

## تأثیر کاربرد باکتری بر بهبود عملکرد بتن هوا دار

نیلوفر پرستگاری، داود مستوفی نژاد\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

## تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۷ دی ۱۳۹۵  
بازنگری: ۶ فروردین ۱۳۹۷  
پذیرش: ۹ فروردین ۱۳۹۷  
ارائه آنلاین: ۲۰ فروردین ۱۳۹۷

## کلمات کلیدی:

بتن هوا دار  
باکتری  
عمق کرناسیون  
حباب‌های هوا  
محیط عمل‌آوری

**چکیده:** یکی از روش‌های افزایش دوام بتن و ترمیم ترک‌های موجود در آن، استفاده از روش‌های بیولوژیکی (اضافه کردن باکتری به آب اختلاط بتن) است. تحقیقات نشان داده است، بتن‌های حاوی باکتری، دارای pH بالا، منافذ با اندازه‌ی نسبتاً کوچک (کم‌تر از ۰/۸ میکرو متر) و محیطی تقریباً خشک هستند؛ بنابراین اگر محیط کشت حفاظت نشده باشد، در بلند مدت باکتری دوامی در بتن نخواهد داشت. یکی از این راه کارهای محافظت از باکتری در بتن، ایجاد حباب‌های هوا است که برای اولین بار در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. باکتری‌ها وارد منافذ هوا می‌شوند و در آن جا به فعالیت خود ادامه می‌دهند. در این مقاله با در نظر گرفتن درصدهای متفاوت هوا، میزان تأثیر هوا دار بودن بتن در فعالیت باکتری‌ها، مورد سنجش قرار می‌گیرد. بدین منظور از ۶ طرح اختلاط با درصدهای متفاوت هوا استفاده می‌شود که نیمی از آن‌ها حاوی باکتری است. پس از ساخت، نمونه‌ها به دو دسته تقسیم شده و در دو محیط متفاوت به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری می‌شود. هدف، بررسی عمق کرناسیون است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد حباب‌های هوای ایجاد شده در بتن، کارایی باکتری را بالاتر برده و با کاربرد باکتری در بتن هوا دار و قرار دادن آن در کنار منبع کلسیم، عمق کرناسیون کاهش می‌یابد.

## ۱- مقدمه

بتن یکی از پر کاربردترین مصالح ساختمانی است. از جمله مهم‌ترین خصوصیات آن، قابلیت شکل‌پذیری به هر حالت مطلوب است. از جمله خواص نامطلوب بتن می‌توان به مقاومت کششی بسیار پایین، پوسته پوسته شدن و عدم پایداری در برابر ترک‌ها اشاره کرد. در حقیقت مقاومت فشاری بالای بتن آن را به عنوان یکی از مصالح مطلوب در ساخت و ساز معرفی می‌کند [۱].

داشتن مقاومت فشاری بالا به تنهایی نمی‌تواند استفاده از سازه‌های بتنی را ایجاب نماید. طول عمر کافی برای هر سازه نیز از نیازهای اولیه در طراحی است. با توجه به این که بتن در بیش‌تر موارد بدون پوشش در محیط ظاهر می‌شود و شرایط محیطی در طول عمر آن بسیار مؤثر است، استفاده از روش‌هایی برای افزایش دوام و طول عمر بتن الزامی به نظر می‌رسد [۱]. یکی از مشکلات اصلی برای ساختمان‌های بتنی، خوردگی میلگردها است. هنگامی که گاز کربن دی‌اکسید به بتن نفوذ می‌کند، روند خوردگی میلگردها سریع‌تر می‌شود. در حقیقت با نفوذ کربن دی‌اکسید به بتن، قلیائیت محیط کم‌تر شده و بستر مناسبی برای خوردگی ایجاد می‌شود [۲]. یک راه حل برای مشکل ذکر شده، غیر قابل نفوذ کردن بتن در برابر عوامل خارجی

است [۱]. با توجه به ناهمگنی بتن، یکی دیگر از مشکلات سازه‌های بتنی، تشکیل ترک در سطح آن است. تا زمانی که ترک‌ها بتوانند مسیری را برای نفوذ آب و گاز فراهم کنند، جلوگیری از کرناتنه شدن بتن اجتناب ناپذیر است؛ بنابراین باید ترک‌های ایجاد شده به سرعت ترمیم شوند تا عمر مفید بتن افزایش یابد [۳]. یکی از موادی که برای ترمیم ترک‌ها استفاده می‌شود، اپوکسی است. اپوکسی علاوه بر هزینه‌ی مالی بسیار سنگین، توانایی نفوذ به عمق ترک‌ها را نیز ندارد [۳ و ۴].

از لحاظ اقتصادی محدود کردن ترک‌ها در سنین اولیه، بسیار مقرون به صرفه‌تر از ترمیم آن‌ها پس از گذشت زمان و بزرگ‌تر و عمیق‌تر شدن ترک‌هاست. رسوبات کلسیم کرناتنه می‌توانند برای هدف خود ترمیمی در بتن استفاده شوند. با استفاده از باکتری‌ها می‌توان چنین رسوباتی را تولید و در ساخت بتن استفاده کرد. رسوبات ایجاد شده از باکتری‌ها توانایی خود ترمیمی از عمق ترک تا سطح بتن را دارند [۳ و ۵ و ۶]. در اکثر تحقیقات صورت گرفته روی اثر خود ترمیمی از خانواده‌های باکتری باسیلوس<sup>۱</sup> برای تولید کلسیم کرناتنه استفاده شده است. این خانواده از باکتری‌ها با اوره، آمونیم و دی‌اکسید کربن تغذیه می‌شوند و کلسیم کرناتنه تولید میکنند [۷-۱۰]. خود ترمیمی با استفاده از باکتری، ترک‌ها را در سنین اولیه پوشش داده و با ساختار داخلی بتن سازگاری دارد.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dmostofi@cv.iut.ac.ir

ونگ<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ باکتری را در هیدروژل به صورت کپسول درآوردند. آن‌ها با استفاده از آزمایش ترموگراویمتریک<sup>۸</sup> میزان رسوب کلسیم کربنات را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد حداکثر عرض ترک ترمیم یافته در نمونه‌هایی که توسط میکروکپسول‌ها حفاظت شده‌اند ۰/۵ میلی‌متر است این در حالی است که در نمونه‌های حاوی باکتری، ماکسیمم عرض ترک ترمیم یافته، ۰/۳-۰ میلی‌متر است. همچنین در نمونه‌های حفاظت شده ۶۸ درصد کاهش جذب آب دیده شده این در حالی است که در نمونه‌های باکتریایی حفاظت نشده، درصد جذب آب ۵۵-۱۵ درصد است [۱۶].

ارسان<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۵) به منظور محافظت از باکتری در ملات، از ۶ روش مختلف استفاده کردند. یکی از این روش‌ها استفاده از حباب‌های هوا است. آن‌ها نشان دادند باکتری با قرارگیری در حباب‌های هوا از محیط خشک و قلیایی ملات دور می‌ماند. آن‌ها در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که با استفاده توأم از مواد هوازا و باکتری در ملات، مقاومت فشاری ۷ روزه بین ۲۲ تا ۳۴ درصد و ۲۸ روزه بین ۶۰ تا ۶۸ درصد کاهش می‌یابد؛ همچنین گیرش اولیه سیمان ۴۰ دقیقه و گیرش نهایی آن ۶۰ دقیقه به تأخیر می‌افتد [۱۷].

بندر<sup>۱۰</sup> و همکاران 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 بر 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 سنین اولیه شود [۱۸].

نصوحیان و مستوفی نژاد در سال ۲۰۱۵ به بررسی دوام بتن حاوی باکتری در محیط سولفات‌ها پرداختند. آن‌ها در هفت گروه متفاوت، نمونه‌های مکعبی ۷ سانتی‌متری بتنی تولید کرده و در هنگام ساخت بتن از دو نوع باکتری متفاوت استفاده کردند. آن‌ها مشخصات دوام بتن را از طریق آزمایش‌های تغییر جرم، تغییر حجم، جذب آب و تغییرات مقاومت فشاری اندازه‌گیری کردند. همچنین برای آزمایش نفوذ یون کلرید<sup>۱۱</sup> دیسک‌های بتنی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر در هفت گروه متفاوت تولید کردند. نتایج نشان دادند که با استفاده از باکتری در بتن، تغییرات جرم، حجم و جذب آب کاهش یافته و مقاومت فشاری نمونه‌ها تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نفوذ یون کلرید در نمونه‌های حاوی باکتری کمتر از نمونه‌های شاهد است [۱۹].

نصوحیان و همکاران در تحقیقی دیگر (۲۰۱۵)، پنج گروه از نمونه‌های

گولاپودی<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۵)، اولین کسانی بودند که به منظور جلوگیری از نفوذ آب و ترک خوردن دیواره‌ی تونل‌ها و ستون‌ها از باکتری استفاده کردند [۱۱].

دمیونک<sup>۲</sup> و همکاران 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 بر روی سطح بتن را افزایش داده و در نتیجه سطح آب موینه و نفوذپذیری در برابر گازها کاهش می‌یابد [۱۲].

جونکرز<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۰) در هنگام ساخت بتن، محلول حاوی باکتری را به خمیر سیمان اضافه و از کلسیم لاکتات به عنوان منبع غنی کلسیم در کنار باکتری استفاده کردند. آن‌ها پس از ۷ روز پوشش ۲۰-۸۰ میکرومتری و پس از ۲۸ روز، پوشش ۲-۵ میکرومتری کلسیم کربنات بر روی ترک‌ها مشاهده کردند؛ همچنین نشان دادند باکتری به مدت ۴ ماه در بتن زنده مانده و به فعالیت خود ادامه می‌دهد [۷].

حسینی بالام و همکاران در سال ۲۰۱۷ از سلول‌های باکتری در راستای کاهش درصد جذب آب سنگدانه‌ها استفاده کردند. آن‌ها در این راه از دو نوع باکتری باسیلوس پاستوری و باسیلوس سابتیلیس با غلظت‌های متفاوت استفاده کردند. نتایج نشان داد باکتری پاستوری عملکرد بهتری در کاهش آب موینه سنگدانه‌ها دارد. همچنین آن‌ها در تحقیقی دیگر مشاهده کردند نمونه‌های حاوی غلظت ۱۰<sup>۶</sup> cells/ml باکتری باسیلوس پاستوری، درصد جذب آب و نفوذ یون کلر کم‌تر (به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد) و مقاومت فشاری بیش‌تری (۲۰ درصد) نسبت به نمونه‌های شاهد دارند [۱۳ و ۱۴].

ون تیتلبون<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، باکتری باسیلوس اسفاریکوس<sup>۵</sup> را برای هدف خود ترمیمی در بتن مناسب دانسته و نشان دادند که رسوبات تولید شده توسط این باکتری‌ها تأثیر به‌سزایی در مقاومت فشاری بتن دارد. ون تیتلبون و همکاران به منظور محافظت از باکتری در برابر محیط خشک و قلیایی بتن از سیلیکا ژل<sup>۶</sup> استفاده کرده‌اند. آن‌ها با ایجاد شیارهای مصنوعی بر روی سطح بتن، به این نتیجه رسیدند که در صورت محافظت از باکتری، می‌توان ترک‌های با عمق بیش‌تر را نیز، ترمیم سطحی نمود [۴].

نصوحیان و مستوفی نژاد در سال ۲۰۱۵ به منظور فراهم کردن محیط مناسبی برای فعالیت باکتری‌ها در بتن، از ژل محافظت‌کننده استفاده کردند. به این منظور ۳۰ نمونه‌ی مکعبی و ۲۷ دیسک بتنی آماده کرده و با استفاده توأم از باکتری و ژل محافظت‌کننده، آن‌ها را ترمیم سطحی نمودند. سپس میزان جذب آب و نفوذ یون کلرید را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها نشان دادند نمونه‌های ترمیم شده توسط باکتری و ژل محافظت‌کننده ۷ درصد جذب آب کم‌تر و ۱۲ درصد نفوذ یون کلر کم‌تری دارد [۱۵].

- 1 U. Gollapudi
- 2 W. De Muynck
- 3 H. M. Jonkers
- 4 Van Tittelboom
- 5 Bacillus Sphaericus
- 6 Silica Gel

7 J. Wang

8 Thermo-gravimetric analysis (TGA)

9 Y.C. Ersan

10 Bundur Z.B

11 Rapid Chlorides Penetration Test (RCPT)

باکتری رشد یافته و محیط کشت آن از انکوباتور خارج شده و به آب اختلاط بتن اضافه می‌شوند.

**جدول ۱: محیط کشت اختصاصی و دمای نگهداری**

Table. 1. Specific media culture and appropriate temperature

مقدار	ترکیبات محیط کشت	گونه‌ی باکتری
۸ گرم	نوترینت براث <sup>۴</sup>	اسپوروسارسینا
یک لیتر	آب مقطر	
۲۰ گرم	اوره	پاستوری



شکل ۱: دستگاه انکوباتور شیکر دار

Fig. 1. Shaker incubator device

**۲-۲- طرح اختلاط بتن**

طرح اختلاط بتن برای ساخت نمونه‌ها، طبق آیین نامه‌ی ACI-211 [۲۲] تعیین گردید. هدف، ساخت نمونه‌هایی با مقاومت ۲۵ مگا پاسکال در سن ۲۸ روزگی و اسلامپ بین ۷۵ الی ۱۰۰ میلی متر است. درشت دانه‌ها از نوع شکسته و با ابعاد ۹/۵ میلی متر انتخاب شدند. سیمان مصرفی در این تحقیق از نوع معمولی تیپ I (۴۲۵-۱)، تولید کارخانه‌ی سیمان سپاهان است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان استفاده شده در جدول ۲ نشان داده شده است. ریز دانه‌ها ابعادی بین صفر تا پنج میلی‌متر دارند و جهت ساخت نمونه‌ها کاملاً تمیز و عاری از هرگونه آلودگی و گل و لای هستند. نسبت اختلاط مصالح مورد استفاده برای یک متر مکعب در جدول ۳ ذکر گردیده و اصلاح‌های لازم جهت رطوبت دانه‌ها در نظر گرفته شده است. ماده‌ی هوازای مصرفی جهت هوادار کردن بتن نیز از کارخانه‌ی شور لول تهیه شده و بدون رنگ و بو است.

5 Nutrient broth

بتنی را تولید کرده و از طریق سوسپانسیون‌های حاوی اسپوروسارسینا پاستوری، باسیلوس اسفاریکوس و باسیلوس سابیلیس<sup>۱</sup> 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 بهبود بخشید [۲۰].

بتن حاوی باکتری، محیطی تقریباً خشک و pH زیادی دارد؛ بنابراین اگر باکتری در ساختار بتن حفاظت نشود، در بلند مدت دوامی در بتن نخواهد داشت [۷]. به همین دلیل در مطالعات میکروبیولوژی، روش‌های محافظت از محیط کشت باکتری در بتن، مورد بررسی قرار گرفته است [۳ و ۲۱]. یکی از این روش‌ها، ایجاد حباب‌های هوا در بتن است؛ باکتری‌ها وارد منافذ هوا می‌شوند و در آن‌جا به فعالیت خود ادامه می‌دهند [۳]. همچنین سلول‌های باکتری برای ادامه حیات در بتن، نیاز به اکسیژن دارند. حباب‌های هوای ایجاد شده اکسیژن لازم برای ادامه‌ی حیات باکتری‌ها را فراهم می‌کنند. در این تحقیق به منظور بهینه کردن تعداد نمونه‌های ساخته شده و بررسی منطقی نتایج، از روش طراحی آزمایش‌ها<sup>۲</sup> استفاده شده است. نمونه‌ها در ۶ گروه متفاوت با درصدهای متفاوت هوا به صورت تصادفی و با استفاده از طرح کرت خرد شده<sup>۳</sup> ساخته می‌شوند که نیمی از آن‌ها حاوی باکتری است. سپس به دو محیط متفاوت برای عمل آوری مختلف منتقل می‌شوند.

در این مقاله به منظور محافظت از باکتری، بتن‌های حاوی درصدهای متفاوت هوا ساخته و به نیمی از آن‌ها باکتری اسپوروسارسینا پاستوری<sup>۴</sup> اضافه می‌شود. سپس نمونه‌ها به دو محیط متفاوت برای عمل آوری منتقل می‌گردند. پس از ۲۸ روز، نمونه‌ها به محفظه‌ی کربناسیون منتقل می‌شوند و آزمایش عمق کربناسیون به منظور سنجش دوام بتن هوا دار حاوی باکتری انجام می‌شود.

**۲- مواد و روش‌های آزمایش**

**۲-۱- باکتری**

در این تحقیق از یک میکروارگانیسم وابسته به خانواده‌ی باسیلوس‌ها، به نام اسپوروسارسینا پاستوری استفاده شده است. سلول‌های تجمع یافته‌ی هر باکتری به صورت آمپول‌های لیوفیلیزه از مرکز کلکسیون قارچ و باکتری‌های صنعتی ایران به شماره‌ی شناسایی (DSM 33) PTCC 1645 خریداری شد. ترکیبات محیط کشت اختصاصی این میکرو ارگانیسم در جدول ۱ نشان داده شده است.

باکتری با غلظت  $10^7$  cells/ml در محیط اختصاصی خود کشت داده می‌شود و در دستگاه انکوباتور شیکردار مطابق شکل ۱، با سرعت ۱۱۵ دور بر دقیقه و دمای ۳۰ درجه‌ی سانتی گراد قرار می‌گیرد. پس از ۴۸ ساعت،

- 1 Bacillus Subtilis
- 2 Design of experiments (DOE)
- 3 Split plot design
- 4 Sporosarcina pasteurii



شکل ۲: دستگاه اندازه گیری درصد هوای بتن

Fig. 2. Air concentration measurement device

جدول ۴: نسبت ترکیبات استفاده شده در محیط عمل آوری حاوی کلسیم لاکتات و اوره

Table. 4. The amount of ingredients which are used in the calcium lactate and urea solution

میزان مصرف	ماده‌ی مصرفی
۱ لیتر	آب
۱۰۳ گرم	کلسیم لاکتات
۲۰ گرم	اوره

#### ۲-۴- روند انجام آزمایش

طرح کرت خرد شده‌ی استفاده شده در این تحقیق نمونه‌ها را به ۶ بلوک متفاوت تقسیم می‌کند که هر بلوک دارای مشخصات معینی است. بلوک‌ها به صورت تصادفی انتخاب و ساخته می‌شوند. سپس به دو محیط متفاوت برای عمل‌آوری منتقل شده و پس از ۲۸ روز برای تست عمق کربناسیون آماده می‌شوند.

#### ۲-۵- نام گذاری نمونه‌ها

هر نمونه با سه حرف علامت گذاری شده است (A-B-C).

A: نشان دهنده‌ی حضور یا عدم حضور باکتری در حین ساخت بتن است که به ترتیب با یک و صفر نشان داده می‌شود.

B: میزان درصد هوای موجود در بتن را نشان می‌دهد. در صورتی که هوای عمده‌ی در بتن ایجاد نشده باشد با صفر، پنج درصد حباب هوا با "۵" و هشت درصد حباب هوا با "۸" نشان داده می‌شود.

C: محیط عمل‌آوری دارای دو سطح آب معمولی و محلول حاوی کلسیم

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان استفاده شده در این مقاله

Table. 2. Chemical and physical characterization of cement

مقدار	ترکیبات شیمیایی	مقدار	مشخصات فیزیکی
۲۱/۱٪	SiO <sub>2</sub>	۳۲۰۰	بلین cm <sup>2</sup> /gr
۴/۹٪	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵۰	گیرش اولیه (دقیقه)
۴/۰۰٪	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۲۰	گیرش ثانویه (دقیقه)
۶۴/۵۰٪	CaO	۱۷۰	۲ روزه
۲/۱۰٪	MgO	۲۲۰	مقاومت فشاری ۳ روزه
۰/۰۲۵٪	Cl	۳۴۰	۷ روزه
۱/۹٪	SO <sub>3</sub>	۴۸۰	۲۸ روزه

جدول ۳: نسبت اختلاط مصالح مصرفی در یک متر مکعب

Table. 3. Concrete mixture

مصالح	وزن در یک متر مکعب
شن	۷۳۹/۳ کیلو گرم
ماسه	۹۹۳/۵ کیلو گرم
سیمان	۳۷۳/۸ کیلوگرم
آب	۲۰۶/۵ کیلوگرم

#### ۲-۳- ساخت بتن

ابتدا مصالح مورد نیاز با توجه به طرح اختلاط و میزان حجم ساخت بتن توزین گردید. شن و ماسه به مدت سه دقیقه به تنهایی مخلوط شدند و پس از آن سیمان به آن‌ها اضافه شد. سپس آب حاوی باکتری و محیط کشت آن به آرامی وارد مخلوط گردید. به نمونه‌های هوادار در حین ساخت ماده‌ی هوازا اضافه شد و میزان درصد هوا با استفاده از دستگاه نشان داده در شکل ۲ اندازه‌گیری شد.

پس از گذشت ۲۴ ساعت از ساخت، قالب‌ها باز و نیمی از آن‌ها به آب معمولی و نیمی دیگر به آب حاوی کلسیم لاکتات و اوره جدول ۴ برای عمل‌آوری منتقل شدند.



شکل ۴: محفظه‌ی کربناسیون استفاده شده در آزمایش تعیین عمق کربناسیون

Fig. 4. Carbonation chamber

پس از گذشت ۴ هفته، نمونه‌ها از محفظه خارج شده و از وسط به دو نیم تقسیم می‌گردند. به منظور تعیین عمق کربناسیون، محلول شاخص که حاوی درصد مشخصی فنول فتالئین حل شده در اتانول است، برای تعیین pH روی سطح شکسته شده‌ی بتن پاشیده می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵: نمونه‌ی بتنی، پس از پاشیده شدن محلول شاخص

Fig. 5. Split surface of specimen after spraying the indicator

محلول شاخص در قسمت‌هایی از بتن که کربناته نشده و حالت قلیایی خود را حفظ کرده‌اند، رنگ ارغوانی ایجاد می‌کند ولی در سایر نواحی که قلیابیت بتن کمتر شده، تغییر رنگی مشاهده نمی‌شود. عمق قسمت‌های بی‌رنگ از شش نقطه اندازه‌گیری شده و بین آن‌ها میانگین گرفته می‌شود (شکل ۶).

الزامی است عملیات فوق یک بار بلافاصله پس از شکست و بار دیگر ۲۴ ساعت پس از شکست بتن انجام پذیرد [۲۵].

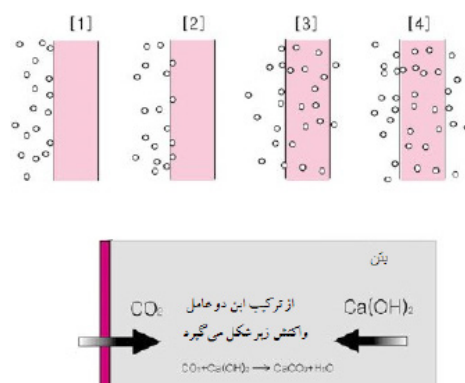
لاکتات و اوره است که به ترتیب با حروف "C" و "W" در نمونه‌ها نشان داده شده است.

برای مثال نمونه‌ای که به صورت C-۸-۱ نام‌گذاری شده است، به نمونه‌ی حاوی باکتری دارای هشت درصد هوا و عمل‌آوری شده در محیط حاوی کلسیم لاکتات و اوره اطلاق می‌شود.

تمامی مراحل ساخت بتن و انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه صنعتی اصفهان و کشت و آماده‌سازی باکتری‌ها در آزمایشگاه زیست فناوری شهرک علمی و تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان صورت پذیرفت.

### ۳- عمق کربناسیون

واکنش شیمیایی بین کلسیم هیدروکسید ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) و کلسیم سیلیکات هیدراته شده (C-S-H) با کربن دی‌اکسید، می‌تواند منجر به تولید کلسیم کربنات ( $\text{CaCO}_3$ ) و آب شود شکل ۳ [۲۳ و ۲۴]. واکنش فوق با تولید اسید، قلیابیت بتن را کم کرده، غلظت هیدروکسید را کاهش داده و منجر به خوردگی میلگردها می‌شود [۲۵].



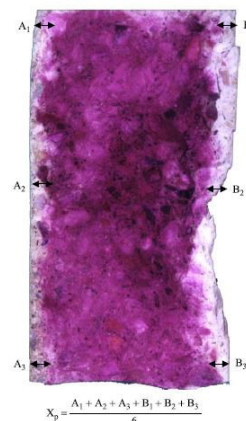
شکل ۳: بررسی روند فعالیت دی‌اکسید کربن در بتن [۲۴]

Fig. 3. The reaction of  $\text{CO}_2$  in concrete matrix

یکی از راه‌حل‌های رایج برای اندازه‌گیری عمق کربناسیون، استفاده از شاخص فنول فتالئین است. پس از گذشت ۲۸ روز از ساخت بتن، نمونه‌ها از محیط عمل‌آوری خارج شده و به مدت ۴ هفته در محفظه‌ای حاوی ۳ تا ۵ درصد گاز کربن دی‌اکسید قرار می‌گیرند (شکل ۴). رطوبت محفظه توسط دستگاه ایجاد بخار متصل به آن بین ۶۰ تا ۷۰ درصد نگه داشته می‌شود.

نتیجه گرفت رسوبات کلسیم کربنات ایجاد شده توسط باکتری، تعدادی از حباب‌های هوا را پس از مدتی پر می‌کنند.

بر اساس مطالعات پیشین ایجاد حباب‌های هوا در بتن باعث تغییراتی در مشخصات دوام آن می‌شود. درصد بهینه‌ی حباب هوا در بتن هوادار بین ۳ تا ۶ درصد وزن سیمان است [۲۷]. بنابراین بتن حاوی ۵ درصد حباب هوا ظرفیت بالاتری نسبت به ۸ درصد حباب هوا در برابر عوامل مهاجم دارد. شکل ۹ اثر حباب‌های هوا در عمق کربناسیون را نشان می‌دهد. به طور کلی هوادار کردن بتن باعث کاهش عمق کربناسیون آن شده است و نمونه‌های حاوی ۵ درصد حباب هوا کم‌ترین عمق کربناسیون را نشان داده‌اند. در حقیقت حباب‌های هوا نفوذپذیری بتن را کاهش داده و مقاومت آن در برابر نفوذ گاز کربن دی‌اکسید را افزایش می‌دهند.



شکل ۶: نحوه‌ی اندازه‌گیری عمق کربناسیون پس از پاشیدن محلول شاخص بر سطح شکسته شده‌ی بتن [۲۳]

Fig. 6. The way is used for determining the carbonation depth

جدول ۵: داده‌های اندازه‌گیری شده از آزمایش عمق کربناسیون (میلی متر)

Table. 5. Carbonation depth data

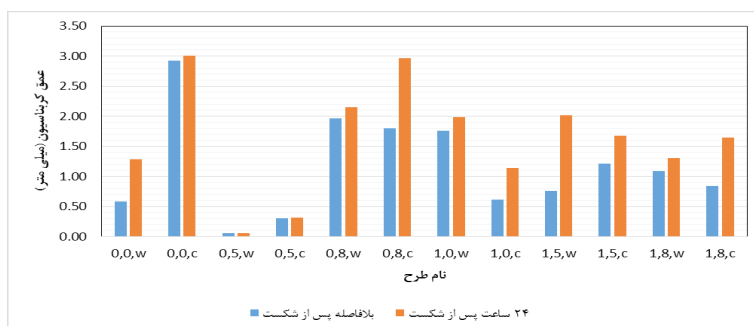
شماره بلوک	نام نمونه	A	B
۱	0-0-w	۰/۵۸	۱/۲۸
	0-0-c	۲/۹۲	۳/۰۱
۲	0-5-w	۰/۰۶	۰/۰۶
	0-5-c	۰/۳۱	۰/۳۲
۳	0-8-w	۱/۹۷	۲/۱۵
	0-8-c	۱/۸۰	۲/۹۷
۴	1-0-w	۱/۷۶	۱/۹۹
	1-0-c	۰/۶۱	۱/۱۴
۵	1-5-w	۰/۷۶	۲/۰۲
	1-5-c	۱/۲۱	۱/۶۸
۶	1-8-w	۱/۰۹	۱/۳۱
	1-8-c	۰/۸۴	۱/۶۵

#### ۴- عکس برداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM)

به منظور مقایسه‌ی ساختار میکروسکوپی نمونه‌های حاوی باکتری، از تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. پس از انجام آزمایش عمق کربناسیون، نمونه‌های کوچکی با ابعاد ۱ سانتی‌متر از نمونه‌های شکسته شده جدا و با لایه نازکی از طلا روکش شدند. پس از اشباع شدن نمونه‌ها و قرار گیری در محفظه‌ی خلا، تصویرنگاری الکترونی شروع می‌شود. این مطلب حائز اهمیت است که تصاویر استفاده شده در این مقاله با بزرگ‌نمایی ۶۲ برابر عکس برداری شده‌اند.

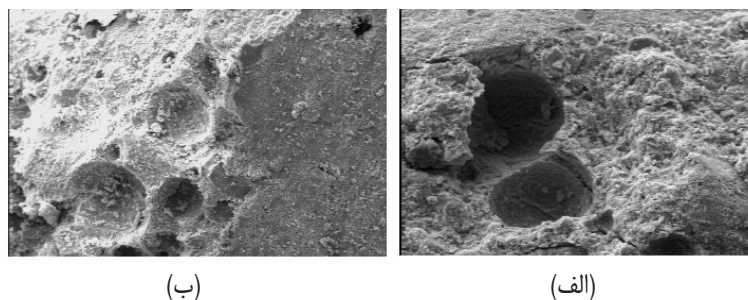
#### ۵- بررسی داده‌های به دست آمده

پس از گذشت ۴ هفته، نمونه‌ها از محفظه خارج و عمق کربناسیون آن‌ها اندازه‌گیری شد (جدول ۵) و (شکل ۷). شکل ۸ عکس‌های به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی را به نمایش می‌گذارد. شکل ۸-الف نمونه‌های حاوی ۵ درصد حباب هوا و شکل ۸-ب نمونه‌های مشابه حاوی باکتری را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان



شکل ۷: میزان عمق کربناسیون اندازه‌گیری شده برای هر طرح (میلی‌متر)

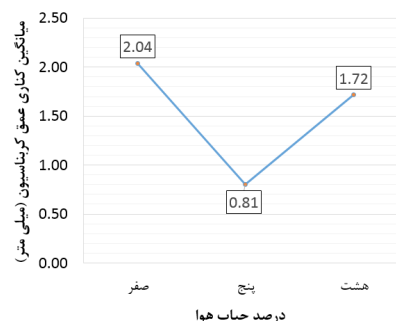
Fig. 7. Carbonation depth (mm)



شکل ۸: عکسهای به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی؛ الف) بتن هوا دار حاوی ۵ درصد حباب هوا، ب) بتن باکتریایی هوا دار حاوی ۵ درصد حباب هوا

Fig. 8. Scanning electron microstructure image of air-entrained concrete with 5% air voids magnified by 125x: a) control sample (without bacteria), and b) bacteria-containing sample

در عمق کربناسیون نشان می‌دهند. این در حالی است که نمونه‌های بدون باکتری به ازای مقادیر مختلف حباب هوا رفتار متفاوتی نشان داده‌اند. در بتن هوا دار حاوی ۵ درصد هوا، باکتری‌ها فضای داخلی حباب‌های هوا را پر کرده و اثر آن‌ها را بر عمق کربناسیون کاهش داده‌اند. این در حالیست که بتن هوا دار حاوی ۸ درصد هوا با اضافه کردن باکتری، عمق کربناسیون ۴۵٪ کاهش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در هشت درصد هوا، کلسیم کربنات رسوب شده فضای داخلی تعدادی از حباب‌های هوا را پوشش داده شکل ۸ و علاوه بر اینکه باکتری‌ها داخل حباب‌های هوا قرار گرفته و از محیط خشک و قلیایی بتن دور می‌مانند، اکسیژن لازم برای فعالیت در بتن را نیز دریافت کرده و کلسیم کربنات بیش‌تری رسوب می‌کنند. از آنجایی که کلسیم کربنات رسوب شده به طور کامل حباب‌های هوا را پوشش نمی‌دهند، در این نمونه‌ها بتن هواداری وجود دارد که حاوی رسوبات کلسیم کربنات است و مقاومت بیش‌تری در برابر نفوذ کربن دی‌اکسید دارد (شکل ۱۱).



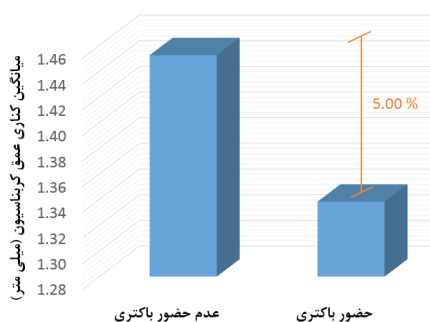
شکل ۹: بررسی درصد حباب هوا بر عمق کربناسیون

Fig. 9. Behavior of air-entrained concrete against the carbonation attack

A: میانگین عمق کربناسیون اندازه‌گیری شده بلافاصله پس از شکست (میلی متر)  
 B: میانگین عمق کربناسیون اندازه‌گیری شده ۲۴ ساعت پس از شکست نمونه (میلی متر)

اگر از تمامی داده‌های نمونه‌های حاوی باکتری میانگین گرفته (میانگین کناری) و با میانگین داده‌های بدون باکتری مقایسه شود دیگرام نشان داده شده در شکل ۱۰ به دست می‌آید. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت رسوبات تولید شده توسط باکتری‌ها خلل و فرج بتن را پر کرده و مانع نفوذ گاز کربن دی‌اکسید به داخل بتن می‌شود. از لحاظ آماری اضافه کردن باکتری به تنهایی عامل معنای نیست زیرا اختلاف عمق کربناسیون نمونه‌های حاوی باکتری و نمونه‌های بدون باکتری ناچیز است (۵ درصد). در حقیقت اثر متقابل عامل باکتری با عوامل دیگر به وضوح بیش‌تری تأثیر حضور باکتری را نشان می‌دهد که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

شکل ۱۱ اثر متقابل بین عامل باکتری و درصد حباب‌های هوا را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی باکتری با افزایش حباب‌های هوا روند ثابتی را



شکل ۱۰: بررسی تأثیر حضور باکتری بر عمق کربناسیون

Fig. 10. The carbonation depth of bacterial concrete

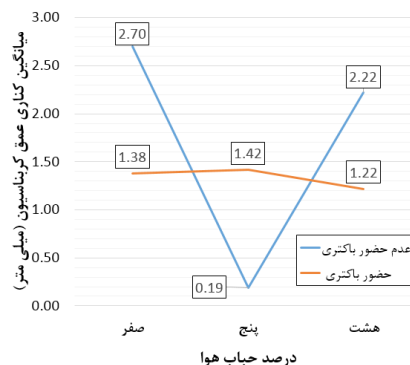
### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر کاربرد باکتری در میزان بهبود عملکرد بتن هوادار، بتن‌هایی با درصد مشخص باکتری اسپوروسارسینا پاستوری و درصدهای متفاوت هوا ساخته شد. سپس نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در دو محیط متفاوت (نیمی از نمونه‌ها در آب معمولی و نیمی دیگر در آب حاوی درصد مشخصی از کلسیم لاکتات و اوره)، به مدت ۲۸ روز در محفظه‌ی کرناسیون قرار گرفتند. پس از شکستن نمونه‌ها و اندازه‌گیری عمق کرناسیون نتایج زیر حاصل شد.

۱. بتن هوادار عمق کرناسیون کمتری نسبت به بتن معمولی دارد و کم‌ترین عمق کرناسیون در بتن هوادار حاوی ۵ درصد حباب هوا دیده شده است.
۲. حضور باکتری در بتن، عمق کرناسیون را ۵ درصد کاهش می‌دهد.
۳. اضافه کردن باکتری به بتن حاوی ۸ درصد حباب هوا عمق کرناسیون آن را به طور معنا داری کاهش می‌دهد. در حقیقت هشت درصد حباب هوا، مقدار بهینه‌ی هوای لازم برای محافظت از باکتری در برابر محیط خشک و قلیایی بتن است.
۴. عمل‌آوری در محلول کلسیم لاکتات و اوره باعث افزایش عمق کرناسیون می‌شود. در واقع ترکیبات اسیدی موجود در این محلول باعث می‌شود محلول شاخص، عمق بیشتری را در حالت بدون رنگ نشان دهد.
۵. در شرایط اسیدی استفاده از باکتری در آب اختلاط بتن، کاهش معنا دار عمق کرناسیون را سبب می‌شود.
۶. قرارگیری منبع غنی کلسیم در کنار باکتری باعث بهبود عملکرد آن شده و نمونه‌های حاوی باکتری که در محلول کلسیم لاکتات و اوره عمل‌آوری شده‌اند، عمق کرناسیون کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد دارند.

### مراجع

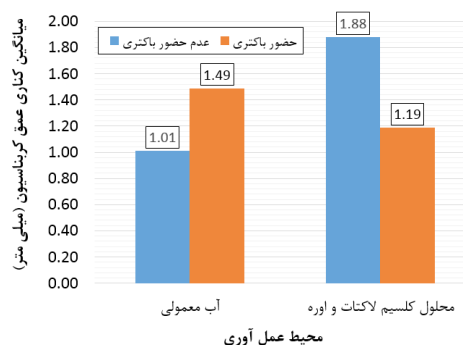
- [1] N. Chahal, R. Siddique, A. Rajor, Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume, *Construction and Building Materials*, 37(1) (2012) 645-651.
- [2] N. Fattuhi, Concrete carbonation as influenced by curing regime, *Cement and Concrete Research*, 18(3) (1988) 426-430.
- [3] J. Wang, K. Van Tittelboom, N. De Belie, W. Verstraete, Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, 26(1) (2012) 532-540.
- [4] K. Van Tittelboom, N. De Belie, W. De Muynck, W. Verstraete, Use of bacteria to repair cracks in concrete, *Cement and Concrete Research*, 40(1) (2010) 157-166.



شکل ۱۱: اثر متقابل حباب‌های هوا و باکتری در عمق کرناسیون

Fig. 11. Interaction effect of air voids and bacteria on carbonation depth

اثر متقابل بین عامل باکتری و محیط عمل‌آوری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب معمولی با اضافه شدن باکتری به آب اختلاط بتن، عمق کرناسیون افزایش یافته است؛ این در حالی است که اضافه کردن باکتری به نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول کلسیم لاکتات و اوره، عمق کرناسیون را ۲۰٪ کاهش می‌دهد. با توجه به مطالعات پیشین، قرارگیری منبع غنی کلسیم در کنار باکتری باعث بهبود عملکرد آن می‌شود. در این تحقیق محلول کلسیم لاکتات و اوره نقش منبع غنی کلسیم را ایفا کرده و باعث افزایش فعالیت باکتری‌ها در بتن می‌شود و در نتیجه کلسیم کرنات بیشتری رسوب شده و خلل و فرج بتن را پر می‌کنند. در صورتی که شرایط اسیدی بر محیط حاکم باشد (محیط عمل‌آوری کلسیم لاکتات و اوره)، عمق کرناسیون حدوداً ۴۶٪ افزایش می‌یابد (شکل ۱۲). بنابراین از دیدگاهی دیگر می‌توان نتیجه گرفت اضافه کردن باکتری به مخلوط بتن در شرایط اسیدی عمق کرناسیون را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۲: اثر متقابل محیط عمل‌آوری و باکتری در عمق کرناسیون

Fig. 12. Interaction effect of curing environment and bacteria on carbonation depth



- [15] F. Nosouhian, Mostofinejad, D., Reducing Permeability of Concrete by Bacterial Mediation on Surface Using Treatment Gel, *ACI Materials Journal*, 113(3) (2016) 287-293.
- [16] J.Y. Wang, D. Snoeck, S. Van Vlierberghe, W. Verstraete, N. De Belie, Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete, *Construction and Building Materials*, 68 (2014) 110-119.
- [17] Y.Ç. Erşan, F.B. Da Silva, N. Boon, W. Verstraete, N. De Belie, Screening of bacteria and concrete compatible protection materials, *Construction and Building Materials*, 88 (2015) 196-203.
- [18] Z.B. Bundur, A. Amiri, Y.Ç. Erşan, N. Boon, N. De Belie, Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability, *Cement and Concrete Research*, 98 (2017) 44-49.
- [19] F. Nosouhian, Mostofinejad, D., and Hasheminejad, H., Concrete Durability Improvement in a Sulfate Environment Using Bacteria, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 28(1) (2015) 1-12.
- [20] F. Nosouhian, Mostofinejad, D., and Hasheminejad, H., Influence of biodeposition treatment on concrete durability in a sulphate environment, *biosystems engineering*, 133 (2015) 141-152.
- [21] V. Wiktor, H.M. Jonkers, Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete, *Cement and Concrete Composites*, 33(7) (2011) 763-770.
- [22] ACI 211, Standard Practice for selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass concrete, Farmington Hills, MI, USA, in, 2009.
- [23] J.-W.C. Cheng-Feng Chang, The experimental investigation of concrete carbonation depth, *Cement and Concrete Research*, 36(9) (2006) 1760-1767.
- [24] D.C. Park, Carbonation of concrete in relation to CO2 permeability and degradation of coatings, *Construction and Building Materials*, 22(11) (2008) 2260-2268
- [25] V.G. Papadakis, Vayenas, C. G., & Fardis, M. N. , Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation, *ACI materials journal*, 88(4) (1991).
- [5] S. Ghosh, M. Biswas, B. Chattopadhyay, S. Mandal, Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar, *Cement and Concrete Composites*, 31(2) (2009) 93-98.
- [6] V. Ivanov, J. Chu, Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2) (2008) 139-153.
- [7] H.M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, E. Schlangen, Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, *Ecological Engineering*, 36(2) (2010) 230-235.
- [8] H.M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, E. Schlangen, Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, *Ecological Engineering*, 36(2) (2010) 230-235.
- [9] M.G. Sierra-Beltran, H. Jonkers, E. Schlangen, Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair, *Construction and Building materials*, 67 (2014) 344-352.
- [10] J. Xu, W. Yao, Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent, *Cement and Concrete Research*, 64 (2014) 1-10.
- [11] U. Gollapudi, C. Knutson, S. Bang, M. Islam, A new method for controlling leaching through permeable channels, *Chemosphere*, 30(4) (1995) 695-705.
- [12] W. De Muynck, K. Cox, N.D. Belie, W. Verstraete, Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete, *Construction and Building Materials*, 22(5) (2008) 875-885.
- [13] N. Hosseini Balam, D. Mostofinejad, M. Eftekhar, Use of carbonate precipitating bacteria to reduce water absorption of aggregates, *Construction and Building Materials*, 141 (2017) 565-577.
- [14] N. Hosseini Balam, D. Mostofinejad, M. Eftekhar, Effects of bacterial remediation on compressive strength, water absorption, and chloride permeability of lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 145 (2017) 107-116.

Please cite this article using:

N. Parastegari, D. Mostofinejad, Influence of bacteria on performance of air entrained concrete, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1103-1112.

DOI: 10.22060/ceej.2018.12371.5188

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



