami. B. A, Bio-inspired self-healing of concrete cracks using new *B. pseudomycooides* species, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 12:967-981, 2021.

- [38] ASTM C618, standard test method for Compressive strength of cylindrical compressive specimen, ASTM international, west Conshohocken, PA.
- [39] ASTM C642, standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM international, west Conshohocken, PA. 2006
- [40] BS EN 12390, Testing hardened concrete Part 122, Method for determination of water absorption.
- [41] ISI 7031, "concrete hardened-determination of depth of penetration of water under pressure", ed, 1998.
- [42] BS EN 12390-8: 2009, Depth of penetration of water under pressure.
- environments and the feasibility of its application in mortar crack repair, *Construction and Building Materials*, Volume 332: 127371, 2022.
- [26] Mirshahmohammad. M, Rahmani. H, Maleki-Kakelar. M, Bahari. A, Effect of sustained service loads on the self-healing and corrosion of bacterial concretes, *Construction and Building Materials*, Volume 322:126423, 2022.
- [27] Cuzman. O, Rescic. S, Richter. K, Wittig. L, Tiano. P, Sporosarcina pasteurii use in extreme alkaline conditions for recycling solid industrial wastes, *Journal of Biotechnology*, Volume 214:49-56, 2015.
- [28] Hadi. S, Abbas. H, Almajed. A, Binyahya. A, Al-Salloum. Y, Biocementation by Sporosarcina pasteurii ATCC6453 under simulated conditions in sand columns, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022.
- [29] Feng. J, Dong. H, Wang. R, Su. Y. A, novel capsule by poly (ethylene glycol) granulation for self-healing concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 133:106053, 2020.
- [30] Lv. L, Guo. P, Liu. G, Han. N, Xing. F, Light induced self-healing in concrete using novel cementitious capsules containing UV curable adhesive, *Cement and Concrete Composites*, Volume 105:103445, 2020.
- [31] Pourfallahi. M, Nohegoo-Shahvari. A, Salimizadeh. M, Effect of direct addition of two different bacteria in concrete as self-healing agent, *Structures*, Volume 28:2646-2660, 2020.
- [32] Nasim. N, Dewangan. U. K., S. V. Deo, Effect of crystalline admixture, fly ash, and PVA fiber on self-healing capacity of concrete, *Materials Today: Proceedings*, Volume 32:844-849, 2020.
- [33] Durga. P, Singh. R. N, Climatic, pathogenic and host conditions for successful induction of *Ustilaginoidea virens* causing false smut of rice. *Indian Journal of Ecology*, Volume 44(5):407-411. 2017.
- [34] Reddy. N. R, Tetzloff. R. C, Solomon. H. M, Larkin. J. W, Inactivation of *Clostridium botulinum* nonproteolytic type B spores by high pressure processing at moderate to elevated high temperatures, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Volume 7(3):169-175,2006.
- [35] ACI committee 211, ACI 211. 1-91, standard practice for selecting proportions for normal, heavy weight, and mass concrete, formington Hills, MI, USA, 2002.
- [36] ASTM C192/C192M-16, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.
- [37] ASTM C 597 – 02 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.

Effect of Sporosarcina bacteria and fly ash on concrete self-healing ability

Mahmoud sadeghpour

Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

Mohammadreza Baradaran *

Department of Civil Engineering, Meymand center, Islamic Azad University, Meymand, Iran.

Abstract

In this paper, the effect of bacteria on self-healing concrete with fly ash has been studied. Sporosarcina bacteria with four different concentrations were used for evaluation. In concrete with fly ash, fly ash is replaced by 20% by weight of cement of mixing design has been used. In order to evaluate and control the specimen, destructive and non-destructive tests such as ultrasonic, permeability, water absorption and compressive strength have been used. To evaluate the effect of bacteria on self-healing of concrete cracks, concrete cracks were studied using scanning electron microscopy (SEM) and light microscope. The results show that the concentration of 10.46×10^6 is the most suitable concentration of Sporosarcina for the production of calcite and filling the pores of concrete by products such as calcium carbonate. The mentioned concentration resulted in a 36% increase in compressive strength in specimen with fly ash and a 30% increase in specimen without fly ash. The results also showed that increasing the bacterial concentration did not cause significant changes in compressive strength, water absorption, impermeability and ultrasonic wave velocity.

Keywords: Self-healing concrete, Bacteria, Sporosarcina, Fly ash.

* Corresponding Author: mr.baradaran@iau.ac.ir