

Rebar Corrosion Potential in Alkali-Activated Slag and Pumice Mortars

Mohsen Jafari Nadoushan^{1*}, Ali Akbar Ramezani pour²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Professor, Concrete Technology and Durability Research Center (CTDRc), Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Previous researches have shown that due to its good adhesion, alkali-activated materials can be used as a protective overlay for concrete structures. However, the mechanical properties and durability of alkali-activated materials are not fully investigated. In this paper, compressive strength, bond strength, water penetration and half-cell corrosion potential of alkali-activated slag and pumice mortars as concrete overlay are investigated. The results show that the performance of alkali-activated slag mortar is better than Portland cement one in above tests and the use of potassium hydroxide as activator and a mixture of 90% slag and 10% pumice as based material result in the highest compressive strength and bond strength and the lowest water permeability and half-cell corrosion potential. The initial half-cell potential reading of alkali-activated mortar specimens was an average of 1.9 times more than Portland cement mortar specimens. This difference indicates that the ranges presented in ASTM C876 and their relationship with rebar corrosion risks are not applicable for alkali-activated materials and it is necessary to provide other criteria for these materials. Also, due to different conductivity of alkali-activated and Portland cement mortars, applying potential difference to accelerate the penetration of chloride ions and comparing the performance of alkali-activated materials with Portland cement is not a correct method. However, this method is suitable for comparing mixes design of alkali-activated mortars and its results are in accordance with non-accelerated methods.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 December 2021

Revise Date: 12 February 2022

Accept Date: 16 February 2022

Keywords:

Alkali Activated
Slag
Pumice
Water Penetration
Corrosion Potential
Half-cell

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.320169.2672>

*Corresponding author: Mohsen Jafari Nadoushan.

Email address: m_jafarin@aut.ac.ir

پتانسیل خوردگی میلگرد در ملات‌های سرباره و پومیس قلیافعال

محسن جعفری ندوشن^{۱*}، علی اکبر رضانیانپور^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

تحقیقات پیشین نشان داده است که به دلیل چسبندگی مناسب می‌توان از مصالح قلیافعال به‌عنوان روکش محافظ سازه‌های بتنی استفاده نمود و با ایجاد یک لایه سطحی مصالح قلیافعال بر روی بتن، تا حد زیادی از مزایای این تکنولوژی جدید بهره جست. با این حال خواص مکانیکی و دوام مصالح قلیافعال هنوز کاملاً مشخص نیست. در این مقاله به بررسی مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی، نفوذ آب تحت فشار و پتانسیل خوردگی نیم‌پیل ملات‌های قلیافعال حاوی سرباره و پومیس به‌عنوان روکش بتن پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد در آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی، نفوذ آب تحت فشار و پتانسیل خوردگی نیم‌پیل، عملکرد ملات‌های سرباره قلیافعال مناسب‌تر از ملات‌های سیمان پرتلندی بوده و استفاده از هیدروکسیدپتاسیم به‌عنوان فعالساز و مخلوط ۹۰ درصد سرباره و ۱۰ درصد پومیس به‌عنوان ماده پایه باعث دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری و چسبندگی و کمترین نفوذپذیری و پتانسیل خوردگی میلگرد شده است. پتانسیل نیم‌پیل اولیه آزمون‌های ملات قلیافعال بطور متوسط ۱,۹ برابر آزمون‌های سیمان پرتلندی بوده است. این تفاوت نشان می‌دهد معیارهای ارائه شده در استاندارد ASTM C876 در خصوص ارتباط خطر خوردگی میلگردها و میزان پتانسیل نیم-پیل برای آزمون‌های قلیافعال قابل استفاده نبوده و نیاز است محدوده‌های دیگری برای مصالح قلیافعال ارائه گردد. همچنین بدلیل رسانایی بسیار متفاوت ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی، اعمال اختلاف پتانسیل به منظور تسریع نفوذ یون‌های کلراید و مقایسه عملکرد محصولات قلیافعال با سیمان پرتلندی روش مناسبی نمی‌باشد. ولی این روش برای مقایسه چندین طرح ملات قلیافعال مناسب بوده و روند نتایج آن مطابق با آزمایش‌های تسریع نشده بوده است.

کلمات کلیدی: قلیافعال، سرباره، پومیس، نفوذ آب، پتانسیل خوردگی، نیم‌پیل.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.320169.2672	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.320169.2672	۱۴۰۱/۰۸/۳۱	۱۴۰۰/۱۱/۲۷	۱۴۰۰/۱۱/۲۷	۱۴۰۰/۱۱/۲۳	۱۴۰۰/۱۰/۰۳
				* نویسنده مسئول:		
				محسن جعفری ندوشن		
				m_jafarin@aut.ac.ir		پست الکترونیکی:

۱- مقدمه

یکی از علل عمده خرابی سازه‌های بتن مسلح، خوردگی میلگردهای فولادی مدفون در بتن می‌باشد. آسیب بتن در نتیجه خوردگی میلگرد به شکل انبساط، ترک خوردگی و در نهایت پکیدن پوشش بتن روی میلگردها ظاهر می‌شود. یکی از عوامل محافظت از میلگرد در داخل بتن، پوشش بتنی روی میلگرد و ویژگی‌های آن است. محققین میزان نفوذپذیری بتن را یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده دوام بتن در برابر انواع خرابی‌ها مانند حملات کلرایدی و سولفاتی می‌دانند و معتقدند در صورتی که بتوان بتنی ساخت که دارای نفوذپذیری کمتری باشد و املاح به راحتی در آن نفوذ نکنند دوام بتن بیشتر خواهد بود. بطور کلی می‌توان گفت کاهش نفوذپذیری بتن راه حل و کلید مسئله پایایی و دوام می‌باشد. در بسیاری از موارد تخریب سطح بتن منجر به مشکلات سازه‌ای به دلیل کاهش ضخامت پوشش میلگرد و خوردگی میلگردها می‌گردد. در این موارد برای به حداقل رسانیدن خرابی و کاهش نفوذپذیری، از مصالح مختلف به‌عنوان روکش‌های بتنی استفاده می‌شود. تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که به دلیل چسبندگی مناسب می‌توان از مصالح قلیافعال به‌عنوان روکش محافظ سازه‌های بتنی استفاده نمود و با ایجاد یک لایه سطحی مصالح قلیافعال بر روی بتن، تا حد زیادی از مزایای این تکنولوژی جدید بهره جست. با این حال خواص مکانیکی و دوام مصالح قلیافعال با مواد پایه مختلف هنوز کاملاً مشخص نیست. بر این اساس در این مقاله به بررسی برخی از خواص مکانیکی، نفوذپذیری و دوام ملات‌های قلیافعال حاوی سرباره و پومیس به‌عنوان روکش بتن پرداخته خواهد شد.

Abhishek و همکاران [۱] با بررسی مطالعات متعددی به این نتیجه رسیدند که غلظت محلول قلیایی و نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی روی خواص ملات قلیافعال تازه بیشترین تأثیر را داشته و علاوه بر پارامترهای فوق، نسبت محلول فعالساز به ماده پایه و رژیم عمل‌آوری از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری ملات قلیافعال می‌باشد. Salazara و همکاران [۲] نشان دادند ملات قلیافعال حاوی ۷۰ درصد پوزولان طبیعی و ۳۰ درصد سرباره کوره آهنگدازی، مقاومت فشاری لازم برای استفاده به‌عنوان ملات تعمیراتی سازه‌ای را دارا بوده (۳۴/۸ مگاپاسکال) ولی مقاومت چسبندگی آن به حداقل مقدار لازم (۱/۵ مگاپاسکال) نرسیده است. Jiao و همکاران [۳] با بررسی خواص مکانیکی ملات سرباره قلیافعال نشان دادند که مقاومت چسبندگی این ملات ملات با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و مقاومت چسبندگی با جذر مقاومت فشاری متناسب است. Fan و همکاران [۴] نشان دادند که مقدار بهینه سرباره در ملات قلیافعال سرباره و خاکستر بادی برای رسیدن به بیشترین مقاومت چسبندگی ۵۰ درصد بوده و مقاومت چسبندگی این مخلوط بیش از ملات سیمان پرتلندی است. همچنین واکنش‌های بین ملات قلیافعال و سیمان موجود در بتن پایه و تولید محصولاتی از قبیل CASH، CSH و NASH مهمترین عوامل موثر در مقاومت چسبندگی ملات قلیافعال به بتن قدیمی می‌باشد.

Shi [۵] نفوذ آب در آزمون بتن قلیافعال با پایه سرباره حاوی سیلیکات سدیم را ۱۰۰۰ برابر کمتر از آزمون بتن سیمان پرتلندی گزارش نموده است. در حالی که Wongpa و همکاران به این نتیجه رسیده‌اند که در یک رده مقاومتی، بتن قلیافعال با پایه سرباره حاوی سیلیکات قلیایی، ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر نفوذپذیرتر از بتن پایه سیمان پرتلندی می‌باشد. با این حال بسیاری از تحقیقات نشان داده است که نفوذپذیری آزمون‌های قلیافعال با پایه سرباره، خاکستر بادی و غیره در حد آزمون‌های سیمان پرتلندی می‌باشند. Zhang و همکاران با مطالعه ژئوپلیمرهای پایه سرباره و خاکستر بادی به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش مقدار جایگزینی سرباره به جای خاکستر بادی و کاهش مقدار آب به ذرات جامد باعث کاهش نفوذپذیری آزمون‌های قلیافعال می‌گردد [۶]. Bondar و همکاران [۷] نشان داده شده است که نفوذ گاز در آزمون‌های بتن ژئوپلیمری با پایه پوزولان‌های طبیعی در سنین بالا کمتر از آزمون‌های سیمان پرتلندی می‌باشد.

عامل دیگر محافظت از میلگرد در داخل بتن، لایه محافظ می‌باشد. محیط قلیایی بتن سیمان پرتلندی با pH بالا (حدود ۱۳) باعث می‌شود که یک لایه اکسید (لایه محافظ) روی سطح میلگرد تشکیل شود و مانع از حل شدن بیشتر فولاد گردد و بدین صورت از خوردگی حتی در حضور رطوبت و اکسیژن جلوگیری می‌شود [۸]. به دلیل خاصیت قلیایی فعالسازها، احتمالاً این لایه محافظ در مصالح قلیافعال قوی تر می‌باشد. pH بالا باعث تشکیل لایه محافظ روی سطح آماتور می‌گردد که این لایه بسیار متراکم و نفوذناپذیر بوده و از ادامه خوردگی جلوگیری می‌نماید. در صورتی که تحت تأثیر عواملی، میزان قلیائیت بتن کاهش یابد این لایه تشکیل نمی‌شود و آسیب‌پذیری بتن

مسلح در برابر خوردگی افزایش می‌یابد. وجود دی‌اکسیدکربن (پدیده کربناتاسیون) و حضور یون کلراید در محیط بتن مهمترین عوامل کاهش قلیابیت بتن می‌باشند [۹]. همچنین حضور یون‌های کلراید در محلول باعث افزایش میزان حلالیت آهن شده و در نتیجه سرعت خوردگی را بیشتر می‌کند. بنابراین مهم‌ترین عامل زنگ‌زدگی و خوردگی میلگرد در بتن وجود و نفوذ یون کلراید در آن است. در مصالح قلیافعال نیز با گذشت زمان کاهش pH که ممکن است بر اثر پدیده کربناتاسیون و یا خروج یون‌های قلیایی و یا نفوذ یون‌های کلراید رخ دهد، می‌توانند لایه محافظ را ناپایدار نماید. استاندارد ASTM C876 روش پتانسیل نیم‌پیل را برای اندازه‌گیری احتمال خوردگی میلگرد ارائه می‌نماید. در صورتیکه برای بتن سیمان پرتلندی در معرض یون‌های کلراید، این مقدار از ۲۰۰- میلی‌ولت کمتر منفی باشد، احتمال عدم خوردگی ۹۰ درصد بوده و در صورتیکه این مقدار منفی‌تر از ۳۵۰- میلی‌ولت باشد، احتمال خوردگی ۹۰ درصد می‌باشد.

Gu و Beaudion [۱۰] عوامل موثر بر پتانسیل خوردگی میلگرد در بتن سیمان پرتلندی را مورد بررسی قرار داده اند که شامل میزان اکسیژن، کربناسیون، یون‌های کلراید، عوامل بازدارنده آندی و کاتدی، نوع میلگرد، روکش‌ها، وصله‌ها و جریان‌های پراکنده است. بسیاری از این موارد در بتن‌های قلیافعال نیز می‌تواند موثر باشد. با توجه به اینکه قلیابیت بتن‌های قلیافعال بالا و در حد بتن‌های سیمان پرتلندی می‌باشد، انتظار می‌رود بتن‌های قلیافعال بتوانند میلگردها را در حالت غیرفعال نگه دارند [۱۱]. Wheat [۱۱] گزارش کرده است که بتن‌های قلیافعال با پایه خاکستر بادی در معرض محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl به مدت سه سال در حالت مغروق و جزر و مدی بدلیل نفوذ ناپذیری بالا، عملکرد مناسبی در نگهداشتن میلگردها در حالت غیر فعال داشته اند. همچنین باید توجه داشت که پتانسیل محلول منفذی و بتن حاوی سیمان سرباره ای بدلیل وجود سولفید در سرباره چند صد میلی ولت کاهش می‌یابد. ولی این کاهش نمی‌تواند باعث مشکلات خوردگی میلگرد در این بتن‌ها گردد [۱۲]. بنابراین می‌توان گفت محدوده‌های استاندارد پتانسیل نیم‌پیل برای بتن‌های حاوی سیمان سرباره ای قابل استناد نمی‌باشد. ولی Hossain و همکاران [۱۳] نشان داده اند که روند نتایج پتانسیل خوردگی نیم‌پیل بتن‌های قلیافعال مشابه بتن سیمان پرتلندی بوده است.

Kukko و Mannonen [۱۴] مشاهده کردند که بتن‌های قلیافعال با پایه سرباره در معرض آب دریا به مدت یک سال به خوبی از میلگردها محافظت نموده اند. Deja و همکاران [۱۵] و Malolepszy و همکاران [۱۶] دوام ملات‌های قلیافعال در معرض آب و محلول ۵ درصد وزنی $MgSO_4$ را با اندازه گیری جریان خوردگی و افت وزن میلگرد مورد بررسی قرار داده اند. $MgSO_4$ روی لایه محافظ میلگرد تأثیرگذار بوده در حالی که اثر آب بسیار ناچیز بوده است. نتایج جریان خوردگی نشان می‌دهد که میلگرد در ملات‌های قلیافعال نرخ خوردگی بیشتری نسبت به ملات سیمان پرتلندی داشته است. اما با گذشت زمان، جریان در همه آزمون‌ها کاهش می‌یابد. Bernal [۱۷] اثر کربناتاسیون را بر نرخ خوردگی بررسی نموده است که آزمون‌های کربناته شده نسبت آزمون‌های غیر کربناته در ۱۲ ماه غوطه وری در آب مقاومت بیشتری در برابر خوردگی از خود نشان داده اند. عدم توجه این نتایج بر اساس استانداردهای موجود نشان می‌دهد که تحقیقات بیشتری در این خصوص نیاز بوده و معیارهای استانداردهای موجود، محدودیت‌های فراوانی دارند.

هدف اصلی این مقاله، مطالعه خواص مکانیکی و نفوذپذیری و پتانسیل خوردگی در ملات‌های قلیا فعال حاوی سرباره و پومیس به‌عنوان روکش سازه‌های بتنی و مقایسه آن با ملات‌های پایه سیمان پرتلندی می‌باشد. در این راستا اقدام به ساخت آزمون‌های ملات قلیافعال سرباره ای و ملات سیمان پرتلندی و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی، نفوذ آب تحت فشار، پتانسیل نیم‌پیل پس از قرارگیری در معرض محلول حاوی یون‌های کلراید شده است. برای بررسی پتانسیل نیم‌پیل پس از نفوذ یون‌های کلراید از روش‌های تسریع نشده و تسریع شده استفاده شده است. در ادامه مقاله به معرفی مصالح مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها، ارائه خواص فیزیکی و شیمیایی آنها، معرفی طرح‌های مخلوط، نحوه ساخت و آزمایش آزمون‌ها و معرفی مشخصات محیط شبیه‌سازی خلیج فارس در بخش ۲ پرداخته شده است. در بخش ۳ نیز به ارائه و تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها پرداخته شده و در بخش ۴ خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده در این مقاله ارائه گردیده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد مصرفی

ملات‌های قلیافعال بطور کلی شامل مواد پایه (معمولاً پوزولان‌ها)، محلول‌های فعال‌ساز و ماسه می‌باشد. در این مطالعه از سرباره کوره آهن‌گدازی و پوزولان طبیعی پومیس جهت فعالسازی قلیایی به منظور تولید ملات استفاده شده است. تشکیل مواد قلیافعال نیازمند مواد فعال‌ساز مناسب با غلظت‌های بهینه می‌باشد. در این پروژه تحقیقاتی از سه نوع ماده فعال‌ساز جهت فعال کردن پوزولان‌ها استفاده شده است که شامل محلول‌های قلیایی هیدروکسید سدیم (NaOH)، هیدروکسید پتاسیم (KOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) می‌باشد.

۲-۱-۱- مشخصات مواد پایه

سرباره محصول جانبی کارخانجات ذوب آهن است که در فرآیند تولید آهن خام از کوره بلند بدست می‌آید و ترکیبی از ناخالصی‌های سنگ آهن و سنگ آهک (کمک ذوب) می‌باشد. اگر سرباره مذاب از طریق غوطه ور کردن در آب یه سرعت سرد شود، دانه‌های کوچک حاوی سیلیکات کلسیم- آلومینیوم- منیزیم آمورف با خاصیت هیدرولیکی حاصل می‌گردد. پومیس از سرد شدن مواد مذاب خارج شده از دهانه‌های آتشفشانی بوجود می‌آید که دارای ساختار آلومینوسیلیکاتی تغییر نیافته و بافت متخلخل بوده و در زمره پوزولان‌های طبیعی می‌باشد. در این پروژه پومیس تفتان از کوه‌های منطقه جنوب شرق ایران بدست آمده است.

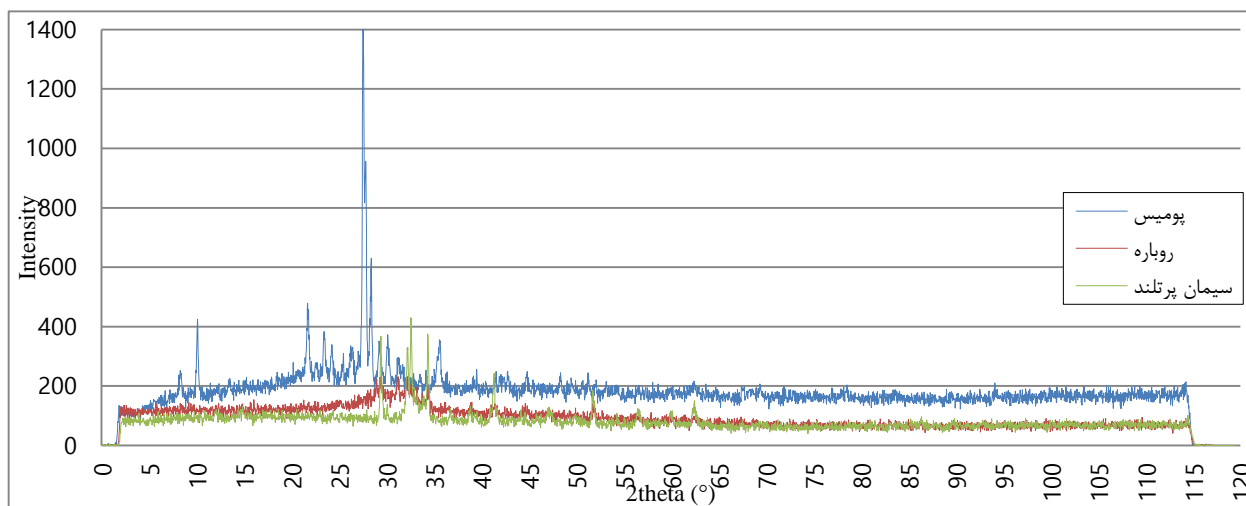
خواص شیمیایی و فیزیکی مواد پایه به ترتیب در جداول ۱ و ۲ برای سرباره کوره آهن‌گدازی دانه ای، پوزولان طبیعی پومیس و سیمان پرتلند نشان داده شده است. سیمان پرتلند مورد استفاده در این تحقیق از نوع ۴۲۵-۱ بوده که فقط جهت ساخت ملات سیمان پرتلند شاهد استفاده شده است و در ساخت آزمون‌های قلیافعال هیچگونه سیمانی استفاده نشده است. نتایج آزمایش XRD مواد پایه در شکل ۱ نشان داده شده است. نمودار XRD نشان می‌دهد که پومیس حاوی مقادیری از ذرات کریستالی می‌باشد. در حالی که دو نقطه اوج ضعیف در نمودار XRD سرباره مشاهده می‌گردد که نشان می‌دهد سرباره حاوی مقادیر کمتری از ذرات کریستالی می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی مواد پایه

ترکیبات شیمیایی	سرباره	پومیس	سیمان پرتلند
اکسید کلسیم (%)	۳۶/۷۵	۷/۴	۶۳/۷۸
دی اکسید سیلیسیوم (%)	۲۱/۳۷	۶۴/۹	۲۱/۵۵
اکسید منیزیم (%)	۸/۵۲	۱/۹۸	۱/۳۵
اکسید آلومینیوم (%)	۱۱/۵۶	۱۲/۱	۵/۸۹
اکسید آهن (%)	۱/۰۱	۵/۲	۳/۷۲
تری اکسید گوگرد (%)	۰/۹۷	۰/۲۲	۱/۸۹
اکسید سدیم (%)	۰/۶۱	۲/۴۹	۰/۵۳
اکسید پتاسیم (%)	۰/۷	۱/۸۸	۰/۳
دی اکسید تیتانیوم (%)	۱/۲۱	۰/۷۹	-
اکسید منگنز (%)	۰/۹۹	۰/۱۲	-
پنتاکسید فسفر (%)	۰/۰۳	۰/۲	-
افت وزن در اثر سرخ شدن (%)	۰/۰۲	۲/۵	۰/۹۴

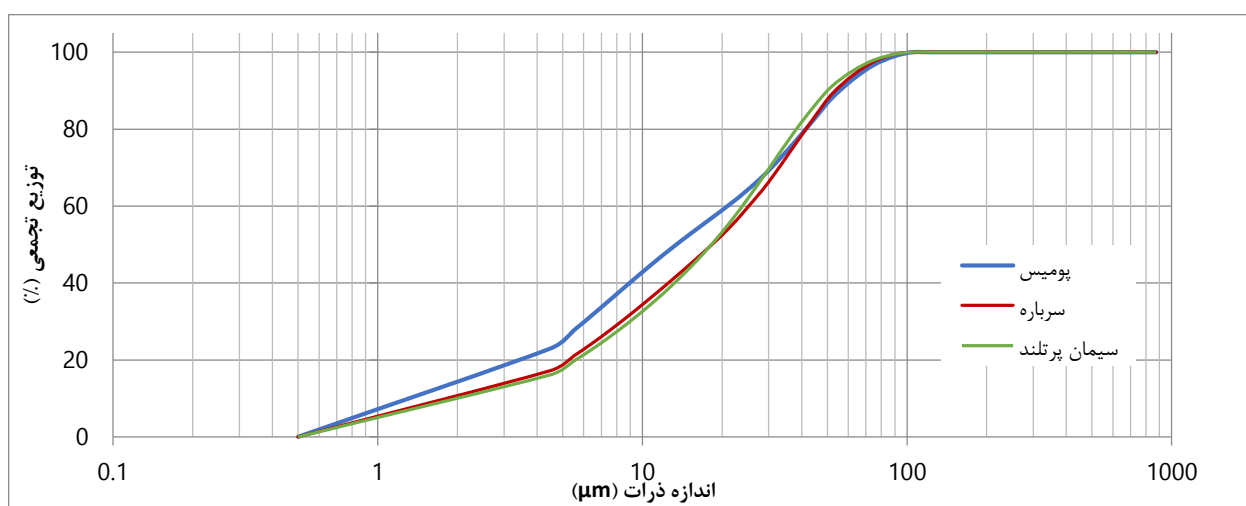
جدول ۲: مشخصات فیزیکی مواد پایه

مشخصات فیزیکی	سرباره	پومیس تفتان	سیمان پرتلند
بلین (cm^2/g)	۳۳۸۳	۵۰۴۷	۳۰۳۵
وزن مخصوص (g/cm^3)	۲/۷۹	۲/۵۴	۳/۰۲



شکل ۱: نتایج آنالیز XRD مواد خام اولیه

شکل شماره ۲ نیز توزیع اندازه ذرات سرباره، پومیس و سیمان پرتلند را نشان می‌دهد. سطح مخصوص سرباره $3383 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و میانگین اندازه ذرات آن $25/79 \text{ }\mu\text{m}$ می‌باشد که از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شده است. پومیس تفتان با سطح مخصوص $5074 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و میانگین اندازه ذرات $22/24 \text{ }\mu\text{m}$ ، از کارخانه سیمان خاش تهیه گردیده است. سیمان پرتلند با سطح مخصوص $3035 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و میانگین اندازه ذرات $24/77 \text{ }\mu\text{m}$ نیز از کارخانه سیمان کردستان تهیه گردیده است.



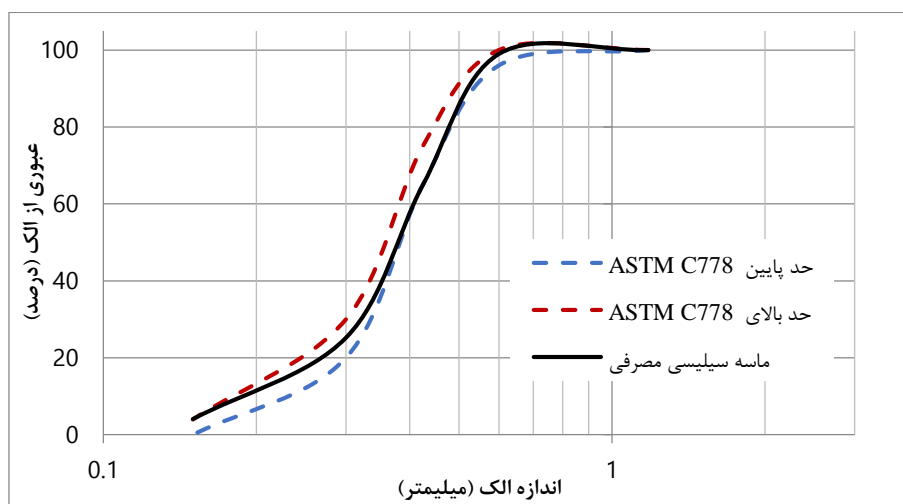
شکل ۲: توزیع اندازه ذرات مواد خام اولیه

۲-۱-۲- فعالساز

در این مطالعه به منظور فعالسازی قلیایی مواد پایه از هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم استفاده شده است. مقادیر بهینه غلظت، مدول سیلیکاتی و مقدار مصرف مواد فعالساز بر اساس مقادیر بهینه مطالعات پیشین [۱۸] انتخاب شده است. بدین منظور هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم به صورت پرک تهیه و جهت دستیابی به محلول ۶ مولار در آب مقطر حل شده است. سیلیکات سدیم که محلولی از SiO_2 ، Na_2O و آب می باشد با مدول ۳/۳۳ و درصد وزنی جامد ۴۸ درصد به منظور تولید ملات قلیا فعال استفاده شده است. مدول سیلیکات سدیم نسبت SiO_2 به Na_2O موجود در این محلول می باشد. از آب مقطر جهت ساخت محلول های قلیایی در این مطالعه استفاده شده است. همچنین از آب شرب شهر تهران به منظور ساخت آزمون های ملات سیمان پرتلندی شاهد استفاده شده است.

۲-۱-۳- ماسه

سنگدانه مورد استفاده برای ساخت آزمون های ملات در این تحقیق، ماسه سیلیسی بوده است. از طریق قرار دادن در آب، ماسه ها شسته شده تا ناخالصی های آن جدا گردد و سپس توسط آفتاب و جریان هوا خشک گردیدند. پس از آن به منظور دستیابی به دانه بندی استاندارد ASTM C778 [۱۹] مقدار ۷۲ درصد و ۲۸ وزنی از دو رده دانه بندی با یکدیگر مخلوط گردیده که نمودار دانه بندی مخلوط حاصل، در شکل ۳ نشان داده شده و با محدوده های استاندارد مقایسه شده است. مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی نیز در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۳: نمودار دانه بندی ماسه سیلیسی مصرفی

جدول ۳: مشخصات فیزیکی ماسه سیلیسی مصرفی

وزن مخصوص (Kg/m^3)	درصد جذب آب SSD
۲۵۹۰	۱/۰۱

۲-۱-۴- فوق روان کننده

در این تحقیق برای دستیابی به روانی مناسب، در ساخت ملات سیمان پرتلندی شاهد از فوق روان کننده استفاده شد. فوق روان کننده مورد استفاده از نسل سوم با پایه کربوکسیلات های اصلاح شده و با نام تجاری P10-3R بوده است. این ماده به رنگ سبز تیره بوده و چگالی آن در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برابر ۱/۱ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد و مقدار یون کلرید موجود در آن کمتر از ۵۰۰ ppm است. علاوه بر این، محدوده مصرف P10-3R برابر ۰/۲ تا ۱/۶ درصد وزن سیمان، توسط سازنده پیشنهاد شده است.

۲-۲- طرح مخلوط و نحوه ساخت ملات قلیافعال

مشخصات طرح مخلوط ملات‌های قلیافعال با پایه سرباره و پومیس، نحوه نامگذاری طرح‌های مختلف و مقادیر مختلف هر یک از فاکتورهای مورد مطالعه در این مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. نحوه نامگذاری این طرح‌ها به این صورت بوده است که؛ حروف ابتدایی نشان دهنده نوع محلول قلیایی (Na: هیدروکسید سدیم و K: هیدروکسید پتاسیم)، عدد بعدی نشان‌دهنده غلظت محلول قلیایی و حرف و عدد پس از آن نیز نشان‌دهنده درصد وزنی جایگزینی پومیس بجای سرباره می‌باشد. همانگونه که در جدول ۴ ملاحظه می‌گردد، از دو نوع محلول قلیایی شامل؛ هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم و دو مقدار جایگزینی پومیس بجای سرباره شامل؛ ۰ و ۱۰ درصد وزنی برای ساخت نمونه‌های ملات قلیافعال استفاده شده است. غلظت محلول قلیایی در تمامی طرح‌ها برابر با ۶ مولار بوده و مدول سیلیکاتی آب شیشه و نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی به ترتیب برابر با ۲/۳۳ و ۰/۴ می‌باشد. برای تعیین مقدار مناسب نسبت محلول به پوزولان طرح‌هایی با نسبت محلول به پوزولان ۱، ۰/۹ و ۰/۸ ساخته شد. ملات قلیافعال با نسبت محلول به پوزولان ۰/۸ بسیار سفت بوده و کارایی مناسبی نداشت. ملات قلیافعال با نسبت محلول به پوزولان برابر با ۱ نیز پس از قالب‌گیری آب انداختگی زیادی داشته که این موضوع می‌تواند باعث خروج مواد فعال‌ساز از ملات‌های قلیافعال و کاهش مقاومت فشاری گردد. بنابراین طرح‌های ملات قلیافعال با نسبت محلول به پوزولان برابر با ۰/۹ ساخته شده است.

جدول ۴: طرح مخلوط ملات‌های قلیافعال حاوی سرباره و پومیس

ردیف	نام طرح	نوع محلول	غلظت محلول (Mol)	وزن ماده پایه (Kg/m ³)	درصد جایگزینی سرباره با پومیس	مدول سیلیکاتی	نسبت سیلیکات به محلول	نسبت فعال‌ساز به مواد پایه	نسبت سنگدانه به مواد پایه	نسبت آب به ذرات جامد
۱	Na6-Pu0	هیدروکسید سدیم	۶	۴۶۳/۸۰	۰	۲/۳۳	۰/۴	۰/۹	۲/۷۵	۰/۴۸۷
۲	Na6-Pu10	هیدروکسید سدیم	۶	۴۶۳/۸۰	۱۰	۲/۳۳	۰/۴	۰/۹	۲/۷۵	۰/۴۸۷
۳	K6-Pu0	هیدروکسید پتاسیم	۶	۴۶۳/۸۰	۰	۲/۳۳	۰/۴	۰/۹	۲/۷۵	۰/۴۸۷
۴	K6-Pu10	هیدروکسید پتاسیم	۶	۴۶۳/۸۰	۱۰	۲/۳۳	۰/۴	۰/۹	۲/۷۵	۰/۴۸۷

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی و دوام ملات‌های قلیافعال با پایه سرباره و پومیس، نمونه‌های ملات سیمان پرتلند شاهد ساخته شده است. مشخصات طرح مخلوط ملات سیمان پرتلندی (OPC) در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به اینکه مقدار مواد جامد بجز ماسه، در ملات سیمان قلیافعال برابر با ۵۹۲/۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است، مقدار سیمان در ملات سیمان پرتلندی شاهد برابر همین مقدار در نظر گرفته شد. نسبت آب به سیمان در ملات سیمان پرتلندی شاهد، با توجه به نسبت آب به ذرات جامد در ملات سیمان پرتلندی برابر با ۰/۴۸۷ در نظر گرفته شد. علاوه بر این برای دستیابی به کارایی مناسب از فوق روان کننده به میزان ۰/۳ درصد وزنی سیمان استفاده شده است.

جدول ۵: طرح مخلوط ملات سیمان پرتلندی شاهد

ردیف	نام طرح	وزن سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	نسبت آب به سیمان	نسبت سنگدانه به سیمان	مقدار فوق روان کننده (درصد وزنی سیمان)
۱	OPC-Mortar	۵۹۲/۶	۰/۴۸۷	۲/۷۵	۰/۳

جهت ساخت ملات قلیافعال ابتدا محلول‌های قلیایی ۶ مولار از طریق حل کردن ذرات هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم در آب مقطر تهیه و سرد شده است. برای ساخت ملات‌های قلیافعال از مخلوط کن ۸ لیتری استفاده گردیده است. ابتدا مواد پایه (سرباره و پومیس) در جام ریخته شده و بصورت خشک مخلوط شدند. پس از آن محلول قلیایی و سیلیکات سدیم به مواد پایه اضافه شده و به مدت

۳۰ ثانیه با دور کند با هم مخلوط شدند. پس از آن به مدت ۱۵ ثانیه اختلاط متوقف شده و دیواره جام تمیز گردید. سپس ماسه به آرامی به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه اختلاط با دور کند و ۳۰ ثانیه با دور تند صورت گرفته است. پس از آن به مدت ۱۵ ثانیه اختلاط متوقف شده و دیواره جام تمیز گردیده و در انتها اختلاط نهایی با دور تند به مدت ۶۰ ثانیه انجام گردیده است. پس از اختلاط کامل، کارائی ملات قلیافعال اندازه گیری و سپس ملات قلیافعال حاصل قالب گیری شده است. به منظور خارج شدن حباب های هوا، آزمون های ملات قلیافعال با استفاده از میز ویبره (به مدت ۱۰ تا ۳۰ ثانیه) متراکم گردیده و به مدت ۲۴ ساعت در محیطه رطوبت نگهداری شده اند.

به منظور بررسی اثر روش های مختلف عمل آوری، پس از باز کردن قالب ها، آزمون های ملات قلیافعال طرح ۳ (K6-PO) تا سن آزمایش مقاومت فشاری به سه روش عمل آوری شده و مناسب ترین روش عمل آوری که باعث دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری شده، برای سایر آزمون ها و آزمایش ها بکار گرفته شده است. سه روش عمل آوری مورد نظر بشرح ذیل می باشد:

۱- عمل آوری خشک: در این روش آزمون های ملات قلیافعال طرح ۳ در کیف های پلاستیکی مخصوصی جهت جلوگیری از افت رطوبت، نگهداری شده اند. دمای محیط نگهداری آزمون ها $23 \pm 2^\circ C$ بوده است.

۲- عمل آوری در آب: در این روش آزمون های ملات قلیافعال طرح ۳ پس از قالب برداری، در حوضچه آب قرار داده شده و تا سن آزمایش در آن نگهداری شده اند. دمای آب و دمای محیط نگهداری آزمون ها $23 \pm 2^\circ C$ بوده است.

۳- عمل آوری در محلول نمک: برای بررسی اثر نفوذ یون های کلراید روی مقاومت فشاری آزمون های ملات قلیافعال طرح ۳ پس از قالب برداری، در محلول ۳٫۶ درصد وزنی نمک طعام (NaCl) قرار داده شده و تا سن آزمایش در آن نگهداری شده اند. دمای محلول و دمای محیط نگهداری آزمون ها $23 \pm 2^\circ C$ بوده است.

پس از تعیین مناسب ترین روش عمل آوری، تمامی آزمون های ملات قلیافعال پس از قالب برداری تا سن آزمایش در حوضچه آب نگهداری شده اند. دمای آب و دمای محیط نگهداری آزمون ها $23 \pm 2^\circ C$ بوده است. ملات سیمان پرتلندی شاهد با استفاده از روش استاندارد ASTM C305 [۲۰] ساخته شده است.

۳-۲- روش آزمایش

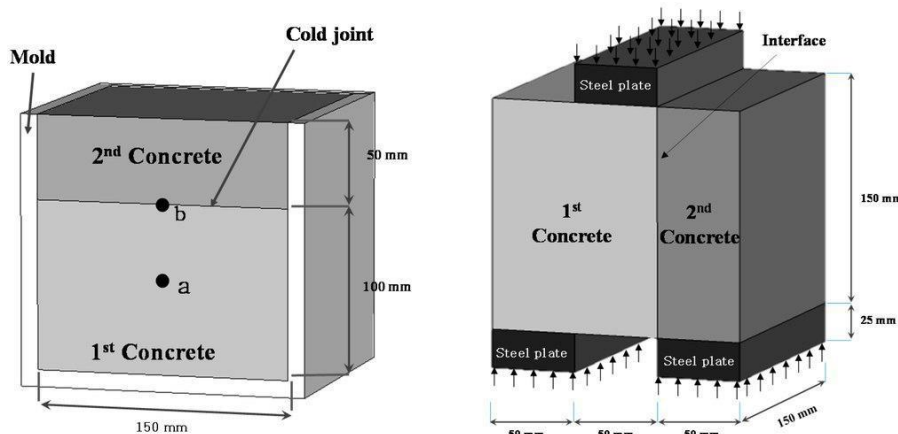
آزمایش مقاومت فشاری ملات در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بر روی آزمون های ملات قلیافعال و ملات سیمان پرتلند شاهد انجام شده است. آزمون های مکعبی ملات قلیافعال به ابعاد ۵۰ میلی متر تا سن آزمایش در آب و آزمون های ملات سیمان پرتلند شاهد در آب آهک عمل آوری شده و با توجه به استاندارد ASTM C39 [۲۱] و با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری با ظرفیت ۲۰ تن مورد آزمایش قرار گرفتند. انتخاب روش عمل آوری با توجه به مقایسه مقاومت فشاری طرح شماره ۳ ملات، در معرض سه نوع عمل آوری خشک، عمل آوری در آب و عمل آوری در محلول نمک بوده است. از هر طرح در هر سن ۳ آزمون مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و میانگین اعداد قرائت شده گزارش گردیده است.

برای تعیین مقاومت چسبندگی ملات های قلیافعال به بتن، از روش برش دو سطحی استفاده شده است (شکل ۴). این روش با استناد به پراکندگی داده های آزمایش و تحلیل های عددی منجر به ارائه نتایج قابل قبول شده است [۲۲]. همچنین نتایج حاصل از روش برش دو سطحی کمتر از روش برش مایل می باشد، زیرا در روش برش مایل، علاوه بر تنش برشی، تنش فشاری نیز وجود دارد و باعث افزایش غیرواقعی نتایج می گردد. در این روش ابتدا آزمون های مکعبی بتنی به ابعاد $15 \times 15 \times 10$ سانتی متر ساخته شده و پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب آهک، از محل عمل آوری خارج شده و به منظور دستیابی به آزمون اشباع با سطح خشک، سطح آنها با پارچه کاملاً خشک گردید. پس از آن، سطحی از آزمون که قرار بود روی آن لایه ملات اجرا شود با برس سیمی دو بار و در دو جهت عمود بر هم کمی زیر شد. این عمل باعث زدودن لایه آهک تشکیل شده روی آزمون ها نیز می گردد [۲۲]. بلافاصله پس از آماده سازی آزمون ها، یک لایه ۵ سانتی متری ملات قلیافعال یا ملات سیمان پرتلندی شاهد روی سطح آماده سازی شده اعمال گردید. پس از ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز عمل آوری

لایه ملات قلیافعال در آب و لایه ملات سیمان پرتلندی شاهد در آب آهک، آزمون‌ها با استفاده از جک فشاری تحت بارگذاری قرار گرفته است. پس از شکستن آزمون از محل اتصال ملات، با استفاده از رابطه ۱ مقاومت چسبندگی بر حسب مگاپاسکال محاسبه شده است.

$$B = \frac{P}{2A} \quad (1)$$

در این رابطه B؛ مقاومت چسبندگی بر حسب مگاپاسکال، P؛ نیروی چسبندگی بر حسب نیوتن و A؛ سطح اتصال ملات و بتن بر حسب میلی‌متر مربع می‌باشد.



شکل ۴: شماتیک اندازه گیری مقاومت چسبندگی به روش برش دو سطحی [۲۳]

برای انجام آزمایش نفوذ آب مطابق با استاندارد BS EN 12390-8:2000 [۲۴]، ابتدا آزمون‌های مکعبی بتنی به ابعاد ۱۳×۱۵×۱۵ سانتیمتر ساخته شده و پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب آهک، لایه ۲ سانتیمتری ملات قلیافعال یا ملات سیمان پرتلندی شاهد روی آن-ها اعمال گردیده است. پس از ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز عمل آوری لایه ملات قلیافعال در آب و لایه ملات سیمان پرتلندی شاهد در آب آهک، آزمون‌ها بمدت ۷۲ ساعت در معرض آب با فشار ۵ بار قرار داده شده و مقدار نفوذ آب در آنها بر حسب میلی‌متر قرائت و گزارش شده است.

تاکنون روش‌های زیادی برای ارزیابی خوردگی میلگرد در بتن مسلح ابداع شده که عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی قابل انجام است. آزمایش پتانسیل نیم‌پیل خوردگی از معدود آزمایش‌هایی است که هم در مقیاس آزمایشگاهی و هم در مقیاس واقعی قابل استفاده می‌باشد. این آزمایش فعال یا انفعالی بودن میلگرد را در بتن مشخص می‌کند. به عبارت دیگر پتانسیل خوردگی نشان می‌دهد که میلگرد از نظر خوردگی در چه وضعیتی می‌باشد. به این نکته باید توجه کرد که ممکن است آزمایش پتانسیل خوردگی فعالیت میلگرد در بتن را نشان دهد ولی بعد از برداشتن پوشش بتنی روی میلگرد و بیرون کشیدن میلگرد هیچگونه آثار زنگ‌زدگی و خوردگی بر سطح میلگرد دیده نشود. لذا باید توجه کرد که پتانسیل خوردگی آلوده بودن پوشش بتن به یون کلراید و دی‌اکسیدکربن و احاطه میلگرد توسط یون کلراید را نشان می‌دهد و شاید اثر زنگ‌زدگی روی میلگرد بعد از چندین سال دیده شود.

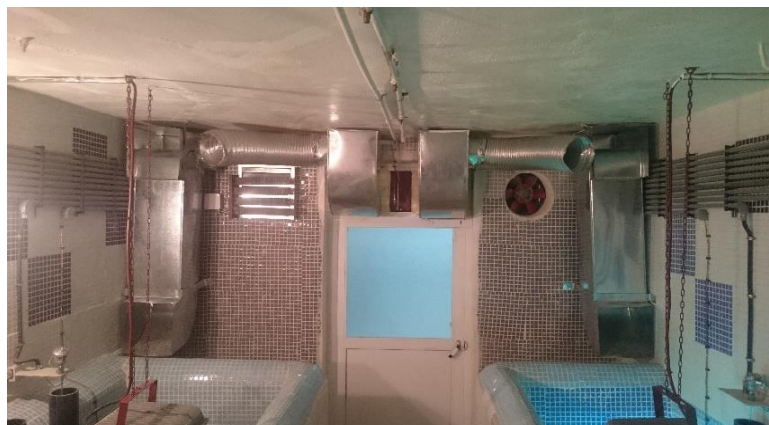
در این آزمایش میزان پتانسیل میلگرد مدفون در بتن مسلح نسبت به یک الکتروود مرجع استاندارد مطابق استاندارد ASTM C876 [۲۵] قرائت می‌گردد. این الکتروود مرجع (مس، نقره یا ...) که در داخل محلولی اشباع از یون‌های همان فلز قرار دارد، نقش نیم سلول اول را دارا بوده و میلگرد قرار گرفته در محیط بتن حاوی یون‌های آهن مانند $Fe(OH)_2$ نقش نیم سلول دوم را خواهد داشت. به این ترتیب یک سلول الکتریکی ساده تشکیل خواهد شد که با توجه به میزان فعالیت الکتروود مرجع و پتانسیل خوردگی موجود در میلگردها، اختلاف پتانسیلی خواهد داشت. در نقاطی از سازه بتنی مسلح که پتانسیل نیم‌پیل به مقدار قابل توجهی کوچکتر (منفی‌تر) از نقاط مجاور باشد، احتمال خوردگی وجود دارد. مطابق توصیه ASTM C876 [۲۵] خطر خوردگی در بتن بر مبنای اختلاف پتانسیل قرائت شده توسط دستگاه نیم‌پیل در جدول ۶ ارائه شده است.

اختلاف پتانسیل الکتروشیمیایی اندازه‌گیری شده بوسیله دستگاه نیم‌پیل به عوامل مختلفی بستگی دارد که مستقیماً بر روی نتایج تأثیر می‌گذارند. مهمترین عامل، کیفیت پوشش بتنی روی میلگرد بخصوص شرایط رطوبتی و آلودگی پوشش بتنی به محصولات کربناتاسیون و یا یون‌های کلراید می‌باشد. همچنین وجود اکسیژن در محیط بتن اثر زیادی روی مقدار پتانسیل دارد. هر چقدر مقدار اکسیژن کمتر باشد، پتانسیل کمتری اندازه‌گیری می‌شود. به همین دلیل توصیه شده است که شرایط رطوبتی آزمون‌های مورد آزمایش را یکسان نگاه داشت.

در این مقاله آزمایش نیم‌پیل به مدت شش ماه روی آزمون‌های ملات قلیا فعال و سیمان پرتلندی در شرایط مغروق و جزر و مدی محیط شبیه سازی خلیج فارس انجام شده است. در پایان دوره شش ماهه برای بررسی دقیق تر وضعیت خوردگی میلگرد، آزمون‌ها شکسته شده و میلگرد خارج شده است. پس از آن میلگردها با استفاده از اسید هیدروکلریدریک (HCl) ۵۰ درصد و برس سیمی اسید شویی شده و افت وزن آنها گزارش شده است. علاوه بر این یک سری از آزمون‌ها در محلول NaCl با غلظت ۳۶ گرم بر لیتر قرار گرفته و در معرض اختلاف پتانسیل ۵ ولت قرار داده شده اند. پس از مدت ۱۴ روز، عمل اسید شویی و محاسبه افت وزن روی این آزمون‌ها نیز انجام گرفته است. تصاویری از محیط شبیه‌سازی خلیج فارس شکل شماره ۵ نشان داده شده است. در این محیط دو حوضچه با ظرفیت تقریبی ۳۰۰۰ لیتر ساخته شده است. به منظور شبیه‌سازی اشعه خورشید از چهار چراغ UV (دو عدد روی هر حوضچه) با برنامه‌ریزی روز و شب استفاده شده است. رطوبت نسبی محیط شبیه‌سازی نیز با استفاده از سنسورهای رطوبت سنج، فن‌های گردش هوا و نازل‌های مه‌پاش کنترل شده و به میزان ۶۸ درصد بوده است. علاوه بر این دمای محیط و آب با استفاده از سنسورهای دما، فن‌های گردش هوا، المنت هوای خشک و المنت‌های مغروق کنترل شده و برابر با ۳۸ درجه سانتیگراد بوده است. با استفاده از دو پمپ و سنسور کنترل سطح آب، کمینه و بیشینه آب موجود در حوضچه‌ها کنترل گردیده و سیکل‌های جزر و مدی مطابق با شرایط شهر بندرعباس اعمال گردیده است. آب مورد استفاده در این حوضچه‌ها، محلول نمک طعام (NaCl) با غلظت ۳۶/۶ گرم بر لیتر بوده است. تصویر نمونه‌های آزمایش‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶: ارتباط خطر خوردگی میلگردها با مقدار اختلاف پتانسیل قرائت شده [۲۵]

نتایج آزمایش نیم‌پیل (mv)	خطر خوردگی محتمل
< -۲۰۰	کم (احتمال خوردگی کمتر از ۱۰ درصد)
-۲۰۰ تا -۳۵۰	متوسط
-۳۵۰ تا -۵۰۰	زیاد (احتمال خوردگی بیشتر از ۹۰ درصد)
> -۵۰۰	خیلی زیاد (شدید)



شکل ۵: تصاویری از محیط شبیه‌سازی خلیج فارس



شکل ۶: نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های مختلف

۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری ملات قلیافعال

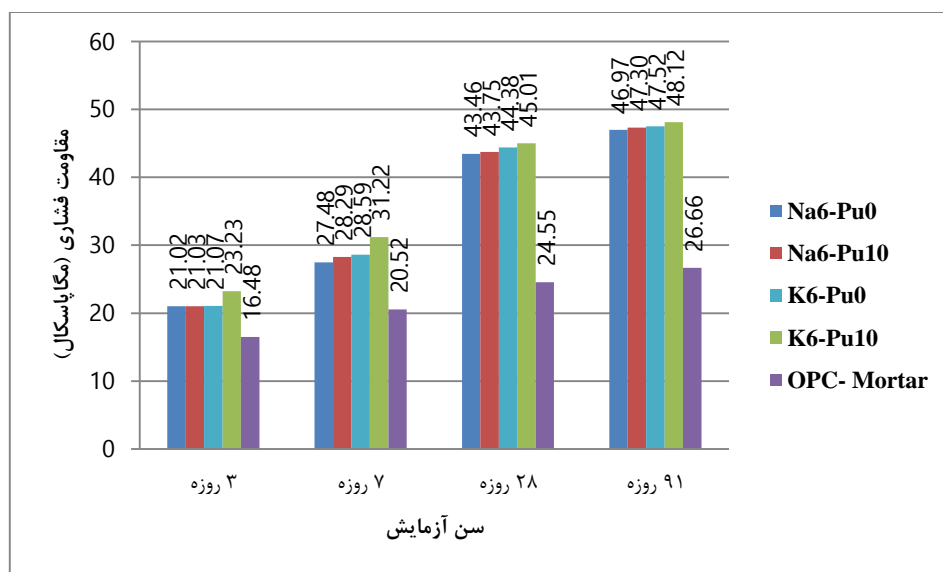
به منظور تعیین بهترین شرایط عمل آوری ملات‌های قلیافعال، آزمون‌های ملات قلیافعال طرح ۳ (K6-Pu0) تا سن آزمایش به سه روش شامل؛ عمل آوری خشک، عمل آوری در آب و عمل آوری در محلول ۳٫۶ درصد وزنی نمک طعام نگهداری شدند که نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای روش‌های مختلف عمل آوری در جدول ۷ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مقاومت فشاری حاصل از روش‌های مختلف عمل آوری در سنین اولیه تفاوت چندانی ندارد، در حالیکه با گذشت زمان و در سنین بالاتر مقاومت فشاری آزمون‌های موجود در آب به مقدار قابل توجهی از مقاومت فشاری آزمون‌های عمل آوری خشک بیشتر شده و این بدلیل انجام فرایند هیدراتاسیون در ملات‌های قلیافعال با پایه سرباره است که در عمل آوری مرطوب هیدراتاسیون افزایش می‌یابد. بنابراین با تعیین مناسب‌ترین روش عمل آوری، تمامی آزمون‌های ملات قلیافعال پس از قالب برداری تا سن آزمایش در حوضچه آب نگهداری شده اند. دمای آب و دمای محیط نگهداری آزمون‌ها $23 \pm 2^\circ\text{C}$ بوده است.

جدول ۷: مقاومت فشاری طرح K6-Pu0 در شرایط مختلف عمل آوری

روش عمل آوری	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۱ روزه
عمل آوری در ظرف درب بسته	۲۰/۲۴	۲۸/۴۶	۳۲/۲۱	۳۵/۵۷
عمل آوری در آب	۲۳/۰۸	۳۳/۲۰	۴۰/۱۶	۴۹/۸۰
عمل آوری در محلول ۳٫۶٪ وزنی نمک طعام	۲۱/۴۲	۳۰/۰۲	۴۲/۱۳	۵۲/۸۰

علاوه بر این به منظور بررسی اثر نفوذ یون‌های کلراید بر روی خواص مکانیکی ملات‌های قلیافعال اقدام به عمل آوری آزمون‌های طرح K6-Pu0 در محلول ۳٫۶ درصد وزنی محلول نمک طعام شد. همانگونه که در جدول ۷ نشان داده شده است، عمل آوری در محلول نمک نه تنها باعث کاهش مقاومت فشاری ملات قلیافعال نشده است، بلکه مقاومت فشاری را در سنین بالا افزایش داده است. Giasuddin و همکاران (۲۰۱۳) قبلاً این موضوع را برای ژئوپلیمرهای حاوی خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی نشان داده اند. دلیل این پدیده پر شدن برخی از حفرات آزمون ملات قلیافعال با ته نشینی نمک و همچنین کاهش آب شستگی آزمون‌های قلیافعال در معرض محلول نمک عنوان شده است [۲۶].

نتایج مقاومت فشاری ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش زمان عمل آوری (سن آزمون) مقاومت فشاری ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی سنین مقاومت فشاری تمامی طرح‌های ملات قلیافعال بیش از ملات سیمان پرتلندی شاهد بوده، بطوریکه مقاومت فشاری ۹۱ روزه ملات‌های قلیافعال تقریباً دو برابر ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. مقاومت فشاری آزمون‌های ملات قلیافعال در یک محدوده و نزدیک به هم می‌باشد. با این وجود مقاومت فشاری آزمون‌های ملات قلیافعال حاوی هیدروکسیدپتاسیم در مقایسه با مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی هیدروکسیدسدیم کمی بیشتر بوده است. ضمناً استفاده از ۱۰ درصد پومیس بجای سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری ملات قلیافعال شده است. یکی از دلایل این موضوع ریزتر بودن ذرات پومیس نسبت به سرباره و ایجاد ساختار متراکم‌تر با حفرات کمتر می‌باشد.

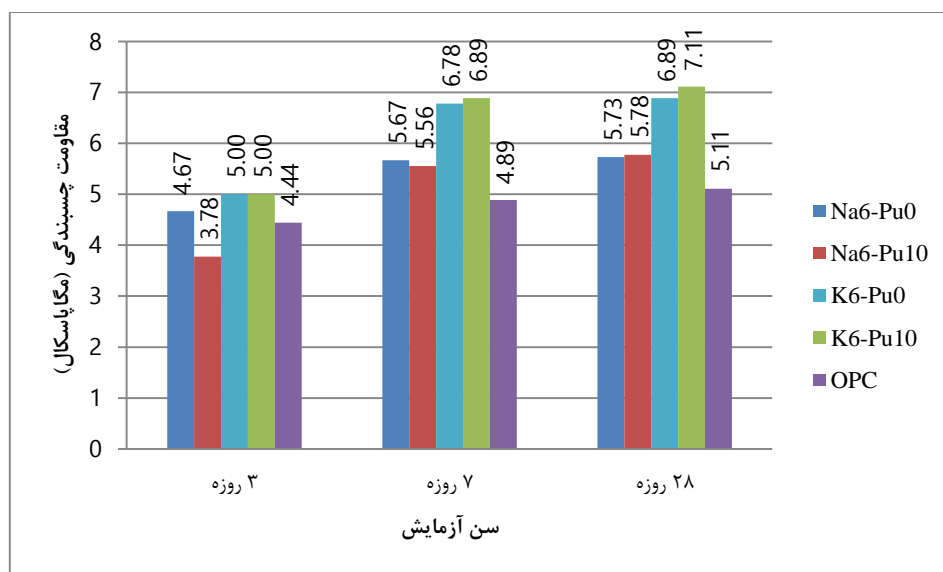


شکل ۷: نتایج مقاومت فشاری ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد

یکی از پارامترهای مهم روکش‌های تعمیراتی، مدول الاستیسیته می‌باشد که باید با بتن پایه در یک محدوده بوده و همخوانی داشته باشد. مطالعات مختلف نشان می‌دهد مدول الاستیسیته ملات‌ها و بتن‌های قلیافعال در محدود بتن سیمان پرتلندی می‌باشد. در مطالعات Douglas و همکاران [۲۷] مدول الاستیسیته بتن سرپاره قلیا فعال حدود ۳۰ تا ۳۵ گیگاپاسکال بوده است. در مطالعات Sofi و همکاران [۲۸] نیز مدول الاستیسیته در محدوده ۲۵ تا ۳۵ گیگاپاسکال بوده است و این آزمون‌ها دارای مقاومت فشاری حدود ۴۷ تا ۵۵ مگاپاسکال بوده اند. بطور کلی می‌توان گفت مدول الاستیسیته بتن سیمان پرتلندی با مقاومت فشاری ۳۰ تا ۵۰ مگاپاسکال در محدوده ۲۵ تا ۳۵ گیگاپاسکال می‌باشد.

۲-۳- آزمایش مقاومت چسبندگی

برای تعیین مقاومت چسبندگی ملات‌های تعمیراتی قلیافعال و مقایسه آن با ملات سیمان پرتلندی شاهد از روش برش دو سطحی استفاده شد. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۸ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد روند نتایج مقاومت چسبندگی در سن ۲۸ روزه همانند نتایج آزمایش مقاومت فشاری بوده و مقاومت چسبندگی آزمون‌های ملات قلیافعال به بتن پایه در سنین مختلف از مقاومت چسبندگی ملات سیمان پرتلندی شاهد بیشتر بوده است. Foster و Castel [۲۹] نیز قبلاً نشان دادند که برای ملات‌های قلیافعال و ملات سیمان پرتلندی با مقاومت فشاری مشابه، ملات‌های قلیافعال در چسبندگی عملکرد بهتری را از خود به نمایش گذاشته است. علاوه بر این در تمامی سنین، مقاومت چسبندگی آزمون‌های ملات قلیافعال حاوی هیدروکسیدپتاسیم از آزمون‌های حاوی هیدروکسیدسدیم بیشتر بوده است. همانگونه که Fan و همکاران [۴] نشان داده‌اند واکنش بین ملات قلیافعال و بتن قدیمی مهمترین عامل تاثیرگذار بر مقاومت چسبندگی ملات قلیافعال به بتن می‌باشد که احتمالاً با وجود هیدروکسیدپتاسیم این واکنشها بیشتر شده است. همچنین اثر هیدروکسیدپتاسیم در افزایش مقاومت چسبندگی ملات سرپاره و پومیس قلیافعال بیشتر از مقاومت فشاری بوده که بدلیل تفاوت در پارامترهای موثر بر این آزمایش‌ها می‌باشد [۴]. در مقایسه نتایج مقاومت چسبندگی با سایر مطالعات [۲۲] می‌توان گفت نتایج مقاومت چسبندگی تمامی طرح‌های ملات قلیافعال در این مقاله پس از ۲۸ روز عمل آوری، از نتایج مقاومت چسبندگی ملات‌های تعمیراتی پایه سیمانی حاوی ۷ درصد میکروسلیس (۳,۰۲ مگاپاسکال) و مصالح پایه سیمانی اصلاح شده پلیمری حاوی ۲۰ درصد استایرن بوتادین (۳,۷۱ مگاپاسکال) بیشتر بوده است.

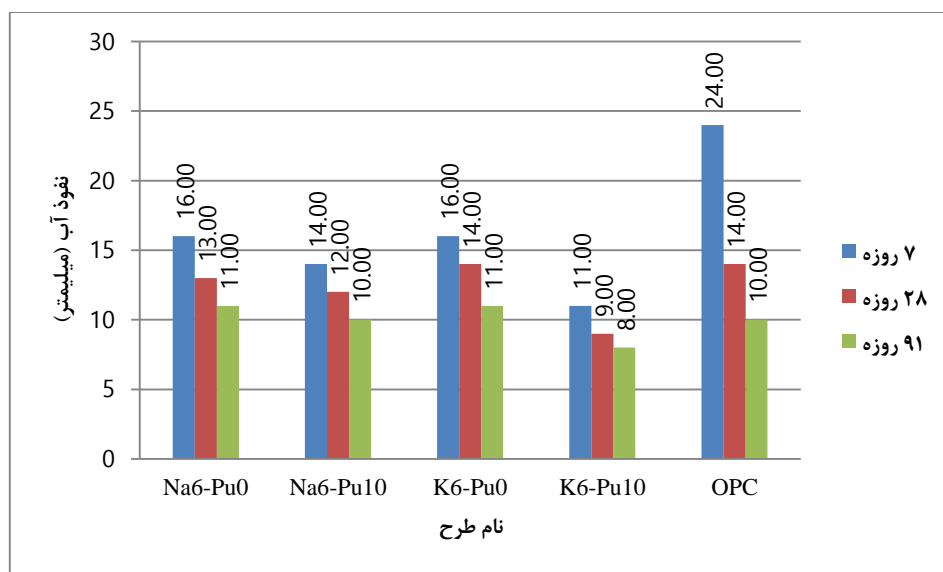


شکل ۸: نتایج مقاومت چسبندگی ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد

۳-۳- آزمایش نفوذ آب تحت فشار

یکی از پارامترهای مهم در بررسی دوام بتن و ملات، میزان نفوذپذیری آب می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد برای انجام این آزمایش از آزمون‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتی متری با روکش دو سانتیمتری ملات استفاده شده است. نتایج آزمایش تعیین میزان نفوذ آب که متوسط دو آزمون می‌باشد، به صورت نمودار میله ای برای سنین مختلف در شکل ۹ ارائه شده است.

نتایج آزمایش نفوذ آب برای ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد در بازه ۸ الی ۲۴ میلیمتر قرار گرفته اند که مقادیر نفوذ بسیار کمی را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود روند نتایج مطابق با نتایج مقاومت فشاری بوده و افزودن ۱۰ درصد پومیس به ملات سرباره قلیافعال بدلیل قطع ارتباط لوله‌های مویینه و بستن راه ارتباطی حفرات باعث کاهش نفوذپذیری این مصالح می‌گردد. کمترین مقدار نفوذ آب در آزمون‌های ملات در سنین مختلف، برای آزمون K6-Pu10 بدست آمده که حاوی هیدروکسیدپتاسیم به‌عنوان فعالساز و ۱۰ درصد پومیس و ۹۰ درصد سرباره به‌عنوان ماده پایه می‌باشد. در مقابل، بیشترین مقدار نفوذ آب برای آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی شاهد بوده است. ضمناً با افزایش سن آزمون‌ها بدلیل تکمیل فرآیند ژئوپلیمره شدن و هیدراتاسیون و پر شدن حفرات ملات، مقدار نفوذ آب در آزمون‌های ملات کاهش یافته است. اساساً نفوذپذیری به صورت حرکت مایع یا گاز در بتن تحت فشار تعریف می‌شود و یک خصوصیت ذاتی است که به قرارگیری و نظم هندسی و مشخصات ذرات تشکیل‌دهنده بتن بستگی داشته و به وسیله تراکم و تخلخل خمیر و هیدراته شدن سیمان و ناحیه انتقال بتن کنترل می‌شود. با توجه به نفوذپذیری کمتر ملات‌های سرباره قلیافعال این مصالح می‌تواند باعث افزایش دوام و عمر مفید سازه‌های بتنی گردد.



شکل ۹: نتایج آزمایش نفوذ آب در آزمون‌های روکش شده با ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی

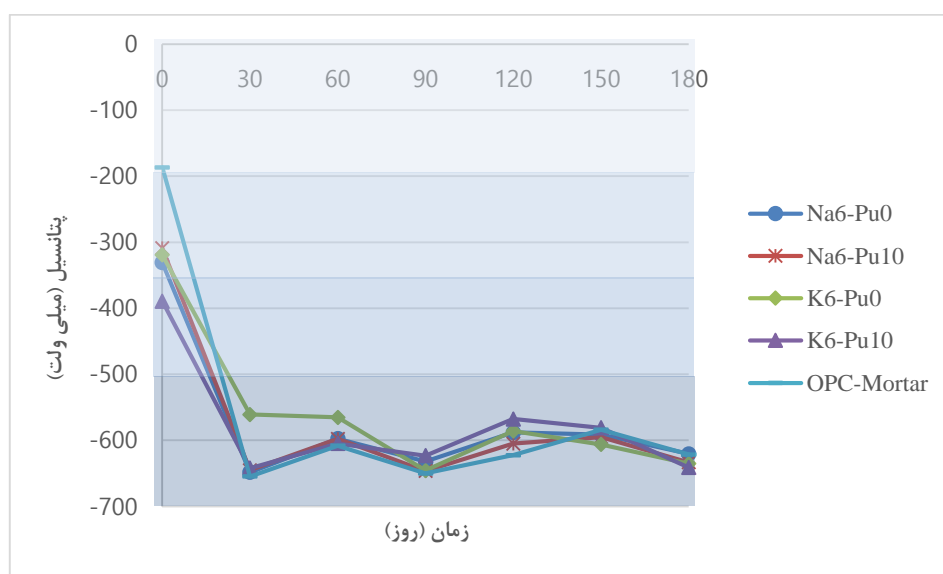
۳-۴- آزمایش پتانسیل خوردگی نیم‌پیل

در این مقاله به منظور ارزیابی خوردگی میلگرد مدفون در ملات‌های قلیافعال و مقایسه آن با ملات سیمان پرتلندی شاهد، آزمایش نیم‌پیل به مدت شش ماه بر روی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی در شرایط مغروق و جزر و مدی محیط شبیه سازی خلیج فارس انجام شده است. نتایج مربوط به پتانسیل نیم‌پیل بصورت ماهیانه در جدول ۸ ارائه شده است. پتانسیل نیم‌پیل اولیه مربوط به قبل از قرار گرفتن آزمون‌ها در معرض محلول نمک می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد پتانسیل نیم‌پیل اولیه آزمون‌های ملات قلیافعال بسیار منفی‌تر از آزمون‌های سیمان پرتلندی می‌باشد. به عبارت دیگر پتانسیل نیم‌پیل اولیه آزمون‌های ملات قلیافعال بطور متوسط ۱،۹ برابر آزمون‌های سیمان پرتلندی می‌باشد. این موضوع بدلیل وجود یون‌های بسیار زیاد و رسانایی بیشتر آزمون‌های قلیافعال در مقایسه با آزمون‌های سیمان پرتلندی می‌باشد. تفاوت فاحش موجود در پتانسیل نیم‌پیل اولیه آزمون‌های ملات قلیافعال و آزمون‌های سیمان پرتلندی نشان می‌دهد معیارهای ارائه شده در استاندارد ASTM C876 در خصوص ارتباط خطر خوردگی میلگردها و میزان پتانسیل نیم‌پیل برای آزمون‌های قلیافعال قابل استفاده و استناد نمی‌باشد و نیاز است محدوده‌های دیگری برای مصالح قلیافعال ارائه گردد.

شکل ۱۰ روند کاهش پتانسیل نیم‌پیل برای آزمون‌های قرار گرفته در ناحیه مغروق اتاق خلیج فارس را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد علی‌رغم اینکه پتانسیل اولیه آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی بسیار کمتر از پتانسیل اولیه آزمون‌های ملات قلیافعال می‌باشد، پس از قرارگیری آزمون‌ها در محلول نمک، پتانسیل آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی برابر و حتی منفی‌تر از پتانسیل آزمون‌های ملات قلیافعال می‌باشد. این موضوع نشان دهنده عملکرد مناسب تر ملات‌های قلیافعال در مقایسه با آزمون ملات سیمان پرتلندی شاهد در بحث دوام در برابر خوردگی کلرایدی می‌باشد. با توجه به وجود یون‌های Na^+ ، K^+ و OH^- در آزمون‌های ملات‌های قلیافعال و رسانایی بالای این آزمون‌ها نسبت به آزمون‌های سیمان پرتلندی، آزمایش‌هایی که اساس آنها اعمال پتانسیل یا جریان الکتریکی می‌باشد برای مقایسه مصالح قلیافعال مناسب نیست. Sykes و Holloway [۳۰] پیشنهاد داده اند که سولفیدهای موجود در سرباره نیز دلیلی برای پیچیدگی‌های الکتروشیمیایی آزمون‌های قلیافعال با پایه سرباره بوده و روی اندازه‌گیری جریان خوردگی تأثیرگذار می‌باشد. در تحقیقات Bernal [۱۷] و Aperador و همکاران [۳۱] نیز، پتانسیل خوردگی تمامی آزمون‌های قلیافعال بر اساس استاندارد ASTM C876 در محدوده احتمال زیاد خوردگی قرار گرفته است.

جدول ۸: مقادیر پتانسیل الکتریکی آزمون‌ها پس از یک تا شش ماه قرارگیری در معرض محلول کلرید سدیم

ردیف	نام طرح	محیط جزر و مدی						محیط مغروق							
		اولیه	۳۰ روزه	۶۰ روزه	۹۰ روزه	۱۲۰ روزه	۱۵۰ روزه	۱۸۰ روزه	اولیه	۳۰ روزه	۶۰ روزه	۹۰ روزه	۱۲۰ روزه	۱۵۰ روزه	۱۸۰ روزه
۱	Na6-Pu0	-۳۶۰	-۶۶۳	-۶۴۹	-۵۹۹	-۵۷۰	-۵۷۱	-۵۸۱	-۳۳۱	-۶۴۸	-۵۹۷	-۶۳۲	-۵۸۸	-۵۹۱	-۶۲۱
۲	Na6-Pu10	-۳۰۹	-۶۳۵	-۶۴۰	-۵۷۸	-۶۰۹	-۵۸۵	-۶۲۱	-۳۰۹	-۶۴۵	-۵۹۸	-۶۴۶	-۶۰۵	-۵۹۵	-۶۳۳
۳	K6-Pu0	-۳۰۱	-۴۱۵	-۴۸۲	-۵۲۰	-۵۵۰	-۵۷۵	-۶۱۷	-۳۳۶	-۵۶۱	-۵۶۵	-۶۴۶	-۵۸۶	-۶۰۶	-۶۳۵
۴	K6-Pu10	-۴۰۳	-۶۳۵	-۶۱۴	-۶۳۰	-۵۵۶	-۵۸۸	-۶۵۸	-۴۰۴	-۶۴۲	-۶۰۵	-۶۲۳	-۵۶۸	-۵۸۱	-۶۴۱
۵	OPC- Mortar	-۱۸۲	-۴۲۷	-۴۶۰	-۴۸۸	-۴۸۷	-۴۹۴	-۵۶۰	-۱۸۷	-۶۵۵	-۶۰۸	-۶۵۰	-۶۲۲	-۵۸۴	-۶۲۲



شکل ۱۰: روند کاهش پتانسیل خوردگی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی در محیط مغروق

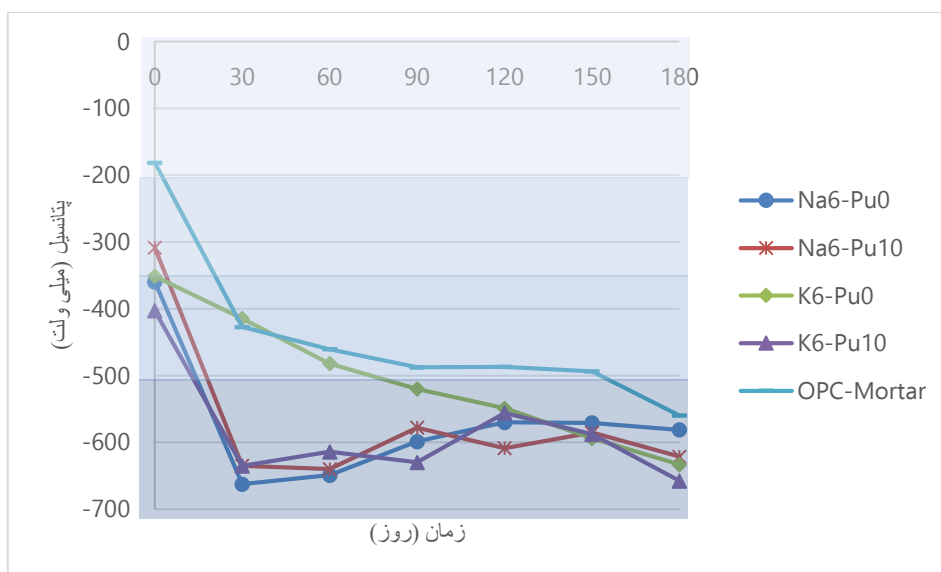
به منظور مقایسه بهتر نتایج بدست آمده، مقدار کاهش پتانسیل خوردگی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد قرار گرفته در ناحیه مغروق، در طول زمان نسبت به پتانسیل اولیه در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، پس از زمان‌های مختلف قرارگیری آزمون‌های در معرض محلول نمک، مقدار کاهش پتانسیل خوردگی آزمون‌های ملات قلیافعال طرح‌های ۱ تا ۴ بسیار کمتر از آزمون ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. همچنین با مقایسه مقدار پتانسیل خوردگی آزمون‌های ملات قلیافعال پس از ۱۸۰ روز می‌توان گفت کاهش پتانسیل خوردگی طرح K6-Pu10 کمتر از سایر طرح‌های ملات قلیافعال بوده و این موضوع می‌تواند نشان دهنده دوام بهتر این طرح در برابر خوردگی کلرایدی در مقایسه با سایر طرح‌های قلیافعال مورد مطالعه باشد. این موضوع با نتایج آزمایش نفوذپذیری ملات‌های قلیافعال نیز مطابقت دارد.



شکل ۱۱: مقدار کاهش پتانسیل خوردگی آزمونه‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد در محیط مغروق

پس از شش ماه قرارگیری آزمونه‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد در معرض محلول نمک و انجام آزمایش نیم پیل، به منظور بررسی وضعیت میلگردهای مدفون در ملات، آزمونه‌ها شکسته شده و پس از شستن میلگردها با محلول اسید هیدروکلریدریک ۵۰ درصد، وضعیت میلگرد و میزان افت وزن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مشاهدات نشان می‌دهد که پس از شش ماه قرارگیری آزمونه‌ها در معرض محلول نمک، هیچگونه افت وزنی در میلگردها مشاهده نگردیده و میلگردها کاملاً سالم بوده اند.

روند کاهش پتانسیل نیم‌پیل برای آزمونه‌های قرار گرفته در ناحیه جزر و مدی اتاق خلیج فارس در شکل ۱۲ نشان داده شده است. روند تغییرات پتانسیل الکتریکی آزمونه‌های ملات قلیافعال در مقایسه با ملات سیمان پرتلندی همانند حالت مغروق می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، پس از قرارگیری آزمونه‌ها در محلول نمک، پتانسیل آزمونه‌های ملات سیمان پرتلندی در محدوده پتانسیل آزمونه‌های ملات قلیافعال می‌باشد. با توجه به بیشتر بودن پتانسیل اولیه ملات‌های قلیافعال، این موضوع نشان دهنده عملکرد مناسب تر ملات‌های قلیافعال در مقایسه با آزمونه ملات سیمان پرتلندی شاهد در بحث دوام در برابر خوردگی کلرایدی می‌باشد. به منظور مقایسه بهتر نتایج بدست آمده، مقدار کاهش پتانسیل خوردگی آزمونه‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد قرار گرفته در ناحیه جزر و مدی محیط شبیه سازی خلیج فارس، در طول زمان نسبت به پتانسیل اولیه در شکل ۱۳ ارائه شده است. پس از ۱۸۰ روز قرارگیری در معرض سیکل‌های جزر و مدی محیط شبیه سازی خلیج فارس، مقدار پتانسیل خوردگی طرح K6-Pu10 کمتر از سایر طرح‌های ملات قلیافعال بوده و این موضوع می‌تواند نشان دهنده دوام بهتر این طرح در برابر خوردگی کلرایدی در مقایسه با سایر طرح‌های قلیافعال مورد مطالعه باشد. این موضوع در سایر آزمایش‌های خواص مکانیکی و دوام نیز مشاهده گردیده بود.



شکل ۱۲: روند کاهش پتانسیل خوردگی آزمون‌های ملات قلیافعال و پرتلندی در معرض سیکل جزر و مدی

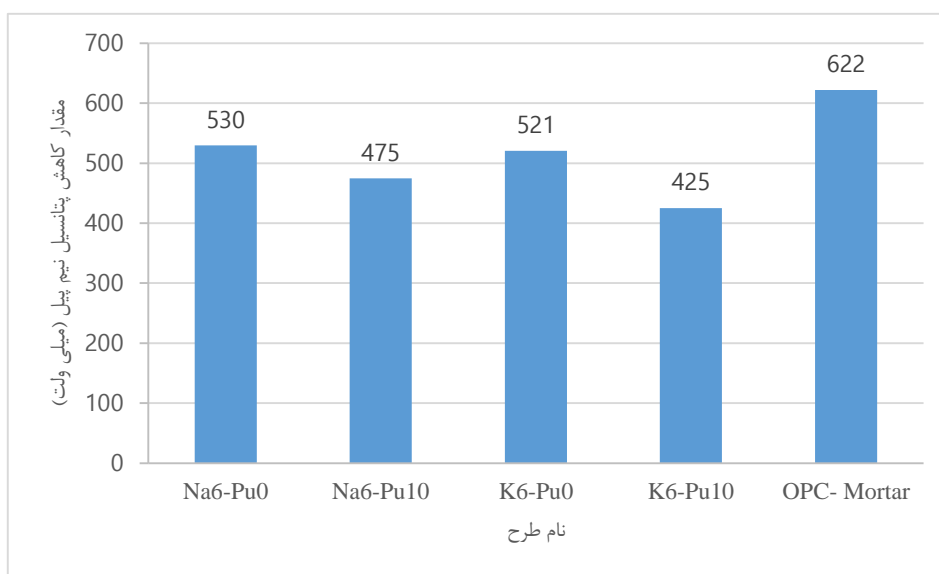


شکل ۱۳: مقدار کاهش پتانسیل خوردگی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد در معرض سیکل جزر و مدی

در ادامه کار به منظور بررسی خوردگی میلگردها در آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد، یک سری از آزمون‌ها پس از ۲۸ روز عمل آوری، در محلول NaCl با غلظت ۳۶ گرم بر لیتر قرار گرفته و در معرض اختلاف پتانسیل ۵ ولت به مدت ۱۴ روز قرار داده شده اند. مقادیر پتانسیل نیم پیل آزمون‌های مذکور قبل و بعد از قرارگیری در معرض محلول نمک و اعمال اختلاف پتانسیل در جدول ۹ نشان داده شده است. به منظور مقایسه بهتر نتایج بدست آمده، مقدار کاهش پتانسیل خوردگی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد برای آزمون‌های در معرض اختلاف پتانسیل ۵ ولت در شکل ۱۴ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در مقایسه آزمون‌های ملات قلیافعال مقدار کاهش پتانسیل نیم پیل مربوط به طرح‌های حاوی هیدروکسیدپتاسیم و ۱۰ درصد پومیس کمتر بوده که می‌تواند نشان دهنده دوام بهتر این طرح در برابر خوردگی کلرایدی در مقایسه با سایر طرح‌های قلیافعال مورد مطالعه باشد و کاملاً منطبق بر نتایج آزمایشات قبلی می‌باشد.

جدول ۹: مقادیر پتانسیل الکتریکی آزمون‌ها پس از قرارگیری در معرض محلول کلرید سدیم و اختلاف پتانسیل ۵ ولت

ردیف	نام طرح	اولیه	نهایی
۱	Na6-Pu0	-۳۱۹	-۸۴۹
۲	Na6-Pu10	-۳۸۵	-۸۶۰
۳	K6-Pu0	-۳۳۰	-۸۵۱
۴	K6-Pu10	-۴۴۴	-۸۶۹
۵	OPC- Mortar	-۱۸۷	-۸۰۹

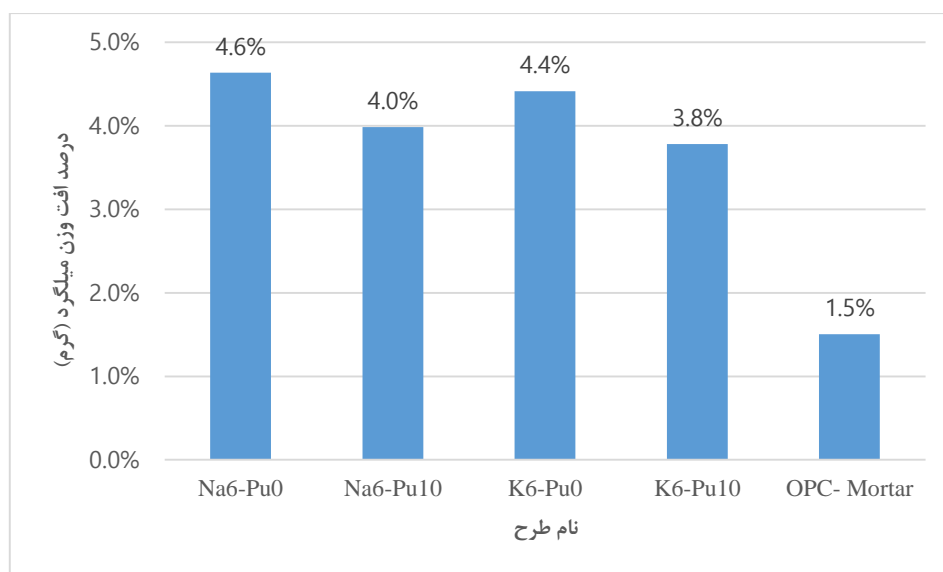


شکل ۱۴: مقدار کاهش پتانسیل خوردگی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد برای آزمون‌های در معرض اختلاف پتانسیل ۵ ولت

به منظور ارزیابی وضعیت خوردگی میلگردهای مدفون در ملات، آزمون‌های در معرض محلول نمک و اختلاف پتانسیل ۵ ولت شکسته شده و پس از اسیدشویی، میزان افت وزن میلگردها اندازه گیری شد. نتایج افت وزن میلگردها به تفکیک برای هر یک از طرح‌های ملات قلیافعال و ملات سیمان پرتلندی شاهد در شکل ۱۵ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مقدار خوردگی میلگردهای مدفون در ملات سیمان پرتلندی شاهد کمتر از میلگردهای مدفون در ملات‌های قلیافعال بوده است. البته با توجه به نفوذپذیری کمتر ملات‌های سرباره قلیا فعال و نتایج بدست آمده در آزمایش‌های تسریع نشده می‌توان گفت بدلیل اعمال اختلاف پتانسیل و رسانایی بیشتر آزمون‌های قلیافعال نسبت به سیمان پرتلندی، میزان نفوذ تسریع شده یون‌های کلراید در آزمون‌های قلیافعال بیشتر بوده و این موضوع باعث افزایش خوردگی میلگردها در این ملات‌ها گردیده است. بنابراین بدلیل رسانایی بسیار متفاوت ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی، اعمال اختلاف پتانسیل به منظور تسریع نفوذ یون‌های کلراید و مقایسه عملکرد محصولات قلیافعال و سیمان پرتلندی روش مناسبی نمی‌باشد ولی این روش برای مقایسه ملات‌های قلیافعال مناسب است و روند نتایج آن مطابق آزمایش تسریع نشده بوده است. در همین راستا Ibrahim و همکاران [۳۲] بیان کرده اند که اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی برای ارزیابی مصالح پوزولان طبیعی قلیافعال نیز مناسب نبوده است.

در خصوص مقایسه عملکرد ملات‌های قلیافعال با یکدیگر ملاحظه می‌گردد که میلگردهای مدفون در ملات قلیافعال حاوی هیدروکسیدپتاسیم نسبت به میلگردهای مدفون در ملات قلیافعال حاوی هیدروکسیدسدیم افت وزن کمتری داشته اند. همچنین مقدار افت وزن میلگردهای مدفون در ملات قلیافعال حاوی ۹۰ درصد سرباره و ۱۰ درصد پومیس کمتر از آزمون‌های حاوی ۱۰۰ سرباره به‌عنوان

ماده پایه بوده است. در مجموع مشاهدات آزمایش خوردگی تسریع شده با نتایج بدست آمده از روش تسریع نشده مطابقت ندارد و بدلیل اعمال اختلاف پتانسیل و وجود مقادیر متفاوت یون‌های در محلول‌های منفذی نتایج قابل مقایسه و استناد نمی‌باشد.



شکل ۱۵: افت وزن میلگردهای مدفون در ملات، برای آزمون‌های در معرض محلول نمک و اختلاف پتانسیل ۵ ولت

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به مطالعه خواص مکانیکی و نفوذپذیری و پتانسیل خوردگی در ملات‌های قلیا فعال حاوی سرباره و پومیس به‌عنوان روکش سازه‌های بتنی پرداخته شد. بدین منظور آزمایش‌های مقاومت و چسبندگی، نفوذ آب تحت فشار، پتانسیل نیم‌پیل پس از قرارگیری در معرض محلول حاوی یون‌های کلراید و سیکل‌های تر و خشک محیط شبیه‌سازی خلیج فارس روی ملات قلیا فعال حاوی سرباره و پومیس و ملات سیمان پرتلندی انجام شد. با توجه به نتایج بدست آمده در این مقاله می‌توان گفت؛

- روند نتایج مقاومت فشاری و چسبندگی ملات‌های قلیا فعال حاوی سرباره و پومیس مشابه بوده و مقاومت فشاری و چسبندگی این ملات‌ها از ملات سیمان پرتلندی شاهد بیشتر بوده است.
- مقاومت فشاری و چسبندگی آزمون‌های ملات قلیا فعال حاوی هیدروکسیدپتاسیم از آزمون‌های حاوی هیدروکسیدسدیم بیشتر بوده است. همچنین استفاده از ۱۰ درصد پومیس بجای سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری و چسبندگی ملات قلیا فعال شده است.
- افزودن ۱۰ درصد پومیس به ملات سرباره قلیا فعال باعث کاهش نفوذپذیری آب در این مصالح شده است. کمترین مقدار نفوذ آب در آزمون‌های حاوی هیدروکسیدپتاسیم به‌عنوان فعال‌ساز و ۱۰ درصد پومیس و ۹۰ درصد سرباره به‌عنوان ماده پایه بوده است.
- پتانسیل نیم‌پیل اولیه آزمون‌های ملات قلیا فعال بطور متوسط ۱,۹ برابر آزمون‌های سیمان پرتلندی بوده است. بنابراین معیارهای ارائه شده در استاندارد ASTM C876 در خصوص ارتباط خطر خوردگی میلگردها و میزان پتانسیل نیم‌پیل برای آزمون‌های قلیا فعال قابل استناد نمی‌باشد.
- کاهش پتانسیل خوردگی آزمون‌های طرح K6-Pu10 کمتر از سایر طرح‌های ملات قلیا فعال بوده می‌باشد. این موضوع با نتایج آزمایش نفوذپذیری ملات‌های قلیا فعال نیز مطابقت دارد.

- نتایج آزمایش نیم‌پیل در معرض اختلاف پتانسیل ۵ ولت نشان می‌دهد که میلگردهای مدفون در ملات قلیافعال حاوی هیدروکسیدپتاسیم نسبت به نمونه‌های حاوی هیدروکسیدسدیم افت وزن کمتری داشته‌اند. همچنین استفاده از ۱۰ درصد پومیس بجای سرباره باعث بهبود نتایج شده است.
- همچنین نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که مقدار افت وزن میلگردهای مدفون در ملات سیمان پرتلندی شاهد کمتر از میلگردهای مدفون در ملات‌های قلیافعال است. ولی این برخلاف نتایج آزمایش‌های تسریع نشده می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت بدلیل اعمال اختلاف پتانسیل و رسانایی بیشتر آزمون‌های قلیافعال نسبت به سیمان پرتلندی، میزان نفوذ تسریع شده یون‌های کلراید در آزمون‌های قلیافعال بیشتر بوده و این موضوع باعث افزایش خوردگی میلگردها در این ملات‌ها گردیده است.
- بدلیل رسانایی بسیار متفاوت ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی، اعمال اختلاف پتانسیل به منظور تسریع نفوذ یون‌های کلراید و مقایسه عملکرد محصولات قلیافعال با سیمان پرتلندی روش مناسبی نبوده ولی مقایسه چندین طرح ملات قلیافعال مناسب است و روند نتایج آن منطبق با آزمایش تسریع نشده بوده است.

۵- مراجع

1. Abhishek H.S., Prashant Sh., Kamath M.V., Kumar M. (2022). Fresh mechanical and durability properties of alkali-activated fly ash-slag concrete: a review. *Innovative Infrastructure Solutions* 7.
2. Salazara R. R., Jesús C., Gutiérrez R. M., Torgalb F. P. (2019). Alkali-activated binary mortar based on natural volcanic pozzolan for repair applications. *Journal of Building Engineering* 25
3. Jiao Z., Wang Y., Zheng W., Huang W., Zhao Y. (2019). Bond properties of alkali-activated slag concrete hollow block masonry with different mortar strength grades. *Construction and Building Materials* 216. p.p. 149-165
4. Fan J., Zhu H., Shi J., Li Z., Yang S. (2020). Influence of slag content on the bond strength, chloride penetration resistance, and interface phase evolution of concrete repaired with alkali activated slag/fly ash. *Construction and Building Materials* 263.
5. Shi, C. (1996). Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. *Cem. Concr. Res.* 26 (12), p. p. 1789-1799.
6. Zhang Z., Yao X., Zhu H. (2010). Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete: I. Basic properties. *Applied Clay Science* 49, p. p. 1-6.
7. Bondar D. (2009). *Alkali activation of Iranian natural pozzolans for producing geopolymer cement and concrete*. A dissertation submitted to University of Sheffield in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, UK.
8. ACI Committee 222. (1985). *Corrosion of Metals in Concrete*. ACI Materials.
9. A.A. Ramezani pour, T. Parhizkar, A.R. Pourkhorshidi, A.M. Raisghasemi. (1996). The effect of environmental conditions on the southern coast of Iran on the long-term durability of concrete with different cements and pozzolans. *Building and Housing Research Center* 434, (In Persian).
10. Gu, P., Beaudoin, J.J. (1998). Construction Technology Update No. 18, Obtaining Effective Half- Cell Potential Measurements in Reinforced Concrete Structures. Institute of Research in Construction. National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.
11. Wheat, H.G. (1992). Corrosion behavior of steel in concrete made with Pyrament blended cement. *Cem. Concr. Res.* 22, p. p. 103-111.
12. Glasser, F.P. (2001). Mineralogical aspects of cement in radioactive waste disposal. *Miner. Mag.* 65 (5), p. p. 621-633.
13. Hossain M.M., Karim M.R., Elahi M.M.A., Islam M.N., Zain M.F.M.. (2020). Long-term durability properties of alkali-activated binders containing slag, fly ash, palm oil fuel ash and rice husk ash. *Construction and Building Materials* 25.
14. Kukko, H., Mannonen, R. (1982). Chemical and mechanical properties of alkali-activated blast furnace slag (F-concrete). *Nord. Concr. Res.* 1, p. p. 16.1-16.16.
15. Deja, J., Małolepszy, J., Jaskiewicz, G. (1991). Influence of chloride corrosion on durability of reinforcement in the concrete. *2nd International Conference on the Durability of Concrete*, p. p. 511-521. Montreal, Canada. American Concrete Institute.

16. Małolepszy, J., Deja, J., Brylicki, W. (1994). Industrial application of slag alkaline concretes. *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, vol. 2, p. p. 989–1001. Kiev, Ukraine. VIPOL Stock Company.
17. Bernal, S.A. (2009). *Carbonatación de Concretos Producidos en Sistemas Binarios de una Escoria Siderúrgica y un Metacaolín Activados Alcalinamente*, Ph.D. thesis, Universidad del Valle. Cali.
18. Jafari Nadoushan M.; Ramezani pour A.A. (2016). The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials* 111: 337-347.
19. ASTM C778 – 12. (2012). *Standard Specification for Standard Sand*. ASTM Publication, United States.
20. ASTM C305 – 12. (2012). *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. ASTM Publication, United States.
21. ASTM C39– 12. (2012). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM Publication, United States.
22. Momayez, A. (2009). *Laboratory study and modeling of methods for evaluating the strength of the connection between repair materials and old concrete*. PhD thesis, Amirkabir University of Technology.
23. Lee H.S., Jang H., Cho K.H. (2016). Evaluation of Bonding Shear Performance of Ultra-High-Performance Concrete with Increase in Delay in Formation of Cold Joints. *Journal of Materials*, 9. p. p. 362-377
24. BS EN 12390-8. (2012) Testing hardened concrete- Part 8: Depth of penetration of water under pressure. British Standard (In Persian).
25. ASTM C876– 12. (2012). *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. ASTM Publication, United States.
26. Haider M. Giasuddin, Jay G. Sanjayan, P.G. Ranjith. (2013). Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions. *Journal of Fuel* 107, p. p. 34–39.
27. Douglas, E., Bilodeau, A., Malhotra, V.M. (1992). Properties and durability of alkali-activated slag concrete. *ACI Mater. J.* 89 (5), p. p. 509–516.
28. Sofi M., Deventer J.S.J., P.A. Mendis, G.C. Lukey. (2007). Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research* 37, p.p. 251–257.
29. Castel A. and Foster S. J.. (2015). Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, p. p. 48-53.
30. Holloway, M., Sykes, J.M. (2005). Studies of the corrosion of mild steel in alkali-activated slag cement mortars with sodium chloride admixtures by a galvanostatic pulse method. *Corros Sci.* 47 (12), p. p. 3097–3110.
31. Aperador, W., Mejía de Gutierrez, R., Bastidas, D.M. (2009). Steel corrosion behaviour in carbonated alkali-activated slag concrete. *Corros. Sci.* 51 (9), p. p. 2027–2033.
32. Ibrahim M., Rahman M. K., Johari M. A. M., Nasir M., Oladapo E. A. (2020). Chloride diffusion and chloride-induced corrosion of steel embedded in natural pozzolan-based alkali activated concrete. *Construction and Building Materials* 262.