

ارزیابی خواص مکانیکی بتن خود ترمیم شونده حاوی میکروارگانیسم

حمزه دهقانی*^۱، رضا حمزه^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی بم
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی بعثت، کرمان

hdehghani@bam.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۴/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۹/۸/۲۸

چکیده

بتن خود ترمیم نوعی بتن است که در صورت بروز ترک در آن، بدون نیاز به عامل بیرونی باعث ترمیم خودکار ترکها می شود. بتن حاوی میکروارگانیسم، دارای خاصیت خودترمیمی است. عامل خود ترمیمی شامل یک غلظت مشخص از باکتری به همراه یک ماده مغذی در بتن است که در صورت رسیدن آب و شرایط محیطی به بتن، باعث تولید کلسیم کربنات می شود. اما اینکه باکتری در خواص مکانیکی بتن چه تأثیری می گذارد موضوع بسیار مهمی در استفاده از این نوع بتن است که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، چهار دسته بتن مختلف ساخته شده است. بتن حاوی میکروارگانیسم در دو غلظت مختلف باکتری باسیلوس پاستوری و ماده مغذی کلسیم لاکتات ساخته و با بتن حاوی میکرو سیلیس، بتن حاوی لاتکس و بتن کنترل مقایسه شده است. در هر چهار دسته از طرح مخلوط مشابه با نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ و حاوی میکرو سیلیس، پلیمر لاتکس و کلسیم لاکتات که در درصدهای مختلف جایگزین سیمان شده اند، استفاده شده است. نمونه ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه از عمل آوری تحت آزمایش های مقاومت فشاری، خمشی و کششی قرار گرفته و نتایج آن ها با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که بهترین عملکرد در میان نمونه ها، مربوط به بتن حاوی میکرو سیلیس است و عامل خود ترمیمی (باکتری و ماده مغزی) موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش مقاومت های کششی و خمشی نسبت به نمونه کنترل شده است.

واژه های کلیدی: بتن خود ترمیمی، باکتری، باسیلوس پاستوری، لاتکس، میکرو سیلیس، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

بتن یکی از مصالح اصلی در سازه ها است. از جمله مهمترین ویژگی های آن، مقاومت فشاری بالای بتن می باشد. از جمله خواص نامطلوب بتن می توان به عدم پایداری در مقابل ترک و مقاومت کششی پایین اشاره کرد [1]. ترک های کوچک در بتن

را دچار ترک کردند و سپس با اضافه کردن خارجی نوار فوم حاوی غلظت‌های مختلف باکتری در قسمت ترک‌ها و قرار دادن نمونه‌ها در محیط کشت حاوی اوره و کلسیم کلرید (به‌عنوان ماده مغذی برای تولید کلسیم کربنات) پوشش ترک را بررسی کردند. در سال ۲۰۰۵ قوش و همکاران [8] با استفاده از باکتری بی‌هوازی کولی و باکتری شوانلا، مقاومت فشاری بتن (مالات ماسه سیمان) را در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در غلظت‌های مختلف میکروارگانسیم بررسی کردند. مقاومت فشاری در همه غلظت‌های میکروارگانسیم افزایش پیدا کرد و بیشترین افزایش برای غلظت ۱۰° سلول بر میلی‌لیتر برای تمامی سنین بود که به ۲۵ درصد در ۲۸ روز رسید. دمیونک و همکاران [9] در سال ۲۰۰۸ به بررسی وجود کلسیم کلرید به عنوان منبع غنی کلسیم در کنار باکتری پرداختند. آنها نشان دادند حضور کلسیم کلرید، میزان رسوبگذاری کلسیم لاکتات روی سطح بتن را افزایش داده و در نتیجه سطح آب موینه و نفوذپذیری در برابر گازها کاهش می‌یابد. جونکرز و همکاران [10] در سال ۲۰۱۰ برای آزمایش بتن حاوی باکتری از اسپوروسارسینا پاستوری در آب مخلوط بتن استفاده کردند. دو سری بتن با باکتری و بدون باکتری ساخته شد و مقاومت فشاری و خمشی آنها در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه بررسی شد. از نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که این باکتری تأثیر چندانی روی مقاومت خمشی و فشاری بتن ندارد. ون تیتلبون و همکاران (۲۰۱۰)، باکتری باسیلوس اسفاریکوس را برای هدف خود ترمیمی در بتن مناسب دانسته و نشان دادند که رسوبات تولید شده توسط این باکتریها تأثیر زیادی در مقاومت فشاری بتن دارد. آنها به منظور محافظت از باکتری در برابر محیط خشک و قلیایی بتن از سیلیکا ژل استفاده کرده اند. آنها با ایجاد شیارهای مصنوعی روی سطح بتن، به این نتیجه رسیدند که در صورت محافظت از باکتری، میتوان ترک‌های با عمق بیشتر را نیز، ترمیم سطحی نمود [11]. نصوحیان و همکاران در سال ۲۰۱۵، پنج گروه از نمونه‌های بتنی را تولید کرده و از طریق سوسپانسیون‌های حاوی اسپوروسارسینا پاستوری، باسیلوس اسفاریکوس و باسیلوس سابتیلیس سطح نمونه‌ها را ترمیم سطحی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با ترمیم سطحی نمونه‌های بتنی نیز می‌توان مشخصات دوام بتن (مقاومت فشاری، درصد جذب آب و نفوذ یون کلر) را

موجب ایجاد خطر در کل سازه می‌شود، به این دلیل که نفوذ آب در داخل ترک‌ها موجب تنزل خواص بتن و خوردگی فولاد شده و طول عمر سازه را کاهش می‌دهد. تعمیر سازه‌های موجود با اپوکسی یا پخش ملات بتن روی سطح آسیب‌دیده انجام می‌شود که باید با شرایط سازه موجود هماهنگی داشته باشد تا اطمینان از عملکرد آن حاصل شود. تعمیرات نیازمند گذشت زمان زیاد و هزینه بالایی می‌باشد، همچنین اگر در بخشی از سازه امکان دسترسی و یا تعمیر وجود نداشته باشد عملاً این مهم غیرقابل انجام است [2]. از لحاظ اقتصادی محدود کردن ترک‌ها بسیار مقرون به صرفه‌تر از ترمیم آنها پس از گذشت زمان و عمیق‌تر شدن ترک‌ها است. بتن خود ترمیم محصولی است که موجب تولید سنگ‌آهک می‌شود که ترک‌های ایجاد شده در سطح بتن را پر می‌کند. مواد خود ترمیم بتن را می‌توان بسته به محرک مورد نیاز برای شروع فرایند ترمیم، به دو دسته مستقل و غیرمستقل تقسیم نمود. فرآیند خود ترمیمی مستقل بدون نیاز به هیچگونه محرک خارجی آغاز می‌شود، در حالی که فرآیند خود ترمیمی غیر مستقل شامل مواد افزودنی طراحی شده برای مخلوط بتن به سه روش سیستم کپسولی، سیستم رگه‌ای و سیستم ذاتی امکان پذیر است. سیستم کپسولی در بعضی از باکتری‌ها، غلاف ژلاتینی چسبناکی است که دیواره سلولی را که توسط باکتری‌ها ساخته شده و به خارج ترشح می‌شود احاطه کرده است. انواع خاصی از باکتری با ژن باسیلوس به همراه مواد مغذی به داخل بتن هنگام مخلوط کردن اضافه می‌شود. این باکتری‌ها در صورت غیرفعال بودن تا حدود ۲۰۰ سال در بتن زنده می‌مانند. وقتی بتن ترک می‌خورد و آب به داخل ترک‌ها نفوذ می‌کند، این باکتری‌ها با سازوکار مخصوص خود باعث پر شدن ترک‌ها می‌شوند [4, 3]. برای اولین بار راما کریشنان و همکاران [5] در سال ۱۹۹۸ در کنفرانس بین‌المللی در استرالیا ایده استفاده از باکتری در بتن برای ترمیم ترک را پیشنهاد دادند. در ادامه راما چاندران و همکاران [6] در سال ۲۰۰۱ استفاده از میکروارگانسیم در بتن را ادامه دادند، آنها پوشش ترک توسط باکتری را در بتن بررسی کردند و به نتایج مثبتی رسیدند. سوکی بنگ و همکاران [7] در سال ۲۰۰۱ تأثیر استفاده از باکتری باسیلوس پاستوری بر تولید کلسیم کربنات در ملات سیمان را بررسی کردند. آنها ملات سیمان ساخته شده

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II

Compound	Constituent%
CaO	62.28
SiO ₂	20.79
Al ₂ O ₃	4.76
Fe ₂ O ₃	3.86
MgO	3.22
SO ₃	1.89
K ₂ O	0.68
Na ₂ O	0.37
Cl	0
Specific gravity ($\frac{Kg}{m^3}$)	3150

Table 1. Physical and chemical properties of type II portland cement

۲-۲ سنگدانه

سنگدانه‌های درشت مصرفی (بادامی) از نوع نیمه شکسته بوده و سنگدانه‌های ریز مصرفی (نخودی) نیز در دو نوع رودخانه‌ای و نوع شکسته است همچنین ریز دانه مورد استفاده ماسه با بیشترین اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر است. جنس سنگدانه‌ها از آهک است که مشخصات فیزیکی آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

Physical properties	Coarse gravel	Fine gravel	Sand
Specific gravity ($\frac{Kg}{m^3}$)	2650	2600	2500
Water absorption percentage	2.73	2.9	3.23

Table 2. Physical properties of aggregates

همچنین مشخصات مربوط به دانه‌بندی ماسه، شن ریز (نخودی) و شن درشت (بادامی) مصرفی در این پژوهش به ترتیب در جدول (۳، ۴ و ۵) نشان داده شده است. درصد عبوری از الک‌ها با استاندارد ASTM C33 هماهنگی داده شده و همان‌گونه که مشاهده می‌شود ضوابط این استاندارد ارضا شده است [16].

بهبود بخشید [12]. باندر و همکاران در سال ۲۰۱۷ برای محافظت از باکتری اسپوروسارینا پاستوری در ملات، از یک مخلوط هوا دار بر پایه نمک آمونیا استفاده کردند. در این روش سلول‌های باکتری با و بدون مواد مغذی مستقیماً به خمیر سیمان اضافه می‌شوند. نتایج نشان داد استفاده از حباب هوا روی ترسیب کلسیم کربنات اثری نمی‌گذارد؛ همچنین حضور باکتری اسپوروسارینا پاستوری در ملات می‌تواند انقباض ترک‌ها را کاهش داده و باعث بهبود میکرو ترکها در سنن اولیه شود [13]. مستوفی نژاد و سلماسی در سال ۲۰۲۰ به بررسی دوام و مقاومت فشاری بتن سبک وزن حاوی باکتری پرداختند. نتایج نشان دادند که با استفاده از باکتری در بتن، تغییرات جرم، حجم و جذب آب کاهش یافته و مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد [14]. در این پژوهش به منظور درک صحیح از عملکرد باکتری‌ها در بتن و تحلیل بهتر نتایج، چهار دسته مخلوط شامل بتن کنترل، بتن حاوی میکرو سیلیس، بتن حاوی پلیمر لاتکس و بتن حاوی میکروارگانسیم (باکتری) تهیه شده است. روی هر سری از نمونه‌ها، آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد مقاومت فشاری ۲۸ روزه در بتن حاوی باکتری با غلظت ۱۰^۷ و ۱۰^۹ سلول بر میلی‌لیتر به ترتیب به میزان ۱۲ و ۱ درصد نسبت به بتن کنترل افزایش داشته است. همچنین بتن حاوی باکتری با غلظت ۱۰^۷ سلول بر میلی‌لیتر، حدود ۱۰ درصد کاهش مقاومت خمشی و بتن حاوی غلظت ۱۰^۹ سلول بر میلی‌لیتر حدود ۶ درصد کاهش مقاومت خمشی داشته است. همچنین در مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن، بتن‌های حاوی باکتری با غلظت ۱۰^۷ و ۱۰^۹ سلول بر میلی‌لیتر به ترتیب حدود ۱۴ و ۲۵ درصد کاهش را نسبت به بتن کنترل داشته است.

۲- مواد و روش‌های آزمایش

۲-۱ سیمان

سیمان مصرفی در این پژوهش از نوع معمولی تیپ II، تولید کارخانه سیمان کرمان که هماهنگ با استاندارد ASTM C 150 است [15]. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان استفاده شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. محلول حاوی باکتری باسیلوس پاستوری

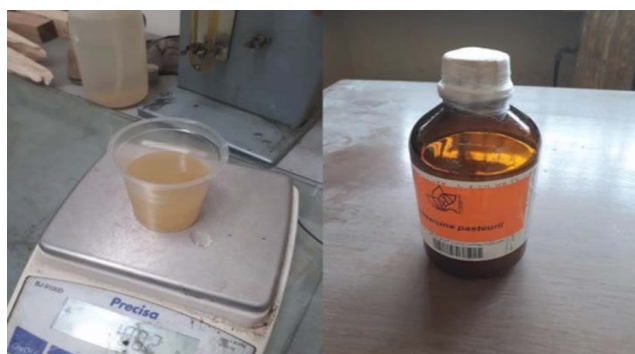


Fig. 1. Solution containing pasteurii bacillus bacteria

ماده مغذی استفاده شده در کنار باکتری، کلسیم لاکتات با فرمول شیمیایی $\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$ است. این ماده، پودر سفیدرنگی با جرم مولی ۲۱۸ گرم بر مول و چگالی ۱/۵ گرم بر سانتی مترمکعب است.

۴-۲ دوده سیلیس

میکرو سیلیس یک محصول جانبی از صنعت سیلیس و فروسیلیس است. تبدیل کوارتز با خلوص بالا در دمای ۲۰۰۰ درجه سانتی گراد دوده SiO_2 تولید می کند، که اکسید می شود و در ناحیه با دمای کم تبدیل به ذرات ریز شامل سیلیس غیر کریستالی می شود. ترکیبات شیمیایی دوده سیلیس استفاده شده در جدول شماره (۶) نشان داده شده است.

شکل ۲. ماده مغذی باکتری (کلسیم لاکتات)



Fig. 2. Bacterial Nutrition (Lactate Calcium)

جدول ۶. ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیس

Compound	Constituent%
CaO	0
SiO ₂	88.33
Al ₂ O ₃	1.16
Fe ₂ O ₃	1.69
MgO	0.95

جدول ۳. دانه بندی ماسه

Sieve size	Cumulative percent retained	Percent passing	ASTM: C33 requirement
4	3	97	95-100
8	15	85	80-100
16	46.5	53.5	50-85
30	63	37	25-60
50	83	17	10-30
100	96.5	3.5	2-10

Table 3. Granulation of sand

جدول ۴. دانه بندی شن ریز (نخودی)

Sieve size	Cumulative percent retained	Percent passing	ASTM: C33 requirement
1/2"	0	100	100
3/8"	12	88	85-100
4	90	10	10-30
8	92.5	7.5	0-10
16	95	5	0-5

Table 4. Granulation of Fine gravel

۳-۲ باکتری

باکتری استفاده شده در این پژوهش از نوع باسیلوس است. این باکتری دارای بیشتر از ۲۰۰ گونه است که از بین آن ها نوع باسیلوس پاستوری استفاده شد. دلیل این انتخاب توانایی زنده ماندن این باکتری در محیط های سیمانی (با pH بالا و پر از کلسیم) و همچنین ایجاد قابلیت افزایش مقاومت فشاری ملات سیمان است [17]. باکتری باسیلوس پاستوری با کد PTCC1645 از مرکز کلکسیون میکروارگانیسم های صنعتی تهیه شده است.

جدول ۵. دانه بندی شن درشت (بادامی)

Sieve size	Cumulative percent retained	Percent passing	ASTM: C33 requirement
1"	0	100	100
3/4"	10	90	90-100
1/2"	31	69	-
3/8"	65	35	20-55
4	99.5	0.5	0-10

Table 5. Granulation of Coarse gravel

با استفاده از روش ملی طرح مخلوط ایران، نوع کارگاه "ب"، اسلامپ S2، نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ و مقدار هوای ناخواسته نیز یک درصد در نظر گرفته شده است. در این پژوهش به منظور یکسان بودن شرایط تمام طرح مخلوطها و برای انجام مقایسه بین آنها، اسلامپ تمامی طرح مخلوطها در محدوده ۶ تا ۹ سانتی متر قرار گرفت. دو نوع مخلوط حاوی باکتری طراحی و ساخته شده است. در هر دو مخلوط از کلسیم لاکتات به میزان ۰/۵ درصد وزنی سیمان استفاده شده است. در مخلوط اول به میزان 10^7 واحد بر میلی لیتر، باکتری در آب مخلوط و در مخلوط دوم نیز به میزان 10^7 واحد بر میلی لیتر باکتری در آب مخلوط استفاده شده است. در مخلوط بتن حاوی میکرو سیلیس به مقدار ۸ درصد وزنی سیمان، از میکرو سیلیس در بتن استفاده شده است. برای رسیدن به کارایی لازم نیز، مقدار ۰/۲ درصد وزنی سیمان (کل) نیز از فوق روان کننده استفاده شده است و نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ است. همچنین در بتن حاوی لاتکس، مقدار ۲۰ درصد وزنی سیمان، از لاتکس به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است. نسبت اختلاط برای انواع نمونهها در جدول (۸) آورده شده است.

جدول ۸. نسبت های مخلوط بتن

CL	CBS	CB	cont rol	Mixture No.
Weight (kg)				
308	354	383	385	Cement
147	185	185	185	Water
1020	1030	1036	1030	Sand
272	274	276	274	Coarse gravel
408	412	414	412	Fine grave
-	-	1.93	-	Lactate Calcium
-	30.8	-	-	Silica fume
77	-	-	-	Latex
-	0.77	-	-	superplasticizer

Table 8. Concrete mix proportions

۲-۸ ساخت بتن و روش انجام آزمایشها

پیش از تهیه بتن، درصد رطوبت سنگدانه های ریزودرشت محاسبه شده و با توجه به نسبت مخلوط بتن که شامل

SO ₃	0.24
K ₂ O	0.38
Na ₂ O	0.23
Cl	0.09
Specific gravity ($\frac{Kg}{m^3}$)	2170

Table 6. Physical and chemical properties of silica fume

۲-۵ پلیمر لاتکس

لاتکس استفاده شده در این پژوهش، لاتکس بر پایه رزین های اکریلیکی اصلاح شده است که به عنوان چسباننده بتن، آب بند کننده بتن و اصلاح کننده ملات های تعمیری استفاده می شود. این مایع شیرین رنگ، یک امولسیون با جرم مخصوص ۱/۰۵ کیلوگرم بر لیتر و درصد جامدی ۵۰ درصد است.

۲-۶ فوق روان کننده

به منظور تأمین کارایی مخلوط حاوی میکرو سیلیس از فوق روان کننده پلی کریوکسیلاتی با نام تجاری P100-3R تولید شرکت شیمی ساختمان با وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است.

۲-۷ طرح اختلاط بتن

در این پژوهش، از ۴ دسته کلی مخلوط استفاده شده است. خلاصه ای از مشخصات مخلوط های ساخته شده، در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۷. مشخصات نمونهها

Specification	Mixture Name
control specimen	C
Concrete containing silica fume with a weight of 8% cement as cement substitute	CMS
Concrete containing latex with a weight of 20% cement as cement substitute	CL
Concrete containing bacteria concentration of 10^7 (cells/mL) with a weight of 0.5% calcium lactate as cement substitute	CB7
Concrete containing bacteria concentration of 10^9 (cells/mL) with a weight of 0.5% calcium lactate as cement substitute	CB9

Table 7. Specification of the specimens

سانتی متری انجام شده است. مقاومت کششی بتن معمولاً به صورت مستقیم و با آزمایش شکافت کششی که به نام آزمایش برزیلی نیز شناخته می شود، تعیین می شود. در این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C496 نمونه استوانه‌ای از پهلو تحت فشار قرار می گیرد [20].

۳- بررسی نتایج آزمایشگاهی

۳-۱ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری بتن

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه بتن در شکل (۳) آمده است. همان‌گونه که مشاهده می شود، مقاومت فشاری ۷ روزه بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت دارای مقاومت فشاری بالاتری نسبت به بتن کنترل است. این موضوع بیشتر می تواند به دلیل حضور کلسیم لاکتات در عامل خودترمیمی باشد، زیرا این ماده باعث تولید کلسیم کربنات در بتن می شود و سبب افزایش مقاومت می شود. مشاهده می شود که با افزایش غلظت باکتری، مقاومت بتن کاهش یافته است، این موضوع احتمالاً به این دلیل است که برای باکتری وجود هوای آزاد در بتن از اهمیت بالایی برخوردار است و با پر شدن این هوای خالی توسط باکتری‌ها و یا با استفاده بیشتر باکتری از این هوای آزاد امکان رشد باکتری و در نتیجه خواص بتن کمتر می شود. در این پژوهش نیز همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می شود، مقاومت فشاری در بتن حاوی باکتری با غلظت 10^7 و 10^9 به ترتیب به میزان ۲۲ و ۷ درصد نسبت به بتن کنترل افزایش داشته است.

شکل ۳. مقاومت فشاری ۷ روزه بتن

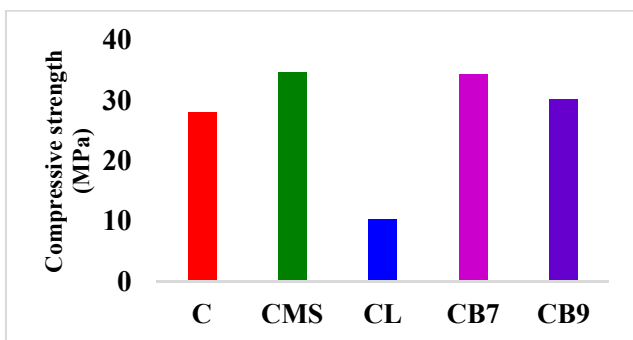


Fig. 3. Compressive strength of concrete at 7 days

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در شکل (۴) آمده است. در مقاومت ۲۸ روزه نیز بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت بهتر از بتن کنترل عمل کرده و به ترتیب دارای ۱۲ و ۱

سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک بود، نسبت مخلوط واقعی با توجه به سنگدانه‌های موجود به دست آورده شد. برای ساخت بتن‌های کنترل، بتن حاوی باکتری و بتن حاوی میکرو سیلیس طبق استاندارد ASTM C192/C192M سال ۲۰۰۹، ابتدا سنگدانه‌های ریز و درشت به همراه حدود یک سوم آب مورد نیاز در داخل مخلوط‌کن ریخته شده و به مدت یک دقیقه اختلاط مصالح صورت می پذیرد. پس از یک وقفه یک دقیقه‌ای، مجدد مخلوط‌کن روشن شده و ضمن اضافه نمودن تدریجی آب، بقیه مصالح به مخلوط‌کن اضافه شده و در نهایت به مدت ۵ دقیقه اختلاط انجام گرفت [18]. برای تهیه بتن حاوی میکرو سیلیس، همین روش بکار گرفته شد، لیکن فوق روان‌کننده بعد از اتمام تدریجی آب به مخلوط اضافه شد. برای ساخت بتن حاوی لاتکس مطابق استاندارد ASTM C1439 سال ۲۰۰۹، سنگدانه‌های درشت، لاتکس و نیمی از آب مورد نیاز با یکدیگر مخلوط شده و سپس سنگدانه‌های ریز، سیمان و باقی آب اضافه شد و بتن برای ۵ دقیقه مخلوط شد [19]. قالب‌های نمونه شامل قالب مکعبی با ضلع ۱۰ سانتی متری برای آزمایش مقاومت فشاری، قالب مکعب مستطیل مربوط به آزمایش مقاومت خمشی با ابعاد $40 \times 10 \times 10$ سانتی متر و قالب مربوط به آزمایش مقاومت کششی به شکل استوانه با قطر و ارتفاع به ترتیب ۲۰ و ۱۰ سانتی متر بودند. مطابق استاندارد ASTM C192/C192M قالب‌ها از سه لایه بتن پر شده و به هر لایه با میله‌ای به قطر ۱۶ میلی‌متر تعداد ۲۵ ضربه وارد می شود. در مورد بتن حاوی لاتکس نیز طبق استاندارد ASTM C1439 عمل‌آوری این نوع بتن‌ها به این صورت بود که در ابتدا توسط پلی اتیلن پوشانده شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۳ درجه سانتی گراد نگهداری شد. سپس پوشش پلی اتیلن برداشته شد و نمونه‌ها در دمای حدود ۲۳ درجه سانتی گراد و حدود ۵۰٪ رطوبت تا زمان آزمایش نگه‌داشته شد. آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌ها، در دو سن ۷ و ۲۸ روزه انجام شده است. به این صورت که بعد از ۷ و یا ۲۸ روز عمل‌آوری، نمونه‌ها توسط جک هیدرولیکی شکسته و عدد مورد نظر مقاومت فشاری خوانده می شود. مقاومت خمشی بتن در واقع مقاومت کششی بتن تحت کشش ناشی از خمش است که در این پژوهش با آزمایش سه نقطه‌ای بر تیر بتنی $10 \times 10 \times 40$

لاتکس است. بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت دارای مقاومت خمشی ۲۸ روزه کمتری نسبت به بتن کنترل می‌باشند. شکل ۵. مقاومت خمشی ۷ روزه بتن

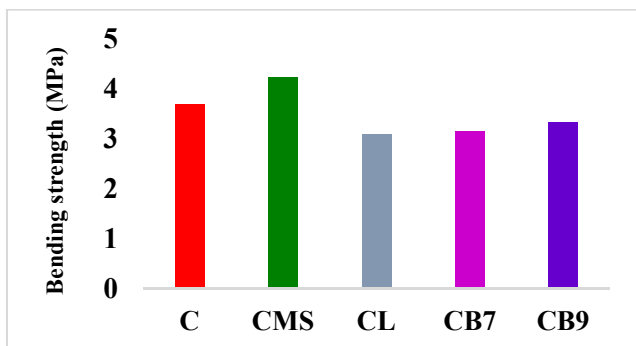


Fig. 5. Bending strength of concrete at 7 days

این نتیجه با پژوهش سیرا بلتران و همکاران [22] هماهنگی دارد، همچنین به دلیل گفته شده باکتری با غلظت بیشتر، کمک می‌کند که مقاومت خمشی بتن کمتر کاهش پیدا کند. همان‌گونه که در شکل (۶) دیده می‌شود، در مقاومت ۲۸ روزه، بتن حاوی ۸ درصد میکرو سیلیس نسبت به بتن حاوی عامل خودترمیمی در هر دو غلظت مقاومت خمشی بیشتری داشته است، به طوری که بتن حاوی ۸ درصد میکرو سیلیس دارای حدود ۳۷ درصد مقاومت بیشتر نسبت به بتن حاوی باکتری با غلظت 10^7 سلول بر میلی‌لیتر و حدود ۳۱ درصد مقاومت بیشتر نسبت به بتن حاوی 10^9 سلول بر میلی‌لیتر است.

شکل ۶. مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن

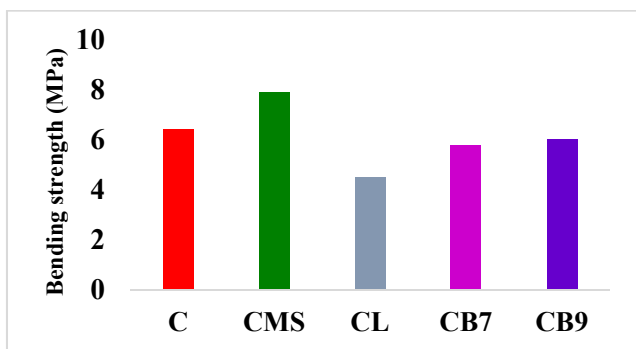


Fig. 6. Bending strength of concrete at 28 days

همچنین بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت مقاومت بسیار بیشتری نسبت به بتن حاوی لاتکس داشته است و بتن حاوی باکتری با غلظت 10^7 و 10^9 سلول بر میلی‌لیتر به ترتیب دارای

درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن کنترل هستند. در مقاومت فشاری ۲۸ روزه، بتن حاوی ۸ درصد میکرو سیلیس نسبت به بتن حاوی عامل خودترمیمی در هر دو غلظت مقاومت بیشتری داشته است، به شکلی که بتن حاوی ۸ درصد میکرو سیلیس دارای حدود ۱ درصد مقاومت بیشتر نسبت به بتن حاوی باکتری با غلظت 10^7 سلول بر میلی‌لیتر و حدود ۱۳ درصد مقاومت بیشتر نسبت به بتن حاوی 10^9 سلول بر میلی‌لیتر است. در مورد بتن حاوی میکرو سیلیس نتیجه به دست آمده با نتایج جهانی هماهنگی دارد. مظلوم و همکاران [21] برای بتن حاوی ۸ درصد میکرو سیلیس، حدود ۱۱ درصد افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه را مشاهده کرده‌اند.

شکل ۴. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن

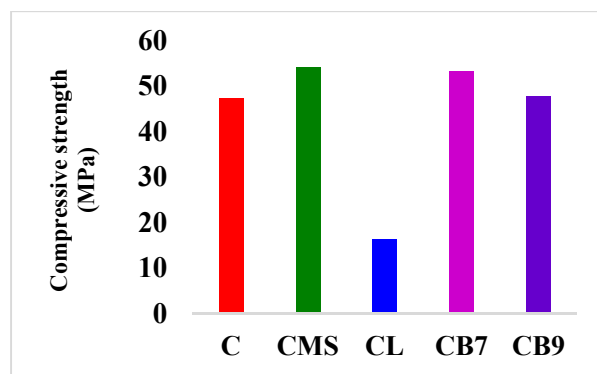


Fig. 4. Compressive strength of concrete at 28 days

۲-۳ نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی بتن

نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۷ روزه بتن در شکل (۵) آمده است. در مقاومت خمشی ۷ روزه، بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت دارای مقاومت کمتری نسبت به بتن کنترل است. در مقایسه با بتن کنترل، بتن حاوی باکتری با غلظت 10^7 سلول بر میلی‌لیتر، حدود ۱۴ درصد کاهش و بتن حاوی غلظت 10^9 سلول بر میلی‌لیتر حدود ۱۰ درصد کاهش داشته است. بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت مقاومت خمشی بیشتری نسبت به بتن حاوی ۲۰ درصد لاتکس داشته است، بتن حاوی باکتری با غلظت 10^7 سلول بر میلی‌لیتر دارای مقاومت حدوداً برابر با بتن حاوی لاتکس و بتن حاوی باکتری با غلظت 10^9 سلول بر میلی‌لیتر دارای ۸ درصد مقاومت بیشتر نسبت به بتن حاوی

فشاری باعث کاهش مقاومت کششی می‌شود و این مقدار کاهش در بتن حاوی باکتری با غلظت 10^9 سلول بر میلی‌لیتر بیشتر است (شکل ۸). در مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن، بتن‌های حاوی باکتری با غلظت 10^7 و 10^9 سلول بر میلی‌لیتر به ترتیب حدود ۱۴ و ۲۵ درصد کاهش را نسبت به بتن کنترل داشته است. از طرفی، مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن نیز با افزایش غلظت باکتری کمتر شده است. در مقایسه بتن حاوی باکتری و بتن حاوی میکرو سیلیس نیز، بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت دارای مقاومت کششی ۲۸ روزه کمتری نسبت به بتن حاوی میکرو سیلیس می‌باشند. بنابراین میکرو سیلیس نتیجه بهتری نسبت به میکروارگانیسم دارد. اما بتن حاوی لاتکس در مقاومت کششی ۲۸ روزه ضعیف‌تر از بتن حاوی باکتری عمل کرده است و از بتن حاوی باکتری با غلظت 10^7 و 10^9 سلول بر میلی‌لیتر به ترتیب حدود ۲۶ و ۱۵ درصد کمتری دارد.

شکل ۸. مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن

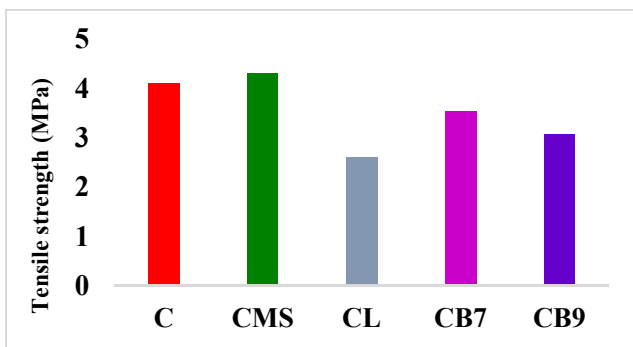


Fig. 8. Tensile strength of concrete at 28 days

۴- نتیجه گیری و بحث

بتن حاوی باکتری، نسل جدید بتن‌ها با قابلیت ترمیم خودکار ترک‌ها بوده و نیاز به توسعه و شناخت بیشتر دارد. در این پژوهش بتن حاوی باکتری در دو غلظت 10^7 و 10^9 سلول بر میلی‌لیتر ساخته شده است و مقاومت مکانیکی آن‌ها از قبیل مقاومت فشاری، خمشی و کششی با بتن حاوی میکرو سیلیس، بتن حاوی لاتکس و بتن کنترل (بتن بدون باکتری) مقایسه و نتایج ذیل حاصل شده است:

- استفاده از عامل خودترمیمی در بتن باعث افزایش

۲۸ و ۳۳ درصد مقاومت خمشی بیشتر نسبت به بتن حاوی 10^7 و 10^9 سلول بر میلی‌لیتر است.

۳-۳ نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی بتن

نتایج آزمایش مقاومت کششی ۷ روزه بتن در شکل (۷) آمده است.

بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت دارای مقاومت کششی ۷ روزه کمتری نسبت به بتن کنترل دارند و این مقدار کاهش در بتن حاوی باکتری با غلظت 10^9 سلول بر میلی‌لیتر بیشتر است. در مقاومت کششی ۷ روزه بتن، بتن‌های حاوی باکتری با غلظت 10^7 و 10^9 سلول بر میلی‌لیتر، به ترتیب حدود ۲۰ و ۳۱ درصد کاهش را نسبت به بتن کنترل داشته است.

شکل ۷. مقاومت کششی ۷ روزه بتن

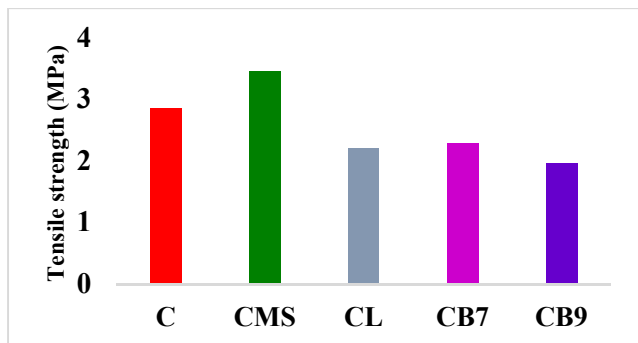


Fig. 7. Tensile strength of concrete at 7 days

در مقایسه بتن حاوی باکتری و بتن حاوی میکروسیلیس نیز، بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت دارای مقاومت کششی ۷ روزه کمتری نسبت به بتن حاوی میکرو سیلیس دارند. مقاومت کششی بتن‌های حاوی باکتری با غلظت 10^7 و 10^9 سلول بر میلی‌لیتر، به ترتیب حدود ۳۴ و ۴۳ درصد کمتر از بتن حاوی میکرو سیلیس بودند. به این معنی که میکرو سیلیس بهتر از میکروارگانیسم‌ها در مقاومت کششی بتن کار می‌کنند. بتن حاوی لاتکس هم تقریباً مانند بتن حاوی باکتری عمل کرده است و مقاومت کششی ۷ روزه در بتن حاوی باکتری با غلظت 10^7 سلول بر میلی‌لیتر مقاومت حدود ۳ درصد کمتر و در بتن حاوی باکتری با غلظت 10^9 سلول بر میلی‌لیتر حدود ۸ درصد بیشتری شده است. بتن حاوی باکتری در هر دو غلظت دارای مقاومت کششی ۲۸ روزه کمتری نسبت به بتن کنترل دارند، به با این معنی که عامل خودترمیمی برخلاف افزایش مقاومت

اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

۵- مراجع

- [1] Parastegari N. & Mostofinejad D. 2019 Influence of bacteria on performance of air entrained concrete. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **50**(6), 1103-1112.
- [2] Dehghani H. & Fadaee M.J. 2014 Probabilistic assessment of torsion in concrete beams externally strengthened with CFRP composites. *Materials and Structures*, **47**(5), 885-894.
- [3] 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.
- [4] Sidiq A., Gravina R & Giustozzi F. 2019 Is concrete healing really efficient? A review. *Construction and Building Materials*, **250**, 257-273.
- [5] Ramakrishnan V., Bang S.S. & Deo K.S. 1988 A novel technique for repairing cracks in high performance concrete using bacteria. *International Conference on High Performance High Strength Concrete*, Perth, Australia
- [6] Ramachandran S.K., Ramakrishnan V. & Bang S.S. 2001 Remediation of concrete using microorganisms. *ACI Materials Journal*, **98**(1), 3-9.
- [7] Bang S.S., Galinat J.K. & Ramakrishnan V. 2001 Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. *Enzyme Microb Tech*, **28**, 404-409.
- [8] Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D. & Pal S. 2005 Use of microorganisms to improve the strength of cement mortar. *Cement Concrete Res*, **35**, 1980-1983.
- [9] De Muynck W., Debrouwer D., De Belie N. & Verstraete W. 2008 Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement Concrete Res*. **38**, 1005-1014.
- [10] 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.
- [11] 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.

مقاومت فشاری بتن (۷ روزه و ۲۸ روزه) می شود، اما این افزایش به اندازه افزایش ناشی از به کارگیری میکرو سیلیس نیست. این موضوع به دلایل مختلف می تواند باشد؛ اول اینکه ذرات میکروارگانسیمها باعث کامل شدن دانه بندی سنگدانه های بتن شده و فضاهای بسیار ریز را پر می کنند، دوم اینکه حضور کلسیم لاکتات در عامل خودترمیمی خود باعث تولید کلسیم کربنات و تشکیل کریستال های ضروری بتن می شود.

- استفاده از باکتری با غلظت بیشتر در مقاومت فشاری بتن تأثیر منفی دارد، به این معنی که با استفاده بیشتر از باکتری در بتن افزایش کمتری در مقاومت فشاری مشاهده می شود تا جایی که حتی باعث کاهش مقاومت فشاری به نسبت مقاومت بتن کنترل نیز می شود. این موضوع این را می رساند که باکتری ها برای رشد نیاز به فضای خالی حاوی اکسیژن و دی اکسید کربن داشته و هرچه فضای خالی بیشتر باشد، به افزایش مقاومت فشاری بتن کمک بیشتری می کنند.
- عامل خودترمیمی باعث کاهش مقاومت خمشی و کششی بتن می شود و در این مورد برعکس میکرو سیلیس عمل می کند، اما در کل بهتر از لاتکس بوده و نتایج بهتری را پدید می آورند. استفاده از باکتری بیشتر باعث می شود که مقاومت خمشی بتن کمتر کاهش پیدا کند، اما در مورد مقاومت کششی برعکس است و باکتری بیشتر، کاهش بیشتری را هم به دنبال دارد.
- در تمامی خواص مکانیکی، در گذر زمان بتن حاوی باکتری پویاتر از بتن های دیگر عمل کرده و به واکنش های خود ادامه می دهد و همچنین افزایش مقاومت های فشاری بیشتری را به نسبت سایر بتن ها تجربه می کند. این افزایش در مرور زمان کمتر می شود و این موضوع به این دلیل است که با انجام واکنش ها فضای خالی برای رشد و فعالیت میکروارگانسیمها کمتر شده و فعالیت آنها متوقف می شود.

- [18] ASTM C192, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Specimens in the Laboratory*, 2002.
- [19] ASTM C1439, *Standard Test Methods for Evaluation Latex and Powder Polymer Modifiers for use in Hydraulic Cement Concrete and Mortar*, 2019.
- [20] ASTM C469, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson Ratio of Concrete in Compression*, 2014.
- [21] Mazloom M, Ramezaniapour AA & Brooks JJ. 2004 Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement & Concrete Composite*, 4:347-357.
- [22] Sierra-Beltran MG, Jonkers HM & Schlangen E. 2004 Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair. *Construction Building Materials*, **67**, 344-352.
- [12] Nosouhian F., Mostofinejad, D. & Hasheminejad, H. 2015 Concrete Durability Improvement in a Sulfate Environment Using Bacteria. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, **28**(1), 1-12.
- [13] Bundur Z.B., Amiri A., Erşan Y.Ç., Boon N. & De Belie N. 2017 Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability. *Cement and Concrete Research*, **98** 44-49.
- [14] Salmasi F. & Mostofinejad D. 2020 Investigating the effects of bacterial activity on compressive strength and durability of natural lightweight aggregate concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, **251**:119032.
- [15] ASTM C 150, *Standard Specification for Portland Cement*, 2014.
- [16] ASTM C 33, *Standard specification for concrete aggregates*, 2013.
- [17] Jonkers H. M. 2007 Self Healing Concrete: A Biological Approach. *Self Healing Materials*, 195-204.

Mechanical Properties Evaluation of Self-Healing Concrete Containing Microorganisms

H. Dehghani^{1*}, R. Hamzeh²

1- Assist. Prof., Faculty of Civil Eng., Higher Education Complex of Bam

2- M.Sc. Graduate., Faculty of Civil Eng., Besat Higher Education Institute of Kerman

hdehghani@bam.ac.ir

Abstract:

Concrete is the most widely made construction material in the structural engineering world. Advantages such as high compressive strength, availability of raw materials, and low preparation cost make concrete one of the most important used construction materials. Under harsh environmental conditions, aggressive agents such as sulfates and chlorides penetrate the concrete through these cracks to damage the concrete. While concrete cracks are not only expensive to repair, they are often hard to detect as well. It is now identified that the strength of concrete alone is not sufficient, the degree of harshness of the environmental condition to which concrete is exposed over its entire life is very important. Self-healing concrete is a type of concrete that has the ability to repair itself without the need for an external agent during cracking. Concrete containing microorganisms has self-healing properties. The self-healing agent contains a specific concentration of bacteria with a nutrient in the concrete that produces calcium carbonate while the water and environmental conditions are suitable for the concrete. In this research, four different specimens of concrete have been made. Concrete containing microorganisms is made in two different concentrations of bacterium bacillus pasteurization ($10^7, 10^9$ cells/ml) and calcium lactate nutrients and is compared with concrete containing silica fume, concrete containing latex and control concrete. In all four specimens, the same mix design was used with a water/cement ratio of 0.48 and containing silica fume, latex polymer, and calcium lactate, which replaced cement in different percentages. Specimens were subjected to compressive, flexural and tensile strength tests at 7 and 28 days of operation, and the results were compared. The results showed that the best performance among all specimens for concrete containing silica fume and self-repair agent (bacteria and brain material) increased compressive strength and reduced tensile and flexural strengths compared to the controlled specimens. The use of a self-healing agent in concrete increases the compressive strength of concrete, but this increase is not as great as the increase in silica fume. Bacteria with a higher concentration have a negative effect on the compressive strength of concrete so that more use of bacteria in concrete increases the compressive strength to such an extent that it even reduces the compressive strength compared to the concrete strength of the control specimens. The self-healing agent reduces the flexural and tensile strength of concrete, as opposed to silica fume but they are better than latex and produce better results.

Keywords: Self-healing concrete, Bacteria, Pasteurii bacillus, Latex, Silica fume, Mechanical properties.