



بررسی خواص مکانیکی خمیر سیمان‌های ژئوپلیمری با پایه روباره کوره آهنگدازی و تعیین پارامترهای بهینه

محسن جعفری ندوشن^۱، علی اکبر رضانیپور

مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۹ آبان ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۳ آذر ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۳ بهمن ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۵ بهمن ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

ژئوپلیمر
روباره
فعالساز
مقاومت فشاری
پخش‌شدگی

چکیده: ژئوپلیمرها، پلیمرهای آلومینو سیلیکاتی هستند که از فعالسازی قلیایی مواد اولیه حاوی سیلیسیوم و آلومینیوم به دست می‌آیند. هدف اصلی این مطالعه، بکارگیری روباره کوره آهنگدازی دانه‌ای بعنوان ماده پایه برای ساخت خمیرهای ژئوپلیمری و بررسی و مقایسه خواص خمیرهای سیمان ژئوپلیمری ساخته شده با خمیر سیمان پرتلندی می‌باشد. خواص مکانیکی و دوامی ژئوپلیمرها با مواد پایه مختلف هنوز کاملاً شناخته نشده است. در این میان مطالعه عوامل مؤثر بر خواص این مصالح به منظور دستیابی به بالاترین مقادیر خواص مکانیکی و کمترین هزینه ضروری می‌باشد. در این راستا اثر نوع و غلظت محلول قلیایی و نوع و مقدار سیلیکات سدیم روی کارایی خمیر تازه و خواص مکانیکی خمیرهای سیمان ژئوپلیمری حاوی روباره کوره آهنگدازی بررسی شده و مناسب‌ترین ترکیب فعال‌ساز برای ساخت خمیرهای سیمان ژئوپلیمری تعیین شده است.

نتایج نشان می‌دهد که افزودن سیلیکات سدیم به مخلوط خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره باعث افزایش پخش‌شدگی خمیر تازه و همچنین افزایش مقاومت فشاری می‌گردد. علاوه بر این در خمیرهای سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره، مقدار بهینه مدول سیلیکات سدیم برای رسیدن به حداکثر مقاومت فشاری برابر با ۲/۳۳ بوده و نسبت بهینه سیلیکات سدیم به محلول قلیایی برابر با ۰/۴ می‌باشد. همچنین مقاومت فشاری ۹۱ روزه طرح بهینه خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره بالغ بر ۷۴٪ بیش از مقاومت فشاری ۹۱ روزه خمیر سیمان پرتلندی بوده است.

۱- مقدمه

ژئوپلیمرها گروهی از مواد سیمانی مقاوم و بادوام هستند که در دمای زیر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد سخت می‌شوند. ژئوپلیمرها، پلیمرهای آلومینو سیلیکاتی هستند که از فعالسازی قلیایی مواد معدنی حاوی سیلیسیوم (Si) و آلومینیوم (Al) و یا محصولات جانبی صنعتی مانند خاکستر بادی، روباره کوره آهنگدازی دانه‌ای و خاکستر پوسته برنج به دست می‌آیند. داویدویتز^۱ در دهه ۱۹۷۰ اظهار کرد که ژئوپلیمرها گروهی جدید از مواد آلومینوسیلیکاتی سه وجهی هستند [۱]. محصولات واکنش ژئوپلیمریزاسیون مزایای ویژه‌ای از قبیل خواص مکانیکی عالی، مقاومت مناسب در برابر دمای بالا و حملات شیمیایی، جمع‌شدگی کم و دیگر موارد دارند [۲].

بتن‌های ژئوپلیمری از مواد پایه (مانند خاکستر بادی، روباره کوره آهنگدازی، خاکستر پوسته برنج) و مواد قلیایی که ماده چسباننده را تشکیل می‌دهند و ریزدانه و درشت‌دانه ساخته می‌شوند. نحوه تولید این نوع بتن‌ها همانند بتن‌های متداول حاوی سیمان پرتلند می‌باشد.

داویدویتز در مطالعات گسترده‌ای به بررسی ساختار شیمیایی ژئوپلیمرها

پرداخته است. وی اصطلاح سیالات (Sialate) را برای ترکیبات شیمیایی ژئوپلیمرهای آلومینوسیلیکاتی پیشنهاد نمود. سیالات مخفف ترکیب قلیایی سیلیسیوم-اکسیژن-آلومینات است. Polysialate حلقه یا زنجیره‌ای پلیمری متشکل از سیلیسیوم و آلومینیوم و اکسیژن می‌باشد، که به صورت آمورف تا نیمه کریستالی تشکیل می‌شود [۳]. فرمول تجربی برای پلی سیالیته‌ها به شکل زیر است:



که در آن M کاتیون موجود در مخلوط بوده و n درجه ژئوپلیمریزاسیون است. Z که می‌تواند برابر با ۱، ۲ و ۳ باشد نوع پیوندها را مشخص می‌نماید و W تعداد ملکول‌های آب پیوند است.

ساختار ژئوپلیمرها برای اولین بار توسط داویدویتز ارائه شد. واحدهای سیالیته (Si-O-Al, Sialate) سیالیته سیلوکسو (Si-O-Al-O-Si-O₂) سیالیته دی سیلوکسو (Sialate-Siloxo) و سیالیته دی سیلوکسو (O-Si-O, Sialate-disiloxo) توسط Davidovits جهت شناسایی ساختار شیمیایی ژئوپلیمرها پیشنهاد شده است [۳].

نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون آب

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

برابر با ۷/۷ می‌باشد. عمل‌آوری در دمای بالا (۶۰ درجه سانتی‌گراد) نیز باعث دستیابی به بالاترین مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری با پایه پومیس تفتان شده است [۹].

رمضانیاپور و همکاران (۱۳۹۵) نشان دادند که میزان فعالساز مهمترین عامل تاثیرگذار بر خواص بتن‌های ژئوپلیمری می‌باشد [۱۰]. مداح روی سه نوع پوزولان و مشخصات مکانیکی خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی این پوزولان‌ها مطالعاتی انجام داده‌اند و نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که خواص مکانیکی برخی مواد ژئوپلیمری در حدود سیمان پرتلند معمولی بوده است [۱۱].

هدف اصلی این مطالعه بکارگیری روباره کوره آهنگدازی بعنوان ماده پایه برای ساخت خمیرهای ژئوپلیمری و بررسی و مقایسه خواص خمیرهای سیمان ژئوپلیمری ساخته شده با خمیر سیمان پرتلندی می‌باشد. در این راستا اثر نوع و غلظت ماده فعال‌ساز روی خواص مکانیکی خمیرهای سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره بررسی شده و مناسبترین ماده فعال‌ساز برای ساخت خمیرهای سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره از نظر خواص مکانیکی و طرح اختلاط بهینه خمیر سیمان ژئوپلیمری به منظور تولید ملات تعیین خواهد شد. تأکید این مقاله بیشتر بر خواص خمیر تازه و خواص مکانیکی ژئوپلیمرها می‌باشد. علاوه بر این جهت بررسی دقیق‌تر ریزساختار ژئوپلیمرها از تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه‌های خمیر ژئوپلیمری و پرتلندی شاهد نیز استفاده شده است. در ادامه مشخصات مصالح و طرح‌های اختلاط بتن و روش‌های آزمایش بیان شده و سپس نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آنها ارائه می‌گردد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد مصرفی

خمیرهای سیمان ژئوپلیمری بطور کلی شامل مواد خام اولیه (معمولاً پوزولان‌ها) و محلول‌های فعال‌ساز می‌باشد. در این مطالعه از روباره کوره آهنگدازی، که معمولاً در کشور به عنوان محصول جانبی در فرآیند تولید آهن در طبیعت دپو می‌گردد، جهت فعالسازی قلیایی به منظور تولید سیمان ژئوپلیمری استفاده شده است. همانطور که پیش از این گفته شد، تشکیل ژئوپلیمرها نیازمند مواد فعال‌ساز با غلظت‌های بهینه می‌باشد. مواد فعال‌ساز متعددی برای فعال کردن پوزولان‌ها وجود دارد که ممکن است هر پوزولان با تعدادی از این مواد سازگاری داشته و باعث فعال شدن آن گردد. در این پروژه تحقیقاتی از سه نوع ماده فعال‌ساز جهت فعال کردن پوزولان‌ها استفاده شده است که شامل محلول‌های قلیایی هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم و همچنین سیلیکات سدیم یا آب شیشه (Na_2SiO_3) می‌باشد.

۲-۱-۱- مشخصات مواد اولیه

روباره محصول جانبی کارخانجات ذوب‌آهن است که در فرآیند تولید آهن خام از کوره بلند بدست می‌آید و ترکیبی از ناخالصی‌های سنگ‌آهن و

آزاد می‌شود. این آب در طول عمل‌آوری و دوره‌های خشک شدن بعدی از ماتریس ژئوپلیمری خارج شده و باعث تشکیل حفرات بسیار کوچک در ماتریس می‌گردد. بنابراین در مخلوط ژئوپلیمری، آب نقشی در واکنش شیمیایی نداشته و فقط باعث کارایی مخلوط می‌گردد. این پدیده برخلاف واکنش شیمیایی آب در فرآیند هیدراتاسیون سیمان پرتلند است.

هووا و همکاران (۲۰۰۸) روی خواص مکانیکی سه ماده تعمیراتی پایه سیمانی، ژئوپلیمری و ژئوپلیمری با پایه روباره کوره قوس الکتریکی تحقیقاتی انجام داده‌اند. نتایج این تحقیق بیانگر آن است که ژئوپلیمرها خواص تعمیراتی بهتری را نسبت به مواد پایه سیمانی از خود نشان داده‌اند [۴]. ژانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۰) نشان داده‌اند که حضور روباره کوره آهنگدازی اثر مثبتی روی کاهش نفوذپذیری نمونه‌های ژئوپلیمری داشته است [۵]. اوه^۳ و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی و مقایسه خواص مکانیکی و فازهای کریستالی نمونه‌های ژئوپلیمری با پایه روباره کوره آهنگدازی، خاکستر بادی نوع C و F پرداخته‌اند. در این مطالعه به منظور افزایش فازهای کریستالی نمونه‌های ژئوپلیمری در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شده‌اند [۶].

سانگپریاکیج^۴ و همکاران (۲۰۱۱) از خمیر سیمان ژئوپلیمری بعنوان عامل چسباننده به منظور کاشت میلگرد در بتن استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیمان‌های ژئوپلیمری خواص مکانیکی مناسبی به منظور استفاده از آنها بعنوان عامل چسباننده در کارهای تعمیراتی از خود نشان می‌دهند [۷]. قیاس‌الدین^۵ و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که عمل‌آوری ژئوپلیمرهای حاوی خاکستر بادی و روباره کوره آهنگدازی در محلول نمک باعث دستیابی به مقاومت فشاری بالاتر و جذب مویینه کمتری نسبت به عمل‌آوری در آب می‌گردد [۸].

بندار^۶ و همکاران (۲۰۰۹) تحقیقات خود روی ژئوپلیمرهای با پایه پوزولان‌های طبیعی را در سه زمینه بررسی اثر نوع و مقدار مواد فعال‌ساز، بررسی اثر افزودن مواد معدنی و بررسی اثر عمل‌آوری در دمای بالا روی خواص مکانیکی سیمان‌های ژئوپلیمری انجام دادند. در این مطالعه آزمایشگاهی از سه نوع فعال‌ساز شامل؛ هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) و دو نوع پوزولان طبیعی شامل؛ پومیس تفتان و پومیس شاهین‌دژ و دماهای مختلف عمل‌آوری تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. در این تحقیق نمونه‌های فعال شده با هیدروکسید پتاسیم مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های فعال شده با هیدروکسید سدیم داشته‌اند. این پدیده بخصوص در نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد مشهود بوده است. همچنین نشان داده شده است که غلظت بهینه فعال‌سازها برای رسیدن به بالاترین مقاومت فشاری، ۷/۵ مول بر لیتر و بهترین نسبت هیدروکسید به سیلیکات سدیم

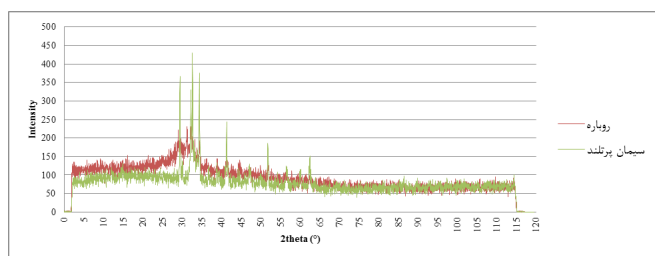
- 1 Hu
- 2 Zhang
- 3 Oh
- 4 Songpiriyakij
- 5 Giasuddin
- 6 Bondar

جدول ۲: مشخصات فیزیکی مواد اولیه

Table 2. Physical characteristics of raw materials

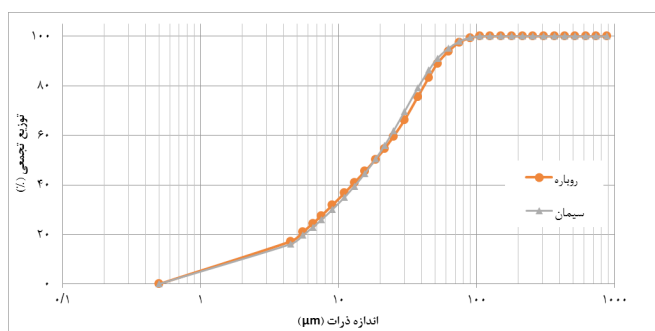
مشخصات فیزیکی	روباره	سیمان پرتلند
بلین (cm^2/g)	۳۳۸۳	۳۰۳۵
وزن مخصوص (g/cm^3)	۲/۷۹	۳/۰۲

نتایج آزمایش XRD مواد خام اولیه در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۲ نیز به ترتیب توزیع اندازه ذرات روباره کوره آهنگدازی دانه‌ای و سیمان پرتلند را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نتایج آنالیز XRD روباره و سیمان پرتلند

Fig. 1. XRD patterns of GGBF slag and Portland cement



شکل ۲: توزیع اندازه ذرات روباره و سیمان پرتلند

Fig. 2. Particle size distribution of GGBF slag and Portland cement

سطح مخصوص روباره $3383 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و میانگین اندازه ذرات آن $25/79 \mu\text{m}$ می‌باشد که از کارخانه ذوب‌آهن اصفهان تهیه شده است. سیمان پرتلند با سطح مخصوص $3035 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و میانگین اندازه ذرات $24/77 \mu\text{m}$ نیز از کارخانه سیمان کردستان تهیه گردیده است.

سنگ آهک (کمک ذوب) می‌باشد. هنگام بهره‌برداری از کوره بلند ذوب‌آهن، سنگ‌آهن به وسیله کک و سنگ آهک در دمای 1600 درجه سانتیگراد به شکل مذاب در آمده و سیلیس و آلومین موجود در سنگ آهن با آهک و منیزیم موجود در سنگ آهک ترکیب شده و روباره مذاب تشکیل می‌گردد. روباره سرد شده با هوا و مقدار محدودی آب به شکل گندله بوده و روباره گندله شده نامیده می‌شود. اگر روباره مذاب از طریق غوطه‌ور کردن در آب به سرعت سرد شود، دانه‌های کوچک حاوی سیلیکات کلسیم-آلومینیوم-منیزیم آمورف با خاصیت هیدرولیکی حاصل می‌گردد. محصول سرد شده با آب به دلیل وجود ذرات هم اندازه با ماسه، روباره‌دان شده نامیده می‌شود. معمولاً روباره‌دان شده دارای ذرات آمورف بیشتری است و خواص سیمانی رضایت‌بخش تری را به دست می‌دهد.

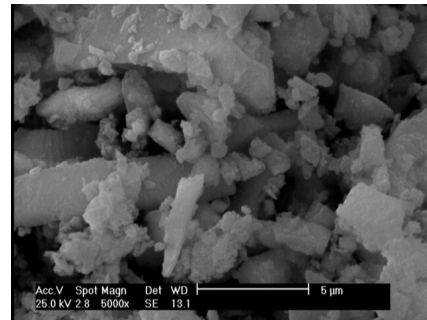
ترکیبات شیمیایی مواد خام اولیه با استفاده از روش XRF مشخص شده است. خواص شیمیایی و فیزیکی مواد خام اولیه به ترتیب در جداول ۱ و ۲ برای روباره کوره آهنگدازی دانه‌ای و سیمان پرتلند نشان داده شده است. سیمان پرتلند مورد استفاده در این تحقیق از نوع $425-1$ بوده که فقط جهت ساخت خمیر سیمان پرتلند شاهد استفاده شده است و در ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری هیچگونه سیمانی استفاده نشده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی مواد اولیه

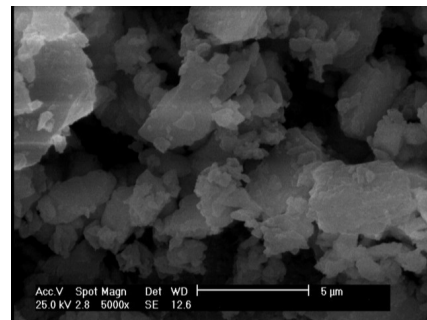
Table 1. Chemical characteristics of raw materials

سیمان پرتلند	روباره	ترکیبات شیمیایی
۷۸/۶۳	۳۶/۷۵	اکسید کلسیم (CaO) (%)
۵۵/۲۱	۳۷/۲۱	دی اکسید سیلیسیوم (SiO_2) (%)
۳۵/۱	۸/۵۲	اکسید منیزیم (MgO) (%)
۸۹/۵	۱۱/۵۶	اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) (%)
۷۲/۳	۱/۰۱	اکسید آهن (Fe_2O_3) (%)
۸۹/۱	۰/۹۷	تری اکسید گوگرد (SO_3) (%)
۵۳/۰	۰/۶۱	اکسید سدیم (Na_2O) (%)
۳/۰	۰/۷۰	اکسید پتاسیم (K_2O) (%)
-	۱/۲۳	دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) (%)
-	۰/۹۹	اکسید منگنز (MnO) (%)
-	۰/۰۳	پنتاکسید فسفر (P_2O_5) (%)
۹۴/۰	۰/۰۲	افت وزن در اثر سرخ شدن (%)

نمودار XRD نشان می‌دهد که سیمان پرتلند حاوی مقادیری از ذرات کریستالی می‌باشد. در حالی که دو نقطه اوج ضعیف در نمودار XRD روباره مشاهده می‌گردد که نشان می‌دهد روباره حاوی مقادیر کمتری از ذرات کریستالی می‌باشد. همچنین در شکل شماره ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روباره و سیمان پرتلند نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف: سیمان پرتلند و ب: روباره)

Fig. 3. SEM micrographs of (a) Portland cement and (b) GGBF Slag

۲-۲- طرح مخلوط و نحوه ساخت خمیر سیمان ژئوپلیمری جهت انجام کارهای آزمایشگاهی چهار فاکتور موثر بر خواص خمیر سیمان ژئوپلیمری شامل نوع محلول قلیایی (در دو سطح)، غلظت محلول قلیایی (در سه سطح)، مدول سیلیکات سدیم (در سه سطح) و نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی (در پنج سطح) مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر مختلف هر یک از فاکتورهای مورد مطالعه در ۹۰ طرح اختلاط خمیر سیمان ژئوپلیمری در جدول شماره ۳ 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 نشان دهنده غلظت محلول قلیایی، عبارت و عدد پس از آن نیز نشان دهنده مدول سیلیکاتی آب و عدد انتهایی نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی می‌باشد. مقدار ماده خام اولیه در تمامی طرح‌ها ثابت و برابر با $cm^2/$ ۱۵۴۷ بوده است و تمامی طرح‌ها با نسبت فعالساز به پوزولان برابر با ۰/۴ ساخته شده است.

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی خمیرهای ژئوپلیمری با پایه روباره، نمونه‌های خمیر سیمان پرتلند شاهد ساخته شد و مقاومت فشاری آن در سنین مختلف با سیمان ژئوپلیمری مقایسه گردیده است. طرح اختلاط خمیر سیمان پرتلندی در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به اینکه مقدار مواد جامد در خمیر سیمان ژئوپلیمری برابر با kg/m^3 ۱۷۳۸/۳۶ و نسبت آب به مواد جامد در آنها بطور متوسط برابر با ۰/۲۴۶ بوده است، مقادیر سیمان و آب به سیمان در خمیر سیمان پرتلندی شاهد برابر با این مقادیر در نظر گرفته شد. جهت ساخت خمیر سیمان ژئوپلیمری ابتدا محلول‌های قلیایی ۸ و ۱۰ مولار از طریق حل کردن ذرات هیدروکسید سدیم و پتاسیم در آب مقطر تهیه و سرد شده است. خمیر سیمان ژئوپلیمری با اضافه کردن محلول قلیایی به مواد خام اولیه و مخلوط کردن به مدت دو دقیقه ساخته شده است. سپس سیلیکات سدیم به مجموعه اضافه شده و مخلوط کردن به مدت ۲ دقیقه دیگر ادامه یافته است. خمیر ژئوپلیمری حاصل در قالب‌های مکعبی به ابعاد ۲۰ میلی‌متر ریخته شد. به منظور خارج شدن حباب‌های هوا، نمونه‌های خمیر سیمان ژئوپلیمری با استفاده از میز ویبره متراکم گردیده و به مدت ۲۴ ساعت در محفظه رطوبت نگهداری شده‌اند. پس از باز کردن قالب‌ها، نمونه‌های خمیر ژئوپلیمری در کیف‌های پلاستیکی مخصوصی جهت جلوگیری از افت رطوبت قرار داده شده‌اند. دمای محیط نگهداری نمونه‌ها 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد بوده است.

۲-۱-۲- فعالساز

در این مطالعه به منظور فعالسازی قلیایی مواد خام اولیه از هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم استفاده شده است. بدین منظور هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم به صورت پرک تهیه و جهت دستیابی به محلول ۸ و ۱۰ مولار در آب مقطر حل شده است. سیلیکات سدیم که محلولی از SiO_2 ، Na_2O و آب می‌باشد با مدول ۲/۱، ۲/۳۳ و ۳/۱۳ به منظور تولید خمیر سیمان ژئوپلیمری استفاده شده است. مدول سیلیکات سدیم نسبت به SiO_2 به Na_2O موجود در این محلول می‌باشد.

۲-۱-۳- آب

از آب مقطر جهت ساخت محلول‌های قلیایی در این مطالعه استفاده شده است.

جدول ۳: فاکتورها و سطوح آنها در ۹۰ طرح مخلوط خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روبراره

Table. 3. The introduced levels for each factor in 90 alkali activated slag paste mixtures

فاکتور	واحد اندازه گیری	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
نوع محلول قلیایی	-	NaOH	KOH	-	-	-
غلظت محلول قلیایی	مولار	۶	۸	۱۰	-	-
مدول سیلیکات سدیم	نسبت وزنی	۲/۱	۲/۳۳	۳/۱۳	-	-
نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی	نسبت وزنی	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴

جدول ۴: طرح مخلوط، کارایی و مقاومت فشاری خمیر سیمان پرتلندی شاهد

Table. 4. The OPC paste mixture proportion, flowability and compressive strength of

ردیف	نام طرح	مقدار سیمان پرتلند (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان	پخش شدگی خمیر تازه (%)	مقاومت فشاری (MPa)					
					۳ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۱ روزه	۲۸ روزه	۹۱ روزه
۱	OPC Paste	۱۷۳۸/۳۶	۰/۲۴۶	۱۳۰	۷۰/۶۸	۷۸/۶۲	۸۰/۵۳	۸۳/۳۶	۸۵/۳۴	۹۷/۴۹

حاوی محلول هیدروکسید پتاسیم از خمیر محلول حاوی هیدروکسید سدیم بیشتر است. پدیده مشاهده شده بر خلاف این مطلب است که به دلیل جرم مولی بیشتر KOH نسبت به NaOH مقدار مشخصی از محلول هیدروکسید پتاسیم حاوی آب کمتری است. نتایج آزمایش پخش شدگی خمیر سیمان ژئوپلیمر حاوی انواع مختلف سیلیکات سدیم با مدول های ۱/۲، ۲/۳۳ و ۳/۱۳ در شکل ۵ نشان داده شده است. اضافه کردن سیلیکات سدیم به مخلوط خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روبراره باعث افزایش پخش شدگی خمیر تازه می گردد. سیلیکات سدیم در مخلوط خمیر سیمان ژئوپلیمری باعث افزایش انحلال یون های Si و Al موجود در ماده خام اولیه شده و از این طریق باعث افزایش کارایی می شود. همانگونه که در شکل ۵ ملاحظه می گردد، افزایش نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید از صفر تا ۰/۴ باعث افزایش میزان پخش شدگی خمیر تازه می گردد. آب موجود در مخلوط مهمترین و تأثیر گذارترین عامل در کارایی خمیر سیمان ژئوپلیمری می باشد. به طور کلی وجود مقدار بیشتر آب در مخلوط باعث کارایی بیشتر می شود. مقدار آب موجود در سیلیکات سدیم با مدول سیلیکاتی ۲/۱، ۳/۳۳ و ۳/۱۳ به ترتیب برابر با ۶۰، ۵۲ و ۵۸ درصد وزنی می باشد. از همین رو مخلوط های حاوی سیلیکات سدیم با مدول ۲/۱ بیشترین مقدار پخش شدگی را از خود نشان می دهد شکل ۵. با همهی این احوال می توان پخش شدگی ۵۰٪ (معادل قطر پخش شدگی ۱۵۰ میلی متر) را به عنوان حداقل پخش شدگی

۲-۳- روش آزمایش

کارائی خمیر سیمان ژئوپلیمری با استفاده از روش استاندارد ASTM C1437 که شامل اندازه گیری درصد افزایش قطر خمیر سیمان نسبت به قطر اولیه مخروط ناقص روی میز روانی است، اندازه گیری شده است [۱۲]. به منظور اندازه گیری مقاومت فشاری نمونه های ۲۰×۲۰×۲۰ میلی متر خمیر سیمان ژئوپلیمری در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۹۱ روز از روش استاندارد ASTM C39 [۱۳] استفاده شده است. نمونه ها تا سن آزمایش در کیف های پلاستیکی مخصوص به منظور جلوگیری از افت رطوبت و در دمای ۲±۲۳ درجه سانتی گراد نگهداری شده اند. ریز ساختار نمونه های ۳ طرح منتخب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور پس از ۳ و ۲۸ روز عمل آوری یک قطعه به ابعاد تقریبی ۱۰×۱۰×۲ میلی متر از هر نمونه جدا شده و سپس در محفظه مخصوص، خشک و با طلا روکش شده است.

۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱- کارایی

بخشی از نتایج آزمایش پخش شدگی ۹۰ طرح خمیر سیمان ژئوپلیمری برحسب درصد، در شکل های ۴ و ۵ ارائه شده است. همانگونه که به عنوان نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است، قابلیت روانی خمیر سیمان ژئوپلیمری

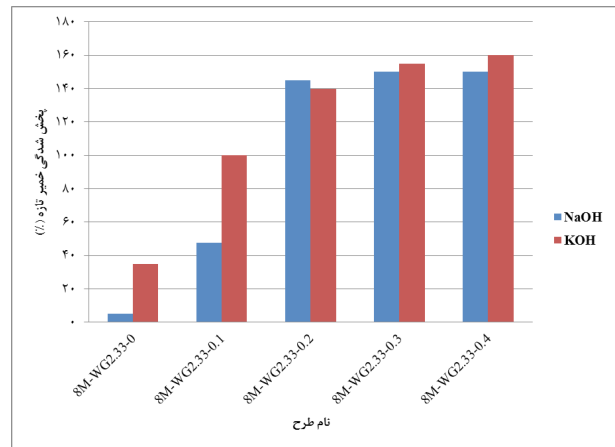
۳-۲- مقاومت فشاری

بخشی نتایج آزمایش مقاومت فشاری خمیرهای سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان شده است. حداکثر مقدار مقاومت فشاری در سن ۲۸ و ۹۱ روزه برای طرح‌های Na6-WG2/33-0/4 و K8-WG2/33-0/4 بوده است (به ترتیب ۱۴۵/۲۲ MPa و ۱۶۹/۴۱ MPa). طرح Na6-WG2/33-0/4 حاوی محلول NaOH با غلظت ۸ مولار و حاوی سیلیکات سدیم با مدول ۲/۳۳ و نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی برابر با ۰/۴ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در خمیرهای سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره، مقدار بهینه مدول سیلیکات سدیم برای رسیدن به حداکثر مقاومت فشاری برابر با ۲/۳۳ بوده و نسبت بهینه سیلیکات سدیم به محلول قلیایی برابر با ۰/۴ می‌باشد. مقاومت فشاری طرح Na8-WG2/33-0/4 در سنین مختلف عمل‌آوری در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که انتظار می‌رود با افزایش زمان عمل‌آوری (سن نمونه) مقاومت فشاری خمیر سیمان ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. بطور متوسط پس از سه روز عمل‌آوری نمونه‌های سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره به ۵۲٪ مقاومت نهایی خود رسیده‌اند و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری این مقدار برابر با ۸۷٪ بوده است. این پدیده نشان از روند سریع کسب مقاومت سیمان‌های ژئوپلیمری با پایه روباره دارد که می‌توان از آن جهت انجام کارهای تعمیراتی فوری استفاده نمود.

۳-۲-۱- اثر نوع محلول قلیایی

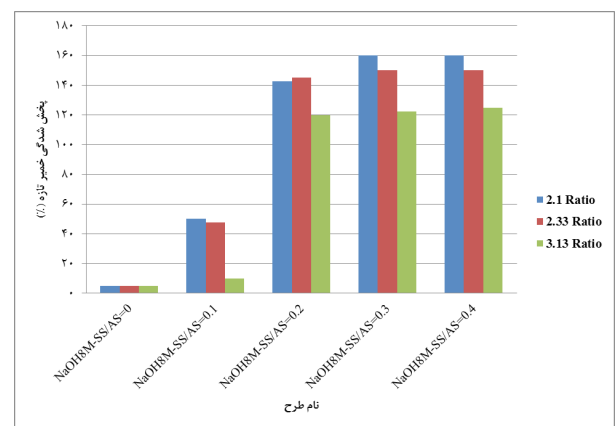
محلول قلیایی باعث انحلال یون‌های Si و Al موجود در ماده پایه می‌گردد و این شروع فرآیند ژئوپلیمریزاسیون می‌باشد. نوع محلول قلیایی اثرات متفاوتی روی خواص خمیر سیمان ژئوپلیمری تازه و سخت شده دارد. از این رو انتخاب نوع محلول قلیایی متناسب با نوع ماده پایه و خواص مورد انتظار دارای اهمیت می‌باشد. دو نوع ماده قلیایی متداول جهت ساخت خمیر سیمان ژئوپلیمری شامل هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم است. نوع محلول قلیایی نقش مهمی در میزان حل شدن یون‌های Si و Al و همچنین سرعت انحلال آنها دارد. همانگونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی هیدروکسید پتاسیم از نمونه‌های حاوی هیدروکسید سدیم بیشتر است و این موضوع در تمامی سنین تا ۹۱ روز صادق می‌باشد. بطوریکه در سن ۹۱ روز به طور متوسط مقاومت فشاری خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره حاوی هیدروکسید پتاسیم ۱۶/۱٪ از خمیر حاوی هیدروکسید سدیم بیشتر است. اندازه‌ی یون‌های Na⁺ برابر با ۱۱۶ pm و اندازه‌ی یون‌های K⁺ برابر با ۱۵۲ pm می‌باشد. بزرگتر بودن یون‌های K⁺ باعث شکل‌گیری الیگومرهای بزرگتری از Al(OH)₄⁻ می‌گردد. بنابراین محلول KOH باعث کسب مقاومت بیشتری می‌گردد.

خمیرهای ژئوپلیمری جهت قالبگیری مناسب، مد نظر قرار داد. نتایج آزمایش کارایی نشان می‌دهد طرح‌هایی که در آنها نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی کمتر از ۰/۲ است کارآیی مناسب و کافی نداشته و بسیار چسبیده بوده و به سختی قالبگیری می‌شوند.



شکل ۴: کارآیی خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی محلول ۸ مولار هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم با مدول ۲/۳۳ و مقادیر مختلف نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی از ۰ تا ۰/۴

Fig. 4. Flow of fresh alkali activated slag paste containing NaOH 8M and KOH 8M with different sodium silicate to alkaline solution ratio



شکل ۵: اثر نوع و مقدار سیلیکات سدیم روی کارآیی خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره حاوی محلول ۸ مولار هیدروکسید سدیم (نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی SS/AS)

Fig. 5. The effect of type and sodium silicate to alkaline solution ratio on the flow of fresh alkali activated slag paste containing NaOH 8M

بیشتری از خود نشان می‌دهند. افزایش غلظت محلول قلیایی از ۸ به ۱۰ مولار باعث کاهش مقاومت فشاری خمیر سیمان ژئوپلیمری شده است. افزایش غلظت محلول قلیایی علاوه بر کاهش کارایی و کاهش مقاومت فشاری باعث تحمیل هزینه‌های بیشتر برای محلول قلیایی شده و همچنین احتمال پدیده شورزدگی را افزایش می‌دهد. در این مطالعه در نمونه‌های حاوی هیدروکسید پتاسیم ۱۰ مولار شورزدگی مشاهده شده است که با افزایش مقدار سیلیکات سدیم در خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی هیدروکسید پتاسیم ۱۰ مولار شدت شورزدگی کاهش یافته است. به طور کلی مقادیر کمتر محلول قلیایی و مولاریته کمتر باعث کاهش شدت شورزدگی می‌گردد.

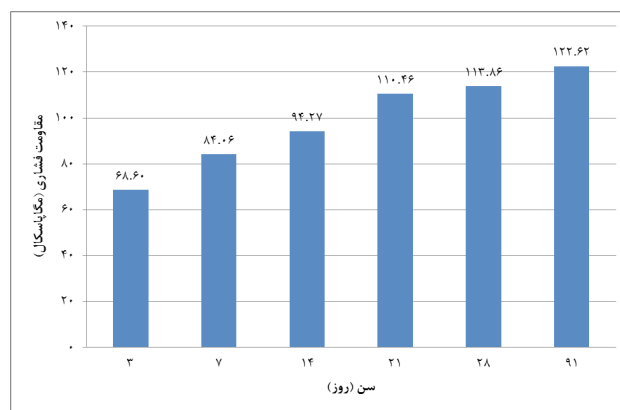
۳-۲-۳- اثر مقدار سیلیکات سدیم

در صورت استفاده از سیلیسیوم محلول در مخلوط اولیه خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی روباره می‌توان فرآیند ژئوپلیمریزاسیون را بهبود بخشید. همانگونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، حضور سیلیکات سدیم، مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی روباره را افزایش می‌دهد. پرواضح است که افزایش نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی از ۰ به ۰/۳، باعث افزایش ۱۰۰ درصدی مقاومت فشاری می‌گردد، در حالیکه افزایش این نسبت از ۰/۳ به ۰/۴ اثر بسیار ناچیزی در افزایش مقاومت فشاری دارد. با این حال نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی برابر با ۰/۴ به عنوان نسبت بهینه برای ساخت مخلوط‌های مرحله دوم انتخاب شده است و به نظر می‌رسد افزایش این نسبت به بیش از ۰/۴ اثر چندانی بر خواص مکانیکی خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره نداشته باشد. سیلیکات سدیم از دو طریق باعث بهبود مقاومت فشاری خمیر سیمان ژئوپلیمری می‌گردد؛ اولاً این ماده مقدار و سرعت حل شدن یون‌های Si و Al را در محلول قلیایی افزایش می‌دهد. ثانیاً به دلیل اینکه پیوند Al در ماده پایه ضعیف‌تر از پیوند Si می‌باشد، در نتیجه یون‌های Al سریع‌تر در محلول قلیایی حل می‌شوند. بنابراین وجود یون‌های Si قبل از حل شدن کامل ماده پایه، می‌تواند درجه ژئوپلیمریزاسیون را افزایش داده و از این طریق مقاومت فشاری را افزایش دهد.

۳-۲-۴- اثر مدول سیلیکات سدیم

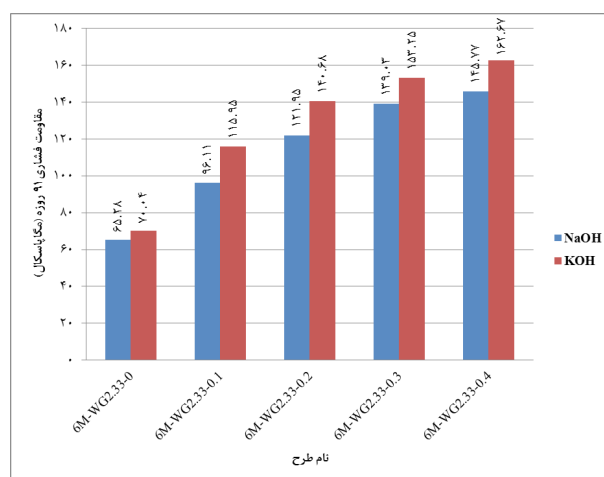
دو پارامتر مهم در خصوص سیلیکات سدیم، مدول سیلیکاتی و درصد مواد جامد می‌باشد. همانگونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد، مدول سیلیکاتی بهینه برای رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر، برابر با ۲/۳۳ می‌باشد. این نوع آب شیشه نسبت به دو نوع دیگر که در این مطالعه استفاده شده است، حاوی بیشترین مقدار ذرات و کمترین مقدار آب می‌باشد.

مقادیر مقاومت فشاری خمیر سیمان پرتلندی شاهد در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به مقایسه نتایج مقاومت فشاری ۹۱ روزه خمیرهای سیمان ژئوپلیمری با مقاومت فشاری ۹۱ روزه خمیرهای سیمان پرتلندی پر واضح است که مقاومت فشاری طرح‌های خمیر سیمان ژئوپلیمری دارای نسبت



شکل ۶: مقاومت فشاری طرح NA8-WG2.33-0.4 در سنین مختلف عمل آوری

Fig. 6. Compressive strength of Na8-WG2.4-0.4 at different ages of curing up to 91 days



شکل ۷: اثر نوع محلول قلیایی روی مقاومت فشاری خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی سیلیکات سدیم با مدول ۲/۳۳ و مقادیر مختلف نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی از ۰ تا ۰/۴

Fig. 7. The effect of alkaline solution type on the compressive strength of alkali activated slag paste

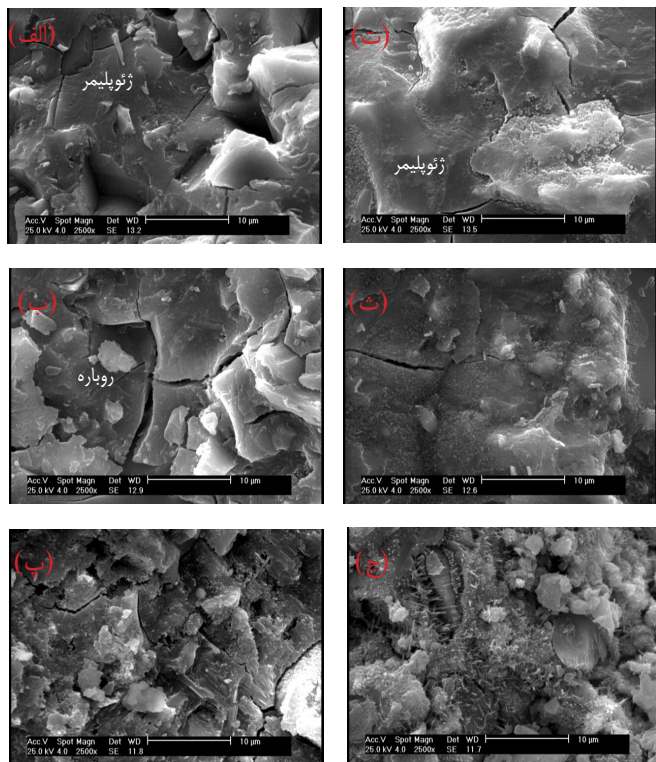
۳-۲-۸- اثر غلظت محلول قلیایی

شکل ۸ تأثیر غلظت محلول قلیایی را روی مقاومت فشاری خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره در حضور مقادیر مختلف سیلیکات سدیم با مدول ۳/۱۳ را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در این مورد غلظت بهینه محلول قلیایی برابر با ۸ مولار می‌باشد، هرچند در برخی موارد مشاهده شده است که نمونه‌های حاوی محلول قلیایی ۶ مولار مقاومت فشاری

۳-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی

شکل ۱۰ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های منتخب خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره در حضور محلول‌های قلیایی هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم و خمیر سیمان پرتلندی را در سنین ۳ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد.

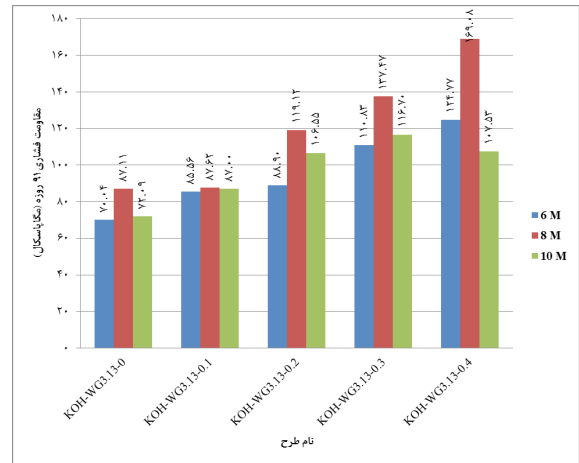
شکل ۱۰-الف نشان می‌دهد که مقادیری از ذرات روباره واکنش نداده در نمونه‌ها پس از ۳ روز عمل‌آوری وجود دارد. در حالیکه ذرات روباره در سن ۲۸ روز به صورت کامل به حالت ژئوپلیمری و متراکم درآمده است شکل ۱۰-ت و ث در تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های سیمان پرتلندی، ذرات اترینگایت در سنین اولیه به قابل مشاهده می‌باشد و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری با پیشرفت هیدراتاسیون، ساختار خمیر سیمان پرتلندی متراکم‌تر گردیده است.



شکل ۱۰: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی طرح Na6-WG2.33-0.4 (الف و ت)، طرح K6-WG2.33-0.4 (ب و ث)، طرح OPC Paste (پ و ج) (الف، ب و پ: پس از ۳ روز عمل‌آوری و ت، ث و ج: پس از ۲۸ روز عمل‌آوری)

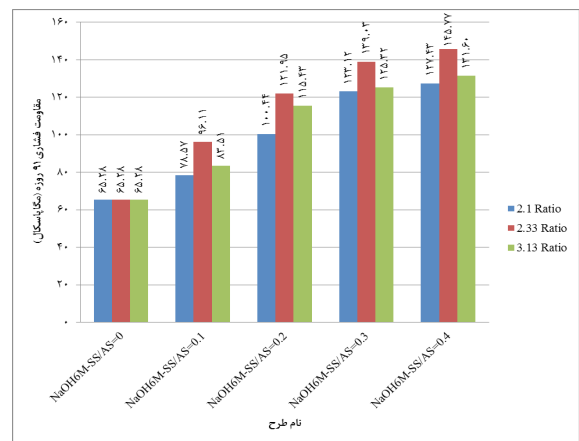
Fig. 10. SEM micrograph of (a and e) Na6-WG2.4-P0, (b and f) Na6-WG2.4-P10, (c and g) K6-WG2.4-P0, (d and h) K6-WG2.4-P10. (a, b, c and d: after 3 days geopolymerisation and e, f, g, h: after 28 days geopolymerisation)

سیلیکات سدیم به محلول قلیایی بزرگتر و مساوی ۰/۲ بیش از مقاومت فشاری طرح شاهد می‌باشد. ضمناً مقاومت فشاری ۹۱ روزه طرح بهینه خمیر سیمان ژئوپلیمری حدود ۷۴٪ بیش از مقاومت فشاری طرح شاهد است.



شکل ۸: اثر غلظت محلول قلیایی روی مقاومت فشاری خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم با مدول ۳/۱۳ و مقادیر مختلف نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی از ۰ تا ۰/۴

Fig. 8. The effect of alkaline solution (KOH) concentration on compressive strength of alkali activated slag paste



شکل ۹: اثر مدول و مقدار سیلیکات سدیم روی مقاومت فشاری خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره حاوی محلول ۶ مولار هیدروکسید سدیم (نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی SS/AS)

Fig. 9. The effect sodium silicate types and contents on the compressive strength of alkali activated slag pastes containing NaOH 6M

۴- نتیجه گیری

از آنچه گفته شد نتیجه می شود که؛

۱. قابلیت پخش شدگی خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی هیدروکسید پتاسیم از خمیر حاوی هیدروکسید سدیم بیشتر است.
۲. افزودن سیلیکات سدیم به مخلوط خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روبراره باعث افزایش پخش شدگی خمیر تازه و همچنین افزایش مقاومت فشاری می گردد.
۳. نتایج نشان می دهد که در خمیرهای سیمان ژئوپلیمری با پایه روبراره، مقدار بهینه مدول سیلیکات سدیم برای رسیدن به حداکثر مقاومت فشاری برابر با ۲/۳۳ بوده و نسبت بهینه سیلیکات سدیم به محلول قلیایی برابر با ۰/۴ می باشد.
۴. مقاومت فشاری نمونه های خمیر سیمان ژئوپلیمری حاوی هیدروکسید پتاسیم از نمونه های حاوی هیدروکسید سدیم بیشتر است. غلظت بهینه محلول قلیایی در خمیرهای سیمان ژئوپلیمری با پایه روبراره برابر با ۶ و ۸ مولار می باشد. افزایش غلظت محلول قلیایی علاوه بر کاهش کارایی و کاهش مقاومت فشاری باعث تحمیل هزینه های بیشتر برای محلول قلیایی شده و همچنین احتمال پدیده شوره زدگی را افزایش می دهد.
۵. مقاومت فشاری طرح های خمیر سیمان ژئوپلیمری دارای نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی بزرگتر و مساوی ۰/۲ بیش از مقاومت فشاری طرح شاهد می باشد. مقاومت فشاری ۹۱ روزه طرح بهینه خمیر سیمان ژئوپلیمری حدود ۷۴٪ بیش از مقاومت فشاری طرح شاهد است.

مراجع

- [1] R. Cioffi, L. Maffucci, L. Santoro, Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue, *Resour Conserv Recycl*, 40 (1) (2003) 27–38.
- [2] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Zongjin, Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement *Appl Clay Sci*, 47 (3–4) (2010) 271–5.
- [3] J. B. Edouard, Experimental evaluation of the durability of fly ash-based geopolymer concrete in the marine environment, University Boca Raton, Florida, (2011).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

M. Jafari Nadoushan, A. A. Ramezani pour, Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Pastes and Determination of Optimum Values of Effective Factors, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1043-1052.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11113.4977

