



## بررسی خواص مهندسی بتن سبک بیولوژیکی و سنجش اثر حفاظتی هوازا بر بهبود عملکرد باکتری

پریا دیناروند، علیرضا رشنو\*

گروه عمران، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷  
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۲۱

### کلمات کلیدی:

بتن سبک بیولوژیکی  
بتن هوادار  
باکتری  
دوام  
محیط عمل‌آوری

**خلاصه:** با توجه به جایگاه ویژه بتن سبک در صنعت ساخت‌وساز جهان، تولید بتن سبک با کیفیت و مبتنی بر مواد بدیع، به یکی از جنبه‌های اساسی این صنعت رو به رشد تبدیل شده است. القای رسوب کلسیت میکروبی به عنوان یک استراتژی نوین و دوست‌دار محیط زیست شناخته شده است. اگر چه هدف اصلی توسعه بتن بیولوژیکی ترمیم ترک بوده است، با این حال تحقق این هدف نه تنها باید بدون تاثیر منفی بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن باشد، بلکه می‌توان با شناخت پارامترهای موثر، به بتن بیولوژیکی با خواص مهندسی ایده‌آل دست یافت که این نوع بتن را از بتن‌های معمولی متمایز می‌کند. در این مطالعه با هدف تولید بتن سبک با دوام و مقاومت مطلوب، از تکنیک استفاده از باکتری در بتن بهره گرفته شده است. منافذ بتن، محیط قلبیایی، عدم دسترسی به مواد مغذی و اکسیژن کافی، از چالش‌های اساسی کاربرد مواد معدنی زیستی در بتن هستند. به همین منظور از افزودنی هوازا به عنوان یک رویکرد حفاظتی جهت افزایش بقای باکتری استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان داد که، رسوب کلسیم کربنات ناشی از فعالیت متابولیک میکروارگانیسم‌ها منجر به افزایش خواص مکانیکی و بهبود ویژگی‌های دوام بتن شده است. همچنین افزودنی هوازا به عنوان فاکتوری موثر در حفظ زیست‌پذیری و بهبود عملکرد باکتری نقش اساسی داشته است. استفاده از باکتری در بتن منجر به افزایش ۱۹/۸٪ مقاومت فشاری و ۶۳/۹٪ مقاومت الکتریکی شده است. همچنین حداکثر کاهش جذب آب و کاهش نفوذ یون کلر در نمونه بیولوژیکی به ترتیب ۶۲/۷٪ و ۴۰/۷٪ بوده است.

### ۱- مقدمه

سازه‌ای کم است، بنابراین استفاده از آن در ساخت سازه‌هایی مانند پل‌ها با عرشه‌ی بسیار بلند، سازه‌های عظیم دریایی و ساختمان‌های بلند روز به روز در حال افزایش است [۳]. با ارائه‌ی طرح اختلاط مناسب می‌توان بتن سبک سازه‌ای با خواص مکانیکی و دوام مشابه بتن معمولی ساخت. اگر چه ممکن است هزینه‌ی ساخت بتن سبک با کیفیت مقداری بالاتر از بتن معمولی باشد اما این هزینه با کوچک‌تر شدن ابعاد سازه، کاهش حجم بتن و کاهش میزان آرماتور مصرفی جبران می‌شود؛ بنابراین ساخت و حمل و نقل قطعات پیش ساخته‌ی بتنی صرفه‌ی اقتصادی دارد [۴]. مهم‌ترین ویژگی بتن سبک، کاهش بار مرده و نیروی لرزه‌ای وارد بر سازه در اثر شتاب زلزله می‌باشد. کاهش ابعاد فونداسیون، دال و ستون‌های بتنی منجر به افزایش فضای معماری و مصرف کمتر مصالح می‌گردد. همچنین بتن سبک عایق صوتی و حرارتی بسیار مناسبی برای سازه‌ها است [۵ و ۶]. در مقابل این ویژگی‌های مطلوب، یکی از معایب بتن سبک نفوذپذیری است. سنگ‌دانه‌های سبک اساساً منجر به تخلخل و نفوذپذیری بیش‌تر بتن سبک

امروزه بتن یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساخت‌وساز جهان است. با این حال وزن زیاد بتن یکی از معایب سازه‌های بتنی می‌باشد که رابطه مستقیمی با میزان تخریب سازه در اثر بارهای وارده دارد. سبک‌سازی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی از موضوعات مورد توجه در صنعت ساخت‌وساز می‌باشند. توجه به این مسائل باعث شده استفاده از مصالح نوین در صنعت ساخت‌وساز رونق پیدا کند. همواره حوادث طبیعی مانند سیل و زلزله باعث تلفات جانی، خسارت مالی و مشکلات زیست محیطی می‌شود. بنابراین نیاز به ساخت بتنی با وزن مخصوص کمتر از بتن معمولی، ضروری به نظر می‌رسد. استفاده از بتن سبک سازه‌ای جایگزین مناسبی برای بتن معمولی است، زیرا مشکلات ناشی از وزن زیاد سازه‌های بتنی را کاهش داده می‌دهد [۲ و ۱]. از لحاظ کاربردی بتن سبک را می‌توان به دو دسته‌ی بتن سبک غیرسازه‌ای و بتن سبک سازه‌ای تقسیم نمود. چگالی بتن سبک

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ar.rashno@iaub.ac.ir



[۲۴] از باکتری باسیلوس سوبتلیس با غلظت  $10^7$  Cells/ml در نمونه‌های بتنی تقویت شده با الیاف‌های مختلف استفاده کردند. مشاهده شد که استفاده از باکتری باعث کاهش ۴۰٪ شار عبوری از نمونه‌ها شده است. همچنین عمق نفوذ آب در مقایسه با نمونه‌های بدون باکتری حدود ۵۰٪ کاهش یافته است.

در سال‌های اخیر، بسیاری از کشورها به دنبال راهکارهایی برای بازیافت مواد زائد بوده‌اند. توسعه سریع صنعت، نیاز به تولید انرژی را تشدید کرده و نگرانی‌های زیست محیطی را افزایش داده است. بازیافت مواد زائد و استفاده‌ی مجدد از آن‌ها در پروژه‌های ساختمانی راه حلی سازگار با محیط زیست می‌باشد. به همین جهت تاثیر جایگزینی سیمان با پوزولان‌های ضایعاتی مانند شیشه، پوسته‌ی تخم مرغ، آهن و پودر لاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان داد که با جایگزینی بخشی از سیمان با پودرهای آهن، پوسته‌ی تخم مرغ و لاستیک مقاومت فشاری ملات افزایش یافته است [۲۵]. در پژوهش دیگری خواص مکانیکی ملات حاوی پوزولان‌های مختلف پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی ملات حاوی پوزولان بهبود یافته است [۲۶]. جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان‌ها نه تنها باعث بهبود ویژگی‌های بتن شده است، بلکه به عنوان عاملی جهت کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از فرآیند تولید سیمان گزارش شده است [۲۷ و ۲۸]. علاوه بر استفاده از باکتری‌ها در بتن، جایگزینی بخشی از سیمان با مواد سیمانی تکمیلی (SCM)<sup>۴</sup> نیز در پژوهش‌های پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است. تاکنون تاثیر استفاده از میکروسیلیس و خاکستر بادی [۲۹]، گرد و غبار کوره سیمان [۳۰ و ۳۱] و خاکستر پوسته برنج [۲۷]، در بتن حاوی باکتری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعات حاکی از تاثیر مثبت استفاده‌ی هم‌زمان از متریال‌های پوزولانی و باکتری بر خواص مکانیکی و دوام بتن است. صدیق<sup>۵</sup> و همکارانش [۲۸] سازگاری بتن میکروبی با میکروسیلیس را مورد بررسی قرار دادند. واکنش‌های پوزولانی منجر به افزایش ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) در ماتریس سیمانی شده‌اند. فضای خالی ماتریس سیمانی توسط این ذرات ریز پوزولانی پر شده است. همچنین خلل و فرج بتن توسط کریستال‌های کلسیم کربنات تولید شده پر شده است؛ بنابراین ریز ساختار بتن متراکم‌تر شده، جذب آب کاهش یافته و مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است.

محیط خشک، منافذ کوچک و pH بالای ماتریس بتن [۳۲]، دسترسی

در مقایسه با بتن معمولی می‌شوند [۷]. یکی از نگرانی‌های اصلی در مورد بتن، کاهش خواص مکانیکی و پوسته پوسته شدن بتن در معرض دمای بالا است. پوسته پوسته شدن بتن یک پدیده‌ی رایج است که معمولاً در بتن‌هایی که در معرض تغییرات دما قرار می‌گیرند رخ می‌دهد. استفاده از الیاف در بتن خواص مکانیکی و دوام بتن در دمای بالا را افزایش داده است. بنابراین ممکن است افزودن الیاف به ترکیبات بتن روش مناسبی برای حفظ یکپارچگی بتن در معرض دمای بالا باشد و از ایجاد ترک تحت دما و فشار بالا جلوگیری کند [۹ و ۸]. از طرفی ممکن است در هر مرحله از طول عمر یک سازه، ترک‌هایی به دلیل تنش‌های شدید ناشی از فرآیندهای مختلف، مانند بارگذاری، انقباض، نشست تکیه‌گاهی، روش‌های ساخت و ساز ضعیف و خطای طراحی در ساختار بتن ایجاد شوند [۱۱ و ۱۰]. ترک‌ها علاوه بر مستعد کردن مسیر نفوذ مایعات و عناصر مهاجم مانند یون‌های کلرید و سولفات، مانع از یکپارچگی ماتریس بتن می‌شوند. خوردگی آرماتورها در ماتریس بتن، کاهش مقاومت و سختی سازه، شکست لایه‌ها و پوسته پوسته شدن بتن و در نهایت تخریب زود هنگام سازه‌های بتنی، از عوارض جبران ناپذیر توسعه‌ی ترک‌ها در بتن است [۱۳ و ۱۲]. روش‌های ترمیم سنتی علاوه بر داشتن هزینه‌ی بالا، کار پیچیده، مشکلات زیست‌محیطی و ضریب انبساط حرارتی متفاوت از بتن، نیازمند بازرسی و نگهداری پیوسته هستند. بنابراین فراهم کردن بستری مناسب برای ساخت بتن هوشمندی که پتانسیل خودترمیمی بالایی داشته باشد و ضمن سازگاری با محیط زیست و ترکیبات بتن منجر به بهبود خواص مهندسی بتن گردد، هدفی ارزشمند است [۱۴].

امروزه تمرکز مطالعات گسترده‌ای بر روی استفاده از رسوبات معدنی ناشی از فعالیت میکروارگانیسم‌های خاص در بتن است [۲۰-۱۵]. در این روش رسوبات کلسیم کربنات تولید شده توسط فعالیت اوره آزی باکتری‌ها، با پر کردن منافذ بتن، منجر به کاهش تخلخل، تراکم بیش‌تر و در نهایت بهبود ویژگی‌های بتن می‌گردند [۲۲ و ۲۱]. بنابراین این مکانیزم دوست‌دار محیط زیست، ایده‌ی مناسبی برای تولید بتن سبک با کیفیت مطلوب و پایداری بیش‌تر است. نایین<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۳] نقش رسوبات تولید شده‌ی کلسیم کربنات را بر افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از باکتری باسیلوس سوبتلیس<sup>۲</sup> منجر به افزایش ۱۴/۳٪ مقاومت فشاری، و استفاده از باکتری باسیلوس مگاتریوم<sup>۳</sup> منجر به افزایش ۲۲/۵٪ مقاومت فشاری شده است. کریمی و مستوفی نژاد

- 
- 1 Nain
  - 2 Bacillus subtilis
  - 3 Bacillus megaterium

---

4 Supplementary cementing materials  
5 Siddique

تراورتن، توف، توف متراکم و گرانیته در ساخت بتن استفاده کردند. نتایج نشان داد که کمترین میزان نفوذ آب در نمونه‌ی ساخته شده با سنگ‌دانه‌ی گرانیته بوده است.

پژوهش حاضر با هدف ارائه‌ی اطلاعات فنی در خصوص بتن سبک بیولوژیکی حاوی میکروسیلیس، که در طراحی و ساخت آن از سنگ‌دانه‌های خاصی نظیر گرانیته، کریستال و لیکا استفاده شده است، انجام شد. به منظور حفاظت از باکتری در محیط قلیایی بتن در ساخت نیمی از نمونه‌ها از افزودنی هوازا استفاده شده است و اثر افزودنی هوازا بر بهبود عملکرد باکتری مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی تاثیر منبع کلسیم بر میزان رسوب کلسیم کربنات تولید شده توسط باکتری، نمونه‌ها در دو محیط آب معمولی و آب حاوی کلسیم کلرید و اوره عمل‌آوری شدند. در شکل ۱، مراحل برنامه‌ی آزمایشگاهی در این پژوهش نشان داده شده است.

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- باکتری

اسپورسارسیناپاستوری<sup>۳</sup> به عنوان یک باکتری تولید کننده رسوبات معدنی، اثربخشی مطلوبی بر بهبود ویژگی‌های بتن نشان داده است [۴۶، ۴۰ و ۱۷]. در این پژوهش از باکتری اسپورسارسیناپاستوری با کد شناسایی (DSM33) 1645 که از مرکز کلکسیون میکروارگانیسم‌های صنعتی ایران تهیه شده بود، استفاده شده است. طبق دستورالعمل دریافت شده از سوی این مرکز برای تهیه محیط کشت، از ۸ gI پودر نوترینت برات در یک لیتر آب مقطر استفاده شده است. محیط کشت آماده شده به منظور استریل شدن به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ °C در دستگاه اتوکلاو قرار داده شد. سپس ۲۰ gI اوره از طریق فیلتر استریل به محیط کشت اضافه گردید. باکتری بعد از کشت، ۴۸ ساعت در دستگاه انکوباتور<sup>۴</sup> با سرعت ۲۰۰ rpm قرار داده شد. محیط کشت آماده شده و دستگاه انکوباتور<sup>۴</sup> مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. اگر چه مشهود است غلظت بالاتر باکتری منجر به رسوب بیشتر کلسیم کربنات می‌گردد، اما لزوماً غلظت مطلوب برای بهبود خواص مهندسی بتن بالاترین غلظت در نظر گرفته شده نیست [۴۷]. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد، معمولاً برای ترمیم ترک از غلظت بالای باکتری در محدوده‌ی (Cells/ml) ۱۰<sup>۷</sup>-۱۰<sup>۹</sup> استفاده شده است [۴۸-۵۲]. در حالی که غلظت بهینه‌ی باکتری جهت افزایش مقاومت فشاری و بهبود ویژگی‌های مهندسی بتن در محدوده

محدود به مواد مغذی و اکسیژن [۳۳] و دوام باکتری در طول فرایند اختلاط [۳۴]، محدودیت‌هایی می‌باشند که در طراحی و ساخت بتن بیولوژیکی باید مورد توجه قرار گیرند. به همین منظور در پژوهش‌های گسترده‌ای از مواد حفاظتی مختلف مانند بیوجار [۳۵]، نانو ذرات اکسید آهن و بتونیت [۳۶]، کیتوزان [۳۷]، نانو ذرات گرافیت [۳۸] و غیره، برای کپسول کردن و افزایش زیست‌پذیری باکتری در شرایط سخت محیطی بتن استفاده شده است. جهت افزایش بقای باکتری، افزایش حجم موجود در ماتریس بتن برای قرارگیری باکتری، راهکاری مناسب است. انتظار می‌رود استفاده از افزودنی هوازا تنش ناشی از محدودیت فضا برای حیات باکتری را رفع کند. همچنین ماده‌ی هوازا اکسیژن لازم برای زیست‌پذیری میکروارگانیسم‌ها را فراهم می‌کند [۳۹]. رستگاری و همکارش [۴۰]، از تکنیک ایجاد حباب‌های هوای عمدی به عنوان عاملی برای حفاظت و افزایش فعالیت متابولیکی باکتری در بتن استفاده کرده‌اند. افزایش ۲۵٪ مقاومت الکتریکی و کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها در برابر یون کلر از نتایج این پژوهش بوده است. همچنین ارسان<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۷] تاثیر استفاده از افزودنی هوازا به عنوان یک ماده حفاظتی سازگار با بتن را برای افزایش بقای باکتری مورد مطالعه قرار دادند. حباب‌های هوای ایجاد شده در ماتریس ملات سبب کاهش ۶۸٪ مقاومت فشاری شده است [۳۲].

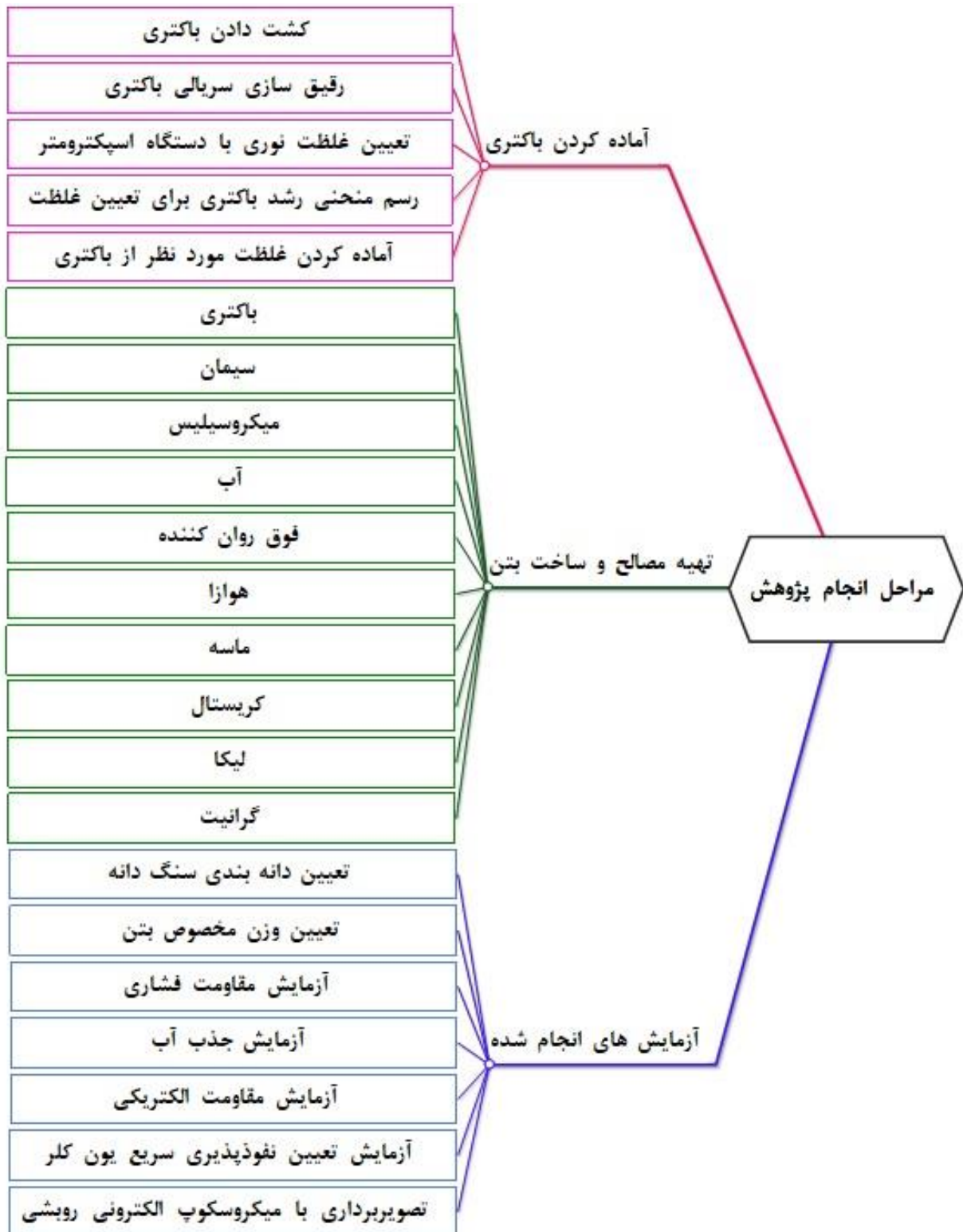
ژوو<sup>۲</sup> و همکارانش [۴۱]، تاثیر نوع سنگ‌دانه بر مقاومت فشاری بتن را مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد که مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های ضعیف، کمتر از مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های مقاوم است. در پژوهش دیگری کاربرد چهار نوع سنگ‌دانه‌ی شن سیلیسی، دیاباز، آهک و گرانیته در ساخت بتن با طرح اختلاط ثابت ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقاومت فشاری در بتن حاوی سنگ‌دانه‌ی گرانیته حاصل شده است [۴۲]. از سنگ‌دانه‌های گرانیته، دولومیت و آهک برای ساخت بتن استفاده شده است. بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های گرانیته بالاترین مقاومت فشاری و مقاومت کششی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشته است [۴۳]. بررسی نتایج مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با شن رودخانه‌ای و گرانیته نشان می‌دهد، مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌ی گرانیته بیش‌تر از مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های طبیعی است [۴۴]. نادری و همکارانش [۴۵]، تاثیر نوع سنگ‌دانه بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از هشت نوع سنگ‌دانه‌ی سیلیس، مرمریت، آندزیت، آهک،

3 Sporosarcina pasteurii

4 Incubator

1 Erşan

2 Zhou



شکل ۱. مراحل انجام پژوهش

Fig. 1. Steps of doing research



(ج) دستگاه انکوباتور

(ب) دستگاه اسپکترومتر

(الف) محیط کشت

شکل ۲. مواد و تجهیزات مورد استفاده جهت آماده‌سازی باکتری

Fig. 2. The prepared culture medium and the equipment for preparing the bacteria

### جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان

Table 1. Physical properties of ordinary Portland cement (OPC)

مقدار	مشخصات فیزیکی
۱۴۰	گیرش اولیه (دقیقه)
۲۰۵	گیرش ثانویه (دقیقه)
۰/۰۲	انبساط سیمان با اتوکلاو
۱۵۵	مقاومت فشاری ۳ روزه ( $\text{kg/cm}^2$ )
۲۳۰	مقاومت فشاری ۷ روزه ( $\text{kg/cm}^2$ )
۳۹۵	مقاومت فشاری ۲۸ روزه ( $\text{kg/cm}^2$ )

### ۲-۲- مواد سیمانی

از سیمان پرتلند تیپ دو با مشخصات فیزیکی درج شده در جدول ۱ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. مشخصات این سیمان با استاندارد ASTM C150 [۵۵] مطابقت دارد. در مطالعات پیشین درصد بهینه‌ی جایگزینی میکروسیلیس با سیمان ۱۰٪ گزارش شده است [۲۸ و ۲۹، ۵۶]. به همین منظور و با بهره‌گیری از نتایج این بررسی‌ها، در این پژوهش بخشی از سیمان با ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین شده است. وزن مخصوص میکروسیلیس مصرفی  $2/2 \text{ g/cm}^3$  است و با ضوابط استاندارد ASTM C1240 [۵۷]، مطابقت دارد. در جدول ۲ مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس نشان داده شده است.

( $10^5-10^7 \text{ Cells/ml}$ ) گزارش شده است [۵۴ و ۵۳، ۴۷، ۳۳، ۱۵]. با در نظر گرفتن نتایج مطالعات پیشین و با توجه به اینکه تمرکز این پژوهش بر روی افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن بوده است، غلظت باکتری در محدوده متوسطی از غلظت‌های بهینه‌ی پیشنهاد شده  $3/5 \times 10^6 \text{ ml Cells}$  انتخاب شد. غلظت باکتری با استفاده از تکنیک رقیق‌سازی سریالی و مشخص کردن غلظت نوری (OD)<sup>۱</sup> با دستگاه اسپکترومتر<sup>۲</sup> نشان داده شده در شکل ۲، تعیین شده است.

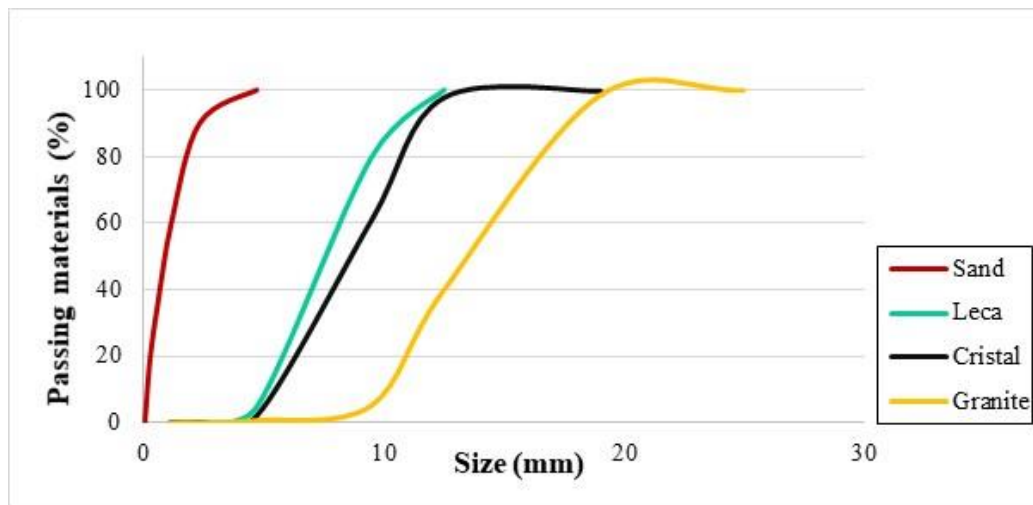
1 Optical density  
2 Spectrometer



جدول ۲. مشخصات شیمیایی مصالح مصرفی

Table 2. Chemical properties of Consumable materials

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	ترکیبات شیمیایی
۲۲/۳۰	۴/۹۳	۴/۰۷	۶۲/۰۷	۱/۸۰	۲/۰۸	۰/۲۵	۰/۶۰	سیمان
۹۰-۹۵	۰/۶-۱/۲	۱/۲-۱/۸	۰/۵-۱	۰/۶-۱/۲	-	۰/۷-۰/۹	۰/۷-۰/۹	میکروسلیس
۳۱	۱۴	۰/۰۲	۵۴/۷۵	۰/۶۱	-	۰/۰۲	۰/۰۳	سنگدانه کریستال



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها

Fig. 3. Aggregates' size distribution

۲-۴- مواد افزودنی

برای کاهش نسبت آب به سیمان و دستیابی به کارایی مطلوب فوق روان کننده‌ای بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با وزن مخصوص  $g/cm^3$  ۱/۱ مورد استفاده قرار گرفت. این افزودنی با استاندارد ASTM C1017 [۶۰]، مطابقت دارد و pH آن ۶/۵ است. جهت تولید حباب‌های هوای میکرونیزه و پایدار، و با هدف محافظت از باکتری در شرایط سخت محیطی ماتریس بتن، در ساخت نیمی از نمونه‌ها از افزودنی هوازا به مقدار  $0.08\%$  وزن مواد سیمانی (بیشترین درصد مجاز تعیین شده توسط شرکت تولید کننده) استفاده شده است. این افزودنی با استاندارد EN 934-2 [۶۱]، مطابقت دارد. هوازای مصرفی فاقد کلر بوده و وزن مخصوص آن  $1.01 \pm 0.2$  kg/lit می‌باشد.

۲-۳- سنگدانه‌ها

از ترکیب سنگدانه‌های کریستال و گرانیته به عنوان درشت‌دانه استفاده شده است. وزن مخصوص کریستال  $2.74$  gr/cm<sup>3</sup> و وزن مخصوص گرانیته  $3.12$  gr/cm<sup>3</sup> است. مشخصات شیمیایی سنگدانه‌های کریستال در جدول ۲ ذکر شده است. سنگدانه‌های گرانیته با جذب آب کم و مقاومت بالا، دارای بافتی سخت و غنی از مواد سیلیکاتی می‌باشند [۵۸]. از لیکا با ابعاد ۴-۱۰ mm و وزن مخصوص  $320$  kg/m<sup>3</sup> به عنوان سبک‌دانه سازه‌ای استفاده شده است. ماسه‌ی رودخانه‌ای به عنوان ریزدانه مورد استفاده قرار گرفت. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی با استاندارد ASTM C33 [۵۹]، مطابقت دارد. شکل ۴ سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



(ج) گرانیت

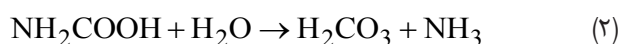
(ب) لیکا

(الف) کریستال

شکل ۴. سنگ‌دانه‌های مصرفی

Fig. 4. Consumable aggregates

غنی از کلسیم آنزیم اوره از توسط باکتری هیدرولیز می‌گردد، کلسیم کربنات به صورت کریستال‌های جامد رسوب می‌کند. در ابتدای مسیر هیدرولیز آنزیمی اوره، یک مول اوره به یک مول آمونیاک و یک مول کاربامات هیدرولیز می‌گردد، سپس کاربامات و آب با یکدیگر واکنش می‌دهند و به یک مول آمونیاک و یک مول اسید کربونیک هیدرولیز می‌شوند. با به تعادل رسیدن این فرآورده‌ها در آب، بی کربنات، دو مول آمونیوم و دو مول یون هیدروکسید تشکیل می‌شود. یون‌های هیدروکسید با افزایش pH محیط، منجر به تغییر در تعادل بی کربنات می‌شوند و یون‌های کربنات تشکیل می‌شوند. در نهایت یون‌های محلول کلسیم به شکل کریستال کلسیم کربنات رسوب می‌کنند، سپس واکنش کلی اوره و کلسیم برای تشکیل کلسیم کربنات و آمونیوم انجام می‌شود. دیواره‌ی سلول باکتری با بار منفی کاتیون‌های  $Ca^{2+}$  محیط را جذب می‌کند. در نهایت واکنشی که بین  $Ca^{2+}$  و  $CO_3^{2-}$  صورت می‌گیرد باعث تشکیل رسوب کلسیم کربنات بر روی دیواره سلول می‌شود. مکانیسم تشکیل رسوب کلسیم کربنات توسط هیدرولیز آنزیمی اوره در رابطه‌های ۱ تا ۷ نشان داده شده است [۶۵].



۲-۵- محیط عمل‌آوری و مکانیزم تشکیل کلسیم کربنات  
تاکنون از منابع کلسیم مختلفی جهت بهبود عملکرد باکتری و افزایش میزان رسوبات معدنی، استفاده شده است [۶۳ و ۶۲]. تشکیل رسوب کلسیم کربنات با استفاده از باکتری باسیلوس اسفریکوس همراه با منابع مختلف کلسیم شامل کلسیم اکسید، کلسیم نترات، کلسیم استات و کلسیم کلرید مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشاهده شد بیش‌ترین میزان رسوب با استفاده از کلسیم کلرید حاصل شده است [۶۴]. با این حال افزایش خواص بتن باکتریایی بدون استفاده از منبع کلسیم نیز در مطالعات آزمایشگاهی گزارش شده است [۴۷، ۳۳ و ۲۲]. بنابراین برای بررسی تاثیر عوامل خارجی بر میزان رسوبات معدنی تشکیل شده توسط باکتری و همچنین ارزیابی تاثیر منبع کلسیم بر بهبود عملکرد باکتری، نمونه‌ها در دو محیط مختلف آب و آب حاوی کلسیم کلرید و اوره عمل‌آوری شدند. مقدار کلسیم کلرید و اوره به ازای هر لیتر آب به ترتیب ۴۹ gI و ۲۰ gI بوده است.

باکتری‌ها برای حفظ پایداری و افزایش زیست‌پذیری خود در بتن به مواد مغذی نیاز دارند تا بتوانند کریستال‌های کلسیم کربنات را تشکیل دهند. این مواد مغذی به صورت منابع مختلف کلسیم در محیط عمل‌آوری، یا به صورت کپسوله شده در بتن، در دسترس باکتری قرار می‌گیرند. کریستال‌های کلسیم کربنات تشکیل شده توسط باکتری تا حد زیادی تحت تاثیر نوع و ترکیبات محیط کشت می‌باشند [۲۱]. یکی از مسیرهایی که منجر به رسوب کلسیم کربنات در بتن می‌شود هیدرولیز آنزیمی اوره است. زمانی که در یک محیط

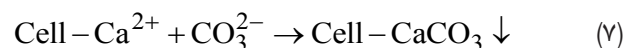
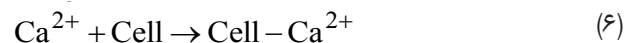
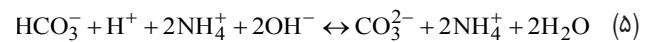
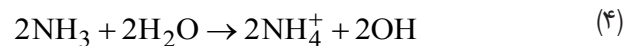
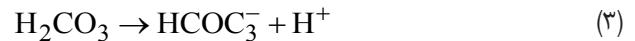
جدول ۳. طرح اختلاط و مشخصات نمونه‌ها

Table 3. Mix design and specifications of specimens

نمونه	سیمان (kg)	ماسه (kg)	کریستال (kg)	گرانیت (kg)	لیکا (kg)	میکروسیلیس (kg)	آب (kg)	غلظت باکتری (Cells/ml)	هوازا (%)	فوق روان کننده (kg)	محیط عمل‌آوری
CWN	۴۵۰	۲۶۸	۱۵۴	۱۱۶	۵۳۵	۵۰	۱۷۵	۰	۰	۴/۵	آب
BWN	۴۵۰	۲۶۸	۱۵۴	۱۱۶	۵۳۵	۵۰	۱۷۵	$3/5 \times 10^6$	۰	۴/۵	آب
CCN	۴۵۰	۲۶۸	۱۵۴	۱۱۶	۵۳۵	۵۰	۱۷۵	۰	۰	۴/۵	منبع کلسیم
BCN	۴۵۰	۲۶۸	۱۵۴	۱۱۶	۵۳۵	۵۰	۱۷۵	$3/5 \times 10^6$	۰	۴/۵	منبع کلسیم
CWA	۴۵۰	۲۶۸	۱۵۴	۱۱۶	۵۳۵	۵۰	۱۷۵	۰	۰/۰۸	۴/۵	آب
BWA	۴۵۰	۲۶۸	۱۵۴	۱۱۶	۵۳۵	۵۰	۱۷۵	$3/5 \times 10^6$	۰/۰۸	۴/۵	آب
CCA	۴۵۰	۲۶۸	۱۵۴	۱۱۶	۵۳۵	۵۰	۱۷۵	۰	۰/۰۸	۴/۵	منبع کلسیم
BCA	۴۵۰	۲۶۸	۱۵۴	۱۱۶	۵۳۵	۵۰	۱۷۵	$3/5 \times 10^6$	۰/۰۸	۴/۵	منبع کلسیم

دستیابی به اسلامپ و کارایی مطلوب از فوق روان کننده نیز استفاده شده است. استفاده از سنگ‌دانه‌های مقاوم منجر به ساخت بتنی با دوام می‌گردد. همچنین مقاومت فشاری بتن حاوی سنگ‌دانه‌های مقاوم مانند گرانیت، بیش‌تر از مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های معمولی گزارش شده است [۴۵-۴۱]. به همین دلیل در این پژوهش به جای سنگ‌دانه‌های معمولی از سنگ‌دانه‌های گرانیتی استفاده شده است تا مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن سبک بهبود یابد. سطح سنگ‌دانه‌های گرانیت زبر و دندانه‌دار است که منجر به پیوستگی بهتر مصالح در ناحیه اتصال شده است. میزان استفاده از سنگ‌دانه‌های گرانیت در طرح اختلاط به گونه‌ای انتخاب شده است که نمونه‌ها در رده‌ی سبک قرار بگیرند.

هر نمونه با سه حرف انگلیسی نام‌گذاری شده است که هر حرف مخفف یک کلمه‌ی انگلیسی است. حرف اول نشان دهنده‌ی وجود یا عدم وجود باکتری در ساخت نمونه است. حرف اول B که مخفف باکتری است، نشان دهنده‌ی استفاده از باکتری در ساخت نمونه‌ها است و حرف اول C که مخفف کنترل است، نشان دهنده‌ی نمونه مرجع می‌باشد. حرف دوم نشان دهنده محیط عمل‌آوری نمونه است. حرف دوم نمونه‌هایی که در آب عمل‌آوری شدند با W که مخفف آب است نشان داده شده است و حرف دوم نمونه‌هایی که در محیط غنی از کلسیم عمل‌آوری شدند با C که مخفف کلسیم است نشان داده شده است. حرف سوم نشان دهنده‌ی وجود یا عدم وجود هوازا در ساخت نمونه است. حرف A مخفف هوازا نشان دهنده‌ی بتن سبک هوادار، و حرف N مخفف نرمال، نشان دهنده‌ی بتن بدون هوازا است



۲-۶- جزئیات نمونه‌ها و طرح اختلاط

طرح اختلاط نمونه‌ها به روش وزنی و مطابق با آیین نامه ACI 211.2-98 [۶۶]، تعیین شده است. این طرح اختلاط با هدف رسیدن به حداقل مقاومت فشاری ۳۰ Mpa در سن ۲۸ روزگی تعیین شده است. مخلوط بتن نهایی با آزمون و خطا تعیین شده است. در مجموع هشت گروه نمونه ساخته شد. در جدول ۳ جزئیات اختلاط مصالح برای ساخت یک متر مکعب بتن، ذکر شده است. علاوه بر این، نوع محیط عمل‌آوری نمونه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. نسبت آب به مصالح سیمانی با توجه به خصوصیات مصالح مصرفی ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است. همچنین برای



جدول ۴. وزن مخصوص نمونه‌ها

Table 4. Specific gravity of specimens

BCA	CCA	BWA	CWA	BCN	CCN	BWN	CWN	نام نمونه
۱۷۶۰	۱۷۷۲	۱۷۷۲	۱۷۶۰	۱۷۹۳	۱۶۷۱	۱۷۸۴	۱۷۵۶	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )

۳-۳- جذب آب

آزمایش جذب آب طبق استاندارد ASTM C642 [۶۹]، بر روی نمونه‌های ۹۰ روزه‌ی استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ mm و ارتفاع ۲۰۰ mm صورت گرفت. نمونه‌ها درون یک خشک کن با درجه حرارت ۱۱۰ °C، به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. وزن نمونه‌ها پس از خشک شدن تعیین گردید. سپس نمونه‌ها ۴۸ ساعت اشباع شدند و مجدد وزن شدند. در نهایت با استفاده از رابطه (۸) جذب آب نمونه‌ها محاسبه شده است. در رابطه‌ی (۸)،  $W_1$  وزن خشک نمونه‌ها و  $W_2$  وزن نمونه‌های اشباع شده را نشان می‌دهد.

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (8)$$

۳-۴- مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی یکی از مشخصه‌های بتن است که مقاومت در برابر جاری شدن جریان الکتریکی به واسطه‌ی حرکت یون‌ها در بتن را نشان می‌دهد. رابطه‌ی قوی میان مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر در مخلوط‌های بتنی وجود دارد. در این مطالعه هدایت الکتریکی طبق استاندارد ASTM C1760 [۷۰] انجام شده است. نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ mm و ارتفاع ۲۰۰ mm برای انجام آزمایش ساخته شده است. برای انجام این آزمایش نمونه‌های بتنی بین دو سلول دستگاه قرار داده شد و سلول‌ها با محلول سدیم کلرید ۳٪ پر شدند. سپس به مدت ۶۰ ثانیه ولتاژ ۶۰ V به دو انتهای نمونه اعمال شد. لازم به ذکر است دمای نمونه‌ها در زمان انجام آزمایش باید بین ۲۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد. در نهایت هدایت الکتریکی طبق رابطه (۹) و مقاومت الکتریکی طبق رابطه (۱۰) محاسبه شده است. در مطالعات پیشین نیز از این روش برای محاسبه مقاومت الکتریکی بتن استفاده شده است [۷، ۱۷، ۴۰].

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- وزن مخصوص بتن سبک

مطابق با استاندارد ASTM C330 [۶۷]، بتن‌های سبک سازه‌ای عموماً ضمن داشتن مقاومت فشاری بالاتر از ۱۷ Mpa، وزن مخصوصی کمتر ۱۸۰۰ kg/m<sup>3</sup> دارند. در جدول ۴، وزن مخصوص نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش ارائه شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که وزن مخصوص تمام نمونه‌ها، در محدوده استاندارد وزن مخصوص بتن سبک می‌باشد. استفاده از باکتری منجر به تشکیل رسوب کلسیم کربنات شده است. پر شدن خلل و فرج بسیار ریز بتن توسط این رسوبات منجر به متراکم شدن ماتریس درونی بتن و در نتیجه افزایش وزن مخصوص بتن شده است. بیشترین درصد افزایش مخصوص نسبت به بتن مرجع، مربوط به نمونه‌ی BWN است که حاوی باکتری بوده و در محیط غنی از کلسیم عمل‌آوری شده است. عمل‌آوری نمونه در محیط غنی از کلسیم باعث شده باکتری به مواد مغذی لازم دسترسی داشته باشد، بنابراین رسوب بیشتری توسط باکتری تشکیل شده است و وزن مخصوص بتن افزایش یافته است.

۳-۲- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری به عنوان معیاری جهت تعیین کیفیت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساخت بتن سبک بیولوژیکی با مقاومت فشاری مناسب یکی از اهداف این پژوهش بوده است. این آزمایش مطابق با استاندارد En12390-3 [۶۸] انجام شده است. از مکعب‌های بتنی ۱۵×۱۵×۱۵ cm<sup>3</sup> برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، استفاده شده است. آزمایش مقاومت فشاری بعد از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد. تا زمانی که ترک‌های قابل مشاهده بر روی بتن ایجاد شد و نمونه‌ها توان تحمل بار بزرگ‌تری را نداشتند، بارگذاری بدون وقفه بر روی نمونه‌ها اعمال شد.



(ب) انجام آزمایش RCPT



(الف) اشباع کردن نمونه‌ها

شکل ۵. آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش RCPT

Fig. 5. Concrete samples in the testing process of the chloride ion permeability

### ۳-۵- نفوذپذیری سریع یون کلرید<sup>۱</sup> (RCPT)

RCPT یک آزمایش معمول برای سنجش سریع نفوذپذیری یون کلر در بتن است که بر اساس استاندارد ASTM C1202 [۷۱]، انجام شده است. آزمون‌هایی به ضخامت ۵۰ mm از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ mm و ارتفاع ۲۰۰ mm، برش داده شد. سپس آزمون‌ها ۱۸ ساعت در شرایط خلا اشباع شدند. بعد از قرارگیری نمونه در سلول دستگاه، یک سمت آزمون با محلول سدیم کلرید و سمت دیگر آزمون با محلول سدیم هیدروکسید در تماس قرار گرفت. بار عبوری از نمونه‌های بتنی اشباع تحت اختلاف پتانسیل ۶۰V و طی ۶ ساعت ثبت گردید. در نهایت کل بار عبوری از نمونه از طریق رابطه‌ی (۱۱) محاسبه گردید. نحوه انجام آزمایش RCPT، در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (11)$$

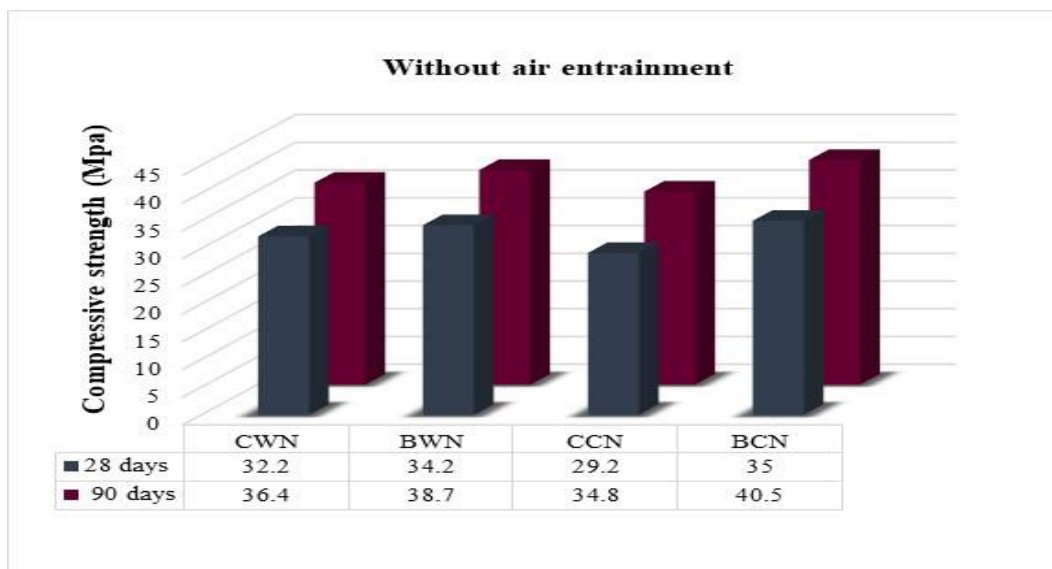
$$\sigma = \frac{K \times I \times L}{V \times D^2} \quad (9)$$

در این رابطه هدایت الکتریکی بتن با  $\sigma$  نشان داده شده است که بر حسب  $(\frac{m}{\Omega \cdot m})$  می‌باشد، K عدد ثابت و برابر با  $1.273/2$ ، جریان اندازه‌گیری شده پس از گذشت ۶۰ ثانیه بر حسب  $V, (mA)$  ولتاژ اعمال شده بر حسب  $(V)$ ، D قطر نمونه بر حسب  $(mm)$  و L طول نمونه بر حسب  $(mm)$  است.

$$R = \frac{1000}{\sigma} \quad (10)$$

در رابطه‌ی (۱۰)، R نشانگر مقاومت الکتریکی بتن بر حسب  $(\Omega \cdot m)$  و

$\sigma$  هدایت الکتریکی بتن بر حسب  $(\frac{m}{\Omega \cdot m})$  است.



شکل ۶. مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های بدون هوازا

Fig. 6. Compressive strength of specimens at age of 28 and 90 days of without AEA

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی همه‌ی نمونه‌های بدون هوازا نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی آن‌ها افزایش یافته است. مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌ی BCN حدود ۱۵/۷٪ نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن افزایش یافته است؛ در حالی که مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌ی CCN حدود ۱۹٪ افزایش داشته است. ممکن است ترکیبات موجود در محیط کشت باکتری، در طولانی مدت بر روی هیدراتاسیون سیمان تاثیر گذاشته باشند به همین دلیل روند افزایش مقاومت در نمونه‌ی حاوی باکتری کندتر بوده است.

مطابق شکل ۷، مشهود است که در گروه نمونه‌های حاوی هوازا نیز با افزایش زمان مقاومت فشاری بالاتری حاصل شده است زیرا هیدراتاسیون سیمان تکمیل شده است. مقاومت فشاری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌ی باکتریایی عمل‌آوری شده در محیط غنی از کلسیم حدود ۱۳٪ نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه افزایش یافته است.

اثر متقابل محیط عمل‌آوری و هوازا بر مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه مرجع و بیولوژیکی در شکل ۸ نشان داده شده است.

حداکثر افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به نمونه‌ی باکتریایی بدون هوازا و عمل‌آوری شده در محیط حاوی کلسیم کلرید و اوره است. در این نمونه مقاومت فشاری در مقایسه با بتن مرجع ۱۹/۸٪ افزایش داشته است. عمل‌آوری نمونه در محیط غنی از کلسیم باعث شده مواد مغذی لازم

در رابطه‌ی (۱۱)،  $Q$  کل بار الکتریکی عبوری از نمونه برحسب کولمب و  $I$  جریان اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف پس از اعمال ولتاژ و برحسب (mA) می‌باشد.

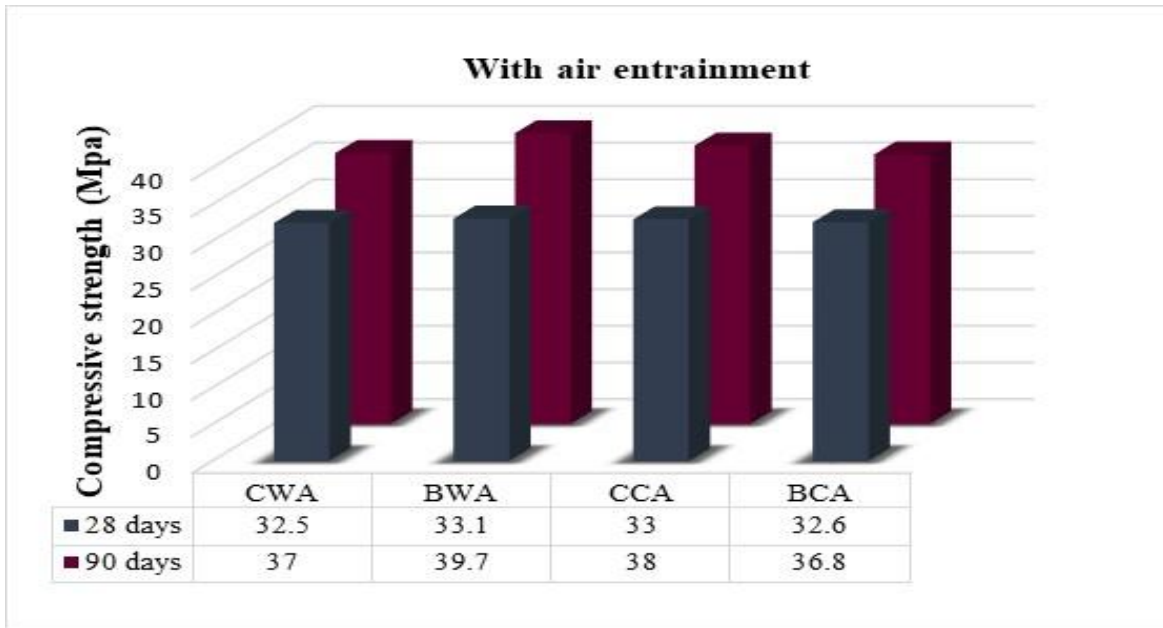
### ۳-۶- عکس برداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان از سطوح تصاویری با بزرگ‌نمایی ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابر تهیه کرد. جهت مقایسه‌ی ریز ساختار نمونه‌های حاوی باکتری با نمونه‌ی مرجع از تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. برای این منظور بعد از شکست نمونه‌ها، قطعاتی به ابعاد  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  انتخاب شد، سپس این قطعات با لایه‌ی نازکی از طلا روکش شدند. در نهایت تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی بعد از اشباع شدن نمونه‌ها و قرار گرفتن در محفظه خلا شروع می‌شود.

### ۴- نتایج

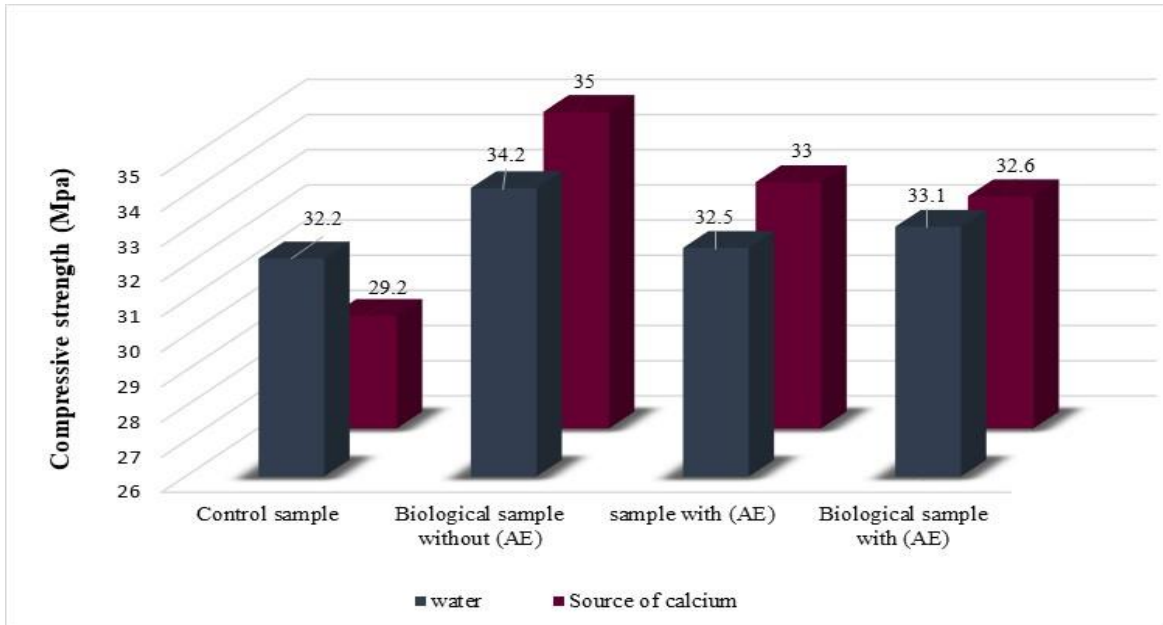
#### ۴-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های بدون هوازا و حاوی هوازا به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. مشاهده شد مقاومت فشاری همه‌ی نمونه‌ها نسبت به بتن مرجع افزایش یافته است.



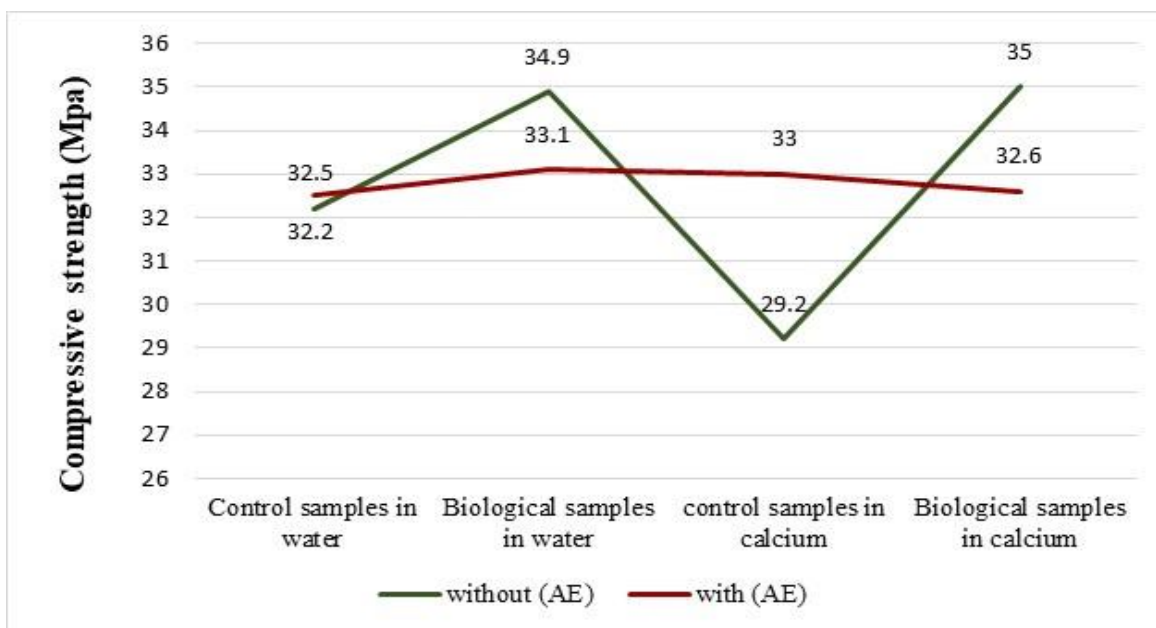
شکل ۷. مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های حاوی هوازا

Fig. 7. Compressive strength of specimens at age of 28 and 90 days of with AEA



شکل ۸. اثر متقابل محیط عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌ها

Fig. 8. Interaction effects of curing environment on compressive strengths of specimens



شکل ۹. اثر متقابل هوازا بر مقاومت فشاری نمونه‌ها

Fig. 9. Interaction effects of AEA on compressive strengths of specimens

خارجی رسوب‌های معدنی تولید کنند؛ با این وجود میزان رسوب مواد معدنی در این حالت، کمتر از حالتی است که منبع کلسیم خارجی نیز برای باکتری فراهم شده است.

در شکل ۹ اثر متقابل هوازا و باکتری بر نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها نشان داده شده است. به طور معمول استفاده از افزودنی هوازا باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد، اما مقایسه‌ی نتایج طرح اختلاط‌های بدون باکتری، با هوازا و بدون هوازا نشان می‌دهد، استفاده‌ی هم‌زمان از میکروسیلیس و هوازا باعث افزایش مقاومت فشاری در این نمونه‌ها شده است، و این باور که افزودنی هوازا همیشه سبب کاهش مقاومت فشاری می‌گردد نقض می‌گردد. افزودنی هوازا در بتن سبک بدون باکتری رفتار متفاوتی داشته است. تاثیر مثبت پوزولان‌ها در بهبود ویژگی‌های بتن به طور عمده در دو مکانیزم نمود پیدا می‌کند. ذرات نرم و ریز میکروسیلیس با پر کردن منافذ خالی منجر به متراکم‌تر شدن ماتریس بتن می‌گردند. از طرفی کلسیم هیدروکسید موجود در فصل مشترک خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها مانع از افزایش مقاومت فشاری می‌شود؛ بنابراین واکنش‌های پوزولانی با تبدیل کریستال‌های کلسیم هیدروکسید حاصل از فرآیند هیدراتاسیون به ژل C-S-H، مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهند. نکته‌ی قابل توجه‌ای که در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و هوازا وجود دارد این است

در اختیار باکتری قرار گیرد در نتیجه بهبود عملکرد باکتری و تشکیل بیشتر رسوب کلسیم کربنات منجر به افزایش حداکثری مقاومت فشاری شده است. در حالی که مقاومت فشاری نمونه‌ی بیولوژیکی حاوی هوازا و عمل‌آوری شده در محیط غنی از کلسیم، ۱۱/۷٪ نسبت به نمونه‌ی مرجع افزایش یافته است.

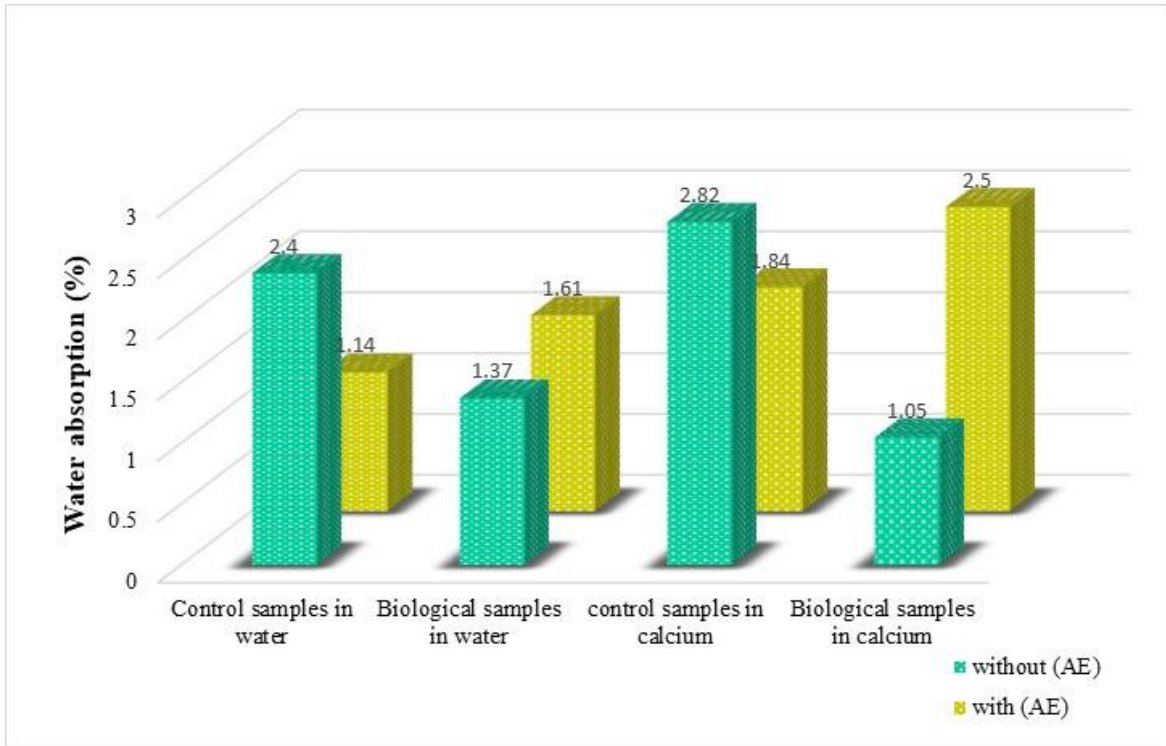
تفاوت در نوع محیط عمل‌آوری بر نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها تاثیر داشته است. عمل‌آوری بتن مرجع در محیط غنی از کلسیم باعث کاهش ۹/۳٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی مرجع عمل‌آوری شده در آب شده است. این نتایج نشان دهنده‌ی مضر بودن محیط حاوی کلسیم برای بتن بدون باکتری است. مقاومت فشاری نمونه‌های BWA و BWN در مقایسه با بتن مرجع به ترتیب ۶٪ و ۲/۸٪ افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که حتی در غیاب یک منبع کلسیم خارجی، باکتری قادر به رسوب کلسیم کربنات است و افزایش مقاومت در این نمونه‌ها به دلیل کاهش خلل و فرج ماتریس بتن توسط رسوبات کلسیم کربنات تولید شده است. در برخی از مطالعات پیشین، کلسیم اکسید (CaO) به عنوان منبع کلسیم برای باکتری مورد استفاده قرار گرفته است [۷۲ و ۶۴]. بنابراین می‌توان گفت، باکتری‌ها قادرند از کلسیم اکسید آزاد موجود در سیمان به عنوان یک منبع کلسیم در داخل بتن استفاده کنند و حتی بدون منبع کلسیم



#### ۴-۲- جذب آب

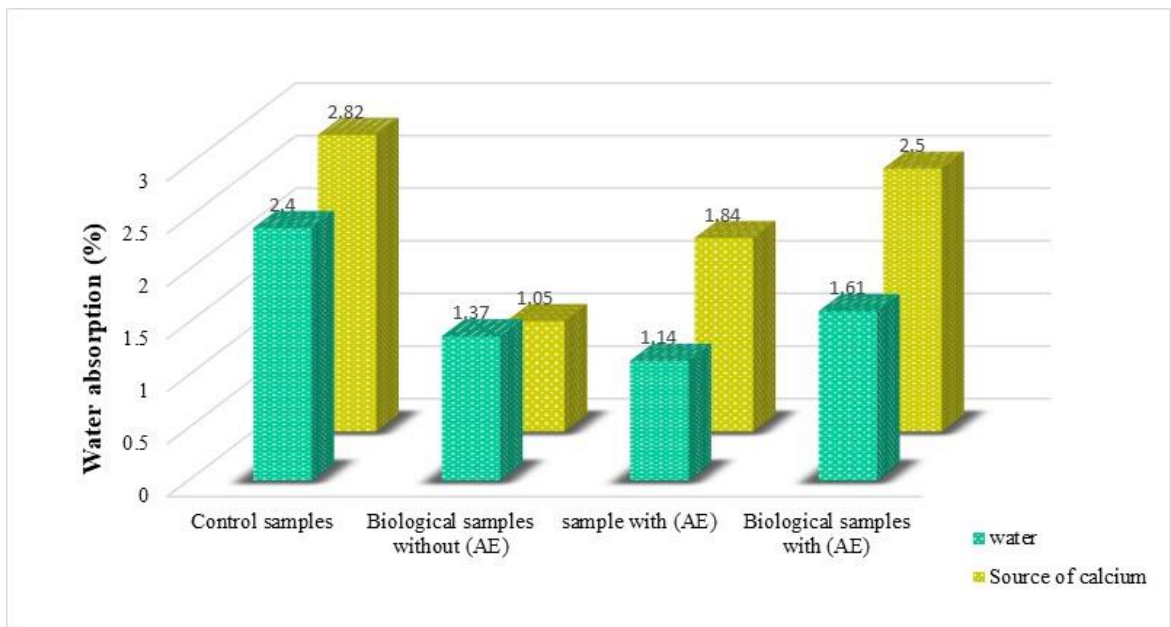
نتایج تاثیر هوازا بر جذب آب ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های مرجع و بیولوژیکی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. هم‌چنین در شکل ۱۱ تاثیر محیط عمل‌آوری بر جذب آب نمونه‌ها نشان داده شده است. عمل‌آوری نمونه‌ی مرجع در محیط غنی از کلسیم باعث افزایش ۱۷/۵٪ جذب آب شده است. دلیل افزایش جذب آب در این نمونه مضر بودن ترکیبات محیط حاوی کلسیم برای بتن بدون حضور باکتری است. واضح است که تشکیل کریستال‌های کلسیت توسط باکتری منجر به کاهش تخلخل و به طبع کاهش جذب آب نمونه‌ها در هر دو محیط عمل‌آوری شده است. حداکثر کاهش جذب آب در نمونه‌ی بیولوژیکی عمل‌آوری شده در محیط حاوی کلسیم حاصل شده است؛ جذب آب در این نمونه ۶۲/۷٪ نسبت به بتن مرجع کاهش یافته است. مشهود است که قرارگیری منبع کلسیم در کنار باکتری باعث بهبود عملکرد باکتری و افزایش رسوب‌های معدنی شده است، در نتیجه با پر شدن منافذ مویینه و کاهش تخلخل، جذب آب نمونه کاهش یافته است. جذب آب نمونه‌های CWA و CCA، در مقایسه با بتن مرجع در محیط عمل‌آوری مشابه، به ترتیب ۵۲/۵٪ و ۳۷/۴٪ کاهش یافته است. این نتایج حاکی از تاثیر مثبت افزودنی هوازا بر کاهش جذب آب نمونه‌ها است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، جذب آب نمونه‌های حاوی هوازا و باکتری بیش‌تر از حالتی است که فقط از افزودنی هوازا در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. اگر چه استفاده هم‌زمان از باکتری و هوازا باعث کاهش ۱۱/۵٪ جذب آب نمونه‌ی BCA در مقایسه با CCN شده است، اما جذب آب این نمونه ۳۵/۸٪ در مقایسه با نمونه‌ی CCA، افزایش یافته است. حفره‌های هوا با حفاظت از باکتری در محیط بتن و تامین اکسیژن کافی برای باکتری، باعث شده‌اند که میزان رسوبات تشکیل شده توسط باکتری افزایش یابد. بنابراین حفره‌های هوای موجود در ماتریس بتن توسط رسوب‌های معدنی پر شده‌اند و از تاثیر مثبت افزودنی هوازا را بر جذب آب کاسته شده است. این در حالی است که جذب آب نمونه‌ی BWA حدود ۳۵/۶٪ کمتر از نمونه‌ی BCA است. با عمل‌آوری نمونه در آب، میزان رسوبات تولید شده کمتر از حالتی است که نمونه در محیط غنی از کلسیم عمل‌آوری شده است. بنابراین در کنار باکتری، رسوب کلسیم کربنات کمتری در ماتریس بتن تشکیل شده است. فضای خالی تعدادی از حباب‌های هوا با رسوب‌های معدنی پر شده است، بنابراین در این حالت بتن هواداری که حاوی رسوبات کلسیم کربنات نیز می‌باشد ساخته شده است. وجود دو عامل افزودنی هوازا و باکتری در کنار

که نمونه‌های بتنی ساخته شده با این طرح اختلاط علاوه بر داشتن ظاهری مناسب و سطحی مسطح، همگن‌تر بوده و شرایط مناسب‌تری برای تراکم داشتند. افزودنی هوازا با ایجاد حالت غلطکی در بتن منجر به حرکت بهتر مصالح بر روی یکدیگر و همگنی مخلوط شده است. بنابراین استفاده از این دو عامل در کنار یکدیگر منجر به بهبود ویژگی‌های بتن در این مطالعه شده است. استفاده هم‌زمان از این دو افزودنی به دلیل ایجاد چسبندگی بهتر میان مصالح و همگن کردن مخلوط منجر به افزایش ۱۳٪ مقاومت فشاری نمونه‌ی CCA در مقایسه با نمونه‌ی CCN شده است. پیش از این پژوهش نیز افزایش مقاومت فشاری با استفاده هم‌زمان از افزودنی هوازا و میکروسلیس گزارش شده است [۷۳ و ۱]. همان‌طور که از نتایج ارائه شده مشخص است، مقاومت نمونه‌ی BCA در مقایسه با نمونه‌ی CCA و BCN کمتر است. به نظر می‌رسد دلیل کاهش مقاومت در این نمونه رسوب بیشتر کریستال‌های کلسیت توسط باکتری است. استفاده از افزودنی هوازا علاوه بر حفاظت از باکتری در محیط قلیایی و خشک بتن، فضای کافی جهت قرارگیری باکتری در بتن فراهم را کرده است. هم‌چنین با تامین اکسیژن کافی برای بقای باکتری، منجر به بهبود عملکرد باکتری و تشکیل بیشتر رسوب کلسیم کربنات شده است. در این حالت به دلیل افزایش میزان رسوبات تولید شده، حباب‌های هوای عمدی ایجاد شده در بتن پوشش داده شده‌اند و از تاثیر مثبت افزودنی هوازا بر مقاومت فشاری نمونه‌ها تا حدودی کاسته شده است. از طرفی، در این حالت به دلیل افزایش میزان رسوبات تشکیل شده توسط باکتری نسبت به سایر طرح‌ها، منافذ سطحی بتن، بیش‌تر و با سرعت بالاتری مسدود شده است. این رسوبات مانند یک مانع برای نفوذ آب درون ماتریس بتن عمل کرده‌اند، بنابراین با کاهش جریان آب درون بتن به ویژه در روزهای اول عمل‌آوری، هیدراتاسیون تا حدودی مختل شده است. بنابراین هر یک از این عوامل به نوعی می‌تواند دلیلی برای کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌ی BCA باشد. مقاومت فشاری در بتن بیولوژیکی تحت تاثیر الگوی رسوب باکتری قرار دارد. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان این‌گونه استنباط کرد که، اگر شرایطی پیش آید که میزان رسوب تولید شده توسط باکتری بسیار زیاد باشد، رسوب قادر به مسدود کردن منافذ سطح بتن خواهد بود. در نتیجه در بتن ترمیم سطحی رخ می‌دهد و با مسدود شدن مسیر جریان آب در بتن و اختلال در هیدراتاسیون، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد؛ بنابراین صرفاً بیش‌تر بودن میزان رسوبات تولید شده توسط باکتری تضمینی برای بهبود خواص مکانیکی بتن نیست.



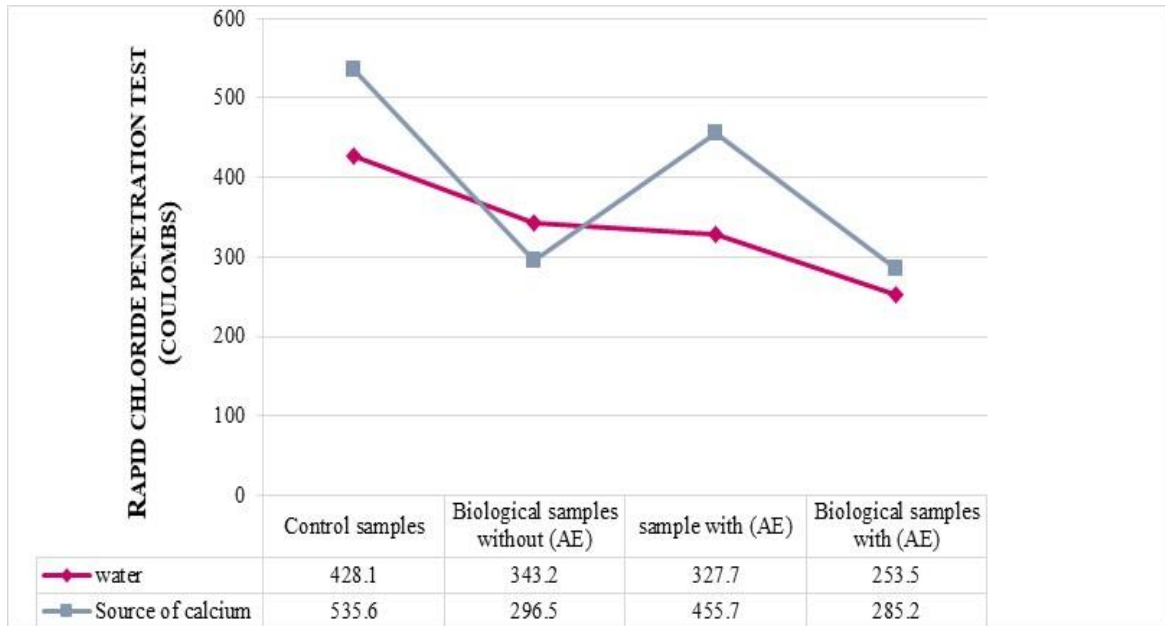
شکل ۱۰. اثر هوازا بر نتایج جذب آب نمونه‌ها

Fig.10. Effects of AEA on results water absorption of specimens



شکل ۱۱. اثر محیط عمل‌آوری بر نتایج جذب آب نمونه‌ها

Fig. 11. Effects of curing environment on results water absorption of specimens



شکل ۱۲. تغییرات شار عبوری از نمونه در آزمایش RCPT

Fig. 12. Electrical charge passing through specimens on the RCPT test

جدول ۵. شاخص تعیین نفوذپذیری یون کلرید [۷۱]

Table 5. Chloride ion penetrability based on charge passed [71]

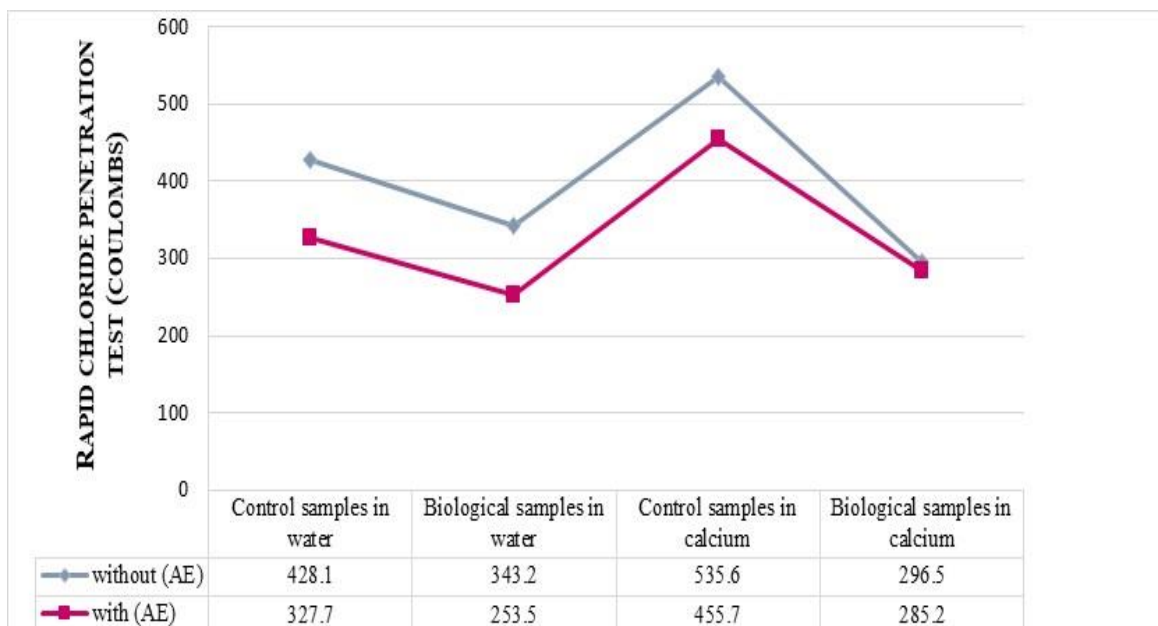
بار الکتریکی عبور کرده بر حسب (کولمب)	نفوذپذیری یون کلرید
$4000 <$	زیاد
$2000\_4000$	متوسط
$1000\_2000$	کم
$100\_1000$	خیلی کم
$100 <$	قابل چشم پوشی

یکدیگر منجر به کاهش ۳۲٪ جذب آب در این نمونه شده است.

#### ۳-۴- فوذ پذیری یون کلرید

در شکل ۱۲ تغییرات شار عبوری از نمونه‌ها در آزمایش RCPT، نشان داده شده است. القای کلسیت میکروبی با کنترل تخلخل و کاهش منافذ ساختاری نمونه‌ها، به‌عنوان فاکتوری مناسب جهت بهبود دوام بتن در برابر نفوذ یون کلر عمل کرده است. فعالیت اوره آزی و واکنش‌های باکتریایی منجر به تشکیل رسوبات معدنی در ماتریس نمونه‌ها شده است. از آن جا که

نرخ نفوذ یون کلر به ساختار درونی بتن وابسته است، این رسوب‌ها با کاهش منافذ مویینه و خلل و فرج بتن منجر به متراکم‌تر شدن ماتریس درونی بتن شده‌اند، در نتیجه ضریب انتقال یون کلر در نمونه‌های بیولوژیکی کاهش چشم‌گیری داشته است. ضریب انتقال یون کلر در نمونه‌های بیولوژیکی BWA و BCA در مقایسه با بتن مرجع با محیط عمل‌آوری مشابه به ترتیب ۱۹/۸٪ و ۴۴/۶٪ کاهش یافته است. تامین منبع کلسیم برای باکتری منجر به بهبود عملکرد باکتری، رسوب بیشتر کلسیم کربنات، متراکم‌تر شدن ماتریس بتن و در نتیجه کاهش بیشتر نفوذ یون کلر شده است. از اطلاعات



شکل ۱۳. اثر متقابل باکتری و هوازا بر نفوذپذیری نمونه‌ها در برابر یون کلر

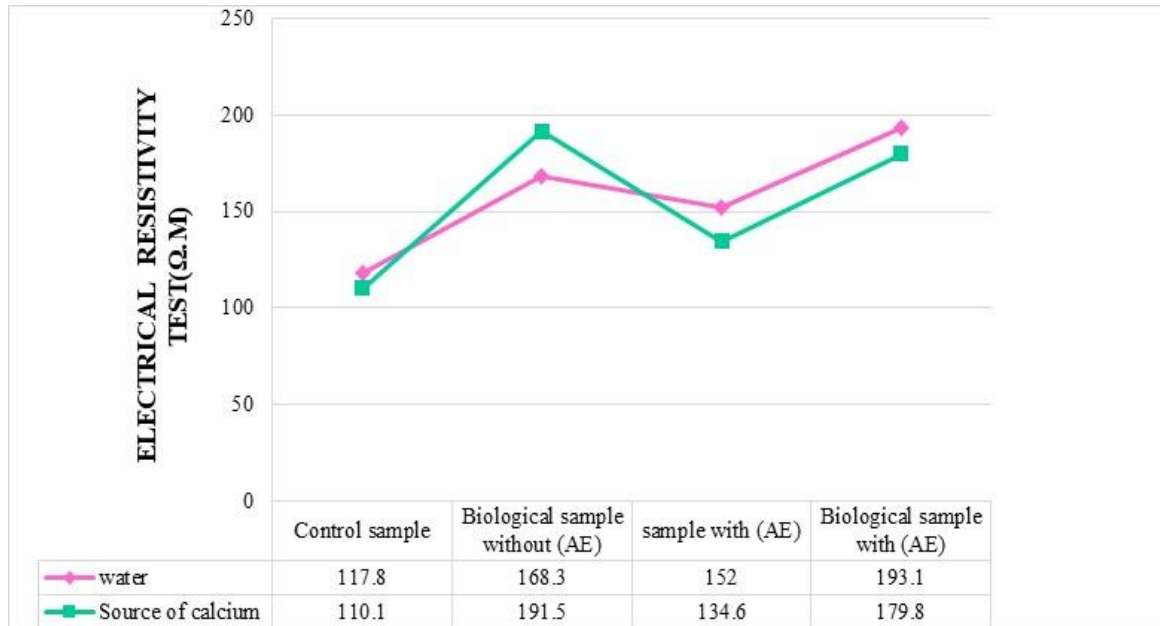
Fig. 13. Interaction effects of bacteria and AEA in the chloride ion penetration in the specimens

حباب‌های هوا با حافظت از باکتری در محیط سخت و قلیایی بتن و با تامین اکسیژن و فضای کافی برای باکتری، منجر به افزایش زیست‌پذیری و بهبود عملکرد باکتری شده‌اند، بنابراین در این نمونه‌ها نرخ نفوذ یون کلر با شیب بیشتری کاهش یافته است.

بدیهی است که عمل‌آوری نمونه در محیط غنی از کلسیم منجر به افزایش تولید رسوب‌های معدنی می‌گردد. به همین دلیل اگر چه با عمل‌آوری نمونه‌ی بیولوژیکی بدون هوازا در محیط غنی از کلسیم میزان رسوب‌های تشکیل شده در مقایسه با نمونه‌ی BWN بیش‌تر بوده است و نفوذپذیری نمونه در برابر یون کلر بهبود یافته است، اما در نمونه‌ی BCA، بیش‌تر بودن رسوب‌ها باعث شده فضای بیش‌تری از حباب‌های هوای عمدی ایجاد شده در بتن پر شوند. این امر باعث کاهش تاثیر مثبت افزودنی هوازا شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، نفوذپذیری یون کلر در نمونه‌ی بیولوژیکی حاوی هوازا با عمل‌آوری در آب، ۴۰/۷٪ کمتر از نفوذپذیری بتن مرجع است. بنابراین در این نمونه به دلیل کمتر بودن میزان رسوب، تنها بخشی از حباب‌های هوا پر شده‌اند در نتیجه بتن هواداری که حاوی رسوب

ارائه شده در جدول ۵ [۷۱]، به عنوان شاخصی معتبر جهت سنجش دوام بتن در برابر نفوذ یون کلر استفاده می‌شود. با توجه به جدول ۴ و داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده در شکل ۱۲، نفوذپذیری نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش در رنج خیلی کم قرار گرفته است. این نتایج نشان دهنده‌ی بتنی با کیفیت است.

شکل ۱۳ تاثیر هوازا بر نفوذپذیری یون کلر در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های بدون باکتری، حاوی هوازا و بدون هوازا نشان می‌دهد، افزودنی هوازا تاثیر مثبتی بر افزایش دوام بتن در برابر نفوذ یون کلر داشته است. به طوری که نرخ نفوذ یون کلر در نمونه‌ی CWN حدود ۲۳/۴٪ کمتر از بتن مرجع بدون هوازا است. حفره‌های هوای میکرونیزه و پایداری که در بتن ایجاد شدند، با مهار کردن حرکت یون‌های آزاد در ماتریس بتن، منجر به افزایش دوام و کاهش نفوذ یون کلر در نمونه‌ها شده‌اند. یکی از یافته‌های مهم این مطالعه نفوذپذیری کم نمونه‌های حاوی باکتری و هوازا است. در نمونه‌های بیولوژیکی حاوی هوازا تاثیر مثبت و هم‌زمان رسوب‌های معدنی و افزودنی هوازا در نمونه‌ها وجود دارد، هم‌چنین



شکل ۱۴. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها

Fig. 14. Electrical resistivity of specimens

مقاومت الکتریکی در مقایسه با نمونه‌ی مرجع شده است. این نتایج حاکی از عملکرد بهتر باکتری در حضور منبع کلسیم است. همچنین افزودن هوازا به آب اختلاط بتن حاوی باکتری، باعث افزایش مقاومت الکتریکی نمونه شده است، به طوری که مقاومت نمونه‌ی BWA حدود ۶۳/۹٪ بیش‌تر از بتن مرجع می‌باشد. بهبود مقاومت الکتریکی در این نمونه ناشی از استفاده‌ی هم‌زمان از هوازا و باکتری در طرح اختلاط نمونه است. حفره‌های هوا شرایط ایده‌آل جهت رسوب کلسیم کربنات را فراهم کردند. از طرفی عمل‌آوری نمونه در آب سبب شده، میزان رسوب‌ها مقداری کمتر از حالتی باشد که بتن در محیط غنی از کلسیم عمل‌آوری شده است. بنابراین با پر شدن بخشی از حفره‌های هوا، نمونه‌ی بیولوژیکی هواداری ساخته شد که بهترین شرایط برای افزایش دوام بتن در این مطالعه را داشت.

#### ۴-۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی (SEM)

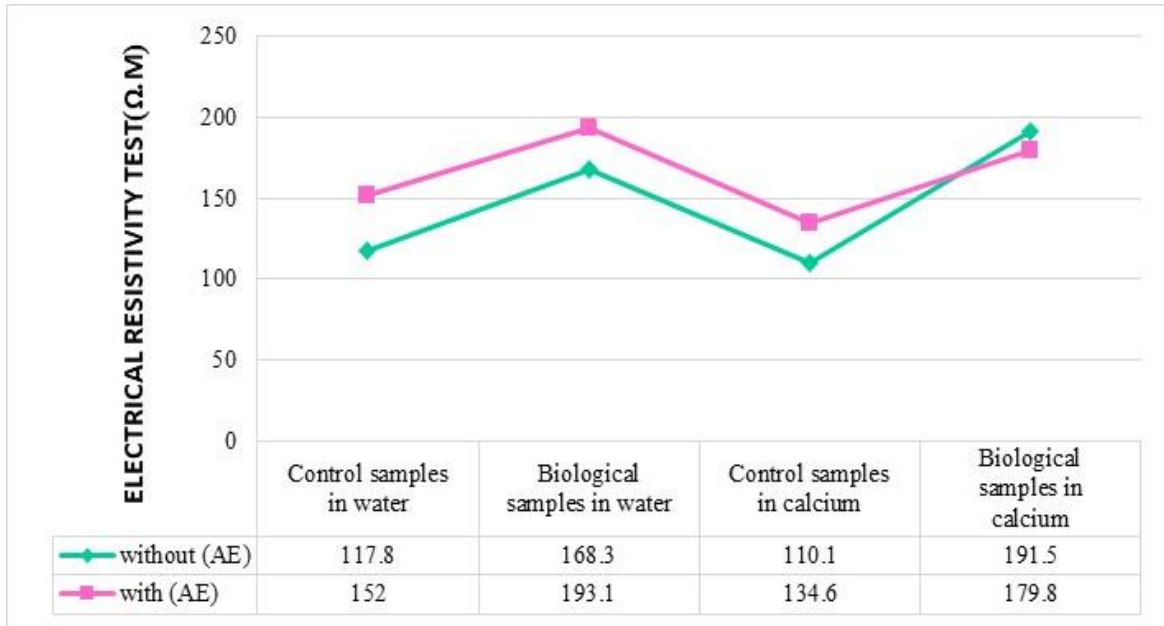
در این بخش برای مقایسه‌ی ریز ساختار بتن مرجع و بتن بیولوژیکی، تصاویر میکروسکوپ الکترونی از دو نمونه‌ی CCN و BCN آورده شده است. شکل ۱۶-الف نمونه‌ی بیولوژیکی و شکل ۱۶-ب نمونه‌ی مرجع را نشان می‌دهد. بهبود ویژگی‌های مهندسی در بتن باکتریایی تا حد زیادی

کلسیم کربنات است وجود دارد که این امر باعث کاهش ضریب انتشار یون کلر در نمونه‌ی BWA شده است.

#### ۴-۴- مقاومت الکتریکی

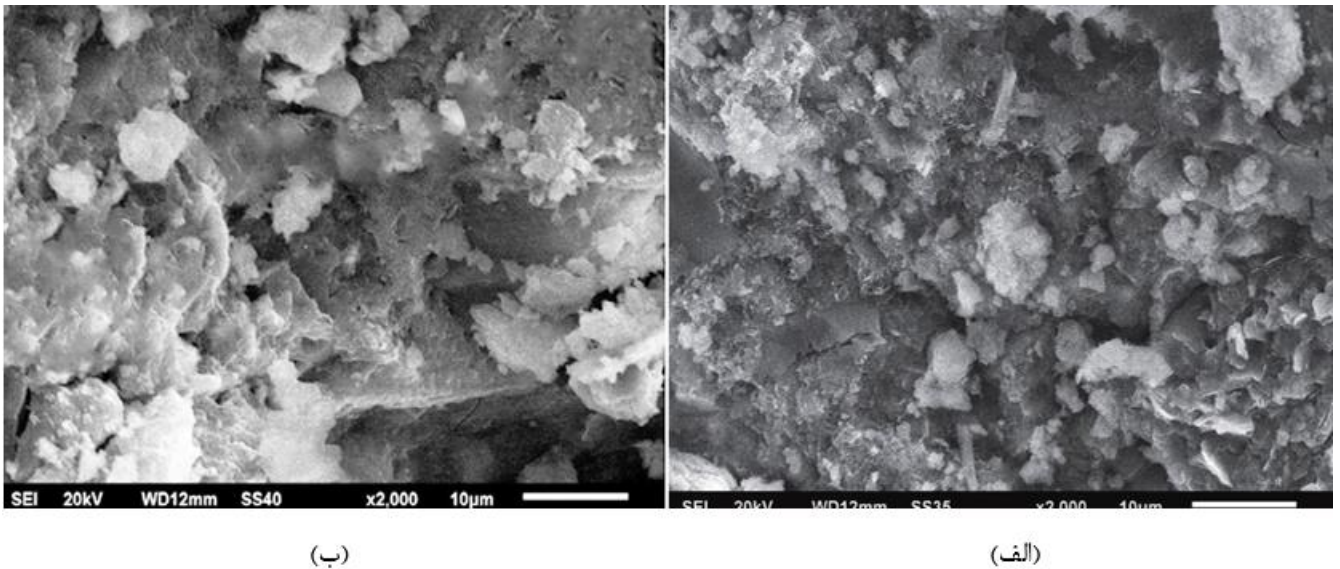
همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، در هر دو محیط عمل‌آوری مقاومت الکتریکی نمونه‌های باکتریایی در مقایسه با بتن مرجع افزایش یافته است. پتانسیل بالای باکتری در تشکیل رسوب‌های معدنی، منجر به پر شدن منافذ مویینه و متراکم‌تر شدن ماتریس بتن سبک شده است. اثر متقابل هوازا و باکتری بر افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است. افزودنی هوازا پارامتری موثر در افزایش قابل توجه مقاومت الکتریکی نمونه‌ها بوده است، به طوری که مقاومت الکتریکی نمونه‌های CWA و CCA به ترتیب ۲۹٪ و ۲۲/۲٪ از بتن مرجع با محیط عمل‌آوری مشابه بیشتر است. حباب‌های هوای ایجاد شده در بتن، مانع از حرکت یون‌های آزاد شدند و از باکتری در برابر عوامل تهاجمی مانند یون‌های کلر محافظت کردند. اگر چه مقاومت الکتریکی نمونه‌ی BWN حدود ۴۲/۸٪ نسبت به بتن مرجع افزایش یافته است، اما کمترین مقدار مقاومت الکتریکی در گروه نمونه‌های باکتریایی متعلق به همین نمونه است. عمل‌آوری نمونه‌ی BCN در محیط غنی از کلسیم منجر به افزایش ۷۳/۹٪





شکل ۱۵. اثر متقابل باکتری و هواز با مقاومت الکتریکی

Fig. 15. Interaction effects of AEA and bacteria on electrical resistivity



(ب)

(الف)

شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی

Fig. 16. Scanning electron microstructure images

نسبت به بتن مرجع ۱۹/۸٪ افزایش یافته است. این نتایج حاکی از عملکرد بهتر باکتری در کنار منبع کلسیم است.

۵- محیط عمل‌آوری از شرایط تاثیر گذار بر رسوب کلسیم کربنات است. با توجه به بهبود ویژگی‌های بتن بیولوژیکی عمل‌آوری شده در آب می‌توان دریافت، اگر چه وجود منبع کلسیم خارجی سبب افزایش فعالیت اوره‌آزی و رسوب بیشتر کلسیم کربنات شده است، اما فعالیت متابولیک باکتری حتی در نبود منبع کلسیم خارجی صورت گرفته است. به نظر می‌رسد باکتری می‌تواند از کلسیم اکسید آزاد موجود در ترکیبات سیمان نیز تغذیه کند و همین موضوع سبب ایجاد رسوب کلسیم کربنات در این نمونه‌ها شده است.

۶- مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن مرجع در هر دو محیط عمل‌آوری نشان می‌دهد، محیط حاوی کلسیم کلرید و اوره محیطی مخرب و دارای ترکیبات مضر برای بتن بدون حضور باکتری است. از آن‌جا که این محیط حاوی یون کلر است بهتر است تاثیر آن بر خوردگی آرماتورها درون بتن نیز بررسی شود و اثر سایر منابع کلسیم در بهبود عملکرد باکتری مورد ارزیابی قرار گیرد.

## منابع

- [1] M. Reisi, H. Emadi, Effect of Silica Fume (SF) and Air Entraining Agent (Aea) on Homogeneity, Compressive Strength and Cost of EPS Concrete, Concrete Research, 7(2) (2015) 109-120, (in Persian).
- [2] M. Haque, H. Al-Khaiat, O. Kayali, Strength and durability of lightweight concrete, Cement and Concrete Composites, 26(4) (2004) 307-314.
- [3] A.M. Neville, Properties of concrete, Longman London, 1995.
- [4] R. Madandoust, M. Kazemi, P.K. Talebi, J. de Brito, Effect of the curing type on the mechanical properties of lightweight concrete with polypropylene and steel fibres, Construction and Building Materials, 223 (2019) 1038-1052.
- [5] B.L.A. Tuan, C.-L. Hwang, K.-L. Lin, Y.-Y. Chen, M.-P. Young, Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete, Construction and building materials, 47 (2013) 334-339.
- [6] N.H. Balam, D. Mostofinejad, M. Eftekhar, Effects of

تحت تاثیر الگوی رسوب باکتری قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشخص است، خلل و فرج بتن توسط رسوب‌های کلسیم کربنات پر شده است، بنابراین بتن باکتریایی ساختار همگن و متراکم‌تری در مقایسه با بتن مرجع دارد. این تصاویر ثابت کرد که استفاده از باکتری در بتن منجر به رسوب کلسیم کربنات و در نتیجه بهبود ساختار درونی ماتریس بتن شده است. کاهش تخلخل در نمونه‌های بیولوژیکی توسط رسوب کلسیم کربنات اساسی‌ترین عامل در بهبود دوام و افزایش مقاومت فشاری در این مطالعه بوده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

۱- حداکثر افزایش مقاومت الکتریکی، در نمونه‌ی بیولوژیکی هوادار عمل‌آوری شده در آب به دست آمد. مقاومت الکتریکی این نمونه ۶۳/۹٪ در مقایسه با بتن مرجع افزایش یافته است. در نمونه‌ی بیولوژیکی حاوی هوازا که در محیط غنی از کلسیم عمل‌آوری شده است، افزایش میزان رسوب‌ها در سطح بتن با مسدود کردن منافذ سطح، مانع از نفوذ آب درون بتن شده است بنابراین بر هیدراتاسیون سیمان تاثیر منفی داشته است. از طرفی بیشتر بودن میزان رسوبات در این نمونه باعث شده حفره‌های هوای بیش‌تری پوشش داده شوند. بنابراین از تاثیر مثبت هوازا بر ویژگی‌های دوام و خواص مکانیکی بتن تا حدودی کاسته شده است.

۲- ۴۰/۷٪ کاهش نفوذ یون کلر در نمونه‌ی بیولوژیکی حاوی هوازا و عمل‌آوری شده در آب مشاهده شده است. در این نمونه با تامین فضا و اکسیژن کافی عملکرد باکتری بهبود یافته است. با داشتن اطلاعات صحیح در مورد الگوی رسوب بنابراین می‌توان از افزودنی هوازا به عنوان یک استراتژی کارآمد، جهت بهبود عملکرد باکتری استفاده کرد.

۳- حداکثر کاهش جذب آب مربوط به نمونه‌ی بیولوژیکی عمل‌آوری شده در کلسیم کلرید و اوره است. در این نمونه جذب آب در مقایسه با بتن مرجع ۶۲/۷٪ کاهش یافته است. تامین منبع تغذیه برای باکتری منجر به رسوب بیشتر کلسیم کربنات در ماتریس داخلی و سطح بتن شده است. در منطقه سطح بتن به دلیل یکسان بودن دسترسی به آب برای همه‌ی نمونه‌ها، رسوب باکتری فقط وابسته به غلظت باکتری است. از آن‌جا که ویژگی جذب آب مستقیماً به ناحیه سطح بتن وابسته است با پر شدن منافذ سطحی و داخلی کاهش جذب آب رخ داده است.

۴- حداکثر افزایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ی بیولوژیکی عمل‌آوری شده در محیط غنی از کلسیم است. مقاومت فشاری این نمونه

- of concrete made by micronized biomass silica and Bacteria-Bacillus sphaericus, *Construction and Building Materials*, 226 (2019) 827-838.
- [17] B. Tayebani, D. Mostofinejad, Penetrability, corrosion potential, and electrical resistivity of bacterial concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(3) (2019) 04019002.
- [18] M.S. Jafarnia, M.K. Saryazdi, S.M. Moshtaghioun, Use of bacteria for repairing cracks and improving properties of concrete containing limestone powder and natural zeolite, *Construction and Building Materials*, 242 (2020) 118059.
- [19] M.A. Akhlaghi, R. Bagherpour, H. Kalhori, Application of bacterial nanocellulose fibers as reinforcement in cement composites, *Construction and Building Materials*, 241 (2020) 118061.
- [20] B. Tayebani, N. Hosseinibalam, D. Mostofinejad, Influential Effect of Self-Healing Treatment on Water Absorption and Electrical Resistance of Normal and Light Weight Aggregate Concretes, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 13(4) (2019) 195-199.
- [21] W. De Muynck, K. Cox, N. De Belie, W. Verstraete, Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete, *Construction and Building Materials*, 22(5) (2008) 875-885.
- [22] 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.
- [23] N. Nain, R. Surabhi, N. Yathish, V. Krishnamurthy, T. Deepa, S. Tharannum, Enhancement in strength parameters of concrete by application of Bacillus bacteria, *Construction and Building Materials*, 202 (2019) 904-908.
- [24] N. Karimi, D. Mostofinejad, Bacillus subtilis bacteria used in fiber reinforced concrete and their effects on concrete penetrability, *Construction and Building Materials*, 230 (2020) 117051.
- [25] G. Pachideh, M. Gholhaki, H. Ketabdari, Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability bacterial remediation on compressive strength, water absorption, and chloride permeability of lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 145 (2017) 107-116.
- [7] F. Salmasi, D. Mostofinejad, 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 (2020) 119032.
- [8] G. Pachideh, V. Toufigh, Strength of SCLC recycle springs and fibers concrete subject to high temperatures, *Structural Concrete*, (2021).
- [9] G. Pachideh, M. Gholhaki, An experimental into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring, *Structural Concrete*, (2020).
- [10] S. Mindess, F. Young, D. Darwin, *Concrete 2nd Editio*, Technical Documents, (2003).
- [11] C.-M. Aldea, W.-J. Song, J.S. Popovics, S.P. Shah, Extent of healing of cracked normal strength concrete, *Journal of materials in civil engineering*, 12(1) (2000) 92-96.
- [12] J. Xu, X. Wang, Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material, *Construction and Building Materials*, 167 (2018) 1-14.
- [13] J. Feng, Y. Su, C. Qian, Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete, *Construction and Building Materials*, 228 (2019) 116810.
- [14] P. Dinarvand, A. Rashno, Review of the potential use of bacterial Precipitation in self-healing, improving durability and properties of concrete, *Sharif Journal of Civil Engineering*, (2022) (in persian).
- [15] K.K. Sahoo, A.K. Sathyan, P. Sarkar, R. Davis, Improvement of the mechanical properties of mortar and concrete using ureolytic bacteria, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 171(5) (2018) 179-186.
- [16] T.S. Priya, N. Ramesh, A. Agarwal, S. Bhusnur, K. Chaudhary, Strength and durability characteristics

- Biochar-immobilized bacteria and superabsorbent polymers enable self-healing of fiber-reinforced concrete after multiple damage cycles, *Cement and Concrete Composites*, 100 (2019) 35-52.
- [36] N. Shaheen, R.A. Khushnood, W. Khaliq, H. Murtaza, R. Iqbal, M.H. Khan, Synthesis and characterization of bio-immobilized nano/micro inert and reactive additives for feasibility investigation in self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, 226 (2019) 492-506.
- [37] J. Wang, A. Mignon, G. Trensou, S. Van Vlierberghe, N. Boon, N. De Belie, A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete, *Cement and Concrete Composites*, 93 (2018) 309-322.
- [38] W. Khaliq, M.B. Ehsan, Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques, *Construction and Building Materials*, 102 (2016) 349-357.
- [39] N. Parastegari, D. Mostofinejad, Influence of Bacteria on Performance of Air Entrained Concrete, *Amirkabir J. Civil Eng*, 50(6) (2019) 1103-1112 (in persian).
- [40] N. Parastegari, D. Mostofinejad, D. Poursina, Use of bacteria to improve electrical resistivity and chloride penetration of air-entrained concrete, *Construction and Building Materials*, 210 (2019) 588-595.
- [41] F. Zhou, F. Lydon, B. Barr, Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete, *Cement and concrete research*, 25(1) (1995) 177-186.
- [42] P.-C. Aitcin, P.K. Mehta, Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete, *Materials Journal*, 87(2) (1990) 103-107.
- [43] H. Donza, O. Cabrera, E. Irassar, High-strength concrete with different fine aggregate, *Cement and Concrete research*, 32(11) (2002) 1755-1761.
- [44] H. Binici, T. Shah, O. Aksogan, H. Kaplan, Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates, *Journal of materials processing technology*, 208(1-3) (2008) 299-308.
- and microstructure of the cementitious mortars, *Journal of Building Engineering*, 29 (2020) 101178.
- [26] G. Pachideh, M. Gholhaki, Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag, *Journal of Structural Fire Engineering*, (2020).
- [27] R. Siddique, K. Singh, M. Singh, V. Corinaldesi, A. Rajor, Properties of bacterial rice husk ash concrete, *Construction and Building materials*, 121 (2016) 112-119.
- [28] R. Siddique, A. Jameel, M. Singh, D. Barnat-Hunek, A. Ait-Mokhtar, R. Belarbi, A. Rajor, Effect of bacteria on strength, permeation characteristics and micro-structure of silica fume concrete, *Construction and Building Materials*, 142 (2017) 92-100.
- [29] N. Chahal, R. Siddique, Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: Influence of ureolytic bacteria, *Construction and Building Materials*, 49 (2013) 161-174.
- [30] R. Siddique, A. Rajor, Strength and microstructure analysis of bacterial treated cement kiln dust mortar, *Construction and Building Materials*, 63 (2014) 49-55.
- [31] R. Siddique, A. Rajor, Influence of bacterial treated cement kiln dust on the properties of concrete, *Construction and building materials*, 52 (2014) 42-51.
- [32] 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.
- [33] P. Ghosh, S. Mandal, B. Chattopadhyay, S. Pal, Use of microorganism to improve the strength of cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 35(10) (2005) 1980-1983.
- [34] J. 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.
- [35] H.W. Kua, S. Gupta, A.N. Aday, W.V. Sruhar III,



- engineering & technology, 4(2) (2012) 392.
- [55] A. C150/C150M-20, Standard Specification for Portland Cement, (2020).
- [56] M.R. Ahmad, B. Chen, S.F.A. Shah, Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 220 (2019) 253-266.
- [57] ASTM C1240-20, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org.
- [58] A. Hussin, C. Poole, Petrography evidence of the interfacial transition zone (ITZ) in the normal strength concrete containing granitic and limestone aggregates, *Construction and Building Materials*, 25(5) (2011) 2298-2303.
- [59] ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.
- [60] ASTM C1017 / C1017M-13e1, Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.
- [61] B. EN, 934-2 “Admixtures For Concrete, Mortar and Grout-Part 2: Concrete Admixtures; Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling”, British Standards Institution, (2009).
- [62] K. Van Tittelboom, W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete, Bacteria protect and heal concrete and stone, *WTA Schriftenreihe*, 33 (2009) 439-457.
- [63] J. Xu, W. Yao, Z. Jiang, Non-ureolytic bacterial carbonate precipitation as a surface treatment strategy on cementitious materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(5) (2014) 983-991.
- [64] V. Achal, X. Pan, Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by *Bacillus* sp. CR2, *Applied biochemistry and biotechnology*, 173(1) (2014) 307-317.
- [65] P. Dinarvand, A. Rashno, Review of the potential application of bacteria in self-healing and the improving
- [45] M. Naderi, r. valibeigi, s.m. mir safi, Investigating the Effect of kind of aggregate on strength and permeability of concrete, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(1) (2018) 109-126, (in Persian).
- [46] V. Achal, A. Mukherjee, M.S. Reddy, Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 38(9) (2011) 1229-1234.
- [47] S. Mondal, A.D. Ghosh, Investigation into the optimal bacterial concentration for compressive strength enhancement of microbial concrete, *Construction and Building Materials*, 183 (2018) 202-214.
- [48] H. Chen, C. Qian, H. Huang, Self-healing cementitious materials based on bacteria and nutrients immobilized respectively, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 297-303.
- [49] R.A. Khushnood, Z.A. Qureshi, N. Shaheen, S. Ali, Bio-mineralized self-healing recycled aggregate concrete for sustainable infrastructure, *Science of the Total Environment*, 703 (2020) 135007.
- [50] L. Jiang, G. Jia, C. Jiang, Z. Li, Sugar-coated expanded perlite as a bacterial carrier for crack-healing concrete applications, *Construction and Building Materials*, 232 (2020) 117222.
- [51] S. Mondal, P. Das, P. Datta, A.D. Ghosh, *Deinococcus radiodurans*: A novel bacterium for crack remediation of concrete with special applicability to low-temperature conditions, *Cement and Concrete Composites*, 108 (2020) 103523.
- [52] C. Liu, X. Xu, Z. Lv, L. Xing, Self-healing of Concrete Cracks by Immobilizing Microorganisms in Recycled Aggregate, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18(4) (2020) 168-178.
- [53] C. Meera, V. Subha, Strength and durability assessment of bacteria based self-healing concrete, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, (IOSR-JMCE), (2016) 1-7.
- [54] S.V. Reddy, A.K. Satya, S.M. Rao, M. Azmatunnisa, A biological approach to enhance strength and durability in concrete structures, *International journal of advances in*



- [70] C. Astm, Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete, West Conshohocken (PA): ASTM, (2012).
- [71] ASTM C1202-19, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [72] C.S. Jacob, V. Jose, Study on Mechanical Properties of Self Healing Self Curing Concrete, in: National Conference on Structural Engineering and Construction Management, Springer, 2019, pp. 935-943.
- [73] M.Gannadi, M.A.L. yaghin, R.Amiri, Effect of Air Entrain and Microsilis Additives on Light Weight Perlite Concrete, Quarterly Journal of Structural Engineering, 10(1) (2013) 61-68 (in persian).
- properties of concrete/mortar, Journal of Sustainable Cement-Based Materials, (2021) 1-34.
- [66] J.R. Prester, M. Boyle, D.A. Crocker, S.B. Chairman, E.A. Abdun-Nur, S.G. Barton, L.W. Bell, S.J. Blas Jr, G.R. Berg, P.M. Carrasquillo, Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98), (1998).
- [67] ASTM C330 / C330M, Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, (2017).
- [68] E. 12390-3, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens, in, CEN Brussels, 2009.
- [69] A. C642-13, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, West Conshohocken, PA: ASTM International, (2013).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*P. Dinarvand, A. R. Rashno, Investigation of engineering properties of biological lightweight concrete and evaluating the air-entrained protective effect on bacteria performance improvement, Amirkabir J. Civil Eng., 54(8) (2022) 3155-3178.*

DOI: [10.22060/ceej.2022.19671.7229](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19671.7229)

