



دوام ملات‌های پوششی سیمانی و ژئوپلیمری در شرایط محیطی شبیه‌سازی شده خلیج فارس

فرامرز مودی، سالار لشکری، پوریا دشتی*

دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

کلمات کلیدی:

شرایط محیطی خلیج فارس

ملات پوششی پایه سیمانی

مواد جایگزین سیمان

ملات ژئوپلیمری

خلاصه: با توجه به اهمیت روزافزون سازه‌های ساحلی و وجود شرایط محیطی سخت و خورنده در محیط‌های ساحلی، تعمیر و نگهداری این سازه‌ها از اهمیتی بیش از پیش برخوردار شده است. یکی از راه‌های تعمیر و نگهداری این قبیل سازه‌ها اجرای لایه پوششی محافظ از ملات‌های پوششی است. در حالی که ملات‌های پایه سیمانی به عنوان رایج‌ترین مصالح برای تعمیر و نگهداری سازه‌های آسیب دیده شناخته می‌شوند، در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت آثار زیست‌محیطی و همچنین در راستای کاهش انرژی مصرفی استفاده از مواد جایگزین سیمان و ملات‌های ژئوپلیمری نیز در معرض توجه قرار گرفته‌اند. در تحقیق پیش رو خواص مکانیکی و دوام ۶ طرح ملات، شامل ۴ طرح ملات پایه سیمانی با جایگزینی سرباره کوره آهن گدازی و دوده سیلیس و ۲ طرح ملات ژئوپلیمری با پایه سرباره کوره آهن گدازی و دوده سیلیس که در محیط شبیه‌سازی شده خلیج فارس عمل‌آوری شده‌اند، مقایسه شده است. در این راستا جهت مقایسه خواص مکانیکی از آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی کششی و جمع‌شدگی و جهت ارزیابی دوام از آزمایشات جذب آب مویینه، نفوذ آب تحت فشار و مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید در سنین مختلف استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ملات‌های پایه سیمانی ۳ جزئی که دارای مقادیر بیشتری از مواد جایگزین سیمان هستند، می‌توانند گزینه بهتری نسبت به ملات‌های پایه سیمانی ۲ جزئی و ملات‌های تعمیراتی ژئوپلیمری برای تعمیر سازه‌های بتنی آسیب دیده در مناطق ساحلی نظیر سواحل خلیج فارس باشند. در بین سایر مخلوط‌ها نیز مخلوط ژئوپلیمری با فعال‌ساز قلیایی پتاسیم هیدروکسید و مخلوط پایه سیمانی با جایگزین ۷/۵ درصد وزنی دوده سیلیس می‌توانند به عنوان گزینه‌های مناسب جهت ترمیم سازه‌های آسیب دیده معرفی گردند.

۱- مقدمه

شده است که خلیج فارس دارای اقلیمی خشن و محیطی بسیار مهاجم و دارای املاح و نمک‌های مخرب متعددی می‌باشد. به طوری که میزان یون‌های کلراید آب خلیج فارس حدود PPM ۲۳۳۰۰ و میزان سولفات آن حدود PPM ۳۲۶۴ است [۲ و ۱]. دما و درجه حرارت محیط‌های دریایی به عنوان یک عامل مهم و تعیین‌کننده در میزان و سرعت واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی در سازه‌های بتنی محسوب می‌شود. برای سازه‌های بتنی واقع در آب و هوای گرم، حرارت ممکن است به عنوان یک فاکتور تشدیدکننده عمل کند، زیرا گرما یک منبع محرک انرژی است که هم‌آغاز حمله و هم پیشرفت آن را در جریان مکانیسم خرابی‌ها شتاب می‌بخشد [۳ و ۴]. تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که بخش‌هایی از سازه‌های دریایی که تحت اثر جزر و مد و پاشش آب دریا واقع می‌شوند، یکی از مناطق بسیار مستعد از لحاظ فعالیت‌های خوردگی و زوال زود هنگام بتن می‌باشند، به طوری که بیشترین خرابی سازه‌های دریایی در نواحی گرم و در این مناطق و در حدود

امروزه سواحل دریایی به دلیل اهمیت ویژه‌ای که در صنعت حمل و نقل و تجارت دارند، نقش مهمی در اقتصاد کشورها ایفا می‌کنند. سواحل جنوبی ایران نظیر سواحل خلیج فارس و دریای عمان علاوه بر نقش ویژه‌ای که در صنعت حمل و نقل دارند، به دلیل منابع سرشار نفت و گاز اهمیت دوچندانی می‌یابند. از این رو در جهت رونق بیش از پیش اقتصاد کشور، نیاز به احداث سازه‌های ساحلی متعدد نظیر اسکله‌ها، سکوه‌های نفتی، موج‌شکن‌ها و سازه‌هایی از این دست و نیز تعمیر و نگهداری سازه‌های آسیب دیده حس می‌گردد.

از چالش‌های مهم پروژه‌های بندرسازی در کشور خصوصاً در حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، تامین دوام و پایایی بتن تحت شرایط محیطی مخرب این منطقه می‌باشد. با توجه به بررسی‌ها و مطالعات صورت گرفته، مشاهده

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fmoody@aut.ac.ir



کمتر از ۱۰ سال پس از ساخت ایجاد شده‌اند [۵ و ۶]. از عوامل تاثیرگذار دیگر نیز میزان رطوبت است که به عنوان یک عامل مهم برای شروع فرآیندهای خوردگی و پیشرفت آن در بتن مسلح شناخته می‌شود. رطوبت محیط‌های دریایی تاثیر شایانی بر زمان شروع خوردگی آرماتور می‌گذارد، به طوری که بر نفوذ اکسیژن و دی اکسید کربن اثرگذار بوده و از شرایط لازم اولیه برای نفوذ کلراید از طریق انتشار است [۷ و ۸].

تحقیقات متعددی که در گذشته انجام شده‌اند، نشان می‌دهند که نفوذپذیری بتن که سبب ورود مواد مهاجم خورنده نظیر یون‌های کلراید، کربنات، سولفات و ... به ساختار بتن می‌شود، مهم‌ترین عامل کاهش دوام سازه‌های بتن آرمه در محیط‌های مخرب می‌باشد. از این رو اگر بتوان بتنی ساخت که دارای نفوذپذیری کمتری باشد و املاح به راحتی در آن نفوذ نکنند، دوام بتن بالاتر خواهد بود. در تعمیر سازه‌های بتن آرمه آسیب دیده در شرایط محیطی مخرب نیز ملات‌های ترمیمی علاوه بر الزامات مکانیکی و سازگاری باید حداقل میزان نفوذپذیری را دارا باشند تا بتوانند دوام مدنظر سازه را تامین کنند. همچنین استفاده از مواد جایگزین سیمان به دلیل فعالیت پوزولانی و خاصیت پرکنندگی که دارند سبب کاهش نفوذپذیری می‌شوند. به عنوان مثال نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از سرباره در ساختار ملات منجر به ایجاد ساختاری با حفره‌های ریزتر و تغییرات ریزساختار در فصل مشترک سنگدانه و سیمان می‌شود که در مجموع باعث کاهش نفوذپذیری می‌گردد [۹]. دوده سیلیس نیز یکی از بهترین مواد جایگزین سیمانی است که استفاده از آن در طرح اختلاط تاثیر زیادی بر روی نفوذپذیری ترکیبات پایه سیمانی می‌گذارد [۹].

ترکیبات ژئوپلیمری که از فعال‌سازی قلیایی مواد معدنی حاوی سیلیسیوم و آلومینیوم به دست می‌آیند، مصالح ساختمانی نسبتاً جدیدی هستند که به دلیل خاصیت چسبانندگی بالایی که دارند می‌توانند جایگزین ترکیبات پایه سیمانی شوند [۱۰ و ۱۱]. ترکیبات ژئوپلیمری به دلیل استفاده از محصولات جنبی صنایع نظیر سرباره کوره آهن‌گدازی و عدم نیاز به حرارت بالا برای تولید به عنوان یک ماده دوست‌دار محیط زیست شناخته می‌شوند. این مواد در تحقیقات بسیاری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و با ویژگی‌هایی نظیر مقاومت فشاری بالا [۱۲ و ۱۳]، مقاومت در برابر اسیدها، یون‌های کلراید و سولفات [۱۴ و ۱۵]، مقاومت حرارتی تا دماهای حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد [۱۶] و مقاومت بالا در برابر ذوب و یخ‌بندان [۱۷ و ۱۸] شناخته می‌شوند. در تحقیقات جعفری و همکاران گزارش شده است که با استفاده از محلول فعال ساز پتاسیم هیدروکسید با غلظت ۶ و ۸ مولار می‌توان

ترکیبات ژئوپلیمری با مقاومت فشاری بیشتر ساخت [۱۹]. معینی و همکاران نیز در تحقیقات خود ویژگی‌های مکانیکی و خصوصیات دوامی و چسبندگی پوشش‌های ژئوپلیمری حاوی درصد‌های مختلف دوده سیلیس و نانوسیلیس را مورد بررسی قرار دادند [۲۰]. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از ترکیبات ژئوپلیمری خصوصاً ترکیبات حاوی دوده سیلیس و نانو سیلیس ضریب مهاجرت یون‌های کلراید را کاهش داده و سبب افزایش مقاومت چسبندگی کششی ملات پوششی به بتن بستر می‌گردد. در تحقیق دیگری داکسون و همکاران بر روی تاثیر غلظت سدیم هیدروکسید در نفوذ یون‌های کلراید در بتن‌های ژئوپلیمری واقع در محیط‌های دریایی تحقیق کردند [۲۱]. با توجه به نتایج حاصل از تعیین پروفیل نفوذ یون‌های کلراید نمونه‌هایی که به مدت ۳ سال در محیط دریایی و در ناحیه جزر و مد قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود که افزایش غلظت سدیم هیدروکسید موجب کاهش نفوذ یون‌های کلراید می‌گردد.

امروزه تعمیرات سازه‌های بتنی ساحلی که در اثر شرایط محیطی ساحلی آسیب دیده‌اند، از مسائل عمده کشورهای مختلف جهان در دهه‌های اخیر بوده است. مطابق آنچه که گفته شد خوردگی آرماتور ناشی از نفوذ یون‌های کلراید در مناطق ساحلی از جمله سواحل جنوبی ایران یکی از علل مهم خرابی سازه‌های بتنی می‌باشد. مهم‌ترین کار پس از تشخیص علت خرابی در این سازه‌ها، انتخاب مواد و مصالح تعمیراتی مناسب است که اساسی‌ترین ویژگی مورد نیاز آن‌ها نفوذپذیری کم و چسبندگی بالا به سطح بتن بستر می‌باشد. با توجه به تحقیقات مختلف صورت گرفته، استفاده از ملات پایه سیمانی با جایگزینی درصد‌های مختلف سرباره کوره آهن‌گدازی و دوده سیلیس به جای سیمان پرتلند و ملات ژئوپلیمری می‌تواند از گزینه‌های مناسب برای کاربرد در تعمیرات سازه‌های آسیب دیده بر اثر تهاجم یون‌های کلراید و خوردگی آرماتور باشد.

با توجه به مطالب مطرح شده و نیاز چشمگیر به مصالح تعمیراتی که علاوه بر دوام بالا در برابر تهاجم یون‌های کلراید، باید صرفه اقتصادی نیز داشته باشند، نیاز به مطالعات بیشتر را افزایش داده است. بیشتر پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینه دوام در محیط‌های ساحلی صورت گرفته است، از نمونه‌های بتنی استفاده شده و ملات‌های ترمیمی کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این تا به حال، پژوهش آزمایشگاهی برای مقایسه دوام پوشش‌های ملات پایه سیمانی و پایه ژئوپلیمری در شرایط شبیه‌سازی خلیج فارس صورت نگرفته است. لذا نتایج این تحقیق می‌تواند گام موثری برای

جدول ۱. ترکیب شیمیایی مصالح سیمانی مورد استفاده

Table 1. Chemical properties of Cementitious materials

LOI	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۲/۱	۰/۵۴	۰/۱۸	۲/۷	۶۳/۲۲	۳/۵۱	۴/۱۲	۲۲/۵۷	سیمان (%)
۰/۵	۱/۳۲	۰/۴۲	۰/۸۷	۰/۴۹	۰/۷	۱/۱	۹۴/۳	دوده سیلیس (%)
۰/۰۲	۰/۷	۰/۶۱	۸/۵۲	۳۶/۷۵	۱/۰۱	۱۱/۵۶	۳۷/۲۱	سرباره کوره آهن گدازی (%)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح سیمانی مورد استفاده

Table 2. Physical properties of Cementitious materials

چگالی (gr/cm ³)	ریزی در مقیاس بلین (cm ² /gr)	مصالح سیمانی مصرفی
۳/۱۴	۲۹۶۲	سیمان
۲/۲۱	۱۹۲۰۰۰ (به روش BET)	دوده سیلیس
۲/۷۹	۳۳۸۳	سرباره کوره آهن گدازی

جدول ۳. فعالیت پوزولانی سرباره کوره آهن گدازی

Table 3. Pozzolanic activity of furnace slag

فعالیت پوزولانی ۲۸ روزه	فعالیت پوزولانی ۷ روزه	درصد جایگزینی	ماده جایگزین سیمان
۷۷	۵۹	۵۰	سرباره کوره آهن گدازی

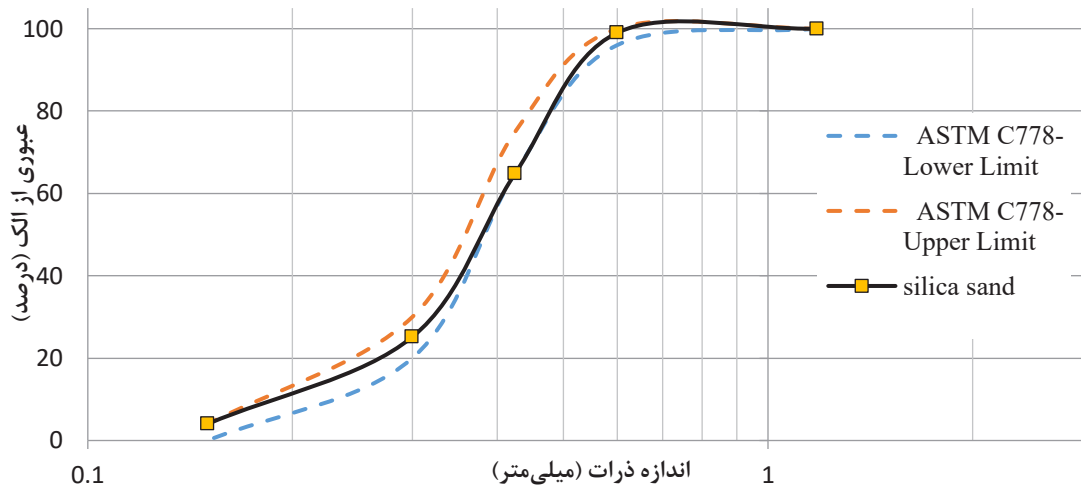
ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان استفاده از سیمان نوع ۲ همراه مواد مکمل سیمانی را برای شرایط خورنده سواحل جنوبی کشور مشخص کرده‌اند، لذا در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع ۲ و دوده سیلیس و سرباره کوره آهن گدازی به عنوان مواد جایگزین سیمان در ساخت نمونه‌های ملات پایه سیمانی و پایه ژئوپلیمری استفاده شده است که ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی هر یک از آن‌ها به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ گزارش شده است. علاوه بر این بر اساس استاندارد ASTM C989 [۲۲] فعالیت پوزولانی سرباره کوره آهن گدازی تعیین و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

انتخاب نهایی بین این مصالح برای سازه‌های آسیب دیده باشد. از این رو در این پژوهش اثر دوده سیلیس و سرباره کوره آهن گدازی در بهبود دوام ملات‌های پوششی با پایه سیمانی نگهداری شده در محیط شبیه‌ساز شرایط خلیج فارس در برابر تهاجم یون‌های کلراید مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با ۲ نوع ملات ژئوپلیمری با طرح مخلوط رایج مقایسه شده است.

۲- برنامه آزمایش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح

با توجه به اینکه ضوابط مختلف کشور شامل آیین‌نامه آبا و آیین‌نامه



شکل ۱. دانه‌بندی ماسه مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C33.

Fig. 1. Gradation curve of sand according to ASTM C33

نگهداری شده در شرایط شبیه‌سازی شده خلیج فارس می‌باشد. با بررسی پژوهش‌های صورت گرفته و طرح مخلوط‌های برتر معرفی شده با در نظرگیری کمترین مقدار نفوذپذیری و به تبع آن بیشترین دوام در برابر شرایط محیطی مخرب خلیج فارس در این پژوهش‌ها [۲۴-۲۶]، ۴ طرح مخلوط ملات پایه سیمانی با جایگزینی درصد‌های مختلف سرباره و دوده سیلیس به عنوان طرح‌های نهایی انتخاب شده‌اند. در مخلوط‌های انتخابی عیار مواد سیمانی برابر با ۷۲۰ کیلوگرم و نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. در اکثر مراجع نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۳ به عنوان نسبت بهینه برای دستیابی به نفوذپذیری کمتر، مقاومت فشاری بیشتر و انجام کامل فرآیند هیدراسیون سیمان می‌باشد. علاوه بر طرح مخلوط شاهد، سه طرح مخلوط مختلف که به ترتیب حاوی ۷/۵ درصد وزنی دوده سیلیس (SF)، ۳۰ درصد وزنی سرباره کوره آهن‌گدازی (SI) و ترکیب ۷/۵ درصد وزنی دوده سیلیس و ۳۰ درصد وزنی سرباره کوره آهن‌گدازی ساخته شدند. از آنجایی که استفاده از مواد جایگزین سیمان خصوصا دوده سیلیس سبب کاهش کارایی مخلوط‌های پایه سیمانی می‌شوند، سعی شده است تا با افزودن درصد مناسب از فوق روان کننده میزان کارایی به دست آمده از آزمایش میز جریان در بازه ۱۵۰ الی ۱۷۰ میلی‌متر نگه داشته شود. در جدول ۴ طرح مخلوط نهایی نمونه‌های ملات پایه سیمانی ذکر شده، نشان داده شده است.

از آنجایی که طرح مخلوط‌های در نظر گرفته شده برای این پژوهش به صورت ملات می‌باشند، لذا سنگدانه مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های ملات در این پژوهش، ماسه سیلیسی بوده که به منظور دستیابی به دانه‌بندی استاندارد ارائه شده در ASTM C778 [۲۳] مقدار ۹۲ درصد و ۸ درصد از دو رده دانه‌بندی مجزا با یکدیگر مخلوط گردیده که نمودار دانه‌بندی مخلوط حاصل در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین چگالی سنگدانه مصرفی برابر ۲/۶۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و درصد جذب آب آن در حالت اشباع با سطح خشک برابر ۱/۰۱ به دست آمده است.

همچنین سدیم هیدروکسید (سود سوزآور) و پتاسیم هیدروکسید (پتاس) که به صورت پرک تهیه شده و با آب مقطر ترکیب نموده و محلول‌های با غلظت ۶ مولار که به عنوان ماده فعال‌ساز شناخته می‌شوند، برای ساخت ملات‌های ژئوپلیمری استفاده شده‌اند. علاوه بر ۲ ماده فعال‌ساز قلیایی ذکر شده از سدیم سیلیکات (آب شیشه) با فرمول شیمیایی Na_2SiO_3 نیز به عنوان ماده فعال‌ساز ثانویه استفاده گردید.

آب مورد استفاده در بخش‌های مختلف نظیر ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، آب شرب تهران بوده است و از فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلات اثر اصلاح شده برای تأمین روانی مورد نیاز نمونه‌ها استفاده شده است.

۲-۲- طرح مخلوط نمونه‌های ملات با پایه سیمانی

مطابق با آنچه که ذکر گردید هدف اصلی این تحقیق مقایسه خواص مکانیکی و دوام پوشش‌های ملات تعمیری پایه سیمانی و ژئوپلیمری

جدول ۴. طرح مخلوط نمونه‌های ملات با پایه سیمانی

Table 4. Mixture proportion of cement-based mortars

نام طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان (kg/m^3)	دوده سیلیس (kg/m^3)	سرباره (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	درصد وزنی فوق	
							روان کننده	روانی (mm)
OPC	۰/۳۳	۷۲۰	-	-	۲۳۷/۶	۱۳۸۱	۰/۸	۱۷۰
7.5SF	۰/۳۳	۶۶۶	۵۴	-	۲۳۷/۶	۱۳۶۱	۱/۱	۱۶۰
30SI	۰/۳۳	۵۰۴	-	۲۱۶	۲۳۷/۶	۱۳۵۸	۰/۸	۱۶۰
7.5SF30SI	۰/۳۳	۴۵۰	۵۴	۲۱۶	۲۳۷/۶	۱۳۳۹	۱	۱۵۰

جدول ۵. طرح مخلوط نمونه‌های ملات ژئوپلیمری

Table 5. Mixture proportion of geopolymer mortars

نام طرح	نوع محلول	غلظت محلول (Mol)	وزن ماده پایه (kg/m^3)	درصد جایگزینی سرباره با دوده سیلیس	مدول سیلیکاتی	نسبت سیلیکات به محلول	نسبت فعال‌ساز به مواد پایه	نسبت ماسه به مواد پایه	نسبت آب به ذرات جامد
KOH	هیدروکسید پتاسیم	۶	۴۶۴	۵	۲/۳۳	۰/۴	۰/۶	۲/۷۵	۰/۴۹

۲-۳- طرح مخلوط نمونه‌های ملات ژئوپلیمری

همراه جایگزینی ۵ درصد آن با دوده سیلیس به عنوان ماده پایه برای این ۲ طرح در نظر گرفته شده‌اند. همچنین از محلول‌های هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم با غلظت ۶ مولار و نیز آب شیشه با مدول سیلیکاتی ۲/۳۳ به عنوان فعال‌ساز ترکیبات ژئوپلیمری استفاده شده است. در نهایت طرح‌های حاوی هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم به ترتیب با نام اختصاری NaOH و KOH نام‌گذاری شدند که جزئیات طرح مخلوط آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

در کنار پوشش‌های ملات با پایه سیمانی، ۲ طرح مخلوط ملات ژئوپلیمری که به عنوان طرح مخلوط بهینه در پژوهش‌های معینی و همکاران [۱۲] و جعفری [۲۷] که با در نظرگیری شرایط شبیه ملات‌های پایه سیمانی یعنی کمترین نفوذپذیری و دوام بالا در برابر حمله یون‌های کلراید معرفی شده بودند نیز برای مقایسه بهتر ملات‌های پایه سیمانی و ملات‌های ژئوپلیمری در این پژوهش در نظر گرفته شد. سرباره کوره آهن‌گدازی به

۲-۴- روش اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

برای اختلاط مصالح و ساخت ملات از مخلوط کن ۶۰ لیتری آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شد. در گام اول باید کلیه مصالح پیش‌بینی شده مطابق با اندازه‌های مورد نظر توزین گردند، سپس تمامی ماسه و سیمان به مدت ۱ دقیقه و به صورت خشک با یکدیگر مخلوط شده و پس از آن حدود دو سوم آب توزین شده به مخلوط‌کن اضافه شده و فرآیند اختلاط ۲ دقیقه ادامه می‌یابد. در نهایت نیز کلیه مصالح باقی‌مانده، یعنی حدود یک سوم آب، مواد جایگزین سیمان و فوق روان کننده نیز در ظرف جداگانه با یکدیگر مخلوط شده و به مخلوط‌کن اضافه می‌گردند و تا ۶ دقیقه دیگر اختلاط ادامه می‌یابد. سپس میزان روانی ملات آماده شده با استفاده از میز جریان و مطابق با استاندارد ASTM C230 [۲۸] اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت نیز قالب‌هایی که از قبل آماده شده‌اند، با استفاده از ملات آماده شده پر و به مدت ۲۴ ساعت تحت پوشش گونی مرطوب و یک لایه پلاستیکی نگهداری می‌شوند و پس از آن نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت یک هفته در محلول آب آهک اشباع نگهداری شده و سپس برای شبیه‌سازی شرایط محیطی خلیج فارس به محیط شبیه‌سازی شده خلیج فارس در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر انتقال یافته و تا سن آزمایش نگهداری می‌شوند.

۲-۵- محیط شبیه‌سازی شده خلیج فارس

همان‌طور که گفته شد، سازه‌های موجود در شرایط واقعی حاشیه خلیج فارس به صورت متناوب در معرض پدیده‌های مخرب محیطی شامل سیکل‌های دمایی و رطوبتی، دما و رطوبت بالا در برخی از فصول، سیکل‌های جزر و مد آب دریا که خود حاوی یون‌های کلراید و سولفات است، تابش مستقیم خورشید و اثرات منفی آن به ویژه اشعه UV و غیره می‌باشند. تاکنون مطالعه بر روی تک تک عوامل نام برده به صورت جداگانه در محیط‌های آزمایشگاهی انجام شده است، لیکن با توجه به تاثیر توأمان و تشدید کننده این عوامل بر یکدیگر، فضایی که در آن تمامی این پدیده‌ها در کنار یکدیگر فراهم شده و تاثیر همه آن‌ها بر دوام مصالح، در یک بازه زمانی کوتاه مورد مطالعه قرار گیرد، مورد نیاز می‌باشد. هدف از ساخت محیط شبیه‌ساز خلیج فارس در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر ایجاد قابلیت تاثیر همزمان عوامل مخرب بر نمونه‌های مختلف، تسریع پدیده‌های محیطی موجود در منطقه در یک بازه زمانی کوتاه‌تر و کاهش مشکلات قرار دادن نمونه‌های مختلف در شرایط واقعی خلیج فارس است. لازم به ذکر است که

کلیه پارامترهای محیطی نظیر سیکل‌های جزر و مد، سیکل‌های تابش اشعه UV، دما و رطوبت در محیط شبیه‌سازی شده خلیج فارس قابل تنظیم بوده و هر روز از طریق ایستگاه هواشناسی بندرعباس دریافت شده و از طریق پنل هوشمندی که برای اتاق مورد نظر طراحی شده است، اعمال می‌گردند [۲۷].

۲-۶- آزمایشات انجام گرفته

آزمایشات در نظر گرفته شده برای این پژوهش شامل آزمایشات تعیین مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی برشی و کششی و جمع شدگی برای بررسی خواص مکانیکی و آزمایشات جذب آب مویینگی، نفوذ آب تحت فشار و مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید برای ارزیابی دوام نمونه‌های ساخته شده می‌باشد که در ادامه مشروحي از هر یک ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که برای انجام هر آزمایش در هر سن و برای هر طرح مخلوط ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج نهایی به صورت میانگین نتیجه ۳ نمونه می‌باشد.

۲-۶-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های ملات تعمیری ساخته شده با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر مکعب در این پژوهش مطابق با استاندارد ASTM C109 [۲۹] تعیین شده است. این آزمایش برای همه طرح‌ها و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه که ۷ روز ابتدایی را در محلول آب آهک اشباع و سپس تا سن آزمایش در محیط شبیه‌سازی شده خلیج فارس نگهداری بر روی ۳ نمونه از هر طرح انجام گرفته است. در نهایت نیز نتیجه مقاومت فشاری برای هر طرح در هر سن به صورت میانگین نتایج به دست آمده از آزمایش ۳ نمونه گزارش شده است.

۲-۶-۲- مقاومت چسبندگی کششی

برای آماده‌سازی نمونه‌های مورد نیاز آزمایش مقاومت چسبندگی کششی در ابتدا نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر مکعب با استفاده از بتن با رده مقاومتی C30 ساخته شده و ۲۸ روز عمل‌آوری گردیدند تا به عنوان بتن بستر لایه ملات تعمیری مورد استفاده قرار گیرند. سپس یک لایه ۲۰ میلی‌متری از ملات‌های تعمیراتی بر روی نمونه‌های بتنی بستر اعمال شده و تا سن ۷ روز در محلول آب آهک اشباع و سپس تا سن ۲۸ روز در محیط شبیه‌سازی شده خلیج فارس عمل‌آوری گردیدند. در نهایت نیز مقاومت چسبندگی کششی بین سطح بین سطح بتن و ملات



شکل ۲. دستگاه مخصوص Pull-Off و خواندن اعداد روی آن در حین کشش.

Fig. 2. Pull off test instrument

گرفته شده است. با استفاده از این روش تغییر طول نمونه‌های ملات ژئوپلیمری در اثر خشک شدن با نمونه‌های ملات پایه سیمانی مقایسه شده است. به منظور انجام این آزمایش، نمونه‌های منشوری ملات ژئوپلیمری و سیمان پرتلندی با ابعاد $25 \times 25 \times 285$ میلی‌متر مکعب ساخته شده و برای اندازه‌گیری تغییرات طول، پین‌های مخصوص در دو انتهای آن‌ها جایگذاری شده است. نمونه‌ها پس از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت در محفظه رطوبت نگهداری شده و سپس به محفظه جمع‌شدگی با رطوبت نسبی ثابت ۵۰ درصد و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد منتقل شده و تغییر طول آن‌ها تا سن ۹۱ روز به صورت هفتگی اندازه‌گیری و گزارش می‌شود.

۲-۶-۵- جذب آب مویینگی

مطابق با استاندارد EN 480-5 [۳۲]، در این پژوهش برای اندازه‌گیری میزان جذب آب مویینه ملات‌های تعمیری ساخته شده از نمونه‌های دیسکی شکل با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر که از برش نمونه‌های استوانه‌ای 100×200 میلی‌متر مربعی به دست آمده و تمام وجوه آن به غیر از یک وجه با نوار مخصوص آب‌بندی شده، استفاده می‌شود. در واقع نمونه‌های ملات در سنین پیش‌بینی شده از داخل آب خارج و برش داده شده و در داخل گرمخانه با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۴ روز نگهداری می‌شوند. سپس نمونه‌ها پس از توزین درون ظرف آب قرار داده شده، به گونه‌ای که سطح آب به اندازه 1 ± 2 میلی‌متر از تراز کف نمونه‌ها

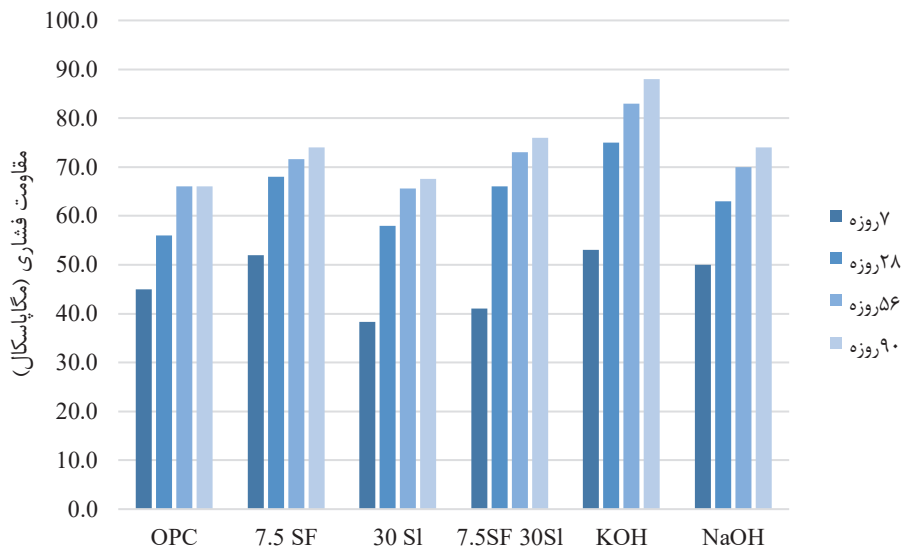
تعمیری اعمال شده بر روی آن از طریق آزمایش بیرون کشیدن^۱ بر اساس استاندارد ASTM D7234 [۳۰] انجام گرفته است (شکل ۲). لازم به ذکر است که نتایج گزارش شده برای این آزمایش میانگین نتایج آزمایش ۳ نمونه برای هر طرح می‌باشد.

۲-۶-۳- مقاومت چسبندگی برشی

برای تعیین مقاومت چسبندگی ملات‌های ساخته شده به بتن از روش دو سطحی استفاده شده است. در این روش ابتدا نمونه‌های مکعبی بتنی با رده مقاومتی C30 و با ابعاد $100 \times 150 \times 150$ میلی‌متر مکعب ساخته شده و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در محیط آب آهک اشباع یک لایه ۵ سانتی‌متری ملات ژئوپلیمری یا ملات سیمانی روی آن اعمال گردیده و به مدت ۷ روز در محلول آب آهک اشباع و پس از آن تا سن آزمایش در محیط شبیه‌سازی خلیج فارس نگهداری می‌شوند. در نهایت نیز نمونه‌های آماده شده مطابق با روند ارائه شده در مرجع [۲۷] تحت بارگذاری قرار گرفته و مقاومت چسبندگی برشی نمونه‌ها محاسبه می‌گردد.

۲-۶-۴- آزمایش جمع‌شدگی

در این پژوهش از روش استاندارد ASTM C596 [۳۱] به منظور ارزیابی جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن نمونه‌های منشوری ملات استفاده



شکل ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

Fig. 3. Compressive strength test results

اشباع یک لایه ۲۰ میلی‌متری ملات ژئوپلیمری یا ملات سیمان پرتلند بر روی آن‌ها اعمال گردیده است. پس از ۷ روز عمل‌آوری نمونه‌ها در آب آهک اشباع، نمونه‌ها به محیط شبیه‌سازی شده خلیج فارس منتقل و تا سن آزمایش در این محیط نگهداری شدند. در نهایت نیز برای تست نمونه‌ها، از هر طرح مخلوط ۳ نمونه به مدت ۷۲ ساعت با فشار ۵ بار تحت نفوذ آب قرار گرفتند و پس از آن عمق نفوذ آب در هر ۳ نمونه اندازه‌گیری شده و میانگین ۳ نتیجه به عنوان نتیجه نهایی هر طرح مخلوط گزارش شده است.

۲-۶-۷- مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید

یکی از مهم‌ترین آزمایشات که به صورت گسترده‌ای برای اندازه‌گیری ضریب انتشار یون‌های کلراید به کار می‌رود، آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید می‌باشد که مطابق با استاندارد [۳۴] NT BUILD 492 صورت می‌پذیرد. برای انجام این آزمایش نمونه‌های دیسکی شکل با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر و قطر ۱۰۰ میلی‌متر درون دستگاه قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت پتانسیل الکتریکی مطابق با الزامات استاندارد به آن اعمال می‌شود. در نهایت نیز عمق نفوذ کلراید با استفاده از محلول نیترات نقره تعیین و از طریق روابط ارائه شده در استاندارد ضریب انتشار یون‌های کلراید (D_{nssm}) به دست می‌آید.

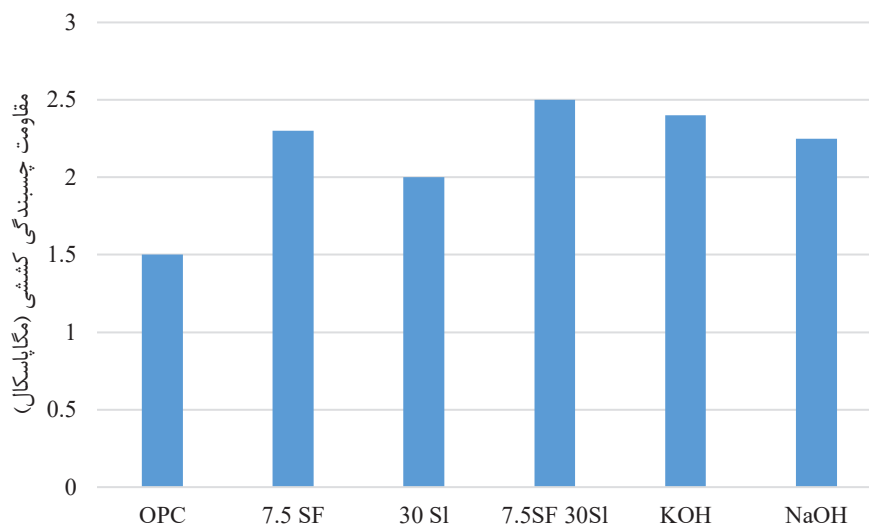
بالتر باشد، ضمن آن که آب با کف نمونه در تماس کامل قرار گیرد. پس از توزین نمونه‌ها در زمان‌های مشخص میزان جذب برحسب میلی‌متر از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$I = \frac{m_t}{a * d} \quad (1)$$

که در این رابطه I میزان جذب آب برحسب میلی‌متر، m_t تغییر در جرم نمونه در مدت زمان آزمایش برحسب گرم، a سطح نمونه برحسب میلی‌متر مربع، d چگالی آب برحسب گرم بر میلی‌متر مکعب می‌باشد.

۲-۶-۶- نفوذ آب تحت فشار

میزان نفوذ آب در ملات و بتن پارامتری برای مقایسه نفوذپذیری نمونه‌ها و به تبع آن می‌باشد. مطابق استاندارد [۳۳] BS EN 12390 نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش نفوذ آب تحت فشار، نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر مکعب می‌باشد که در این پژوهش برای کاهش استفاده از مصالح، ابتدا نمونه‌های مکعبی بتنی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر مکعب ساخته شده و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب آهک



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت چسبندگی کششی به روش بیرون کشیدن در سن ۲۸ روز.

Fig. 4. Pull off test results at the age of 28 days

۳-ارائه و تفسیر نتایج آزمایشات

پس از انجام آزمایشات ذکر شده در بخش قبلی، در ادامه به ارائه نتایج مربوط به هر یک از آن‌ها به صورت مشروح پرداخته خواهد شد.

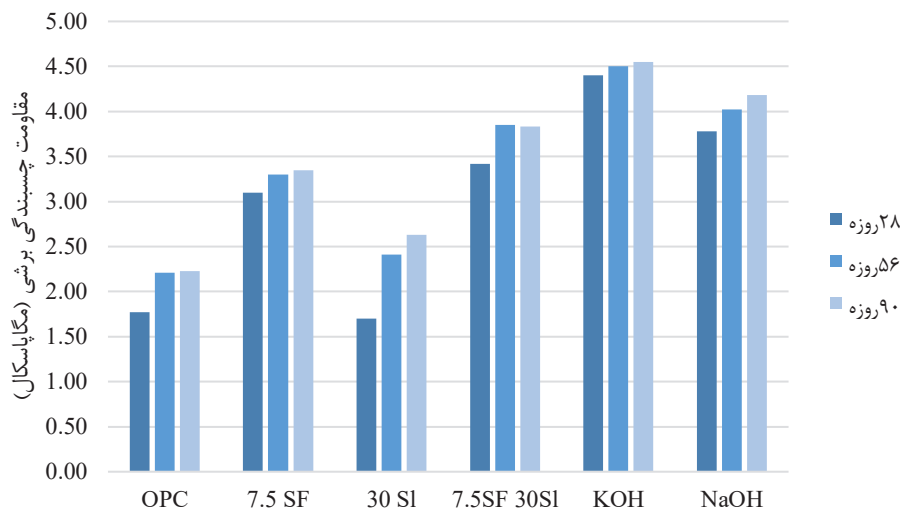
۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ساخته شده در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست در بین نمونه‌های پایه سیمانی نمونه ملات حاوی دوده سیلیس به علت فعالیت پوزولانی بالاتر در سنین اولیه بیشترین مقاومت فشاری را داشته است. اما با گذشت زمان نمونه‌های ملات سه جزیی دارای سرباره و دوده سیلیس مقاومت بیشتری کسب کرده‌اند. از نتایج نیز پیداست که دارا بودن درصد بالاتری از مواد جایگزین سیمان به دلیل تشکیل ژل ثانویه و خاصیت پرکنندگی ذرات ریز آن‌ها به مرور زمان مقاومت فشاری طرح را بهبود می‌بخشد. در تحقیقات بنار و همکاران نیز گزارش شده است که استفاده از دوده سیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها خصوصاً در سنین اولیه می‌گردد [۳۵]. همچنین صدیقی نیز در بخشی از تحقیقات خود بر تاثیر بسزای استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی در بهبود کارایی و مقاومت فشاری ملات‌های پایه سیمانی تاکید داشته است [۲۵]. از مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری ملات‌های ژئوپلیمری این نتیجه حاصل می‌شود که به دلیل

جرم مولی بیشتر پتاس نسبت به هیدروکسید سدیم، مقدار آب کمتری برای تهیه محلول با غلظت ۶ مولار مورد نیاز بوده و از این رو مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پتاس در همه سنین از مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سدیم هیدروکسید بیشتر بوده است [۳۶ و ۲۰]. همچنین مقایسه ملات‌های با پایه ژئوپلیمری و پایه سیمانی نشان می‌دهد که به دلیل چسبندگی بیشتر خمیر ژئوپلیمری، نمونه‌های ژئوپلیمری مقاومت فشاری بیشتر از خود نشان داده‌اند.

۳-۲- آزمایش مقاومت چسبندگی کششی

همان‌طور که پیشتر گفته شد، سازگاری و تطابق لایه پوششی اجرا شده با سطح بتنی بستر یکی از اصلی‌ترین پارامترهای حفظ دوام و افزایش طول عمر مفید تعمیرات به حساب می‌آید. در انجام تعمیرات لازم است تا لایه پوشش اعمالی مقاومت چسبندگی مناسبی با سطح زیرین داشته باشد که این پارامتر در پژوهش حاضر از طریق آزمایش بیرون کشیدن در سن ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۴ گزارش گردیده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص است که هر چقدر ملات تعمیراتی مورد استفاده چسبنده‌تر باشد، مقاومت چسبندگی کششی نیز بیشتر باشد. از این رو ملات‌های ژئوپلیمری و ملات‌های پایه سیمانی حاوی دوده سیلیس به دلیل ماهیت چسبنده‌ای که دارند، مقاومت چسبندگی کششی بیشتری نیز



شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت چسبندگی برشی.

Fig.5. Shear adhesion strength test results

آزمایش مقاومت چسبندگی کششی نشان داده شد، نمونه ملات پایه سیمانی حاوی هر دو ماده جایگزین سیمان دوده سیلیس و سرباره کوره آهن گدازی بیشترین چسبندگی را در بین ملات‌های پایه سیمانی داشته که در آزمایش مقاومت چسبندگی برشی هم این پدیده قابل ملاحظه است.

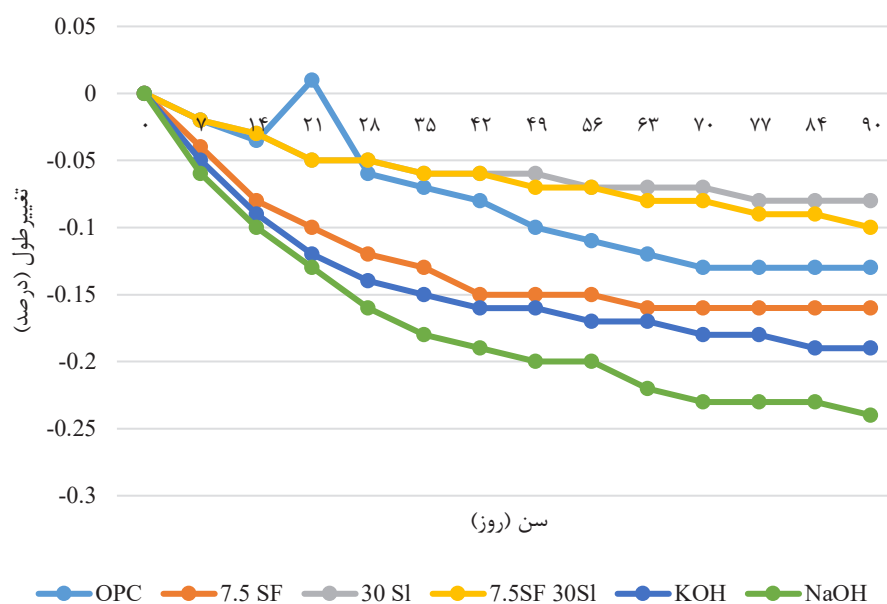
۳-۴- آزمایش جمع شدگی ناشی از خشک شدن

از دیگر خصوصیات ملات‌های پوششی تعمیراتی مناسب می‌توان به پایداری ابعادی آن اشاره کرد. یکی از عوامل حفظ پایداری ابعادی این ملات‌ها عدم جمع شدگی یا جمع شدگی کم آن‌ها بر اثر خشک شدن است. چرا که این جمع شدگی می‌تواند باعث ایجاد تنش برشی، کاهش چسبندگی و در نهایت کنده شدن زود هنگام ملات از روی سطح بتن بستر شود که با خواسته دوام از ملات‌های تعمیراتی در تضاد است. به همین منظور در این پژوهش آزمایش جمع شدگی نمونه‌های ملات انجام شده و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص است که استفاده از سرباره کوره آهن گدازی سبب کاهش جمع شدگی ملات‌های پایه سیمانی می‌گردد، در حالی که استفاده از دوده سیلیس به دلیل ریزی زیاد ذرات و جذب آب بالایی که دارند، جمع شدگی این ملات‌ها را افزایش می‌دهد [۳۵]. همچنین با دقت در نتایج حاصله می‌توان متوجه شد که میزان جمع شدگی تمامی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری از همان سنین ابتدایی نیز

از خود نشان داده‌اند. در تحقیقات مشابه دیگر نیز عملکرد بهتر ملات‌های ژئوپلیمری در مقایسه با ملات‌های پایه سیمانی حاوی مواد جایگزین سیمان ذکر گردیده است [۳۸ و ۳۷]. در این خصوص انجمن بتن آمریکا توصیه می‌کند که ملات‌های ترمیمی حداقل میزان مقاومت چسبندگی در سن ۲۸ روز بیشتر از ۱/۷ مگاپاسکال داشته باشند که با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که کلیه ملات‌های ژئوپلیمری و پایه سیمانی حاوی مواد جایگزین سیمان قابلیت تامین این الزام را دارا می‌باشند.

۳-۳- آزمایش مقاومت چسبندگی برشی

یکی دیگر از پارامترهای مهم تعیین کننده سازگاری ملات‌های تعمیراتی، مقاومت چسبندگی برشی آن‌ها به بتن بستر می‌باشد که همان‌طور که توضیح داده شد، در این پژوهش از آزمایش برش دو سطحی استفاده شده و نتایج آن در شکل ۵ گزارش شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان چسبندگی ملات‌های ژئوپلیمری در تمام سنین بیشتر از ملات‌های پایه سیمانی بوده است که ماهیت بسیار چسبنده ملات ژئوپلیمری حتی در حالت تازه نیز نشان دهنده چسبندگی بهتر این ملات‌ها به سطح می‌باشد. جعفری نیز در بخشی از تحقیقات خود عملکرد ملات‌های ژئوپلیمری را در ایجاد چسبندگی برشی بالا بر روی بستر بتن معمولی را بهتر از ترکیبات سیمانی ارزیابی و گزارش کرده است [۲۷]. مشابه با آنچه که در نتایج



شکل ۶. نتایج آزمایش جمع شدگی ناشی از خشک شدن.

Fig. 6. Drying shrinkage test results

پرتلندی به مقدار قابل توجهی بالا است که این مقدار در مخلوط‌های حاوی مواد پوزولانی کاهش چشمگیری داشته است. یکی از مهم‌ترین دلایل این پدیده را می‌توان تولید ژل ثانویه توسط مواد جایگزین سیمان دانست که در طی این فرآیند فضاهای مویینه پر شده و فضای کمتری برای آب جهت نفوذ وجود دارد [۲۶]. نکته قابل ملاحظه دیگر بالا بودن ضریب جذب آب مویینه در نمونه‌های ژئوپلیمری می‌باشد که مودی و همکاران نیز در تحقیقات خود چنین نتایجی را گزارش کرده و علت آن را چنین شرح داده‌اند که با قرارگیری نمونه‌ها در داخل آون با درجه حرارت ۵۰ درجه سانتی‌گراد، ریزترک‌هایی در ساختار نمونه‌ها ایجاد شده و گاهی این ترک‌ها به یکدیگر متصل می‌گردند که همین عامل سبب افزایش جذب آب مویینه نمونه‌های ژئوپلیمری شده است [۳۶]. با دقت در نمودارها مشخص است که اکثر جذب آب رخ داده در نمونه‌ها در ساعات اولیه اتفاق افتاده است که این پدیده می‌تواند ایجاد ریزترک‌ها در ساختار نمونه‌های ژئوپلیمری را تایید کند.

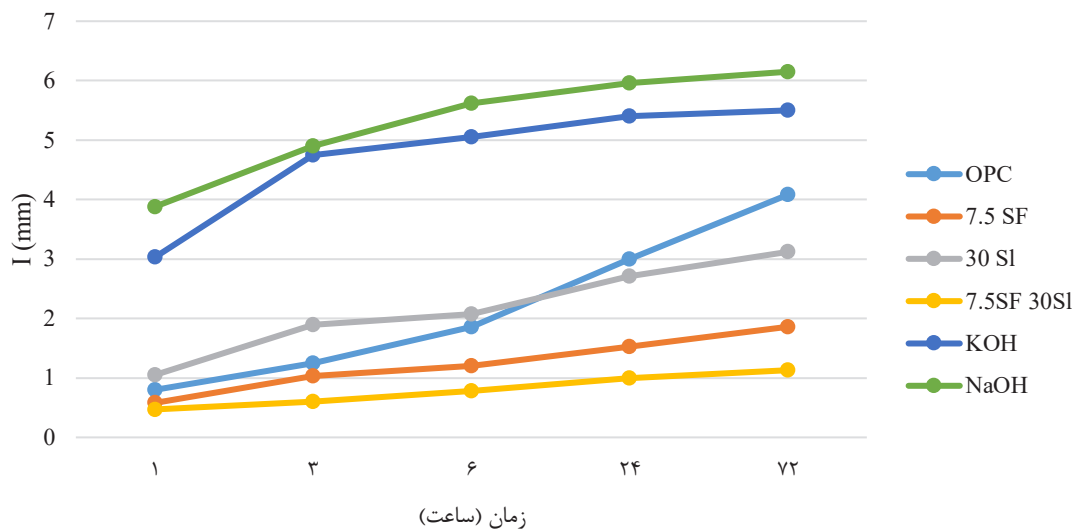
۳-۶- آزمایش نفوذ آب تحت فشار

همان‌طور که گفته شد، می‌توان نفوذپذیری را به عنوان اصلی‌ترین پارامتر در تعیین میزان دوام و خصوصیات دوامی انواع بتن و ملات معرفی کرد. در

بیشتر از ملات‌های پایه سیمانی است. مهم‌ترین دلیل این پدیده را می‌توان خروج آب در حین فرآیند ژئوپلیمریزاسیون ژئوپلیمرها دانست در شرایطی که در فرآیند هیدراسیون سیمان در مخلوط‌های پایه سیمانی آب مصرف می‌شود و همین عامل را می‌توان مهم‌ترین عامل جمع شدگی بیشتر ترکیبات ژئوپلیمری دانست که در تحقیقات دیگر نیز به آن اشاره شده است [۳۹].

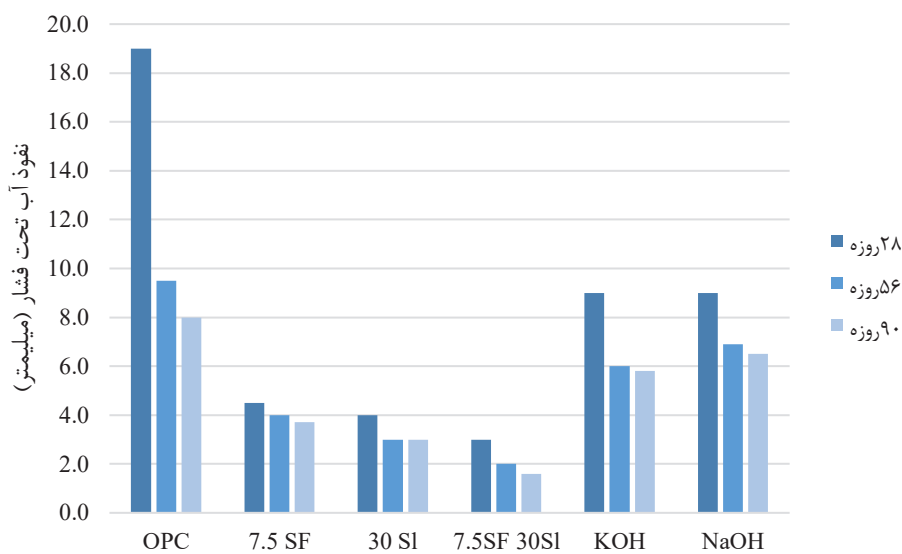
۳-۵- آزمایش جذب آب مویینی

همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، نفوذ آب به فضاهای مویینه داخل بتن و ملات می‌تواند علاوه بر مشکل یخ زدگی و ذوب شدن، عاملی موثر در میزان نفوذ یون‌های مختلف باشد. نفوذ آب به داخل فضاهای خالی بتن و ملات گاهی بر اثر نیروهای اعمالی نظیر برخورد امواج و گاهی نیز بدون آن صورت می‌گیرد. یکی از راه‌های تعیین و تشخیص میزان نفوذ آب به داخل نمونه‌ها، آزمایش جذب آب مویینه است که جز دسته‌ای که آب خود به داخل فضاهای مویینه وارد شده و نیازی به اعمال نیرو جهت تسریع آزمایش وجود ندارد، به شمار می‌رود. در این پژوهش نیز آزمایش جذب آب مویینه در سن ۲۸ روز انجام گرفته که شکل ۷ نشان دهنده نتایج این آزمایش می‌باشد. همان‌طور که از نتایج پیداست، میزان جذب آب در نمونه شاهد ملات سیمان



شکل ۷. نتایج آزمایش جذب آب موئینگی در سن ۲۸ روز.

Fig. 7. Capillary water absorption test results at the age of 28 days.

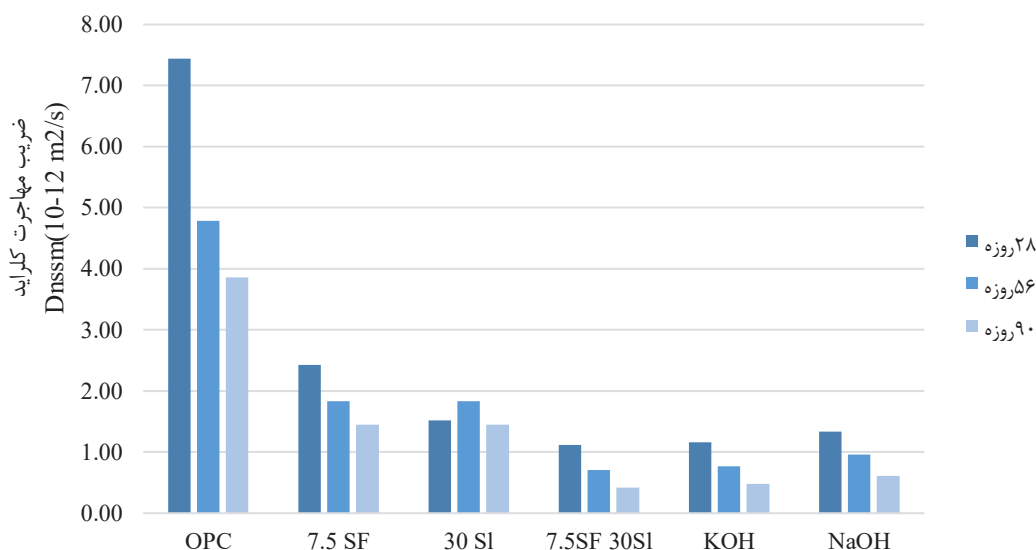


شکل ۸. نتایج آزمایش نفوذ آب تحت فشار.

Fig. 8. Water penetration under pressure test results

آن‌ها در کاهش نفوذ ملات می‌باشد. همچنین مخلوط ۳ جزیی حاوی دو ماده جایگزین سیمان سرپاره کوره آهن‌گدازی و دوده سیلیس نشان داد که استفاده از این ترکیبات می‌تواند به عنوان راه حل مناسب جهت کاهش نفوذپذیری ترکیبات سیمانی معرفی گردد. در مورد نمونه‌های ژئوپلیمری مشخص است که عملکرد هر دو نمونه تقریباً یکسان بوده، در حالی که

این پژوهش نیز به منظور تعیین میزان نفوذپذیری و مقایسه مخلوط‌های ساخته شده، آزمایش نفوذ آب تحت فشار انجام گردید که نتایج آن در شکل ۸ گزارش شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان نفوذ بسیار زیاد مخلوط شاهد نشان دهنده نقش پر رنگ مواد جایگزین سیمان چه به لحاظ تولید ژل ثانویه و تراکم بیشتر ساختار نمونه‌ها و چه به لحاظ نقش پرکنندگی



شکل ۹. نتایج آزمایش مهاجرت تسریع شده یون های کلراید.

Fig. 9. RCMT test results

آزمایش معرفی می‌گردد که هر چقدر این ضریب برای نمونه‌ای بیشتر باشد به منزله بیشتر بودن امکان نفوذ کلراید به داخل بتن یا ملات است. بر همین اساس نمونه شاهد پایه سیمانی که دارای بیشترین ضریب مهاجرت یون‌های کلراید می‌باشد، دارای بیشترین نفوذ کلراید نیز می‌باشد که نشان دهنده عدم دوام کافی این مخلوط در برابر تهاجم کلرایدی می‌باشد. برخلاف نمونه شاهد، نمونه‌های پایه سیمانی ۲ و ۳ جزیی حاوی سرباره و دوده سیلیس و نیز نمونه ملات ژئوپلیمری حاوی پتاسیم هیدروکسید به عنوان فعال‌ساز دارای کمترین ضریب مهاجرت یون‌های کلراید هستند که به تبع آن بیشترین دوام در برابر تهاجم کلرایدی را خواهند داشت. در تحقیقات مختلف کاهش چشمگیر نفوذ و مهاجرت یون‌های کلراید به داخل ساختار بتن‌های حاوی دوده سیلیس و سرباره گزارش شده است [۲۶ و ۲۵]. علاوه بر آن بهمن‌زاده نیز در بخشی از تحقیقات خود بر روی دوام ترکیبات ژئوپلیمری و مقایسه آن‌ها با ترکیبات پایه سیمانی، کاهش عمق نفوذ یون‌های کلراید در مخلوط‌های ژئوپلیمری را گزارش کرده است [۴۰]. همچنین از نتایج مشخص است که در همه مخلوط‌ها با گذشت زمان ضریب مهاجرت کاهش یافته است که نشان دهنده ادامه یافتن فرآیند هیدراسیون در ملات‌های پایه سیمانی و فرآیند ژئوپلیمریزاسیون در ملات‌های ژئوپلیمری است. در بین دو ترکیب ژئوپلیمری نیز نمونه حاوی پتاسیم هیدروکسید عملکرد بهتری از خود نشان داده است که علت اصلی آن را می‌توان ساختار متراکم‌تر نمونه‌های

نسبت به نمونه شاهد پایه سیمانی مقدار نفوذ آب تا بیش از ۵۰ درصد نیز کاهش یافته است. مقایسه نتایج نمونه‌های حاوی مواد جایگزین سیمان خصوصاً مخلوط 7.5SF30SI با نمونه‌های ژئوپلیمری نشان می‌دهد که علی‌رغم مقاومت فشاری بالای طرح‌های ژئوپلیمری که به نحوی می‌تواند با تخلخل ساختار این ۲ طرح در ارتباط باشد، طرح‌های حاوی مواد جایگزین سیمان نفوذپذیری کمتری داشته‌اند. دلیل این اتفاق را می‌توان این گونه توصیف کرد که استفاده از مواد جایگزین سیمان علاوه بر کاهش حجم حفرات که منجر به بهبود مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است، پیوستگی و اتصال این حفرات را نیز کاهش داده که این اتفاق نهایتاً منجر به کاهش چشمگیر نفوذ آب به داخل ساختار بتن شده است.

۳-۷- آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید

یکی از مخرب‌ترین یون‌ها در بحث خوردگی آرماتور در سازه‌های بتن آرمه خصوصاً در مناطق ساحلی، حمله کلرایدی می‌باشد. لذا اطلاع از میزان نفوذ یون‌های کلراید به داخل ساختار ملات تعمیراتی یا پوششی و در پی آن رسیدن به سطح آرماتور و تخریب بیشتر سازه‌های بتن آرمه امری الزامی است که در این پژوهش از طریق آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، ضریب مهاجرت یون‌های کلراید به عنوان خروجی

ژئوپلیمری برای آزمایش جذب آب مویینگی، نتایج ملات‌های ژئوپلیمری ضعیف‌تر از نمونه‌های پایه سیمانی گزارش شده است. همچنین در بین ملات‌های پایه سیمانی استفاده از مواد جایگزین سیمان سبب کاهش مقدار آب جذب شده نمونه‌ها شده است.

• میزان جمع شدگی نمونه‌های ژئوپلیمری به خصوص در مورد مخلوط حاوی سدیم هیدروکسید بیش از نمونه‌های پایه سیمانی به دست آمده است.

در نهایت و با بررسی کلیه نتایج به دست آمده می‌توان گفت که ملات‌های پایه سیمانی ۳ جزیی که دارای مقادیر بیشتری از مواد جایگزین سیمان هستند، می‌توانند گزینه بهتری نسبت به ملات‌های پایه سیمانی ۲ جزیی و ملات‌های تعمیراتی ژئوپلیمری برای تعمیر سازه‌های بتنی آسیب دیده در مناطق ساحلی نظیر سواحل خلیج فارس باشند. در بین سایر مخلوط‌ها نیز مخلوط ژئوپلیمری با فعال‌ساز قلیایی پتاسیم هیدروکسید و مخلوط پایه سیمانی با جایگزین ۷/۵ درصد وزنی دوده سیلیس می‌توانند به عنوان گزینه‌های مناسب جهت ترمیم سازه‌های آسیب دیده معرفی گردند. از آنجایی که نتایج این تحقیق در یک بازه زمانی ۹۰ روزه از شرایط شبیه‌سازی شده خلیج فارس به دست آمده و گزارش شده‌اند، پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آتی نمونه‌ها در یک بازه زمانی یک ساله در محیط نگهداری شوند تا بتوان تاثیر تغییر پارامترهای محیطی در طول سال را بهتر ارزیابی کرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد علاوه بر آزمایشات ذکر شده، آزمایشات لازم جهت بررسی ریزساختار ترکیبات نظیر تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) و آنالیز الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) صورت پذیرد.

منابع

- [1] P. Ghods, M. Chini, R. Alizadeh, M. Hoseini, M. Shekarchi, A. Ramezani-pour, The effect of different exposure conditions on the chloride diffusion into concrete in the Persian Gulf region, 3th ConMat, 5 (2005).
- [2] A. Ramezani-pour, A. Pourkhorshidi, T. Parhizkar, G.A. Raeis, Assessing durability of concrete marine structures with different cements and pozzolans in tidal region of Persian Gulf environment, International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS), ports & marine organization, (2005) (in Persian).

حاوی این فعال‌ساز نسبت به مخلوط‌های حاوی فعال‌ساز سدیم هیدروکسید دانست که در تحقیقاتی که به بررسی ریزساختار مخلوط‌های ژئوپلیمری پرداخته‌اند به آن اذعان شده [۱۹] و در آزمایشاتی نظیر مقاومت فشاری، جذب آب مویینه و نفوذ آب تحت فشار که به نحوی نشان دهنده تراکم ریزساختار نمونه‌ها هستند، قابل درک می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که گفته شد، هدف این پژوهش مقایسه دوام ملات‌های پوششی با پایه سیمانی و ژئوپلیمری در شرایط محیطی شبیه‌سازی شده خلیج فارس در برابر تهاجم یون‌های کلراید بوده است که از مهم‌ترین نتایج آن می‌توان موارد زیر را نام برد:

• در بین ۴ طرح پایه سیمانی مورد استفاده در این پژوهش طرح مخلوط ۳ جزیی حاوی ۳۰ درصد سرباره به همراه ۷/۵ درصد دوده سیلیس در تمامی آزمایشات و سنین خصوصاً آزمایشات مقاومت چسبندگی کششی، جمع شدگی و مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید، عملکرد بهتری از خود نشان داده است که نشان دهنده تاثیر چشمگیر مواد پوزولانی بر بهبود خواص مکانیکی و دوام ترکیبات پایه سیمانی حتی در شرایط محیطی شبیه‌سازی شده خلیج فارس می‌باشد.

• علاوه بر ملات ۳ جزیی ذکر شده، نمونه حاوی ۷/۵ درصد دوده سیلیس نیز از عملکرد مناسبی برخوردار بوده و خصوصاً در آزمایشات مقاومت فشاری، چسبندگی برشی و جذب آب مویینه بهترین عملکرد در بین طرح‌های پایه سیمانی را داشته است.

• مقایسه طرح‌های ژئوپلیمری و طرح‌های پایه سیمانی نشان می‌دهد که ملات‌های ژئوپلیمری هم به لحاظ کسب مقاومت و هم به لحاظ ویژگی‌های سازگاری نظیر چسبندگی عملکرد مناسبی داشته‌اند اما نکته قابل توجه در مورد آن‌ها میزان جذب آب زیاد به‌خصوص در سنین پایین است که این جذب آب به ویژه اگر حاوی یون‌های مخرب نظیر کلراید باشد، می‌تواند استفاده از این ملات‌ها را در محیط‌های خورنده را تحت‌الشعاع قرار دهد.

• نوع ماده فعال‌ساز در مخلوط‌های ملات ژئوپلیمری تاثیر زیادی بر ویژگی‌های مکانیکی و دوامی طرح‌ها داشته است؛ در مجموع می‌توان طرح حاوی پتاسیم هیدروکسید را در دارا بودن ویژگی‌ها و عملکرد مناسب‌تر نسبت به طرح حاوی سدیم هیدروکسید بهتر دانسته و استفاده از آن را در شرایط محیطی سخت و خورنده پیشنهاد کرد.

• به دلیل ایجاد ریزترک‌ها در زمان خشک کردن ملات‌های

- [12] A. Hassan, M. Arif, M. Shariq, Mechanical behaviour and microstructural investigation of geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures, *Arabian Journal for Science Engineering*, 45(5) (2020) 3843-3861.
- [13] J. Li, P. Sun, J. Li, Y. Lv, H. Ye, L. Shao, D. Du, Synthesis of electrolytic manganese residue-fly ash based geopolymers with high compressive strength, *Construction & Building Materials*, 248 (2020) 118489.
- [14] W. Zhang, X. Yao, T. Yang, C. Liu, Z. Zhang, Increasing mechanical strength and acid resistance of geopolymers by incorporating different siliceous materials, *Construction & Building Materials*, 175 (2018) 411-421.
- [15] A. Özcan, M.B. Karakoç, Evaluation of sulfate and salt resistance of ferrochrome slag and blast furnace slag-based geopolymer concretes, *Structural Concrete*, 20(5) (2019) 1607-1621.
- [16] S. Luhar, S. Chaudhary, I. Luhar, Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete, *Journal of Building Engineering*, 19 (2018) 420-428.
- [17] R. Zhao, Y. Yuan, Z. Cheng, T. Wen, J. Li, F. Li, Z.J. Ma, Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete, *Construction & Building Materials*, 222 (2019) 474-483.
- [18] F.N. Degirmenci, Freeze-Thaw and fire resistance of geopolymer mortar based on natural and waste pozzolans, (2018).
- [19] M.J. Nadoushan, A.A. Ramezani pour, The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers, *Construction & Building Materials*, 111 (2016) 337-347.
- [20] A.A. Ramezani pour, M.A. Moeini, Mechanical and durability properties of alkali activated slag coating mortars containing nanosilica and silica fume, *Construction & Building Materials*, 163 (2018) 611-621.
- [3] A. Hadj-sadok, S. Kenai, L. Courard, A. Darimont, Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag, *Construction & Building Materials*, 25(2) (2011) 1018-1025.
- [4] X. Shi, N. Xie, K. Fortune, J. Gong, Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview, *Construction & Building Materials*, 30 (2012) 125-138.
- [5] R. Duval, E. Kadri, Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes, *Cement & concrete research*, 28(4) (1998) 533-547.
- [6] J. Khatib, J. Hibbert, Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin, *Construction & building materials*, 19(6) (2005) 460-472.
- [7] G. Li, B. Yang, C. Guo, J. Du, X. Wu, Time dependence and service life prediction of chloride resistance of concrete coatings, *Construction & Building Materials*, 83 (2015) 19-25.
- [8] A. Mahmoodi, H. Afshin, H. Hakimzadeh, D. Jalali, Investigation of durability of reinforcement concrete in severe corrosive marine environment 3rd International Conference on Concrete and Development ,Tehran, 2009.
- [9] A. Ramezani pour, A. Kazemian, M. Nikravan, A. Mahpur, M. Moghadam, Influence of a low-activity slag and silica fume on the fresh properties and durability of high performance self-consolidating concrete, in: *Proceedings of 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2013.
- [10] R. Gado, M. Hebda, M. Łach, J. Mikuła, Alkali activation of waste clay bricks: Influence of the silica modulus, SiO₂/Na₂O, H₂O/Na₂O molar ratio, and liquid/solid ratio, *Materials*, 13(2) (2020) 383.
- [11] M. Nawaz, A. Heitor, M. Sivakumar, Geopolymers in construction-recent developments, *Construction & Building Materials*, 260 (2020) 120472.

- Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [30] ASTM D7234-19, Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [31] ASTM C596-18, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [32] EN 480-5, Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Determination of capillary absorption, European Standard (EN), (1997).
- [33] BS EN 12390-8, Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure.
- [34] NT Build 492, Nord Test Method: Chloride Migration Coefficients from Non Steady-State, 1999.
- [35] R. Banar, P. Dashti, A. Zolfagharnasab, A.M. Ramezaniapour, A.A. Ramezaniapour, A comprehensive comparison between using silica fume in the forms of water slurry or blended cement in mortar/concrete, *Journal of Building Engineering*, 46 (2022) 103802.
- [36] F. Moodi, S. Norouzi, P. Dashti, Mechanical properties and durability of alkali-activated slag repair mortars containing silica fume against freeze-thaw cycles and salt scaling attack, *Advances in concrete construction*, (2021).
- [37] E.R. Dehkordi, A.A. Ramezaniapour, F. Moodi, Application of pre-fabricated geopolymer permanent formworks (PGPFs): A novel approach to provide durability and mechanical strength of reinforced concrete, *Journal of Building Engineering*, 45 (2022) 103517.
- [38] F. Moodi, A.A. Ramezaniapour, F. Farhadian, P. Dashti, Durability of cementitious and geopolymer coating mortars against sulfuric acid attack, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9) (2021) 6-6.
- [21] P. Duxson, J.L. Provis, G.C. Lukey, S.W. Mallicoat, W.M. Kriven, J.S. Van Deventer, Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, *Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects*, 269(1-3) (2005) 47-58.
- [22] ASTM C989 / C989M-18a, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [23] ASTM C778-17, Standard Specification for Standard Sand, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [24] P. Dashti, Mechanical and durability properties of silica fume blended cement concrete against chloride ions attack and carbonation, MSc Thesis, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), 2019.
- [25] A.A. Ramezaniapour, S. Sedighi, M. Kazemian, A. M. Ramezaniapour, Effect of micro silica and slag on the durability properties of mortars against accelerated carbonation and chloride ions attack, 4(4) (2020) 2-2.
- [26] S.M.M. Karein, A. Ramezaniapour, T. Ebadi, S. Isapour, M. Karakouzian, A new approach for application of silica fume in concrete: Wet granulation, *Construction & Building Materials*, 157 (2017) 573-581.
- [27] M.J. Nadoushan, Production of geopolymer coatings to improve mechanical properties and durability of concrete against chloride ions penetration, PhD Thesis, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), 2017, (in Persian).
- [28] ASTM C230, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [29] ASTM C109 / C109M-20a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement

Engineering Meet, Springer, 2018, pp. 2203-2212.

[40] F.B. Zadeh, Mechanical properties and chloride ions penetration in alkali activated slag concrete, MSc Thesis, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), 2015.

[39] A.A. Ramezaniapour, F.B. Zadeh, A. Zolfagharnasab, A.M. Ramezaniapour, Mechanical properties and chloride ion penetration of alkali activated slag concrete, in: High Tech Concrete: Where Technology and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Moodi, S. Lashkari, P. Dashti, Durability of cement-based and geopolymer coating mortars in the Persian Gulf simulated environment, Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 3433-3450.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20908.7568](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20908.7568)



