تحقیقات بتن
سال پانزدهم، شمارهٔ چهارم
زمستان ۱۴۰۱
ص ۷۲ – ۵۹
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱

مطالعه آزمایشگاهی دوام بتن خودمتراکم حاوی سرباره و میکروسیلیس و ترکیب آنها در محیط دریایی و جزر و مدی خلیج فارس

امیرحسین ریگی
کارشناس ارشد عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران.
مسعود ضیائی *
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سراسری گرمسار.

چکیده

سازه‌های بتن مسلح در سواحل خلیج فارس دارای پتانسیل شدید خوردگی می‌باشند و درخصوص سازه‌هایی مانند اسکله و بندرها که در شرایط جزر و مدی دریا و یا بخش‌هایی که به صورت مغروق در دریا قرار می‌گیرند، این مسأله به دلیل کثرت یون کلراید حادتر است. بررسی رفتار و دوام بتن در چنین محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. برای افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی در خلیج فارس، استفاده از بتن خودمتراکم در کنار مواد پودری جایگزین سیمان از سوی محققین پیشنهاد شده است. پس از بررسی‌های گسترده، در این مقاله دو ماده پودری سرباره و میکروسیلیس برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن انتخاب شده است. آزمایش دوام بتن در شرایط مستغرق و جزر و مدی روی نمونه‌ها انجام شده است. بر اساس نتایج گرفته شده از آزمایشات بر روی ۲۱۶ نمونه بتنی، استفاده از بتن پیشنهادی به‌طور میانگین موجب افزایش ۲۲ درصدی مقاومت فشاری، ۵۰ درصدی مقاومت الکتریکی و کاهش نفوذپذیری ۱۲ درصدی جذب آب حجمی و ۳۰ درصدی جذب آب موئینه در شرایط محیطی جزرومدی شده است.

واژه‌های کلیدی: بتن خودمتراکم، جزرومد، سرباره، میکروسیلیس، خلیج فارس.

* نویسنده مسئول: m.ziyaei@fmgarmsar.ac.ir

۱- مقدمه

خلیج فارس با داشتن شرایط آب و هوایی بسیار تهاجمی برای سازه‌های بتنی منطقه‌ای آسیب‌رسان و خطرناک است. در محیط‌های ساحلی، عوامل تخریبی فیزیکی و شیمیایی از جمله حملات سولفاتی، کربناتاسیون بتن، تنش ناشی از کریستالیزه شدن نمک‌ها در حفره‌های بتن و نیروهای هیدرولیکی به همراه پارامترهای آب و هوایی شامل نوسانات دما و رطوبت در طول شبانه روز و ماه از جملهٔ عواملی هستند که موجب شکل‌گیری شرایط حاد برای تخریب طیف وسیعی از سازه‌های بتنی در این مناطق می‌شوند.به علاوه، استفاده از میلگردهای فولادی مسلح کننده در اعضای بتنی باعث ایجاد نگرانی هایی در خصوص خوردگی آنها می‌شود.. واکنش خوردگی آهن واکنشی کند است، اما این واکنش در حضور یون کلر تسریع می‌شود. یون‌های کلرید به عنوان کاتالیزور بوده و در ترکیب نهایی خوردگی قرار نمی گیرد [۱].

در سواحل خلیج فارس به‌دلیل وقوع جزر و مد، یون کلراید در عمق بتن حرکت کرده و دو مکانیزم انتشار و مکش موئینه که همزمان اتفاق می‌افتند، حرکت یونها به داخل بتن را تسهیل و تسریع میکنند.

در بتن‌های درمعرض محیط و هوای دریایی، نفوذ یون کلراید می‌تواند تاسه برابر بیشتر ازسازه‌های معمولی باشد. دلیل این امر آن است که مقادیر زیادی از آب حاوی یون کلراید درهنگام تر شدن بتن به داخل آن مکیده شده و هنگامیکه بتن درمعرض هوای محیط قرارمی‌گیرد، رطوبت سطح آن خشک میشود و مقدار زیادی از یون‌های کلراید روی سطح بتن به جای می ماند. تکرار فرایند تر و خشک شدن بتن ، غلظت کلراید در محیط داخلی بتن را افزایش می‌دهد، تا حدی که ممکن است غلظت یون کلراید در منافذ بتن از غلظت یون کلراید آب دریا بیشتر شود [۲].

استفاده از پوزولان‌ها[1] یکی از بهترین روش‌ها برای بهبود دوام و افزایش مقاومت در برابر خوردگی میلگردها در بتن است که اثرات زیست محیطی مثبتی را نیز به دنبال دارد.

وجود مواد پوزولانی که نقش چسباننده دارند می‌تواند به نفوذ ناپذیری خمیر سیمان و بتن کمک نمایند. با مصرف این مواد نفوذپذیری خمیر سیمان کاهش و کیفیت ناحیه انتقالی بهبود می‌یابد و باعث می‌شود نفوذپذیری بتن کم شود [۳].

یکی دیگر از موادی که استفاده از آن‌ها در بتن باعث کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود، سرباره است. استفاده از سرباره در مخلوط منجر به ایجاد ساختاری با حفره‌های ریزتر و تغییرات ریزساختار در فصل مشترک سنگ‌دانه و سیمان می‌شود که در مجموع باعث کاهش نفوذپذیری می‌گردد. همچنین بعلت ظرفیت پیوندی این ماده سرعت نفوذپذیری یون کلرید در بتن کاهش می‌یابد. تحقیقات متعددی در مورد عملکرد این نوع ماده در بتن انجام شده است که در اکثر آنها بهبود دوام بتن به اثبات رسیده است [۴-۶].

شرایط خاص آب و هوایی مناطق گرم ساحلی باعث می شود که کارآیی عوامل اجرا و نظارت کاسته شده و توجه لازم برای ساخت بتن با کیفیت مطلوب کاهش یابد. در چنین شرایطی استفاده از بتن خودمتراکم می‌تواند انتخاب مناسبی برای پوشش این ضعف باشد. بتن خود متراکم، بتنی است که به راحتی جریان می یابد و درون قالب و زوایای آن و لابلای میلگردها و اقلام مدفون را به سهولت پر می‌کند، در حالی‌که همگنی آن حفظ می‌شود و دارای جداشدگی و آب انداختن ناچیز می‌باشد. این بتن به تراکم و لرزاندن نیاز ندارد.

بررسی پدیده خوردگی در بتن از مدت‌ها قبل موضوع مطالعه محققین بوده است. تاکادا و همکاران [۷] در سال ۱۹۹۸ تحقیقاتی در خصوص خوردگی در بتن در دراز مدت تحت تاثیر یونهای کلر و سولفات‌ها انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که محصولات ناشی از خوردگی حجمی بیش از فولاد دارد و ایجاد تنشی بیش از مقاومت کششی بتن می کند و در نتیجه بتن ترک خورده و متلاشی می‌شود.

خنداکار [۸] در سال ۲۰۰۷ نشان داد که یکی از مهم‌ترین مشخصات دوام بتن، توانایی آن برای مقابله با خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلر می‌باشد. نیولندز و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۷ تحقیق در خصوص ماهیت الکتروشیمیایی خوردگی انجام دادند که نشان دهنده اهمیت مقاومت ویژه الکتریکی به‌عنوان شاخصی برای دوام و مقاومت در برابر خوردگی و یکی از ویژگی‌های فیزیکی بتن است.

[1] Pozzolan

بوندار و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۱ طی تحقیقی نتیجه گرفتند که برای بررسی پارامترهای خوردگی و طراحی آزمایش‌ها، باید در نظر داشت که از آنجا که ورود یونهای مهاجم مانند کلراید به فرآیندهای مختلف انتقال رطوبت (یعنی انتشار، جذب آب و نفوذپذیری) بستگی دارد، زمانی که نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد، دوام آن افزایش می‌یابد.

شکرچی‌زاده و همکاران [۱۱] در سال ۱۳۹۲ نشان دادند که یکی از عوامل مضرتر بودن شرایط جزر و مدی نسبت به شرایط مستغرق در حاشیه خلیج فارس، نفوذ بیشتر یون کلراید در بتن و متعاقباً افزایش غلظت کلراید در مجاورت میلگردهاست. نتایج این مطالعه، نشان داده که میزان نفوذ یون کلراید در بتن در شرایط جزر و مدی به مراتب بیشتر از شرایط مستغرق در مدت مشابه است.

استفاده از خاکستر بادی و پودرسنگ آهک به‌صورت مجزا و ترکیبی در بتن خودتراکم در سال ۲۰۱۶ توسط داسیلوا و بریتو [۱۲] در انستیتو لیسبون پرتقال مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش کربناسیون، نفوذ یون کلراید و مقاومت الکتریکی به‌عنوان معیارهای دوامی بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از مخلوط سه‌گانه حاوی سیمان، خاکستر بادی و پودرسنگ مطلوب‌ترین حالت را در معیارهای دوامی کسب کرده است.

پوریامهر و قویمی [۱۳] در سال ۲۰۱۷ با بررسی خواص بتن‌های خودمتراکم سبک حاوی پوزولان، گزارش نمودند که باتوجه به طرح‌های اختلاط استفاده شده دراین تحقیق و آزمایشات انجام گرفته استفاده مناسب از مواد پودری در بتن می‌تواند جوابگوی نیروهای وارد بر بتن سازه ای باشد و بااستناد به این مسئله می‌توان از پوزولان در ساخت انواع بتن‌های مختلف بهره برد.

در سال ۲۰۱۸ ماسانا و همکاران [۱۴] بر روی مخلوط‌های دوگانه و سه‌گانه میکروسیلیس و نانوسیلیس در بتن خودمتراکم تحقیقات جامعی صورت دادند.آنها آزمایش‌های مهم دوامی همچون کربناسیون، چرخه‌های ذوب و یخبندان، نفوذ جیوه را مورد بررسی قرار داده‌اند. استفاده از نانو سیلیکات فشردگی بسیار خوبی در ریزساختار بتن ایجاده کرده و نتایج مطلوبی در معیارهای دوامی به‌دست آمده است.

وی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹ آزمایش‌های میدانی بر روی طرح اختلاط‌هایی با نسبت آب به سیمان مختلف در شرایط محیطی مستغرق و جزر و مد انجام دادند. نتایج آماری نشان داد که میانگین مقدار عمق ناحیه نفوذ کلرید در محدوده ۴ تا ۶ میلیمتر بدون در نظر گرفتن تفاوت زمان قرار گرفتن در معرض، نسبت آب به سیمان و با یا بدون افزودنی در نمونه‌ها است.

ریس و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۶] رفتار بتن خودمتراکم با مقاومت بالا محتوی میکرو نانوسیلیس در حضور یون کلرید را مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد که میزان نفوذپذیری یون کلراید در نمونه‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

باتوجه به شرایط ویژه خلیج فارس و لزوم استفاده از مصالح جدید در بتن برای کاهش اثرات مخرب محیط جزر و مدی آن بر سازه های بتنی موجود و در حال ساخت، و همچنین محدودیت تعداد تحقیقات انجام گرفته دراین باره، انجام تحقیق آزمایشگاهی در این خصوص ضرورت داشته است. با توجه به مطالب ذکر شده، در این تحقیق از بتن خودمتراکم حاوی میکروسیلیس و سرباره به منظور کاهش اثرات محیط بسیار مخرب خلیج فارس برای بتن مسلح استفاده شده است.

۲- برنامه آزمایشات

در تحقیق حاضر، خصوصیات دوام بتن خودمتراکم حاوی پوزولان طبیعی و مصنوعی در برابر حملات کلرایدی در محیط خلیج فارس بررسی شده است.

با ثابت نگه داشتن مقدارکل مواد سیمانی، سهم سنگ‌دانه، نسبت آب به سیمان و درصدهای بهینه جایگزینی پوزولان، صرفا به تأثیر نوع پوزلان بر رفتار بتن تحت شرایط شبیه‌سازی شده خلیج فارس پرداخته شده است. خصوصیاتی که مورد ارزیابی قرارگرفته شامل مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، جذب آب حجمی و موئینه، و مهاجرت یون کلر می‌باشد.

۲-۱- مصالح مورد استفاده

سیمان مورداستفاده در این تحقیق، از نوع ۴۲۵-۱ تولید شده توسط مجتمع سیمان دلیجان می‌باشد. مشخصات شیمیایی این سیمان در جدول ۱ ارایه شده است. همچنین از پودر دوده سیلیسی معادن ازنا لرستان استفاده شده است (شکل ۲) که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۲ ارایه شده است.

سربارهٔ کوره‌ی بلند تولید چدن خام در کارخانه ذوب‌آهن اصفهان

برای ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور فعالیت بهتر و افزایش سطح ذرات، سرباره آهن‌گدازی مصرفی در این پژوهش به میزانی بیش از سیمان‌های متداول آسیاب شده است). در جدول ۳ مشخصات شیمیایی این ماده ارایه شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده

SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	SO3	MgO	K2O	Na2O
۲۰/۳۵	۵/۳	۴/۱	۶۳/۲۵	۲/۴۴	۲/۱۱	۰/۷۱	۰/۲۱

جدول ۲- مشخصات شیمیایی پودر دوده سیلیسی

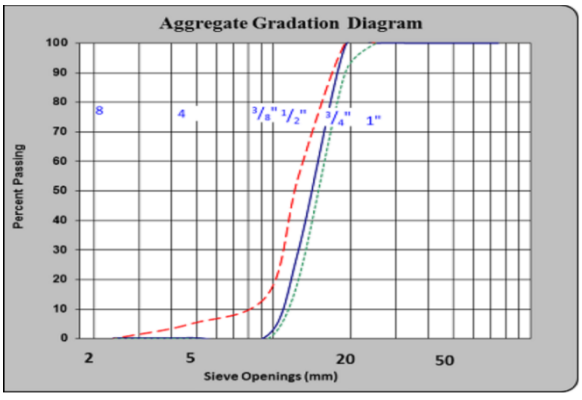
Na2o	K2o	So3	Mgo	Al2o3	Fe2o3	Cao	Sio2	چگالی (Kg/m3)
۰/۳۱	۰/۳۸	۲/۶۳	۱/۶۳	۰/۸۱	۰/۸۶	۲/۲۷	۹۰/۳۳	۲۲۱۲

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سرباره

TiO_2	Mno	Mgo	Al2o3	Fe2o3	Cao	Sio2	چگالی (Kg/m^3)
۱/۲۵	۱/۲۴	۶/۸۶	۱۲/۴۸	۱/۱	۳۹/۱۲	۳۷/۳۵	۲۹۰۰

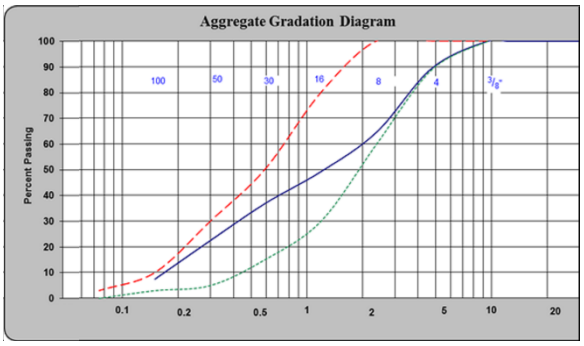
در این پژوهش از سه نوع مصالح سنگی شن بادامی، شن نخودی و ماسه استفاده‌شده است. انتخاب مصالح مناسب جهت ساخت بتن خودتراکم با انجام آزمایش‌های متعدد بر روی انواع مصالح انجام‌شده است و درنهایت مصالح سنگی از معدنی در شهریار که از نوع رودخانه‌ای و دارای مرغوبیتی مناسب بود، انتخاب گردیده است.

ماسه مورداستفاده در طرح نمونه‌های این پژوهش از نوع طبیعی و در اندازه ۶-۰ میلی‌متر می‌باشد. وزن مخصوص این ماسه برابر ۲۵۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن ۳/۳ درصد می‌باشد. مدول نرمی ماسه ۳/۵ بوده که برای تولید بتن مناسب است. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی شن(قرمز و سبز محدوده استاندارد ملی ایران -آبی دانه‌بندی مورد استفاده)

برای رسیدن به دانه‌بندی یکنواخت و مناسب از یک نوع شن نخودی با اندازه ۱۲-۶ میلی‌متر کاملاً طبیعی انتخاب گردیده است. وزن مخصوص این شن برابر ۲۵۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن ۲/۱۷ درصد می‌باشد.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه(قرمز و سبز محدوده استاندارد ملی ایران -آبی دانه بندی مورد استفاده)

با توجه به اهمیت کسب روانی موردنیاز بدون ایجاد جداشدگی اجزای بتن، استفاده از شن بادامی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی-متر بهترین گزینه می‌باشد. شن مورد استفاده با حداکثر ۶۰ درصد شکستگی علاوه برنداشتن تأثیر منفی بر روی کسب مقاومت فشاری بتن، کمک زیادی به تأمین خواص بتن تازه می‌نماید. وزن مخصوص این شن برابر ۲۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن برابر ۱/۷۷ درصد می‌باشد.

عموما پوزولان‌ها به‌دلیل زبری و ریزی بیشتر که منجر به سطح مخصوص بالا می‌گردد و نیز تخلخل بیشتری که نسبت به ذرات سیمان دارند، آب بیشتری جذب می‌کنند. این مسئله موجب کاسته

شدن روانی بتن‌های دارای پوزولان نسبت به بتن‌های بدون پوزولان می‌شود [۱۷]. با توجه به اینکه در این پژوهش سعی شد تا روانی تمامی مخلوط‌ها در یک محدوده مشخص قرار داشته باشند، از فوق روان کننده استفاده شده است.

۲-۲- ساخت نمونه ها

در این پژوهش، یک طرح اختلاط به‌عنوان طرح شاهد در نظر گرفته‌شده است و سپس تغییرات مورد نظر جهت بررسی تأثیر مواد پوزولانی در مقاومت و دوام در این طرح اختلاط اعمال‌شده است. در طرح اختلاط بتن شاهد از ۵۰۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب بتن استفاده شده و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۵ (۱۷۵ کیلوگرم در متر مکعب بتن) است. نسبت وزنی ریز دانه از کل سنگ‌دانه ها (۱۸۲۰ کیلوگرم در متر مکعب) برابر ۶۰ ٪ و درشت دانه ۴۰٪ درصد بوده است.

دو ماده پودری با استفاده از درصدهای بهینه جایگزینی حاصل از مطالعات گذشته بر روی این مواد، در طرح اختلاط شاهد جایگزین شده است. سرباره کوره آهن‌گدازی به میزان ۳۰ درصد کل مواد سیمانی (۱۵۰) و میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد کل مواد سیمانی (۵۰) جایگزین در طرح اختلاط شاهد شده است. جایگزینی در تمامی طرح اختلاط‌ها بر اساس مقدار کل مواد سیمانی ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. جهت رسیدن به کارایی برابر در جریان اسلامپ ۷۲-۶۸ میلیمتر، از مواد فوق روان‌کننده بر پایه پلی-کربوکسیلات اتر استفاده‌شده است. مشخصات طرح اختلاط‌ها در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

بعد از ساخت بتن، با استفاده از بیلچه بتن ساخته شده در قالب‌ها ریخته شد و مطابق با استاندارد برای هر آزمایش سه آزمونه یکسان، که در زمان و شرایط یکسانی تولید و نگهداری شدند، تهیه شد.

جدول ۴- مشخصات طرح اختلاط نمونه ها

ردیف	نام	ماده جایگزین	درصد جایگزینی
۱	SC-01	-	۰
۲	SC-02	میکروسیلیس	۱۰
۳	SC-03	سرباره	۳۰
۴	SC-04	میکروسیلیس و سرباره	۱۰ و ۳۰

برای عمل آوری نمونه‌ها از آب لوله‌کشی استفاده شده است. پس از ساخت، آزمونه‌ها حدود ۲۴ ساعت درون قالب که در دمای محیط(۲۰ درجه سانتی گراد) قرار داشتند، نگه‌داری شدند. جهت جلوگیری از تبخیر سطحی، سطح نمونه‌ها با نایلون پوشانده شد. بعد از خارج کردن آزمونه‌ها از قالب، جهت انجام عمل هیدراتاسیون سیمان و تا رسیدن آزمونه‌ها به سن مورد نظر جهت انجام آزمایش‌ها، آزمونه‌ها در حوضچه‌های آب هم دما با محیط نگهداری شدند.

۲-۳- شبیه‌سازی جزرومد خلیج فارس

جهت ارزیابی میزان مقاومت نمونه‌های بتنی در برابر نفوذ یون کلر در محیط خلیج فارس دو شرایط مختلف نگهداری شامل محیط غوطه‌وری و جزر و مد در نظر گرفته شده است. محیط جزر ومد به‌صورت تجربی توسط دستگاه شبیه سازی شده است. شرایط جزر و مد به صورت اعمال کردن سیکل‌های تر و خشک بر روی نمونه-های بتنی انجام شده است. برای شبیه‌سازی شرایط جزرو مد، دو محفظه به‌صورت مخازن پلاستیکی استوانه‌ای به صورت مجزا در نظر گرفته شده است (شکل ۳).

شکل ۳- دستگاه شبیه ساز شرایط جزر و مد

استوانه‌ها مجهز به پمپ آب و یک تابلو هوشمند PLC الکتریکی جهت تنظیم ساعات پمپ کردن و خالی کردن آب نمک از یک محفظه به محفظه دیگر در هر ۶ ساعت می‌باشد. آزمایش بر روی نمونه‌های بتنی به‌صورت هم‌زمان با خارج نمودن از ۳ محیط آب معمولی، غوطه‌وری در آب نمک و جزرومد انجام شده است. غلظت محلول نمکی آماده شده برای شرایط غوطه‌وری و جزر و مد به‌صورت یکسان و میزان نمک برابر با ۴۰ گرم بر لیتر مطابق با شرایط خلیج فارس در نظر گرفته شده است. دورهٔ زمانی آزمایش

برای هر سه شرایط معمولی، غوطه‌وری و جزرو مد در این پژوهش ۹۰ روز در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است برای شرایط غوطه‌وری، یک حوضچه حاوی آب نمک با غلظت موجود در خلیج فارس درنظر گرفته شده است.

۳- نتایج حاصل از آزمایش

برای تعیین رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده، آزمایشهای اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، جذب آب بتن، جذب آب مویینه بتن و نرخ مهاجرت یون کلراید انجام شده است که نتایج در ادامه ذکر خواهد شد.

۳-۱- آزمایش اسلامپ

در این مطالعه برای ایجاد امکان بررسی تنها اثر مواد پوزولانی بر خواص دوامی بتن خودتراکم، با انجام تعداد آزمایش لازم سعی شده تا کارایی طرح اختلاط‌های بتن در یک سطح قرار داشته باشد. جهت دستیابی به جریان اسلامپ ۷۲-۶۸ میلیمتر در بتن‌هایی که کارایی کمتری داشته اند، از مواد فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر استفاده شده است. آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد INSO-11270 [۱۸] انجام شده است. در جدول ۵ مشخصات اسلامپ نمونه‌ها ارایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، محدوده اسلامپ نمونه‌ها در بازه ۶۸ تا ۷۲ میلیمتر حفظ شده است.

جدول ۵- نتایج اسلامپ طرح اختلاط نمونه ها

نام	ماده جایگزین	اسلامپ (mm)
SC-01	-	۷۰
SC-02	میکروسیلیس	۷۱
SC-03	سرباره	۷۰
SC-04	میکروسیلیس- سرباره	۶۹

۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

نمونه‌ها پس از قالب‌گیری ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه نگهداری شده و سپس به مدت مورد نظر در سه محیط نگهداری شده‌اند.

در محیط اول که به‌صورت معمول در تمامی تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرد، عمل‌آوری در آب‌آهک اشباع انجام شده است. محیط دوم و سوم محیط شبیه‌سازی شده خلیج فارس می‌باشد.

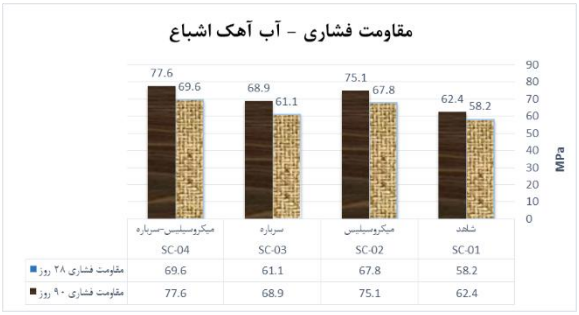
نمونه‌های بتنی در دستگاه شبیه‌سازی جزر و مد که در بخش قبل تشریح شده، نگهداری می‌شود. در این دستگاه بر روی نمونه‌ها چرخه‌های جزر و مد هر ۶ ساعت اعمال می‌شود. همچنین بخشی از نمونه‌ها همیشه درحال غوطه‌وری در آب نمک بوده است. آزمونه‌ها در سنین مورد نظر از محیط خارج شده و مورد آزمایش قرار گرفته است.

آزمایش‌های مربوط به مقاومت فشاری بتن در آزمایشگاه بتن موسسه شهید رجایی انجام شده است. با استفاده از نتایج این آزمایش نمودار مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های موردمطالعه در محیط‌های مستغرق آب دریا، جزر و مد آب دریا و محیط آب اشباع آهک ترسیم شده است. دستگاه انجام آزمایش و مثالی از شکل نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش در شکل ۴ قابل مشاهده است.

شکل ۴- دستگاه انجام آزمایش مقاومت فشاری بتن و شکل نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش

در شکل ۵، نتایج مقاومت فشاری در سن ۲۸ و ۹۰ روز در محیط آب آهک اشباع نشان داده شده است. با توجه به این نمودار بتن حاوی میکرو سیلیس- سرباره مقاومت بالاتری در هر دو سن کسب کرده است. بتن حاوی میکرو سیلیس نیز بافاصله عددی بسیار کمی مقاومت بالایی از خود نشان داده است. وجود سیلیس در این ۲ طرح مخلوط به دلیل افزایش سیلیکات‌های کلسیم و آلومینیم هیدراته شده باعث افزایش سطح تماس مواد سیمانی با سنگ‌دانه‌ها شده که درنتیجه آن مقاومت فشاری افزایش چشمگیری داشته است. بتن حاوی سرباره نیز مقاومت فشاری بسیار خوبی در میان طرح مخلوط‌های به دست آورده است. شاید بتوان دلیل این امر را قدرت پرکنندگی ذرات سرباره و افزایش تراکم بسیار زیاد در نمونه بتنی بیان کرد. سرباره کوره آهن‌گدازی همچنین با واکنش‌پذیری خوبی که با محصولات حاصل از

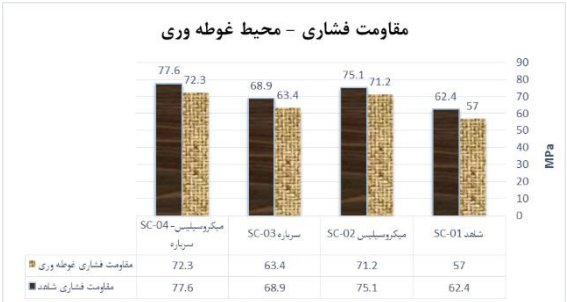
هیدراته شدن سیمان دارد موجب افزایش مقاومت به میزان بسیار خوبی نسبت به بتن شاهد کسب کرده است. نکته قابل‌توجه این است که استفاده از سرباره نه‌تنها اثر منفی بر روند کسب مقاومت نسبت به بتن شاهد نداشته، بلکه مقداری افزایش نیز نشان داده است. این نتیجه می‌تواند سرباره را به‌عنوان یک محصول دوستدار محیط‌زیست جایگزین بسیار مناسبی برای سیمان بیان کند.



شکل ۵- مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌ها عمل آوری شده در آب آهک اشباع

شرایط محیطی دوم مورد بررسی، شرایط غوطه‌وری به صورت غوطه‌ور کردن کلیه نمونه‌ها به صورت کامل در محلول نمکی شبیه سازی شد. همچنین شرایط محیطی سوم به صورت شرایط جزر و مدی با اعمال کردن سیکلهای تر و خشک در نظر گرفته شده است. در انتهای آزمایش‌ها، به دلیل کامل شدن فرایندهای شیمیایی بتن و همچنین تاثیر چشمگیر تخریب در دراز مدت بعد از ۹۰ روز مقاومت فشاری در کلیه طرح مخلوط‌ها برای هر دو شرایط غوطه وری و جزر و مد تعیین گردید.

در شکل ۶ نتایج مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌ها در محیط غوطه-وری آب دریا نشان داده شده است. نمونه‌های بتنی درون حوضچه حاوی آب نمک با غلظت منطبق بر غلظت آب خلیج فارس نگه-داری شده است.



شکل ۶- مقایسه مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌ها در شرایط محیطی عادی (شاهد) و غوطه وری در آب خلیج فارس

همانطور که انتظار می‌رفت، تمامی طرح اختلاط‌های بتن در برابر تهاجم یون کلراید محیط آب دریا دچار افت مقاومت فشاری شده‌اند.

بتن شاهد با افت مقاومت ۸/۶ درصد بیشترین افت را نشان می‌دهد. طرح مخلوط حاوی میکروسیلیس کمترین افت مقاومت فشاری را با عدد ۵/۱ درصد در محیط غوطه‌وری کسب کرده است. طرح مخلوط حاوی میکرو سیلیس- سرباره با وجود کسب بیشترین مقاومت فشاری در محیط آب آهک اشباع، در این محیط دچار افت مقاومت بیشتری در حدود ۶/۸ درصد نسبت به بتن حاوی میکروسیلیس شده است. طرح مخلوط دارای سرباره نیز افت مقاومت ۷/۹ درصدی را نشان می‌دهد، که نسبت به مخلوط شاهد عملکرد بهتری داشته است.

این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از سرباره اثر منفی کمتری در مقاومت فشاری نسبت به بتن خودتراکم بدون مواد پودری داشته است از اینرو استفاده از سرباره باز هم در این شاخص مفید خواهد بود. در جدول شماره ۶ نتایج مقاومت فشاری در محیط غوطه‌وری و درصد افت مقاومت نسبت به محیط شاهد نشان داده شده است.

جدول ۶- افت مقاومت فشاری نمونه‌ها در حالت غوطه وری در آب خلیج فارس

نام	مقاومت فشاری (MPa)	افت مقاومت نسبت به محیط عادی (٪)
SC-01	۵۷	۸.۷
SC-02	۷۱.۲	۵.۲
SC-03	۶۳.۳	۸/۰
SC-04	۷۲.۳	۶.۸

در شکل ۷ نتایج مقاومت فشاری سن ۹۰ روز در شرایط شبیه‌سازی شده سیکل‌های جزرومد خلیج فارس نشان داده شده است. نمونه-های بتنی درون دستگاه حاوی آب نمک با غلظت منطبق بر غلظت آب خلیج فارس، در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن قرار گرفته است. با توجه به این نمودار تمامی طرح مخلوط‌ها در برابر سیکل-های تر و خشک شدن دچار افت مقاومت فشاری شده است.

مشابه حالت محیط غوطه‌وری، بتن شاهد با افت مقاومت ۱۴/۰۰ درصد بیشترین افت را نشان می‌دهد. طرح مخلوط حاوی میکروسیلیس نیز کمترین افت مقاومت فشاری را با عدد ۷/۴ درصد

در محیط جذورمدی کسب کرده است. طرح مخلوط حاوی میکرو سیلیس- سرباره در این محیط دچار افت مقاومت بیشتری در حدود ۹/۶ درصد نسبت به بتن حاوی میکروسیلیس شده است.

شکل ۷- مقایسه مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های شاهد و نمونه ها در محیط جزر و مدی

طرح مخلوط دارای سرباره نیز افت مقاومت را نشان می‌دهد، که نسبت به مخلوط شاهد عملکرد بهتری داشته است.

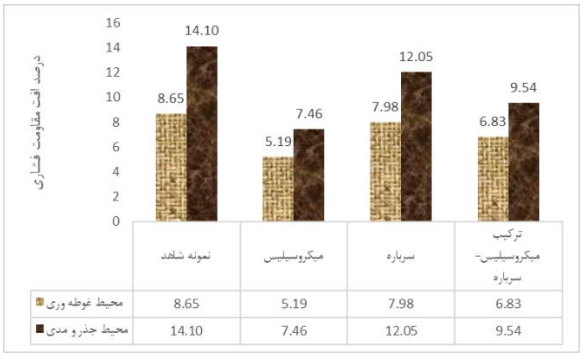
اختلاف زیاد افت مقاومت فشاری در بتن شاهد نسبت به دیگر طرح مخلوط‌ها نشان می‌دهد که در چرخه‌های تر و خشک شدن میزان تخریب این نوع بتن زیاد است و در عمل، استفاده از این نوع بتن خودتراکم که خالی از هرگونه ماده معدنی اضافه می‌باشد اثرات مخرب مقاومتی در طول عمر سازه به‌وجود خواهد آورد.

میزان افت مقاومت فشاری بتن حاوی میکروسیلیسی و حاوی ترکیب میکروسیلیس- سرباره عدد بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشد، و از طرفی اختلاف نسبتا زیاد با افت مقاومت فشاری دو طرح دیگر، انتخاب این دو طرح را برای محیط‌های دریایی که تنها بر معیار مقاومتی قضاوت می‌شوند، در اولویت قرار می‌دهد.

همانطور که انتظار می‌رفت، افت مقاومت و تخریب بتن در ناحیه جزرومد شدیدتر از ناحیه غوطه‌وری می‌باشد. مقاومت در برابر این افت مقاومت فشاری در بتن میکروسیلیسی بسیار خوب ارزیابی می‌شود.

در شکل ۸ نمودار درصد افت مقاومت در دو محیط دریایی مورد بررسی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، طرح حاوی میکروسیلیس و میکروسیلیس-سرباره مقاومت خوبی در برابر افزایش تخریب ناشی از محیط جزرومدی نسبت به تخریب محیط غوطه‌وری داشته است.

اعداد بدست آمده در خصوص افت مقاومت فشاری برای نمونه بتن سیلیسی در شرایط جزر و مدی با نتایج تحقیقات گذشته با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵که این میزان را ۸/۸ درصد برای آب دریاچه ارومیه تعیین کرده بوده است [۲۲] نزدیکی دارد. این میزان برای بتن شاهد برابر ۱۳/۳ درصد گزارش شده بود که مطابقت مناسبی با نتایج تحقیق حاضر (۱۴/۱٪) دارد.



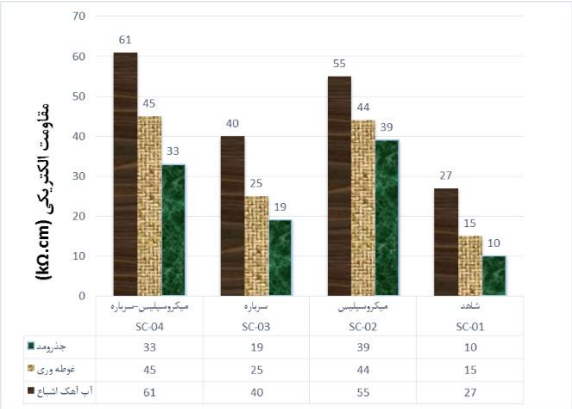
شکل ۸- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها در دو محیط دریایی درنظر گرفته شده

۳-۳- آزمایش مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی به‌عنوان اولین معیار دوامی در این پژوهش سنجیده شده است. دوام بتن خودتراکم و وابستگی زیادی به ریز ساختار آن مانند میزان منافذ، توزیع و شکل ارتباطات بین آنها دارد. هرچه شبکه فضای خالی بتن ریزتر و با ارتباطات کمتر باشد نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد و یک ساختار متخلخل با میزان بالای ارتباطات داخلی بین ذرات باعث نفوذپذیری زیاد و کاهش دوام میشود.

دستگاه مورد استفاده جهت آزمایش، دستگاه دارای ۴ الکترود بوده که در یک خط مستقیم و به یک فاصله واقع شده اند. دو الکترود داخلی دستگاه اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد شده را محاسبه کرده و دو الکترود خارجی جریان متناوب را به سطح بتن وارد می‌کند. در این پژوهش سن ۹۰ روز به عنوان سن اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن در نظر گرفته شده است. میانگین قرائت‌های صورت پذیرفته توسط دستگاه از ۲ آزمونه استوانه‌ای ۲۰×۱۰ سانتی‌متر تعیین کننده مقامت الکتریکی بتن می‌باشد.

مقاومت الکتریکی معیاری از تخلخل و میزان حفرات درون ریزساختار بتن است. مقاومت الکتریکی در سن ۹۰ روز بر روی نمونه‌های بتنی استوانه شکل آزمایش شده است. در شکل ۹، نتایج به‌دست آمده در شرایط محیطی آب آهک اشباع، غوطه‌وری و جزرو مد نشان داده شده است.



شکل ۹- مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در شرایط محیطی درنظر گرفته شده

با توجه به نتایج مقاومت الکتریکی، بتن شاهد در شرایط عمل‌آوری معمول دارای مقاومت الکتریکی بسیار کمی است. تهاجم یون کلر به این طرح مخلوط موجب افت شدید در آن شده است. غوطه‌وری ۴۴ درصد و جزرومد ۶۲ درصد کاهش مقاومت الکتریکی به وجود آورده است. این نوع بتن در بین طرح مخلوط-های در هر سه محیط دارای کمترین عدد مقاومت الکتریکی است. قرار گرفتن نمونه‌های در معرض آب نمک با غلظت شدید محیط خلیج فارس موجب نفوذ و ایجاد حفرات پوک در بتن می‌شود. کاهش شدید مقاومت الکتریکی در بتن بدون مواد پودری نشان دهنده عدم حفظ انسجام شبکه تراکمی درون بتن پس از حملات کلرایدی می‌باشد.

بتن حاوی میکروسیلیس- سرباره بدلیل قدرت پرکنندگی بالای میکروسیلیس و سرباره دارای بیشترین عدد مقاومت الکتریکی می-باشد. این طرح مخلوط در برابر حملات کلرایدی دچار کاهش مقاومت شده است، اما نرخ این کاهش به اندازه تأثیر در بتن معمول نمی‌باشد.

در محیط غوطه‌وری عملکرد این طرح مخلوط از همه مطلوب‌تر بوده اما در محیط جزرومد عملکرد بتن حاوی میکروسیلیس مناسب‌تر بوده است. دلیل این امر ممکن است در ناپیوستگی شرایط محیطی در زمان جزر و مد و ایجاد چرخه‌های ترو خشک شدن می‌باشد. این عدم یکنواختی در بتن حاوی سرباره تاثیر مخرب شدیدی به وجود آورده است.

بیشترین اثر تخریبی در بتن شاهد مشاهده می‌شود. پس از آن بتن حاوی سرباره دارای درصد افت مقاومت الکتریکی ۵۲ در شرایط جزرومد و ۳۷ در شرایط غوطه‌وری می‌باشد. طرح مخلوط حاوی میکروسیلیس با درصد افت ۴۳ و ۲۰ درصد بهترین عملکرد را دارا می‌باشد. بتن میکروسیلیس سرباره در شرایط غوطه‌وری دارای بهترین مقاومت الکتریکی بوده، اما در چرخه‌های تروخشک شدن نسبت به بتن حاوی میکروسیلیس ضعیف‌تر بوده است.

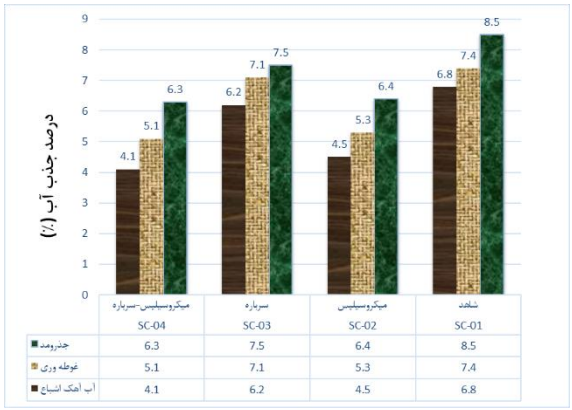
فرآیند شیمیایی ضعیف سرباره در واکنش‌های درون بتن نسبت به میکروسیلیس موجب می‌شود حملات کلرایدی تأثیر بیشتری روی این نمونه بتن داشته باشد.

۳-۴-آزمایش جذب آب حجمی بتن

حجم منافذ در بتن به وسیله جذب آب حجمی سنجیده می‌شود. جذب آب را معمولاً به وسیله خشک نمودن آزمونه تا جرم ثابت و غوطه‌ور کردن آن در آب و سنجش افزایش جرم، به صورت درصدی از جرم خشک می‌سنجند. بتن‌های مطلوب، دارای جذب آب پایین‌تر از ۱۰ درصد جرمی است [۱۲]. آزمایش جذب آب حجمی مطابق با استاندارد ASTM C 642 [۱۹] بر روی نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه انجام شد (شکل ۱۰). مطابق این استاندارد، جذب آب حجمی بتن به‌صورت درصد وزنی بر روی آزمونه‌های آزمایشگاهی استوانه‌ای که به‌صورت قرص‌های بتنی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ سانتی متر برش داده شده، به دست آمده است.

شکل ۱۰- آزمایش جذب آب حجمی بتن

نتایج آزمایش در نمودار شکل ۱۱ که بیانگر درصد جذب آب حجمی می‌باشد، ارایه شده است. بطور کلی مشاهده می‌شود که شرایط غوطه‌وری در آب نمک و جزرومد تأثیر چشمگیری در افزایش نفوذپذیری نمونه‌های بتنی در آزمایش جذب آب حجمی داشته است.



شکل ۱۱- نتایج آزمایش جذب آب حجمی در شرایط مختلف محیطی

این موضوع بیانگر افزایش خلل و فرج و فضاهای خالی با قرار گرفتن در شرایط مخرب خلج فارس است. عدم تکمیل فرایند شیمیایی سخت شدن سیمان و مواد پودری در مواجه با شرایط حملات کلرایدی موجب افزایش درصد حفرات در بتن می‌شود. در این آزمون، نمونه‌های نگهداری شده در آب معمولی طرح شاهد بیشترین جذب آب را داشته که از قبل قابل پیش‌بینی بود.

سه طرح مخلوط حاوی میکروسیلیس، سرباره و ترکیب میکروسیلیس سرباره نیز باتوجه به پایین بودن درصد جذب آب آنها، با اختلاف بسیار کمی در یک سطح قرار می‌گیرند. در نهایت طرح حاوی میکروسیلیس-سرباره، کمترین میزان جذب آب حجمی را داشته است.

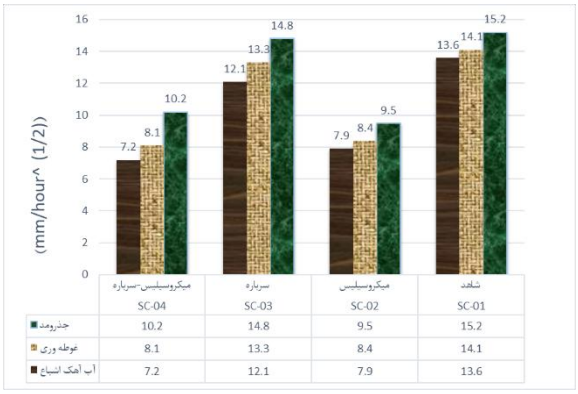
درصد جذب آب حجمی و به دنبال آن درصد حفرات با اعمال شرایط غوطه‌وری و جزرومد افزایش پیدا می‌کند. روند این افزایش مشابه با شرایط محیطی آب آهک اشباع است اما شدت آن در شرایط جزرومد بسیار بیشتر است. این مسأله بیانگر بالا رفتن نرخ نفوذپذیری به داخل بتن با قرارگیری در معرض محیط‌های کلرایدی و در نتیجه پایین آمدن طول عمر و دوام بتن است. دو طرح مخلوط میکروسیلیس و میکروسیلیس-سرباره عملکرد بسیار خوبی در مقابل حملات کلرایدی داشته و دچار کمترین تأثیر منفی در نفوذپذیری شده است.

۳-۵-آزمایش جذب آب موئینه بتن

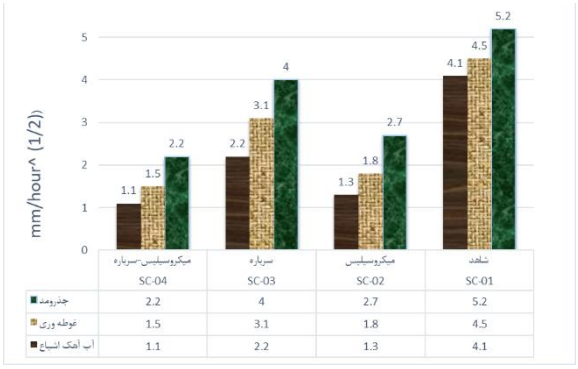
آزمایش جذب آب موئینه بر اساس استاندارد ملی ایران ۱۹۸۹۵ [۲۰]، در سن ۹۰ روزه برروی یک قرص استاندارد با قطر ۱۰۰ میلیمتر و طول ۵۰ میلیمتر انجام شده است (شکل ۱۲). اساساً در آزمایش جذب آب موئینه، نرخ جذب به وسیله بالا رفتن آب در لوله‌های موئینه در یک نمونه بتنی که بر روی تکیه‌گاه‌های کوچکی به صورتی قرار دارد که فقط ۱ تا ۳ میلیمتر تحتانی منشور در آب مستغرق است، تعیین می‌گردد.

شکل ۱۲- نمونه‌های آزمایشگاهی برای آزمایش جذب آب موئینه بتن

جذب آب مویینه در دو حالت اولیه و ثانویه اندازه گیری می‌شود که جذب آب اولیه در زمان ۶ ساعت از پایان سن مورد نظر آزمونه، و جذب آب ثانویه در مدت زمان ۷ الی ۹ روز پس از سن آزمونه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پژوهشگران اغلب جذب آب موئینه ثانویه را مورد تحلیل و بررسی قرار می‌دهند. نتایج بدست آمده برای جذب آب موئینه اولیه و ثانویه در نمودار شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۳- جذب آب مویینه اولیه بتن در محیط‌های مورد بررسی



شکل ۱۴- جذب آب مویینه ثانویه بتن در محیط‌های مورد بررسی

طرح مخلوط حاوی میکروسیلیس کمترین نرخ جذب آب اولیه و ثانویه، و طرح مخلوط شاهد، بیشترین نرخ جذب آب را داشته است. طرح حاوی سرباره به جهت بسته شدن کانال‌های موئین پس از جذب آب اولیه، خود را متفاوت نشان می‌دهد و با طرح حاوی میکروسیلیس در رده مشابهی از نظر جذب آب قرار گرفته‌اند. در شرایط جزر و مدی جذب آب مویینه ثانویه رشد قابل‌توجهی (بیش از دو برابر) نسبت به شرایط غوطه وری در آب دریا داشته اند.

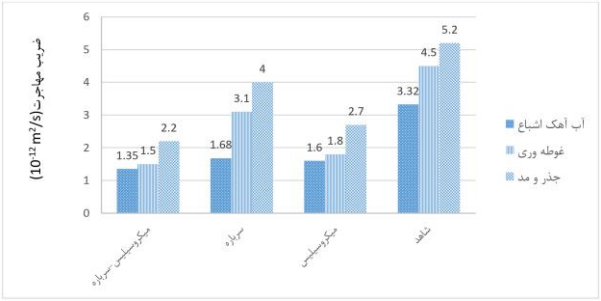
۳-۶- آزمایش مهاجرت یون کلراید

آزمایش نفوذ کلرید در بتن سخت‌شده حاوی سیمان هیدرولیکی با روش مهاجرت سریع (RCMT) مطـــــابق NT BUILD 492 [۲۱] به منظور طبقه‌بندی بتن بر اساس سهولت نفوذ یون‌های کلرید در بتن، مورد استفاده قرار گرفته که این آزمون بیانگر نشانه‌ای از امکان خوردگی میلگرد مدفون در بتن ناشی از ورود کلرید است. این آزمایش در سن ۹۰ روز بر روی نمونه‌ها و بر اساس استاندارد کانادا انجام گرفت. دلیل انتخاب سن ۹۰ روز برای انجام آزمایش RCMT، فعالیت پوزولانی بیشتر مواد جایگزین شده می‌باشد. در شکل ۱۵ نمونه و دستگاه انجام آزمایش قابل مشاهده است.

شکل ۱۵- نمونه‌ها و دستگاه انجام آزمایش مهاجرت یون کلراید

نمونه بتنی جهت آزمایش به‌صورت قرص‌های بتنی با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر برش خورده است و سپس درون سلول‌های دستگاه قرار داده شده است.

درشکل ۱۶ ضریب مهاجرت یون کلراید در نمونه در سه محیط درنظر گرفته شده نشان داده شده است. طبیعتا هر چقدر در بتن تراکم بیشتری ایجاد شود، و منافذ بدلیل فشردگی بسته شود، نفوذ یون کلراید سخت‌تر خواهد شد. از این‌رو ورود ذرات ریز تر از ذرات سیمان به مخلوط بتنی موجب بسته شدن منافذ و تراکم بالاتری خواهد شد. میکروسیلس و سرباره هر دو دارای ذرات ریزتر از سیمان می‌باشند. به همین دلیل نتایج بدست آمده از آزمایش نرخ مهاجرت یون کلراید نشان می‌دهد مخلوط‌های بتنی دارای میکروسیلیس و سرباره دارای عمق نفوذ بسیار کمتری نسبت به مخلوط حاوی سیمان به تنهایی می‌باشد که این نتیجه با یافته های تحقیقات قبلی [۲۳] تطابق دارد. نتایج نشان می دهد که جایگزینی میکروسیلیس و سرباره به جای سیمان منجر به کاهش عمق نفوذ و بنابراین کاهش نفوذپذیری بتن می‌گردد. از طرفی در نتایج این پژوهش مشخص شده که ترکیب میکروسیلیس–سرباره دارای عمق نفوذ بسیار کمتر و ساختار فوق العاده فشرده است.



شکل ۱۶- ضریب مهاجرت یون کلرید در سه محیط مورد بررسی

عمق نفوذ یون‌های کلرید در کلیه طرح مخلوط‌ها تحت شرایط جزر و مدی و غوطه‌وری بیشتر از حالت معمول نگهداری می‌باشد. همچنین عمق نفوذ یون‌های کلرید در کلیه طرح مخلوط‌ها تحت شرایط جزرومدی بیشتر از حالت غوطه‌وری است، که این مسئله را می‌توان به خشک شدن سطحی نمونه‌های بتنی در این شرایط محیطی مربوط دانست.

۴- نتیجه‌گیری

با درنظر گرفتن آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق و بررسی و مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها، موارد ذیل را می‌توان به‌عنوان نتیجه بیان نمود.

- تمامی طرح اختلاط‌ها در محیط آب دریا دچار افت مقاومت فشاری شده اند. بتن شاهد بیشترین افت و طرح اختلاط حاوی میکروسیلیس کمترین افت مقاومت فشاری را در محیط غوطه‌وری کسب کرده است. طرح مخلوط حاوی میکرو سیلیس- سرباره با وجود کسب بیشترین مقاومت فشاری در محیط آب آهک اشباع، در محیط شبیه سازی شده دریا دچار افت مقاومت نسبت به بتن حاوی میکروسیلیس شده است. تمامی طرح اختلاطها در برابر

سیکل‌های تر و خشک شدن دچار افت مقاومت فشاری شده اند. نمونه شاهد بیشترین افت را نشان می‌دهد. طرح مخلوط حاوی میکروسیلیس نیز کمترین افت مقاومت فشاری کسب کرده است.

- کاهش شدید مقاومت الکتریکی در بتن بدون مواد پودری در محیط دریایی مشاهده شد. بتن حاوی میکروسیلیس- سرباره بدلیل قدرت پرکنندگی بالای میکروسیلیس و سرباره دارای بیشترین عدد مقاومت الکتریکی می‌باشد. این طرح اختلاط نیز دچار کاهش مقاومت شده، اما نرخ این کاهش به اندازه کاهش در بتن شاهد نمی‌باشد. در محیط غوطه‌وری عملکرد این طرح اختلاط از همه مطلوب‌تر بوده، اما در محیط جزرومد عملکرد بتن حاوی میکروسیلیس مناسب‌تر بوده است.

- شرایط غوطه‌وری در آب نمک و جزرومد تأثیر چشمگیری در افزایش نفوذپذیری نمونه‌های بتنی در آزمایش جذب آب حجمی داشته است. درصد جذب آب حجمی با اعمال شرایط غوطه‌وری و جزرومد افزایش پیدا می‌کند. روند این افزایش مشابه با شرایط محیطی آب آهک اشباع است، اما شدت آن در شرایط جزرومد بسیار بیشتر است. دو طرح مخلوط میکروسیلیس و میکروسیلیس سرباره عملکرد بسیار خوبی در مقابل حملات کلرایدی داشته و دچار کمترین تاثیر منفی در عدم نفوذپذیری شده است. وجود شرایط جزرومد در افزایش نفوذپذیری بسیار بیشتر از شرایط غوطه‌وری اثر منفی گذاشته است. همچنین نرخ جذب آب موئینه دارای روندی مشابه نمودار جذب آب حجمی است.

- مخلوط‌های بتنی دارای میکروسیلیس و سرباره دارای عمق نفوذ بسیار کمتری نسبت به مخلوط حاوی سیمان به تنهایی می‌باشد. جایگزینی میکروسیلیس و سرباره به جای سیمان منجر به کاهش عمق نفوذ و بنابراین کاهش نفوذ پذیری بتن می‌گردد. از طرفی مشاهده شد که ترکیب میکروسیلیس-سرباره دارای عمق نفوذ بسیار کمتر و ساختار فشرده است.

- عمق نفوذ یون‌های کلرید در کلیه طرح مخلوط‌ها تحت شرایط جزر و مدی و غوطه‌وری بیشتر از حالت معمول نگهداری می‌باشد. همچنین عمق نفوذ یون‌های کلرید در کلیه طرح مخلوط‌ها تحت شرایط جزرومدی بیشتر از حالت غوطه‌وری است.

به‌طور کلی میتوان ارزیابی نمود که استفاده از بتن پیشنهادی بطور میانگین موجب افزایش ۲۲ درصدی مقاومت فشاری، ۵۰ درصدی مقاومت الکتریکی و کاهش نفوذپذیری ۱۲ درصدی جذب آب حجمی و ۳۰ درصدی جذب آب موئینه در شرایط محیطی جزرومدی شده است.

۵- مراجع

[۱]. شکرچی زاده م.، علی لیبر ن.، دهقان مروستی س.، پورضرابی ع.، افزودنی‌های شیمیایی بتن، دانش، فناوری و کاربردها، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، نشر علم و ادب، ۱۳۹۱

[۲]. صفری ا.، شکرچی زاده م.، نعمتی چاری م.، بررسی اثر چرخه‌های جزر و مد بر نفوذ یون کلراید در بتن، ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ۱۳۹۳.

[۳]. رمضانیان پور ع.، قدوسی پ. ، گنجیان ا.، ریز ساختار، خواص و اجزای بتن، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران،۱۳۹۱.

[4]. Chander Mohan Kansal, Rajesh Goyal, Effect of nano silica, silica fume and steel slag on concrete properties, Materials Today: Proceedings, 2021.

[5]. Nurul Hidayah Roslan, Mohammad Ismail, Nur Hafizah A. Khalid, Bala Muhammad, Properties of concrete containing electric arc furnace steel slag and steel sludge, Journal of Building Engineering, Volume 28, 2020.

[6]. M.H. Lai, Jiajun Zou, Boyu Yao, J.C.M. Ho, Xin Zhuang, Qing Wang, Improving mechanical behavior and microstructure of concrete by using BOF steel slag aggregate, Construction and Building Materials, Volume 277, 2021.

[7]. Takada, K, pelova, G.I. and Walraven, J.C., Influences of Mixing Efficiency on the Mixture Proportions of General Purpose Self-Compacting Concrete, Sherbrook publication, Quebec University, 1998.

[8]. Khandaker H., Anwar M., Pumice based blended cement concretes exposed to marine environment: effects of mix composition and curing conditions, Cement and Concrete Composites, Vol. 30.2, 2008.

[9]. Newlands M.D., Jones M.R., Kandasami S., Harrison T.A., Sensitivity of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical resistivity of concrete, Materials and Structures, 41(4), 2007

[10]. Bondar D., Lynsdale C., Milestone N., Hassani N., Ramezanianpour A.A., Engineering properties of alkali-activated natural pozzolan concrete, ACI Materials Journal 108.1, 2011.

[۱۱]. شکرچی زاده م.، ولی پور م. و پرگر ف.، بررسی خوردگی در آزمونه‌های بتنی مسلح با نسبت آب به سیمان مختلف واقع در

شرایط رویارویی پاشش در منطقه خلیج فارس، مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز ۱، ۴۳ (۱۳۹۲): ۶۳-۶۹.

[12]. Da Silva, P.R., de Brito, J., Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. Mater Struct 49, 2749–2766, 2016.

[13]. Puriyamehr E., Ghoveimy K., Proportions of Lightweight Self-Compacting Concrete white pumice, Cement and Concrete Composites, 30.2, 2017.

[14]. Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., León, N., Sánchez- Espinosa E., Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. Construc. Build. Mat. 165, 93–103, 2018.

[15]. Wei, J., Wang, CG., Wei, X. et al. Corrosion Evolution of Steel Reinforced Concrete Under Simulated Tidal and Immersion Zones of Marine Environment. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.) 32, 900–912, 2019.

[16]. Reyes E., Massana J., Peralta F.A., Leóna N., Moraguesa A., Behaviour of a high-performance self-compacting concrete (HPSCC) with ternary mixtures of nano-and microsilica in the presence of chlorides, Materiales de Construcción 70(339):221, 2020.

[17]. ASTM C494 / C494M-04, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

[۱۸]. اندازه گیری جریان اسلامپ بتن خودتراکم- روش آزمون- استاندارد ملی INSO-11270

[19]. ASTM C642-13 - Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

[۲۰]. استاندارد INSO 19895، بتن – اندازه گیری نرخ جذب آب بتن‌های حاوی سیمان هیدرولیکی – روش آزمون، سازمان ملی استاندارد، ۱۳۹۳.

[21]. NT BUILD 492, Standard Test Method The Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration, NordTest family of test methods, Canada,2014.

[۲۲]. محمودی الف.، افشین ح.، حکیم زاده ح.، و جلالی وحید د.، بررسی دوام بتن مسلح در محیط دریایی خورنده شدید بر حسب موقعیت قرارگیری بتن نسبت به تراز آب دریا، نشریه مهندسی دریا،سال پنجم، شماره ۱۰، پاییز و زمستان ۱۳۸۸.

[۲۳]. احمدی ب.، رمضانیانپور ع.، و سبحانی ج.، خوردگی میلگرد در بتن مسلح ترک خورده تحت بار در ناحیه جزر و مد خلیج فارس، اولین کنفرانس ملی دوام بتن،تهران، ۱۳۹۷.

Experimental Study of Durability of Self-compacting Concrete Containing Micro-silica and Slag in Persian Gulf Tidal Environment

Amir Hosein Rigi
MSC in Structural Engineering, Azad University Tehran North Branch.
Masoud Ziaei*
Assistant Professor, Engineering faculty, Garmsar University.

Abstract

Reinforced concrete structures on the shores of the Persian Gulf experience a severe corrosion environment, and in the case of the structures that are in tidal conditions or some of their members are submerged in the sea, such as piers and ports, this problem is more acute due to the penetration of chloride ions. To increase the efficient life of concrete structures in the Persian Gulf, the use of self-compacting concrete along with cement substitutes has been suggested by researchers. In this paper, two powdered materials, slag and micro-silica, have been selected to replace part of the cement content in concrete. The durability test in submerged and tidal conditions has been performed on the specimens. Based on the results of experiments on 216 concrete specimens, the use of the proposed concrete on average increases the compressive strength by 22%, electrical resistance by 50% and decreases the permeability of volumetric water absorption by 12% and capillary water absorption by 30% in tidal conditions.

Keywords: Self-compacting concrete, Tide, Slag, Micro silica, Persian Gulf.

* Corresponding Author: m.ziyaei@fmgarmsar.ac.ir