



استفاده بهینه میکروسیلیس در کاهش خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی دریایی (مطالعه موردی اسکله P1 بندر امام خمینی)

عبدالرضا تنگ تکابی^۱، محمد حسن رامشت^{۲*}، علی گلصورت پهلویانی^۲، توحید پوررستم^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

کلمات کلیدی:

سازه‌های دریایی

خوردگی آرماتور

میکروسیلیس

بتن مسلح

عمر مفید

خلاصه: سازه‌های دریایی با توجه به موقعیت خاص جغرافیایی و سهم مهمی که در اقتصاد کشور دارند جزء سازه‌های زیربنایی به شمار می‌روند، که تعمیر و مرمت این سازه‌ها در برابر خوردگی به منظور افزایش دوام و عمر بهره‌برداری از موضوعات اساسی به حساب می‌آید. مهم‌ترین خسارت به سازه‌های بتنی دریایی در منطقه جزر و مد و در اثر خوردگی آرماتورها در بتن می‌باشد. این شرایط عمر مفید سازه‌های بتنی را کاهش می‌دهد. یکی از روش‌های موثر برای جلوگیری از خوردگی آرماتور و کاهش نفوذ یونهای کلر در سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی، بهبود کیفیت و خواص مکانیکی بتن با استفاده از میکروسیلیس می‌باشد، اگرچه تاکنون مطالعات گوناگونی در مورد این موضوع انجام گرفته است ولی این مقاله در نظر دارد، استفاده بهینه میکروسیلیس در کاهش خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی دریایی را بر روی خواص بتن سخت شده در ۱۸ ماه و طی زمان‌های مختلف بررسی نماید. در نمونه‌های آزمایشگاهی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ و ۰/۴۰ و فوق روان کننده محدوده ۰/۳ تا ۰/۶ و میکروسیلیس با درصدهای ۷، ۱۰ و ۱۳ ساخته شده و پس از قرارگیری در معرض شرایط تهاجمی، آزمایش سرعت خوردگی، اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصله مبین آن است که، اثر مخلوط بتن حاوی ۰/۱۰ میکروسیلیس با نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ دوام آرماتور در برابر خوردگی و عمر مفید سازه‌های دریایی را افزایش می‌دهد.

۱- مقدمه

تخریب سازه‌های بتنی دریایی در اثر خوردگی آرماتور، تحت تاثیر نفوذ یون‌های کلرید، از عوامل اصلی تخریب سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. شرایط حاکم بر سازه‌های دریایی، در حاشیه خلیج فارس چه از نظر املاح موجود در آب دریا و چه از نظر شرایط اقلیمی حاکم بر آن، این محیط را به یکی از مهاجم‌ترین محیط‌های دریایی از دیدگاه خوردگی مبدل ساخته است. خرابی‌های زودرس سازه‌های بتنی منطقه خلیج فارس در اثر خوردگی آرماتور، تاکنون هزینه‌های تعمیراتی زیادی را به کشورهای منطقه تحمیل نموده است، که یک مشکل جدی و مهم از نظر اقتصادی به شمار می‌رود. به همین علت استقبال روز افزون برای شناخت علل خوردگی آرماتور مدفون در بتن، راه‌های پیشگیری از آن، عوامل ایجاد کننده مقاومت زیاد و دوام بتن نشانه اهمیت موضوع است.

سازه‌های بتن آرمه در دریا در معرض آسیب دیدگی شیمیایی و الکتروشیمیایی قرار دارند، مهم‌ترین عوامل خوردگی، در اثر دو پدیده

کربناسیون هوا و نفوذ کلرید می‌باشد. در اثر خوردگی آرماتور و ترک خوردگی بتن، عمر مفید سازه‌های بتنی دریایی را در حد قابل توجه‌ای کاهش می‌یابد، این نوع آسیب دیدگی در منطقه جزر و مد بیشتر مشاهده می‌شود، زیرا در منطقه جزر و مد به دلیل تر و خشک شدن، نفوذ کلرید به داخل بتن تشدید می‌گردد و در نتیجه شدت خوردگی افزایش می‌یابد [۱ و ۲].

محیط بتن تازه به دلیل وجود مقادیر بسیار زیادی از هیدروکسید کلسیم و مقادیر به نسبت کمتری از عناصر قلیایی مانند سدیم و پتاسیم محیطی بسیار قلیایی با pH بین ۱۲ تا ۱۳ می‌باشد. وجود این محیط قلیایی باعث ایجاد یک لایه نازک بر روی سطح میلگرد میگردد. این لایه در محیط به شدت قلیایی بتن تازه پایدار بوده و میلگرد را در برابر خوردگی محافظت می‌کند [۳]. مادامی که pH محیط بیشتر از ۱۰ باشد، میلگرد به لحاظ شیمیایی کماکان غیرفعال مانده و در معرض خوردگی قرار نمی‌گیرد. مشکل اساسی زمانی آغاز می‌شود که pH محیط کاهش یافته، قلیایی بودن بتن از دست برود. کاهش pH محیط می‌تواند به دلایل متفاوتی صورت پذیرد که مهم‌ترین دلیل تحقق این امر مربوط به نفوذ دی اکسید کربن (CO_2)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Mhramesht@yahoo.com



موجود در اتمسفر و یون‌های کلرید موجود در محیط‌های دریایی به داخل بتن است که باعث انجام واکنش شیمیایی و کاهش pH بتن می‌گردد. در اغلب موارد این مواد از ترک‌های موجود در سطح بتن وارد ساختار سازه می‌شوند و خود را به آرماتور می‌رسانند، در محیط‌هایی که امکان ورود چنین موادی وجود دارد و بتن نفوذپذیر باشد، غلظت این مواد افزایش پیدا کرده و نهایتاً به آستانه‌ای می‌رسد که لایه محافظ تخریب می‌شود و در نتیجه فولاد شروع به خورده شدن می‌کند. خوردگی باعث کاهش سطح مقطع میلگرد شده و می‌تواند ناپوستگی‌های مقطعی ایجاد نماید و بالطبع مقاومت کششی و مقاومت در برابر تنش‌های خستگی را کاهش دهد [۴].

هنگامی که خوردگی سازه‌های بتنی مسلح صورت می‌گیرد، تبدیل آهن فلزی به اکسید با افزایش حجم همراه است که بسته به حالت اکسیداسیون می‌تواند تا ۶۰٪ از حجم آهن اصلی نیز برسد. تنش‌های ناشی از نیروهای مولکولی حاصل از این اضافه حجم منجر به ترک خوردگی و نهایتاً تخریب کامل سازه بتنی می‌گردد [۵]. ترک‌های ایجاد شده راه را برای نفوذ آب، اکسیژن و کلریدها بیشتر باز می‌نماید و این باعث تسریع در امر خوردگی خواهد شد. لذا زنگ زدگی بیشتری تشکیل شده و تنش‌های بیشتری به وجود می‌آید. تنش‌های بیشتر باعث ایجاد ترک‌های بیشتر شده، تا جایی که فاجعه تخریب بتن به طور کامل اتفاق بیفتد [۶].

گنجیان و همکاران عملکرد خمیر سیمان با افزودن میکروسیلیس (۷٪ و ۱۰٪ به عنوان جایگزینی سیمان) با سیمان پرتلند معمولی نوع ۲ در شرایط مرطوب و خشک شدن را مورد بررسی قرار داده‌اند، نتایج مبین عملکرد بسیار خوب و مقاومت بالاتر بتن حاوی میکروسیلیس در برابر بتن بدون میکروسیلیس است. علاوه بر این نتایج نشان داده، هر چه مقدار میکروسیلیس مورد استفاده در مخلوط‌ها بیشتر باشد، جذب آب مویرگی در معرض قرار گرفتن منطقه جزر و مد بیشتر می‌شود [۷].

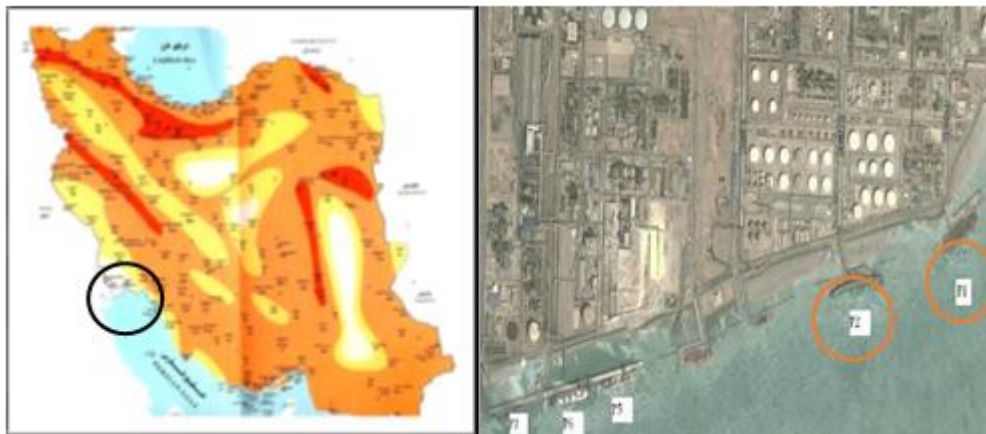
باقری و همکاران با انجام آزمایش‌هایی دریافتند که جایگزینی ۱۲ درصد میکروسیلیس با سیمان می‌تواند مقاومت الکتریکی بتن را تا ۵ برابر افزایش دهد [۸]. موافقت و همکاران با انجام آزمایش‌هایی دریافتند، عملکرد دوام طولانی مدت بتن حاوی خاکستر بادی و میکروسیلیس در معرض یک محیط دریایی می‌تواند عمق نفوذ کلرید را از ۹۰ میلی‌متر (۳/۵ اینچ) به ۴۰ میلی‌متر (۱/۶ اینچ) در برابر همه نمونه‌های شاهد (بدون خاکستر بادی و میکروسیلیس) در مدت و شرایط مشابه کاهش دهد. همچنین نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری حاکی از افزایش قابل توجه مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید برای بتن حاوی خاکستر بادی و میکروسیلیس می‌باشد [۹].

صدیق با انجام آزمایش‌هایی دریافت، استفاده از میکروسیلیس در بتن، ناحیه بین سطحی ضعیف را با تقویت پیوند خمیر سیمان و سنگدانه و تشکیل یک ساختار با تخلخل کمتر و همگن‌تر در منطقه بین سطحی از بین می‌برد. و باعث کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود [۱۰]. مستوفی نژاد و همکاران با مطالعه بر روی بتن حاوی سرباره و میکروسیلیس مقادیر بهینه هر یک از سرباره و میکروسیلیس جایگزین در بتن برای حصول بهترین پایایی در مقابل خوردگی فولاد را تعیین کردند. نتایج نشان داد که برای میکروسیلیس و سرباره جایگزین سیمان در بتن مقدار بهینه‌ای جهت حصول بیشترین مقاومت بتن در مقابل خوردگی فولاد وجود دارد [۱۱]. اسکندری و همکاران در پژوهشی به این نتایج رسیدند که، استفاده از بتن حاوی ۰.۶٪ نانو و ۹.۴٪ میکروسیلیس باعث افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی و کاهش نرخ خوردگی می‌شود [۱۲]. معتضدیان و فاطمی در پژوهشی به بررسی اثر ژل میکروسیلیس بر روی خوردگی میلگرد درون بتن پرداختند و نتایج نشان داد، که استفاده از مقدار بهینه ژل میکروسیلیس ۱۱ درصد وزن سیمان مصرفی می‌باشد و این مقدار میکروسیلیس مصرفی به میزان ۴۱ درصد خوردگی میلگرد را کاهش می‌دهد [۱۳]. هوانگ^۱ و همکاران با مطالعه بر روی مقاومت بتن در محیط‌های شیمیایی خورنده به این نتایج رسیدند که افزودن همزمان میکروسیلیس و نانوسیلیس به بتن به عنوان جایگزینی سیمان، نفوذپذیری بتن را در برابر عوامل شیمیایی کاهش می‌دهد، و باعث بهبود ریز ساختار بتن می‌شود [۱۴]. سیلا پوردی^۲ و همکاران با مطالعه در مورد اثر ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس و متاکائولین جایگزین سیمان، در بتن SCC منجر به ۲۴/۵٪ افزایش مقاومت در ۷ روز و ۳۸/۹٪ افزایش مقاومت در ۲۸ روز شد [۱۵]. قانعی و همکاران با مطالعه و بررسی اثر ترکیبی افزودنی حباب هوا (AEA) و میکروسیلیس (MS) برای بهبود رفتار خوردگی بتن مسلح به این نتایج رسیدند که ۰.۷٪ حباب هوا و ۱۰٪ میکروسیلیس به عنوان جایگزینی سیمان ترکیبی مطلوب را فراهم می‌آورد، که باعث افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید و کاهش نرخ خوردگی می‌شود [۱۶]. لی^۳ و همکاران با تحقیقاتی نشان دادند، که مقادیر مطلوب ۱۰٪ میکروسیلیس و ۲٪ نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ آب، و همچنین سولفات، کربناسیون، و یون‌های کلرید در بتن می‌شود و بتن را در برابر خوردگی محافظت می‌کند و مقاومت آن را افزایش می‌دهد

1 .Huang

2 .Seelapureddy

3 .Li



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای از اسکله P1 بندر امام خمینی

Fig. 1. Satellite image of the p1 pier of Imam Khomeini port

صادرات محصولات پتروشیمی در بندر امام خمینی هستند که سالانه با پذیرش حدود ۱۶۰ کشتی، بیش از ۲/۵ میلیون تن صادرات و واردات انواع فراورده‌های گازی و شیمیایی را به خود اختصاص داده که نقش بسیار مهمی را در استمرار تولید مجتمع‌های پتروشیمی دارا می‌باشند. این اسکله توسط کمپانی ژاپنی توآ TOA در سال ۱۹۷۵، طراحی و اجرا شده است.

۳- علل خرابی و کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی در شرایط محیطی مهاجم

سواحل و جزایر خلیج فارس از نظر اقلیمی و آب و هوایی دارای وضعیت ویژه‌ای در جهان بوده و بسیاری از شرایط نامساعد را برای تخریب و انهدام سازه‌های بتن مسلح دارا می‌باشند و می‌توان گفت که مخرب‌ترین و نامساعدترین شرایط برای سازه‌های بتن مسلح در جهان است. دمای بالا به دلیل نزدیکی به خط استوا، تغییرات زیاد دما در طول شبانه روز و نیز در طول سال، زیاد بودن املاح موجود در آب خلیج فارس نسبت به آب‌های آزاد به دلیل جدایی نسبی از آب‌های آزاد، برخی از دلایل این امر می‌باشد. علاوه بر آب، هوای شرجی و گرم و مرطوب منطقه نیز به همراه یون‌های فعال کلرید را جابه‌جا می‌کنند [۲۱]. این یون‌ها هم خودشان مخربند و هم به عنوان کاتالیزوری برای سایر خوردگی‌ها محسوب می‌شوند. از طرف دیگر، املاح نه تنها در آب بلکه در خاک نیز بسیار زیاد بوده و موجب خسارت می‌شوند. نکته دیگر آن که، تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که بیش از ۹۰٪ خرابی‌های سازه‌های حاشیه خلیج فارس و دریای عمان ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن می‌باشد [۲۳ و ۲۲]. بررسی جامع توسط

[۱۷]. تحقیقات اخیر وانگ^۱ و همکاران نیز نشان داده است که با استفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس همراه با خاکستر بادی باعث نتایج بهتر در مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن در برابر عوامل شیمیایی می‌شود [۱۸]. تحقیقات کرامالله خان^۲ و همکاران نشان داد، با جایگزین کردن ۱۰٪ وزن سیمان میکروسیلیس و ۱۰٪ باگاس SBA (ضایعات محصول جانبی صنایع نیشکر) باعث افزایش مقاومت بتن در برابر حملات سولفات و کلرید می‌شود [۱۹]. دوتو^۳ و همکاران افزودن دود سیلیس (SF) برای بهبود عملکرد مقاومت در برابر خوردگی آرماتور در بتن را پیشنهاد دادند. در این تحقیق نتایج مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی نشان داد با افزودن (۶٪ و ۱۲٪) دود سیلیس (SF) به بتن با نسبت آب به سیمان مختلف بهبود قابل توجهی در نفوذپذیری بتن در محیط‌های تهاجمی به وجود آمد [۲۰].

۲- معرفی محل پروژه

محل پروژه اسکله P1 بندر امام خمینی در جنوب غربی استان خوزستان و در منتهی علیه شمال خاوری خور موسی در مناطق ساحلی خلیج فارس می‌باشد (شکل ۱). در مناطق ساحلی خلیج فارس آلودگی آب، خاک و حتی جو منطقه به عناصر شیمیایی مضر برای بتن، رطوبت بالا، دمای بالا در حدی است که به روند تخریب سازه‌ها کمک می‌کند و سرعت آسیب دیدگی را افزایش می‌دهد. اسکله‌های P1 و P2 از اسکله‌های مهم و استراتژیک

- 1 .Wang
- 2 .Kramullah Khan
- 3 .Dotto



شکل ۲. نمایی از تخریب اسکله PI بندر امام و خوردگی آرماتور در بتن

Fig. 2. View of the destruction of Bandar Emam P1 pier and corrosion of reinforcement in concrete

استحکام کششی آن را عمدتاً از نظر شکل‌پذیری کاهش می‌دهد [۲۶]. دوم، محصولات خوردگی مستقر در سطح آرماتور باعث ایجاد تنش در بتن می‌شوند، از این مکانیسم که به بتن تغییر شکل پلاستیکی محدود متصل شده، ترک‌های بتنی ظاهر می‌شوند، نفوذ عوامل تهاجمی از محیط و به تبع آن روند تخریب ساختار بتن افزایش می‌یابد (شکل ۲). سوم، عدم یکپارچه شدن در سیستم بتن و آرماتور است. به این معنا، از دست رفتن آرماتور در بتن، انتقال بارها بین عناصر سازه‌ای را مختل می‌کند [۲۷].

۴- مواد و روش‌ها

۴-۱- انتخاب نوع سیمان

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲، کارخانه سیمان تهران و با عیار ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب استفاده شده است. که مشخصات شیمیایی سیمان در جدول ۱ آمده است.

۴-۲- سنگدانه

در این تحقیق سنگدانه مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM-C33 انجام شده است، که در شکل مطابق با دانه‌بندی جدول ۵ و شکل ۳ تا ۵ نشان داده شده است [۲۸].

سنگدانه مورد استفاده در ساخت این نمونه‌ها مطابق با دانه‌بندی جدول ۵ و شکل ۳ تا ۵، که با آیین نامه ASTM مربوط به دانه‌بندی مصالح مصرفی در بتن مطابقت دارد، نشان داده شده است.

ماسه تهیه شده از نوع رودخانه‌ای با وزن مخصوص ۲۵۶۰ کیلوگرم بر

مهتا و همکاران، از حالت‌های تجزیه خمیر هیدراته سیمان پرتلند مبین آن است که، سطح بتن، خط مقدم دفاع در مقابل آب دریا می‌باشد. یعنی با یک بتن با کیفیت زیاد یا یک بتن با لایه سطحی نفوذ ناپذیر، حملات شیمیایی آب دریا، ضرورتاً به سطح بتن محدود می‌شود و از نفوذ یون کلرید در بتن و خوردگی فولاد پیشگیری می‌کند [۲۴].

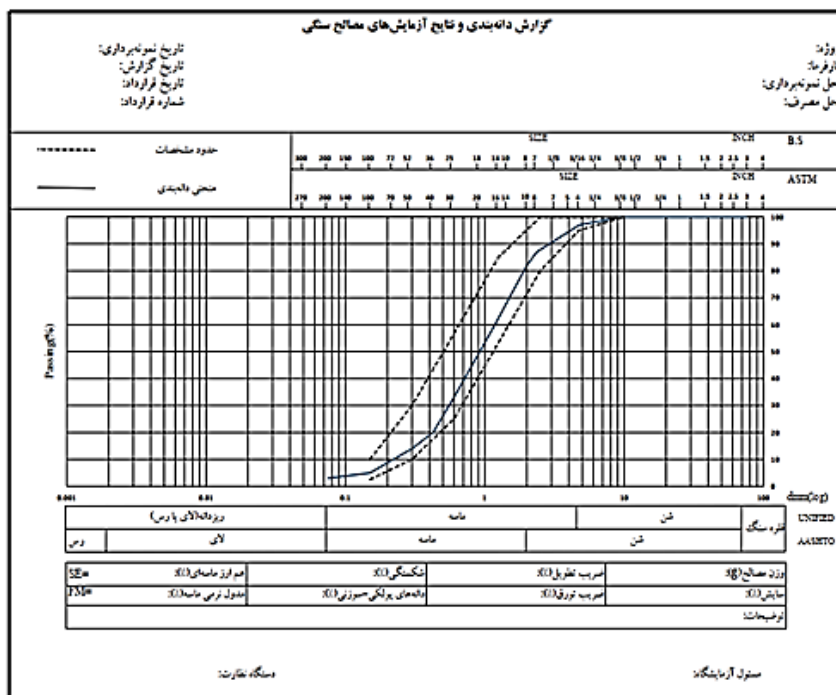
۳-۱- خوردگی فولاد در بتن

خوردگی فولاد در بتن یک روند الکتروشیمیایی است که در آن پیل‌های خوردگی عموماً به علت اختلاف بین غلظت یون‌ها و گازهای موجود در مجاورت فلز تشکیل می‌گردد، در سازه‌های بتنی مسلح، محلول قلیایی موجود در منافذ بتنی، محیط مناسب برای محافظت از آرماتور مدفون در بتن را فراهم می‌کند. در برابر خوردگی این محیط قلیایی (pH حدود ۱۳-۱۲) تشکیل یک فیلم غیرفعال متشکل از اکسیدهای آهن که آن‌ها را می‌پوشاند و محافظت می‌کند. با این وجود، بتن یک ماده متخلخل غیراشباع متوسط و خارجی مانند دی‌اکسید کربن در مناطق شهری و کلریدها در محیط دریایی، اگرچه در شبکه متخلخل بتن نفوذ کرده و با رسیدن به آرماتورها، شرایط را برای شروع خوردگی ایجاد می‌کنند [۲۵]. هنگامی که این عوامل قادر به از بین بردن این فیلم منفعل باشند، به محض شروع خوردگی و پیشرفت آن، محصولات خوردگی تشکیل می‌شوند و در اطراف مناطق کاتدی در سطح آرماتورها جمع می‌شوند. از این فرآیند، تنش شعاعی در اطراف آرماتورها ایجاد می‌شود که منجر به سه اثر اصلی می‌شود. اول، مقطع تقویت کننده به تدریج کاهش می‌یابد و بر خواص مکانیکی آرماتورها تأثیر می‌گذارد و

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

Table 1. Chemical properties of cement

Na ₂ O	C ₂ S	C ₃ S	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیب شیمیایی
-	۲۴/۷۶	۵۰/۶۸	۲/۳۳	۶۴/۵۶	۳/۵۵	۱/۶۵	۴/۶۲	۲۱/۹۷	درصد



شکل ۳. دانه بندی شن شکسته (۱۲-۲۵) میلی متر سنگ شکن امید شوستر

Fig. 3. Broken sand granulation (12-25) mm Shredder Omid Crusher

داشت. در این تحقیق ماد فوق روان کننده ملکریت ت.ب (MEICRET TB 101F) استفاده شده است این فوق روان کننده دیرگیر است و پایه ترکیبی آن نفتالین و ملامین و مقاوم در برابر خوردگی می باشد که برای سازه های دریایی و محیط های خورنده مناسب است.

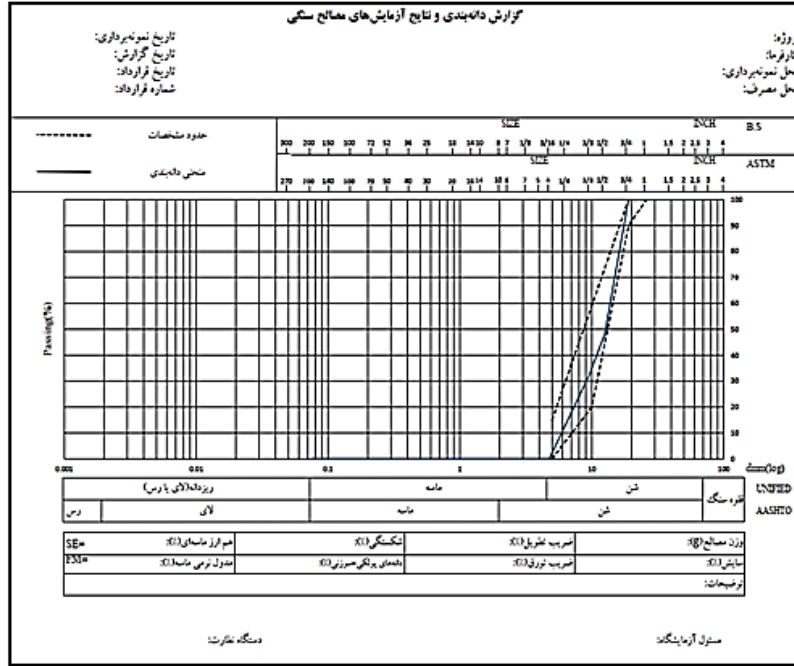
متر مکعب و شن تهیه شده از نوع شکسته با وزن مخصوص ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. سنگدانه مصرفی تهیه شده از معادن شن و ماسه سنگ شکن امید در حوالی شهرستان شوستر به فاصله حدود ۱۹۵ کیلومتری شهرستان ماهشهر تهیه شده است.

۴-۴- انتخاب میکروسیلیس

میکروسیلیس جهت افزایش دوام، مقاومت و تراکم مورد استفاده قرار می گیرد و نفوذپذیری را به شدت کاهش می دهد و در نتیجه باعث جلوگیری از خوردگی آرماتور در بتن مسلح در مقابل عوامل خورنده می شود [۲۹]. میکروسیلیس استفاده شده در این تحقیق، میکروسیلیس شرکت فروسیلیس

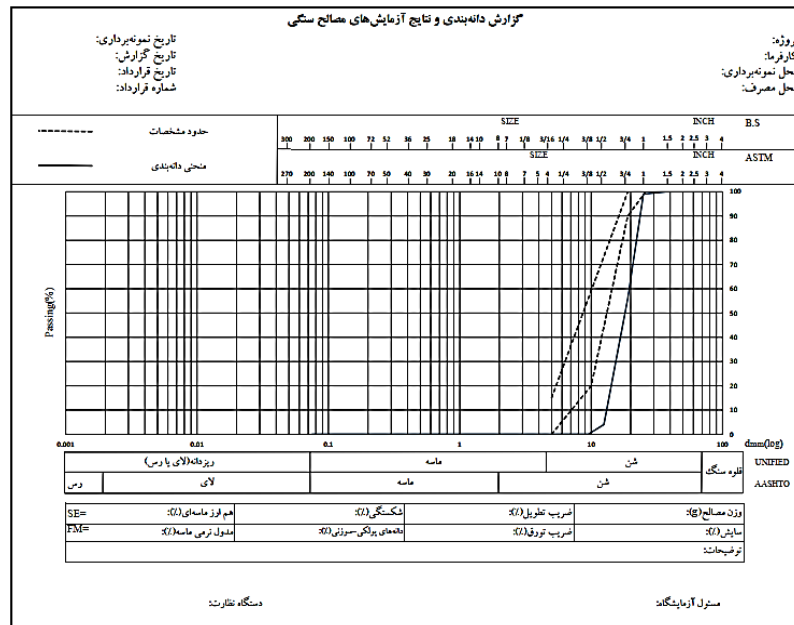
۴-۳- ماده ی افزودنی فوق روان کننده

از آنجا که مصرف میکروسیلیس در بتن آب مصرفی را بالا می برد، به جهت ایجاد روانی بالا در مخلوط بتن و عدم استفاده از آب بیشتر که این خود بر مسائل تخلخل و مقاومت اثر خواهد داشت، از فوق روان کننده استفاده شد. این کاهش در مقدار آب، افزایش مقاومت و دوام بتن را در پی خواهد



شکل ۴. دانه‌بندی شن شکسته (۵-۱۹) میلی‌متر سنگ شکن امید شوستر

Fig. 4. Crushed sand granulation (5-19) mm Shushtar Omid Crusher



شکل ۵. دانه‌بندی ماسه شسته طبیعی سنگ شکن امید شوستر

Fig. 5. Natural washed sand granulation of Shushtar Omid Crusher



شکل ۶. مصالح سنگی (شن ۵-۲۵ میلی‌متر) و (ماسه ۰-۵) شسته دو بار شور مورد استفاده - شهرستان شوشتر - ایران
 Fig. 6. Aggregate (5-25 mm sand) and (0-5 sand) washed twice salt used - Shushtar city - Iran

جدول ۲. خصوصیات فوق روان کننده ملکریت ت.ب 101F

Table 2. Properties superplasticizer TB 101F

شرح	خصوصیات
پودر قهوه‌ای	ظاهر
۵۵۰۷ gr/lit	وزن حجمی
تقریباً بین ۸-۱۱	PH محلول ۲۰٪

جدول ۳. خصوصیات شیمیایی میکروسیلیس مصرفی

Table 3. Chemical properties of consumable microsilica

Na ₂ O	LOI	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیب شیمیایی
۰/۵۵۶	۲/۶۰	۱/۶۱	۱/۸۷	۲/۱۲	۱/۰۵۶	۱/۲۰	۸۹/۲۲	درصد

۵- تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

۵-۱- ساخت نمونه‌ها

هدف از این تحقیق استفاده از میکروسیلیس در کاهش خوردگی آرمانتور، افزایش مقاومت فشاری و بهبود خواص مکانیکی بتن در اسکله‌های دریایی می‌باشد، برای نیل به هدف فوق، با در نظر گرفتن سه مقدار میکروسیلیس ۰، ۱۰، ۱۳ و ۴۰ درصد و عیار سیمان ۴۰۰ و انتخاب دو نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ و ۰/۴۰ و رسیدن به اسلامپ قابل قبول در طرح‌های مختلف از فوق

سمنان که چگالی ذرات آن 2200 kg/m^3 می‌باشد. نتایج تجزیه شیمیایی انجام یافته روی این میکروسیلیس در جدول ۳ نشان داده شده است.

۴-۵- آب

آب مصرفی در ساخت و عمل آوری بتن‌ها از آب شرب شهرستان ماهشهر می‌باشد که با توجه به مصرف آشامیدنی آن برای ساخت بتن مناسب می‌باشد، که نتایج آزمایش آب در جدول ۴ آمده است.



شکل ۷. میکروسیلیس مورد استفاده

Fig. 7. Microsilica used

جدول ۴. نتایج آزمایش آب ماهشهر

Table 4. Mahshahr water test results

ترکیب شیمیایی	پتاسیم (K)	سدیم (Na)	کربنات‌ها (CO ₃)	بی کربنات‌ها (HCO ₃)	سولفات (SO ₃)	کلرور (CL)	pH	مواد معلق
غلظت بر حسب میلی گرم در لیتر	۱/۶	۱۵۶/۶	۴	۱۲۰	۲۴۰	۲۶۲	۸	ناچیز

ASTM C39 در سن ۲۸ روز اندازه‌گیری شد. در جدول ۶ آمده است.

۵-۳- سرعت خوردگی

سرعت خوردگی را می‌توان با توجه به میزان کاهش وزن و تغییر ضخامت سطح، وقتی که جسم در محیط خورنده قرار گرفته باشد بیان کرد. به دلیل اهمیت کاهش ضخامت فلز در اثر خوردگی، میزان سرعت خوردگی بر حسب معیار هزارم اینچ در سال (mpy) بیان می‌شود، یعنی در طول یک سال چه میزان از ضخامت جسم کاسته شده است.

با توجه به اینکه میزان خورده شدن یک جسم در محیط خورنده به مدت زمان تماس آن با محیط خورنده بستگی دارد، بنابراین خوردگی را با سرعت خوردگی که در آن تأثیر زمان نیز لحاظ شده است، بیان می‌کنند. میزان خورده شدن یک جسم در یک محیط به سطح تماس آن بستگی دارد.

1 mil per year

روان کننده در محدوده ۰.۳٪ تا ۰.۶٪ به طور جداگانه استفاده شد، در ادامه با این فرضیات، تعداد مخلوط‌های بتن مورد بررسی به این صورت (M^*S^*W) نام‌گذاری شده است:

حرف اول از سمت چپ (M) نمایانگر میکروسیلیس (S) نمایانگر فوق روان کننده (W) نمایانگر نسبت آب به سیمن است. رقم بعد از هر حرف نیز به نحوی نمایانگر مقدار مربوط به آن مخلوط است.

۵-۲- آزمایش‌های انجام شده

۵-۲-۱- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها

جهت بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ ساخته شد، تمام نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و به مدت ۷۲ ساعت در حوضچه آب معمولی در دمای طبیعی (۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند (شکل ۸). مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد

جدول ۵. تعیین درصد نسبت‌های اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی بتن

Table 5. Determining the percentage of mixing ratios of concrete laboratory samples

درصد فوق روان کننده	پودر میکروسیلیس (kg/m ³)	درصد میکروسیلیس	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان ٪	سیمان (kg/m ³)	کد نمونه
۳٪	۰	۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۶۰	۴۰٪	۴۰۰	M0S3w40:1
۴٪	۰	۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۶۰	۴۰٪	۴۰۰	M0S4w40:2
۵٪	۰	۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۳۶	۳۴٪	۴۰۰	M0S5w34:3
۶٪	۰	۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۳۶	۳۴٪	۴۰۰	M0S6w34:4
۰/۳	۲۸	۷	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۶۰	۴۰٪	۳۷۲	M7S3w40:5
۰/۴	۲۸	۷	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۶۰	۴۰٪	۳۷۲	M7S4w40:6
۰/۵	۲۸	۷	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۳۶	۳۴٪	۳۷۲	M7S5w34:7
۰/۶	۲۸	۷	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۳۶	۳۴٪	۳۷۲	M7S6w34:8
۰/۳	۴۰	۱۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۶۰	۴۰٪	۳۶۰	M10S3w40:9
۰/۴	۴۰	۱۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۶۰	۴۰٪	۳۶۰	M10S4w40:10
۰/۵	۴۰	۱۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۳۶	۳۴٪	۳۶۰	M10S5w34:11
۰/۶	۴۰	۱۰	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۳۶	۳۴٪	۳۶۰	M10S6w34:12
۰/۳	۵۲	۱۳	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۶۰	۴۰٪	۳۴۸	M13S3w40:13
۰/۴	۵۲	۱۳	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۶۰	۴۰٪	۳۴۸	M13S4w40:14
۰/۵	۵۲	۱۳	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۳۶	۳۴٪	۳۴۸	M13S5w34:15
۰/۶	۵۲	۱۳	۷۴۴	۱۱۱۶	۱۳۶	۳۴٪	۳۴۸	M13S6w34:16



شکل ۸. حوضچه‌های آب عمل‌آوری نمونه‌های مکعبی

Fig. 8. Water basins processing cubic samples curing

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ۲۸ روز بر روی نمونه‌های بتنی

Table 6. Results of 28-days compressive strength tests on concrete specimens

مقاومت فشاری kg/cm ²	حداکثر نیروی وارده kg	وزن مخصوص بتن gr/cm ³	وزن نمونه gr	حجم cm ³	سطح بارگذاری cm ²	ارتفاع cm	عرض cm	طول cm	کد نمونه
۴۲۴	۱۲۵۳۰۰	۲/۴۷	۸۴۰۰	۳۳۹۸	۲۲۷	۱۵	۱۵	۱۵/۱	M0S3w40:1
۴۴۶	۱۲۴۵۰۰	۲/۳۹	۸۲۴۰	۳۴۴۳	۲۳۰	۱۵	۱۵/۱	۱۵/۲	M0S4w40:2
۴۶۳	۱۱۸۴۰۰	۲/۴۷	۸۴۰۰	۳۳۹۸	۲۲۷	۱۵	۱۵	۱۵/۱	M0S5w34:3
۴۸۰	۱۱۵۵۰۰	۲/۴۲	۸۴۳۰	۳۴۸۹	۲۳۱	۱۵/۱	۱۵/۱	۱۵/۳	M0S6w34:4
۵۰۳	۱۴۶۶۰۰	۲/۴۴	۸۳۵۰	۳۴۲۰	۲۲۸	۱۵	۱۵/۱	۱۵/۱	M7S3w40:5
۵۴۹	۱۵۶۹۰۰	۲/۴۷	۸۳۸۰	۳۳۹۸	۲۲۷	۱۵	۱۵	۱۵/۱	M7S4w40:6
۵۸۰	۱۳۸۲۰۰	۲/۳۶	۸۳۰۰	۳۵۳۴	۲۳۱	۱۵/۳	۱۵/۲	۱۵/۲	M7S5w34:7
۵۹۵	۱۲۵۱۰۰	۲/۴	۸۲۷۰	۳۴۴۳	۲۲۸	۱۵/۱	۱۵/۱	۱۵/۱	M7S6w34:8
۵۷۷	۱۳۱۶۰۰	۲/۳۹	۸۲۴۰	۳۴۴۳	۲۲۸	۱۵/۱	۱۵/۱	۱۵/۱	M10S3w40:9
۶۰۱	۱۳۶۳۰۰	۲/۴۱	۸۱۸۰	۳۳۹۸	۲۲۷	۱۵	۱۵	۱۵/۱	M10S4w40:10
۶۱۵	۱۵۰۴۰۰	۲/۴۲	۸۳۹۰	۳۴۶۶	۲۳۰	۱۵/۱	۱۵/۱	۱۵/۲	M10S5w34:11
۶۳۸	۱۶۷۶۰۰	۲/۴۱	۸۱۹۰	۳۳۹۸	۲۲۷	۱۵	۱۵	۱۵/۱	M10S6w34:12
۵۸۶	۱۴۵۰۰۰	۲/۴۲	۸۲۶۰	۳۴۲۰	۲۲۸	۱۵	۱۵/۱	۱۵/۱	M13S3w40:13
۶۰۹	۱۵۸۲۰۰	۲/۴۴	۸۲۸۰	۳۳۸۹	۲۲۷	۱۵	۱۵	۱۵/۱	M13S4w40:14
۶۱۶	۱۴۴۷۰۰	۲/۴۲	۸۴۳۰	۳۴۸۹	۲۳۱	۱۵/۱	۱۵/۱	۱۵/۳	M13S5w34:15
۶۲۷	۱۴۲۸۰۰	۲/۴۵	۸۳۳۰	۳۳۹۸	۲۲۷	۱۵	۱۵	۱۵/۱	M13S6w34:16

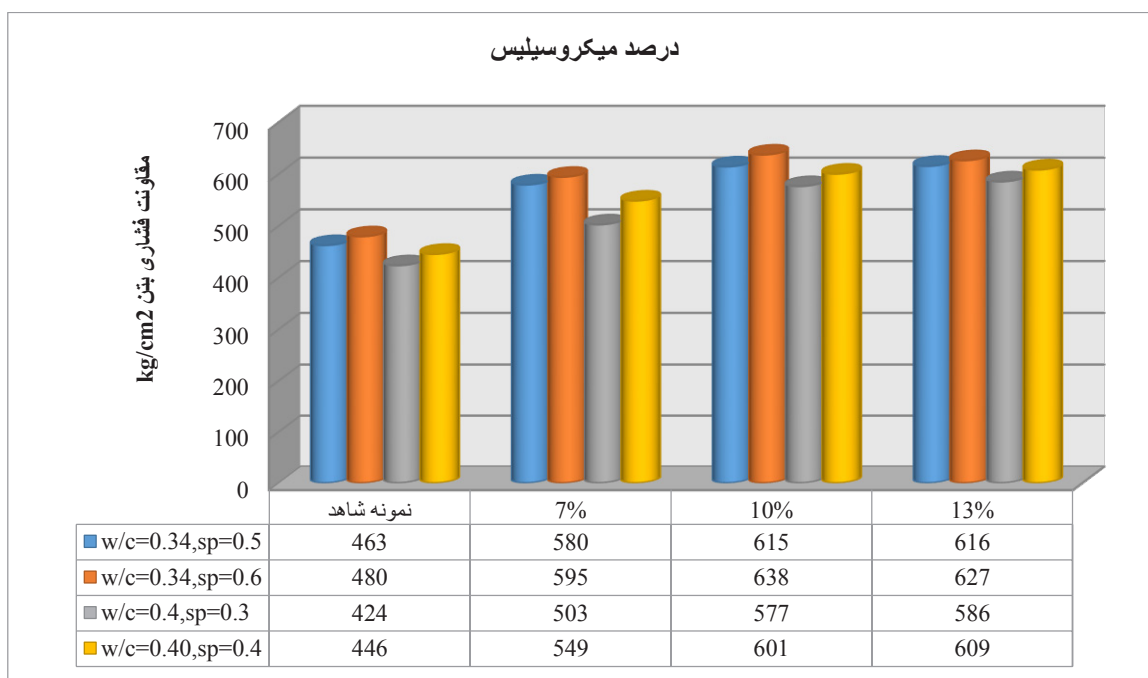
۶- بحث

برای آزمایش مقاومت فشاری بتن، نمونه‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ آماده شد و نتایج آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۶ و شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، برای هر سه نمونه بتن حاوی میکروسیلیس ۷ و ۱۰ و ۱۳ درصد، مقاوت فشاری ۲۸ روز بیشتر از نمونه شاهد بود. در ضمن بالاترین مقاومت فشاری مربوط به میکروسیلیس ۱۰ درصد و نسبت آب به سیمان ۳۴ درصد فوق روان کننده ۶ درصد می‌باشد، که نسبت به نمونه شاهد حدود ۳۲ درصد افزایش داشته است. با توجه به اینکه هدف در این تحقیق استفاده بهینه میکروسیلیس در کاهش خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی دریایی می‌باشد، نمونه‌های بتنی به مدت ۱۸ ماه در آزمایشگاه و شرایط محیط خلیج فارس قرار داشتند که آزمایش‌های خوردگی

کی از روش‌های ساده برای تخمین سرعت خوردگی، فلز استفاده از آزمون غوطه‌وری است. در این آزمون فلز به طور کامل در محیط خورنده قرار داده می‌شود، سپس از روی تغییرات وزن فلز، سرعت خورده شدن از رابطه (۱) تعیین می‌گردد [۳۰].

$$mpy = \frac{534W}{DAT} \quad (1)$$

که در آن W ، اختلاف وزن اولیه و ثانویه بر حسب میلی‌گرم، D چگالی نمونه بر یکای گرم بر سانتی‌متر مکعب، A مساحت نمونه بر حسب اینچ مربع و T زمان تماس فلز با محیط آزمایش است.



شکل ۹. اثر میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری ۲۸ روز بتن

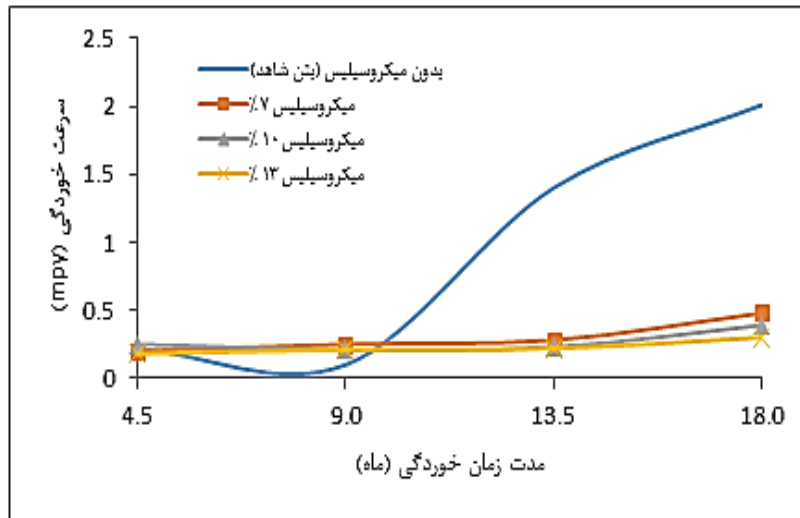
Fig. 9. Effect of microsilica on compressive strength of 28 days of concrete

باعث مقاومت در برابر خوردگی و بهبود قابل توجهی در نفوذپذیری بتن در محیط‌های تهاجمی می‌شود.

در مقایسه شکل ۱۲ و ۱۳ و شدت خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی بر حسب سن بتن برای $W/C = 34\%$ و $W/C = 4\%$ و سه درصد مختلف میکروسیلیس، نشان می‌دهد که شدت خوردگی در نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۳۴ درصد ($W/C = 34\%$) کمتر از نسبت آب به سیمان ۴۰ درصد ($W/C = 4\%$) است، و این به علت کاهش نفوذپذیری بتن در یک فوق روان کننده ثابت نسبت W/C کمتر می‌باشد. در مقایسه شکل ۱۲ و ۱۳ و شدت خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی بر حسب سن بتن در محدوده میکروسیلیس بین ۷-۱۳ درصد نسبت به نمونه‌های بدون میکروسیلیس بسیار کمتر شده و شدت خوردگی‌ها بسیار نزدیک به هم می‌باشند. البته تفاوت بین شدت خوردگی مخلوط‌ها دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس و مخلوط‌های حاوی ۱۳ درصد میکروسیلیس کمتر می‌گردد و این می‌تواند بخاطر افزایش مقدار هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان و آب در مخلوط‌های پرعیارتر باشد که در نتیجه مقدار زیادتر میکروسیلیس توانسته

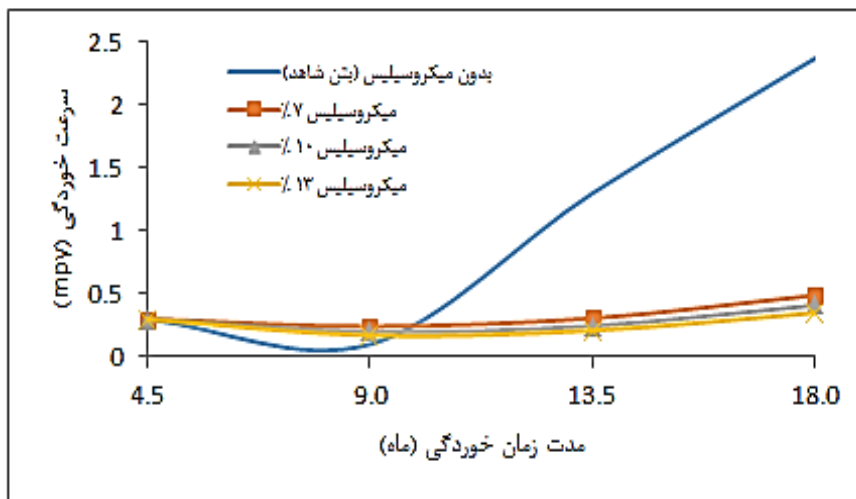
در طی هر ۴/۵ ماه روی نمونه‌ها انجام گرفت، و نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج آزمایشگاهی در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ آمده است.

در شکل ۱۰ شدت خوردگی بر حسب سن بتن (مدت زمان خوردگی) برای نمونه‌های حاوی میکروسیلیس ۷، ۱۰ و ۱۳ درصد (وزن سیمان) و نمونه بدون میکروسیلیس (نمونه شاهد) رسم گردیده است. شدت خوردگی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس در محدوده ۷ تا ۱۳ درصد با گذشت زمان تقریباً ۱۸ ماه بسیار کمتر از شدت خوردگی نمونه بدون میکروسیلیس می‌باشد، یکی از علل این کاهش ریز بودن دانه‌های میکروسیلیس نسبت به دانه‌های گرد سیمان است که وقتی در کنار لعاب سیمان قرار می‌گیرند، اولاً فضاهای بسیار ریز لعاب را پر می‌کنند، ثانیاً چون از لحاظ شیمیایی فعال هستند با هیدروکسید کلسیم $[Ca(OH)_2]$ حاصل از آب‌گیری سیمان ترکیب شده و آن را به سیلیکات کلسیم آبدار تبدیل می‌نماید. به این ترتیب فضاهای خالی لعاب سیمان کاهش یافته هیدروکسید کلسیم به جسم مقاوم‌تری مشابه سایر سیلیکات‌های خمیر سیمان تبدیل شده، بافت خمیر سیمان یکنواخت‌تر می‌شود و ویژگی‌های بتن نیز بهبود می‌یابد و



شکل ۱۰. سرعت خوردگی نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف (SP = 0.6, w/c = 0.34)

Fig. 10. Corrosion rate of concrete specimens at different times (SP = 0.6, w/c = 0.34)



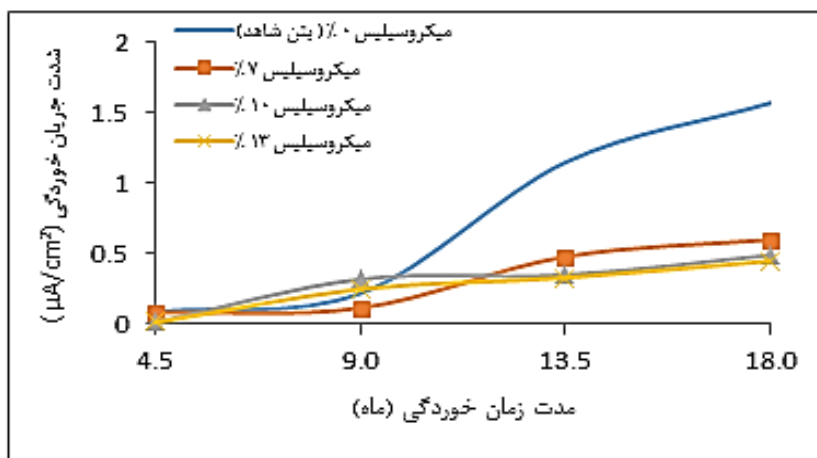
شکل ۱۱. سرعت خوردگی نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف (SP = 0.6, w/c = 0.4)

Fig. 11. Corrosion rate of concrete specimens at different times (SP = 0.6, w/c = 0.4)

جدول ۷. محدوده‌های شدت خوردگی و تفسیر آن [۳۱]

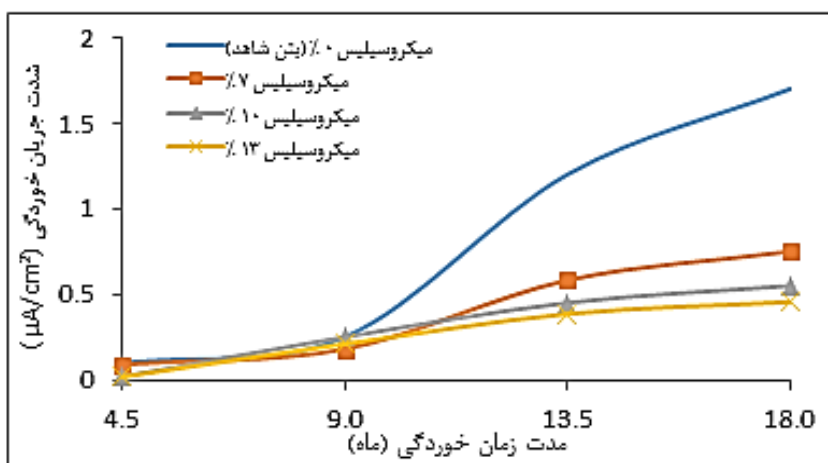
Table 7. Corrosion intensity ranges and its interpretation

میزان خوردگی	i_{corr} چگالی جریان خوردگی ($\mu A/cm^2$)
غیرفعال	$i_{corr} < 0.1$
خوردگی کم تا متوسط	$0.1 < i_{corr} < 0.5$
خوردگی متوسط تا زیاد	$0.5 < i_{corr} < 1$
خوردگی زیاد	$i_{corr} > 1$



شکل ۱۲. شدت خوردگی نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف (SP = 0.6, w/c = 0.34)

Fig. 12. Corrosion density of concrete specimens at different times (SP = 0.6, w/c = 0.34)



شکل ۱۳. شدت خوردگی نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف (SP = 0.6, w/c = 0.4)

Fig. 13. Corrosion density of concrete specimens at different times (SP = 0.6, w/c = 0.4)

قدردانی

از مدیران اسکله PI بندر امام خمینی جهت هماهنگی کار تحقیق بر روی این اسکله کمال تشکر را دارم.

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی

MS	میکروسیلیس
S	فوق روان کننده
A	مساحت، m^2
D	چگالی نمونه cm^3
T	زمان year
W	اختلاف وزن اولیه و ثانویه mg
I_{corr}	چگالی جریان خوردگی $\mu A/cm^2$
w/c	نسبت آب به سیمان

منابع

- [1] L. Fedrizzi, F. Azzolini, P.L. Bonora, The use of migrating corrosion inhibitors to repair motorways' concrete structures contaminated by chlorides, *Cement and Concrete Research*, 35(3) (2005) 551-561.
- [2] G. Batis, A. Routoulas, E. Rakanta, Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar, *Cement and Concrete Composites*, 25(1) (2003) 109-115.
- [3] M. Abedini, C. Zhang, Dynamic performance of concrete columns retrofitted with FRP using segment pressure technique, *Composite Structures*, 260 (2021) 113473.
- [4] W. Morris, M. Vazquez, A migrating corrosion inhibitor evaluated in concrete containing various contents of admixed chlorides, *Cement and Concrete Research*, 32(2) (2002) 259-267.
- [5] C. Zhang, M. Abedini, J. Mehrmashhadi, Development of pressure-impulse models and residual capacity assessment of RC columns using high fidelity Arbitrary Lagrangian-Eulerian simulation, *Engineering Structures*, 224 (2020) 111219.
- [6] B. Mobasher, Modeling of stiffness degradation and

است باعث افزایش ژل گردد و تأثیر منفی بیش از حد بودن مخلوط را خنثی سازد. اما با توجه به روند شکل‌های شدت خوردگی نسبت میکروسیلیس ۱۰ درصد از دو نسبت دیگر میکروسیلیس کمتر می‌باشد. همچنین در این شکل‌ها دیده می‌شود که نسبت میکروسیلیس ۱۰ درصد و ۱۳ درصد بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشد. همچنین در بعضی از سنین پایین بتن مشاهده می‌گردد که بعضی از درصد‌های میکروسیلیس نسبت به درصد انتخابی دارای شدت خوردگی کمتری است که این به علت کامل نشدن واکنش‌های شیمیایی در این محدوده زمانی می‌باشد که با افزایش سن بتن و کامل شدن واکنش‌های شیمیایی روند شکل‌ها اصلاح می‌گردد.

۷- نتیجه گیری

با توجه به اینکه یکی از عوامل اصلی خرابی زودرس در سازه‌های بتن مسلح، خوردگی میلگردها در اثر نفوذ کلرید در بتن می‌باشد و مهم‌ترین عامل در افزایش سرعت این تخریب، نفوذپذیری بتن می‌باشد، استفاده از مواد پوزولانی مانند، میکروسیلیس، تأثیر مثبتی بر خوردگی، افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش نفوذپذیری بتن دارد. هدف از این تحقیق استفاده بهینه میکروسیلیس در کاهش خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی دریایی می‌باشد، که با نسبت جایگزینی ۳ درصد میکروسیلیس و استفاده از فوق روان کننده و کاهش نسبت آب به سیمان به شرح زیر است.

الف) به کار بردن بتن حاوی میکروسیلیس در محدوده ۷ تا ۱۳ درصد وزن سیمان اثر قابل توجهی در کاهش خوردگی نسبت به بتن فاقد میکروسیلیس دارد. بنابراین، استفاده از میکروسیلیس بر زمان شروع و انتشار پیشرفت در خوردگی فولاد تأثیر می‌گذارد.

ب) با توجه به کاهش نفوذپذیری بتن، نسبت آب به سیمان ۳۴٪ برای سه درصد مختلف میکروسیلیس مناسب‌تر از نسبت آب به سیمان ۴۰٪ بوده است.

پ) اثر میکروسیلیس به روی مقاومت فشاری ۲۸ روز بتن و نسبت آب به سیمان ۳۴٪ و ۶ درصد فوق روان کننده نشان می‌دهد که با کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده از میکروسیلیس باعث افزایش متوسط ۳۰ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد بتن بدون میکروسیلیس می‌باشد.

ت) با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق و آزمایشات انجام شده مقاومت فشاری و نزدیک بودن کاهش شدت خوردگی نمونه‌ها، مصرف میکروسیلیس در بتن به میزان ۱۰٪ و فوق روان کننده به میزان ۶٪ و نسبت آب به سیمان ۳۴٪ به دلایل فنی و اقتصادی مناسب‌تر می‌باشد.

- [15] J. Seelapureddy, J. Bommisetty, M.S. Rao, Effect of metakaolin and micro silica on strength characteristics of standard grades of self-compacting concrete, *Materials Today: Proceedings*, 45 (2021) 884-890.
- [16] A. Ghanei, H. Eskandari-Naddaf, T. Ozbakkaloglu, A. Davoodi, Electrochemical and statistical analyses of the combined effect of air-entraining admixture and micro-silica on corrosion of reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 262 (2020) 120768.
- [17] L. Li, J. Zhu, Z. Huang, A. Kwan, L. Li, Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar, *Construction and Building Materials*, 157 (2017) 337-347.
- [18] W. Wu, R. Wang, C. Zhu, Q. Meng, The effect of fly ash and silica fume on mechanical properties and durability of coral aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 185 (2018) 69-78.
- [19] M.I. Khan, M.A.A. Sayyed, M.M.A. Ali, Examination of cement concrete containing micro silica and sugarcane bagasse ash subjected to sulphate and chloride attack, *Materials Today: Proceedings*, 39 (2021) 558-562.
- [20] J. Dotto, A. De Abreu, D. Dal Molin, I. Müller, Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars, *Cement and concrete composites*, 26(1) (2004) 31-39.
- [21] M. Abedini, C. Zhang, Dynamic vulnerability assessment and damage prediction of RC columns subjected to severe impulsive loading, *Structural Engineering and Mechanics*, 77(4) (2021) 441-461.
- [22] C.-S. Poon, S. Kou, L. Lam, Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, *Construction and building materials*, 20(10) (2006) 858-865.
- [23] A. Ramezani-pour, A. Pourkhorshidi, National code of practice for concrete durability in the Persian Gulf and Oman Sea (proposed), BHRC Publication, Tehran, Iran, (2004).
- [24] P.K. Mehta, Sustainable cements and concrete for the climate change era—a review, in: *Proceedings of expansion in cement based materials subjected to external sulfate attack, Transport Properties and Concrete Quality. Materials Science of Concrete. The American Ceramic Society. John Willy & Sons. New Jersey-2007.-c, (2006) 157-171.*
- [7] E. Ganjian, H.S. Pouya, The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, 23(2) (2009) 644-652.
- [8] A. Bagheri, H. Zanganeh, H. Alizadeh, M. Shakerinia, M.A.S. Marian, Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash, *Construction and building materials*, 47 (2013) 1402-1408.
- [9] E. Moffatt, M. Thomas, Performance of 25-year-old silica fume and fly ash lightweight concrete blocks in a harsh marine environment, *Cement and Concrete Research*, 113 (2018) 65-73.
- [10] R. Siddique, Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties, *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11) (2011) 923-932.
- [11] D. Mostofi Nejad, M. Sadeghi, K. Mirtalaei, Experimental study of steel corrosion in concrete containing slag and microsilica, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(14) (2002) pp. 259 - 278.
- [12] H. Eskandari-Naddaf, A. Ziaei-Nia, Simultaneous effect of nano and micro silica on corrosion behaviour of reinforcement in concrete containing cement strength grade of C-525, *Procedia Manufacturing*, 22 (2018) 399-405.
- [13] M. Motazedian, H. Fatemi, Laboratory study of the optimal composition of microsilica gel on the strength and durability and corrosion rate of reinforced concrete with rebar coating, in: *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management, Iran.*
- [14] L. Li, Z. Huang, J. Zhu, A. Kwan, H. Chen, Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar, *Construction and Building Materials*, 140 (2017) 229-238.

- [28] A. C33/C33M, Standard specification for concrete aggregates, in, ASTM International West Conshohocken, PA, 2013.
- [29] A.M. Heniegal, M. Amin, H. Youssef, Effect of silica fume and steel slag coarse aggregate on the corrosion resistance of steel bars, *Construction and Building Materials*, 155 (2017) 846-851.
- [30] M. FONI'ANA, *Corrosion Engineering*, in, McGraw-Hill, New York, 1986.
- [31] P. Gu, J. Beaudoin, M.-H. Zhang, V. Malhotra, Performance of reinforcing steel in concrete containing silica fume and blast-furnace slag ponded with sodium-chloride solution, *Materials Journal*, 97(3) (2000) 254-262.
- the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Aneona, Italy, Citeseer, 2010, pp. 28-30.
- [25] C. Zhang, M. Abedini, Time-history blast response and failure mechanism of RC columns using Lagrangian formulation, in: *Structures*, Elsevier, 2021, pp. 3087-3098.
- [26] M. Abedini, A.A. Mutalib, Investigation into damage criterion and failure modes of RC structures when subjected to extreme dynamic loads, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(2) (2020) 501-515.
- [27] پیلوار، امیررضا، رمضانیاپور، رجایی، حسین، بررسی آزمایشگاهی روش‌های تسریع یافته الکتریکی سنجش نفوذپذیری کلریدی بتن، تحقیقات بتن، ۹(۲) (۲۰۱۷) ۵-۱۵

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.R. Tangtakabi, M. H. Ramesht, A. Golsoorat Pahlaviani, T. Pourrostam, *Optimum Use of Microsilica in Reducing Corrosion Reinforcing Steel of Marine Concrete Structures (Case study of Imam Khomeini quay P1)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(8) (2022) 2953-2968.

DOI: 10.22060/ceej.2022.18954.7008

