

ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوامی روسازی بتن ژئوپلیمری حاوی

خاکستر بادی و دوده سیلیسی

غلامعلی شفافبخش (مسئول مکاتبات)، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

ابوالفضل محمدی جانکی، دانشجو دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۵

چکیده

در سال‌های اخیر با استفاده بیش از حد سیمان باعث تولید بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای شده که یکی از عواقب آن گرمایش زمین بوده است. این اثرات مخرب باعث شد تا توجه بیشتر به استفاده مواد پوزولانی گردد. در این پژوهش دوام بتن ژئوپلیمری (سرباره قلیا فعال) حاوی دوده سیلیسی و خاکستر بادی در برابر محیط‌های خورنده اسیدی، سولفات و همچنین مقاومت فشاری، خمشی، کششی و نفوذپذیری یون کلر مورد بررسی قرار گرفت. مقدار خوردگی محیط‌های مختلف توسط آزمایش مقاومت فشاری و افت وزنی با هم مقایسه گردید. نمونه‌ها بعد از ۷ روز عمل‌آوری در آب آهک، به مدت ۱۸۰ روز در محلول اسید سولفوریک، سولفات منیزیم و سولفات سدیم قرار گرفتند. ابتدا افت وزنی نمونه‌ها، سپس مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در محیط خورنده اندازه‌گیری شد. همچنین مقاومت فشاری، خمشی، کششی و نفوذپذیری یون کلر اندازه‌گیری شد. در این پژوهش با افزایش جایگزینی دوده سیلیسی و خاکستر بادی بجای سرباره در بتن، مقاومت فشاری، خمشی، کششی و دوام کاهش و نفوذپذیری یون کلر افزایش یافت. در واقع بهترین نمونه بتن ژئوپلیمری سرباره خالص می‌باشد که دارای مقاومت فشاری ۵۳/۴۵ مگاپاسکال، مقاومت خمشی ۶/۰۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۵/۵ مگاپاسکال، جریان عبور یون کلر ۶۰۶۷ کولمب و مقاومت فشاری بعد از قرارگیری در اسید سولفوریک، سولفات منیزیم و سولفات سدیم به ترتیب ۴۳/۹۲، ۴۴/۸ و ۴۵/۹ مگاپاسکال و همچنین افت وزنی بعد از قرارگیری در این محلول‌ها به ترتیب ۲۱، ۱۴ و ۱۲ گرم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتنی، سولفات، اسید سولفوریک، مقاومت خمشی، نفوذ یون کلر

۱. مقدمه

سیمان نظیر کریستال‌های آهک و ژل H-S-C در برابر حمله اسید سولفوریک، استفاده هرچه کمتر از مواد سیمانی توصیه شده است [Allahverdi and Skvara, 2000 and rahmani and Ramezani-pour, 2008 and Hewayde, et al, 2007 and Sersale, Frigione, and Bonavita, 1998]. از سوی دیگر، با توجه به ماهیت واکنش‌های پوزولانی، استفاده از مواد جایگزین سیمان موجب کاهش میزان آهک و نیز بهبود نفوذپذیری بتن می‌گردد [Ramezani-pour, 2014]. از این-رو طبق نتایج بدست آمده در پژوهش‌های صورت گرفته، استفاده از مواد جایگزین سیمان نظیر پوزولان‌های طبیعی و سرباره کوره آهن‌گدازی سبب بهبود دوام بتن در محیط‌های حاوی اسید سولفوریک می‌شود [Alexander and Fourie, 2011 and Aydın, Yiğiter, and Baradan, 2007 Monteny, De Belie, and Taerwe, 2003]. در این میان برخی محققین اثر استفاده از مواد جایگزین سیمان را بر دوام بتن منفی ارزیابی کرده-اند [Alexander, Bertron, and De Belie, 2013 and Senhadji, et al, 2014]. مشخصات فیزیکی، ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده، ریزی و فعالیت پوزولانی مواد جایگزین سیمان در کنار شرایط آزمایش‌های انجام شده می‌تواند عوامل تاثیر گذار بر وقوع چنین تضادی در نتایج تحقیقات به‌شمار روند. علاوه بر ملاحظات شرح داده شده، استفاده از مواد پلیمری و نیز بهره بردن از سنگدانه‌های مقاوم در برابر حملات شیمیایی نظیر سنگدانه‌های سیلیسی به جای سنگدانه‌های آهکی راهکارهای مناسبی برای افزایش مقاومت بتن در برابر حمله اسیدی به‌شمار می‌روند [Monteny, et al, 2000 and Vincke, et al 2002]. لازم به ذکر است اثر ختنی‌کنندگی سنگدانه‌های آهکی در برخی موارد علت اصلی مشاهده نتایج مثبت استفاده از این مصالح در مقایسه با مصالح سنگی سیلیسی گزارش شده - است [Skvara, 2000 and Allahverdi and Challenges, et al, 2008]. در تحقیقی سرباره کوره آهن‌گدازی را به میزان ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزین خاکستر بادی نمودند و از محلول فعال‌کننده قلیایی به

عملکرد روسازی بتن سیمانی در مواجهه با عوامل شیمیایی خورنده همانند حمله اسیدی و سولفاتی و نفوذ یون کلر نگران‌کننده است. اجزای خمیر سیمان پرتلند در تماس با محیط‌های خورنده و مهاجم از جمله اسید دچار تجزیه می‌شوند و علت اصلی، انحلال هیدروکسید کلسیم و نیز C-S-H موجود در خمیر سیمان است. بتن ژئوپلیمری نتیجه‌ی واکنش یک ماده جامد آلومیناسیلیکاتی با محلول قلیایی برای تهیه یک ماده جامد قابل جایگزینی با سیمان پرتلند هیدراته است [Wang, Li, and Yan, 2005].

خورندگی سولفاتی یکی از مکررترین و مضرترین فرایندها در روسازی بتنی می‌باشد. شکل و مقدار خرابی بتن به غلظت سولفات، نوع یون مثبت در محلول سولفاتی (سدیم یا منیزیم)، اسیدیته محلول ریز ساختار خمیر سیمان سخت شده، بستگی دارد. آب دریا یکی از عمده‌ترین محیط‌های چند عنصری طبیعی است که شکل پیچیده سیستم فیزیکی-شیمیایی با بتن دارد و شامل تشکیل الکترولیت‌های عموماً با کلرور سدیم، سولفات منیزیم، سولفات و کلرور کلسیم حاصل می‌شوند و در فولاد پیل گالوانیک تشکیل می‌دهند. به طور کلی حمله آب دریا منجر به تشکیل اتریژیته و بروسیت و نمک فریدل در بتن می‌گردد. تشکیل اتریژیته با انبساط و افت ثانوی مقاومت همراه است که ناشی از ترک‌های موئین و تضعیف اتصال‌های شیمیایی می‌باشد. تشکیل بروسیت ناشی از واکنش شیمیایی تبادلی است که در تحکیم سهمی ندارد. مهندسان با بهره‌گیری از بتن‌های با دوام برآند که عمر مفید روسازی‌های بتنی را افزایش داده و هزینه‌های تعمیر و ترمیم را به حداقل برسانند [Ramezani-pour, et al. 2018]. با توجه به شدت خرابی‌های احتمالی در سازه‌های مورد تهاجم اسید سولفوریک، بررسی‌های گسترده در راستای بهبود دوام بتن در محیط‌های آسیب‌رسان حاوی این عامل اسیدی انجام پذیرفته است. در این رابطه، به دلیل آسیب‌پذیری مواد ناشی از هیدراتاسیون

Shahrajabian, and] [Behfarnia, 2018. اسماعیل تاثیر خاکستر بادی بر مقاومت و نفوذپذیری یون کلر در بتن و ملات سرباره قلیا فعال را مطالعه نمود، به این نتیجه رسید که بعضی از نمونه‌های بتن ژئوپلیمری جذب آب بیشتری نسبت به بتن سیمانی دارند و با افزایش خاکستر بادی مقاومت و نفوذپذیری یون کلر به بتن بیشتر شده است [Ismail, et al. 2013]. نیوپن و همکاران به بررسی بتن ژئوپلیمری پرداختند در این تحقیق بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن سیمانی مقاومت کششی، فشاری و خمشی بالاتری داشته است [Neupane, Chalmers, and Kidd, 2018].

ژانگ به بررسی دوام خمیر سرباره قلیا فعال حاوی خاکستر بادی در معرض اسید سولفوریک پرداخت، نتایج نشان داد که با افزایش خاکستر بادی مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها در طی حمله اسید سولفوریک کاهش می‌یابد و فرسایش و تخلخل در مخلوط افزایش می‌یابد [Zhang, et al. 2018].

۲. نوآوری تحقیق

با توجه به اهمیت توسعه پایدار در کشور، استفاده از محصولات جانبی کارخانجات صنعتی مانند سرباره، دوده سیلیسی و خاکستر بادی باعث عدم تخریب محیط زیست، صرفه‌جویی اقتصادی در پروژه‌ها، ارتقا کیفیت اجرا و افزایش دوام روسازی می‌گردد. همچنین استفاده از بتن ژئوپلیمری در روسازی راه موضوعی جدید است و تحقیقات پیشین نیز بیشتر معطوف به روسازی آسفالتی و بتن سیمانی بوده و دوام روسازی‌های بتن ژئوپلیمری در برابر اسیدها، سولفات‌ها و نفوذ یون کلر نیز تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین برای اولین بار است که ترکیب سه‌گانه سرباره، دوده سیلیسی و خاکستر بادی در بتن ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گرفته است.

۳. روش تحقیق

میزان ۳۵ و ۴۰ درصد کل چسب استفاده کردند، نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم در مطالعه آن‌ها ۱/۵ و ۲ بوده است. آن‌ها مشاهده نمودند که کارایی بتن ژئوپلیمری با افزایش میزان سرباره، هنگامی که سایر موارد ثابت باشد کاهش می‌یابد. این امر به خاطر شرکت سریع کلسیم در واکنش‌ها و تیزگوشه بودن فرم سرباره در مقایسه با خاکستر بادی می‌باشد. کارایی با کاهش میزان فعال کننده به کل چسب از ۴٪ به ۳۵٪ کاهش می‌یابد [Deb, Nath, and Sarker, 2014]. در تحقیقی مشابه نتایج مشابهی نیز بدست آمد، مقاومت فشاری و خمشی با افزایش میزان سرباره و افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر بهترین نتیجه در ۱۰۰ درصد سرباره ایجاد می‌شود. همچنین نرخ افزایش مقاومت تا ۷ روزه بسیار سریع و بعد از آن روند کندی به خود می‌گیرد [Rajini, and Rao, 2014]. محققانی به بررسی بتن قلیایی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی در برابر حمله سولفات منیزیم پرداختند، آن‌ها نشان دادند با افزایش دمای عمل‌آوری، مولاریته سدیم هیدروکسید و کاهش محلول قلیایی نسبت به چسباننده مقاومت افزایش پیدا می‌کند و بتن قلیایی با ۵۰ درصد خاکستر بادی، ۳۵ درصد سرباره و ۱۵ درصد دوده سیلیسی بهترین عملکرد را داشته است [Elyamany, Eloaty, and Elshaboury, 2018]. باقری و زنگنه مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر را در مخلوط‌های بتنی حاوی سرباره کوره آهن-گدازی، دوده سیلیسی و خاکستر بادی بررسی کردند، در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش دمای نمونه جریان عبوری افزایش می‌یابد [Bagheri, and Zangeneh, 2012]. شاهرجبیان و بهفرنیا دوام بتن سرباره قلیا فعال حاوی مواد نانو سیلیس، نانو رس و نانو آلومینا را با درصدهای مختلف ۱، ۲ و ۳ درصد بررسی کردند، مشاهده شد که به ترتیب نانو سیلیس و نانو رس نتایج بهتری نسبت به نانو آلومینا در بتن ژئوپلیمری دارد

کششی و نفوذپذیری یون کلر را محاسبه نموده و بهترین نسبت مخلوط جهت استفاده در روسازی بتنی انتخاب گردد.

۴. برنامه آزمایشگاهی

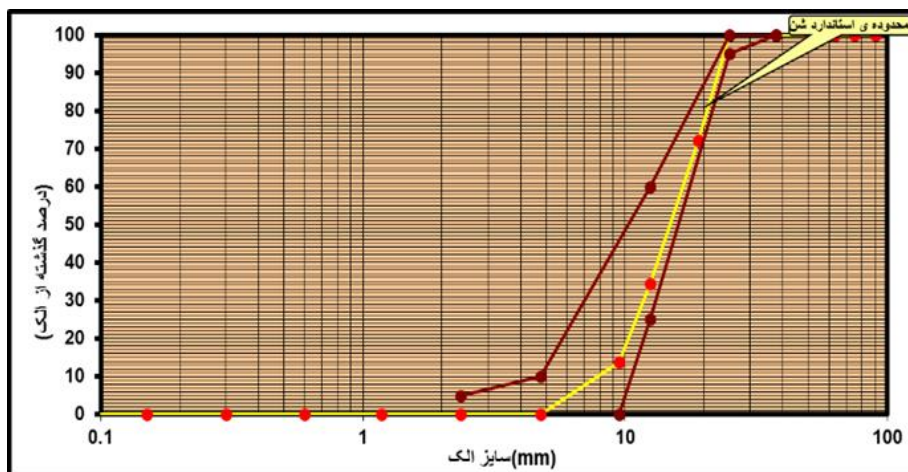
برای تهیه نمونه‌های بتنی مورد استفاده در این تحقیق از سنگدانه‌ها (شامل هر دو گروه درشت‌دانه و ریزدانه)، سرباره کوره آهن‌گدازه، آب، دوده سیلیسی، خاکستر بادی و محلول فعال کننده قلیایی استفاده شده است. که در ادامه به بیان مشخصات و ویژگی‌های هر کدام پرداخته می‌شود.

۴-۱ مواد و مصالح

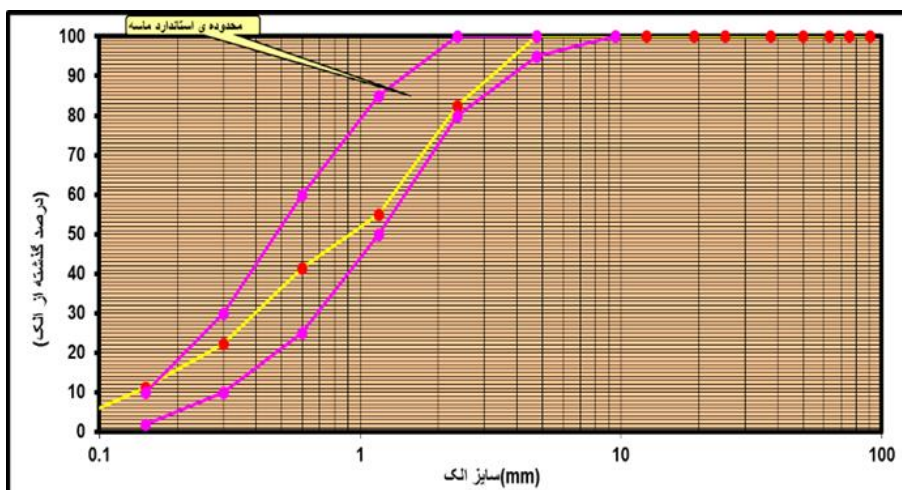
۴-۱-۱ مصالح سنگی

سنگدانه‌های استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها دارای وزن معمولی و طبیعی می‌باشند، همچنین دانه‌بندی آنها مطابق شکل ۱ و ۲ با استاندارد ASTM C33 و نشریه ۳۰۲ ملی ایران مطابقت دارد.

با توجه به مطالب فوق، پیش‌بینی دوام بتن‌های ژئوپلیمری در برابر حمله اسیدی، سولفات و یون کلر و مقایسه عملکرد آن‌ها با بتن معمولی در محیط‌های آسیب‌رسان با دشواری همراه خواهد بود؛ نفوذپذیری کمتر این نوع بتن و نیز تفاوت ماده چسباننده در این نوع بتن نسبت به بتن سیمانی در کنار بهره بردن از مواد جایگزین سیمان، همگی سبب غیرقابل پیش‌بینی شدن دوام بتن‌های ژئوپلیمری در برابر حمله محیط اسیدی، سولفات و کلریدی می‌شوند. به همین منظور در این تحقیق دوده سیلیسی با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، خاکستر بادی با درصدهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، ترکیب دوده سیلیسی ۱۰ و خاکستر بادی ۲۰ درصد، دوده سیلیسی ۲۰ و خاکستر بادی ۲۰ درصد جایگزین سرباره شده تا دوام بتن در برابر اسید سولفوریک، سولفات منیزیم و سولفات سدیم و همچنین مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت



شکل ۱. دانه بندی درشت دانه



شکل ۲. دانه بندی ریزدانه

۴-۱-۲ سرپاره کوره آهن گدازی

سرپاره ماده اصلی چسباننده در ترکیب بتن سرپاره قلیا فعال است، جهت ساخت نمونه‌ها، سرپاره از شرکت سیمان سپاهان تهیه شد که بصورت آسیاب سرپاره کوره کارخانه ذوب آهن اصفهان با سطح مخصوص ۳۲۰۰ سانتی متر مربع بر گرم و وزن مخصوص ۲/۷۵۴ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب، جهت ساخت نمونه‌ها استفاده گردید. درصد وزنی ترکیب شیمیایی سرپاره مورد استفاده با استفاده از آزمایش XRF به دست آمده و در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سرپاره

ماده	P,Cl, Cr,Ni	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	SiO ₂	درصد
وزنی	۳/۵	۰/۹۷	۱/۲	۰/۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۹۰	

۴-۱-۳ دوده سیلیسی

دوده سیلیسی پودری است به رنگ خاکستری روشن یا تیره که حاوی حدود ۹۶-۹۴ درصد دی اکسید سیلیسیوم (SiO₂) می باشد. که از فرآیند تولید فروسیلیسیوم در کوره‌های قوس الکتریکی به دست می آید و برای ارتقاء بعضی از خواص بتن در زمان ساخت، به بتن افزوده می شود. افزودن دوده سیلیسی به مخلوط

بتن باعث می گردد، دی اکسید سیلیسیوم فعال آن با محلول هیدرواکسید کلسیم Ca(OH)₂ آزاد موجود در منافذ موئین بتن ترکیب گردد و کریستال سیلیکات کلسیم نامحلول تولید نماید و در نهایت باعث تراکم ساختار خمیر سیمان و افزایش مقاومت بتن می گردد.

۴-۱-۴ خاکستر بادی

خاکستر بادی ماده‌ای است که از سوختن زغال سنگ حاصل می گردد و توسط فیلترهای مخصوص، به صورت غبار جمع آوری می شود. در این پژوهش خاکستر بادی کلاس C (پر کلسیم) استفاده شده است.

۴-۱-۵ فعال کننده قلیایی

به منظور فعال سازی سرپاره از ترکیب سدیم هیدروکسید^۱ (NaOH) و سیلیکات سدیم^۲ (Na₂SiO₃) تهیه شده از شرکت کیمیا سود استفاده شده است. ترکیب شیمیایی سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. محلول استفاده شده دارای غلظت ۶ مولار می باشد، با توجه به اینکه جرم مولی هیدروکسید سدیم ۴۰ گرم بر مول است، مقدار هیدروکسید سدیم حل شده در یک لیتر محلول هیدروکسید سدیم ۶ مولار برابر ۲۴۰ گرم می باشد. از آنجا که واکنش هیدروکسید

2 Sodium silicate

1 Sodium hydroxide

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره چهارم (۴۹) / تابستان ۱۴۰۰

از قبل آماده کرده می‌ریزیم. در سه لایه بتن ریخته و هر لایه ۲۵ ضربه وارد می‌کنیم و سپس ویریه کرده، بعد از ۲۴ ساعت ساخت نمونه‌ها، نمونه‌ها را از داخل قالب بیرون آورده و در داخل حوضچه عمل‌آوری آب آهک قرار داده. عمل‌آوری نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. به دلیل این که انحلال سدیم هیدروکسید و آب در طی واکنش گرمازا انجام می‌شود، یک روز قبل از ساخت نمونه‌ها، فعال‌کننده (سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم) ساخته شد. فعال‌کننده به گونه‌ای انتخاب شد که Na_2O به میزان ۰/۶ وزن مجموع سرباره، دوده سیلیسی و خاکستر بادی باشد. نسبت $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ در کلیه اختلاط‌ها برابر با ۱ در نظر گرفته شد. آب به اندازه‌ای اضافه شد که نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۴۲۵ در نظر گرفته شد و یک نمونه سیمانی به نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. در این پژوهش ماده سیمانی ما تغییر کرده و به جای سیمان از مواد پوزولانی استفاده شد. نسبت‌های مخلوط به این صورت می‌باشند، دوده سیلیسی با درصدهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و خاکستر بادی با درصدهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی جایگزین سرباره شدند، ترکیب سه گانه سرباره ۷۰ درصد، دوده سیلیسی ۱۰ درصد و خاکستر بادی ۲۰ درصد و ترکیب سه‌گانه سرباره ۶۰ درصد، دوده سیلیسی ۲۰ درصد و خاکستر بادی ۲۰ درصد، و همچنین بتن سیمانی (شاهد)، جدول ۴ نسبت‌های مخلوط بتن ژئوپلیمری را نشان می‌دهد.

سدیم با آب گرماده می‌باشد و ضمن حل شدن در آب حرارت قابل توجهی تولید می‌گردد، محلول قلیا فعال یک روز قبل از آزمایش آماده می‌شود.

جدول ۲. مواد تشکیل دهنده سدیم هیدروکسید

مشخصات شیمیایی	NaOH	Fe	K ₂ O	Ni	Na ₂ CO ₃
درصد وزنی	۹۹	۰/۰۰۳	۰/۰۶۶	۰/۰۰۳	۰/۴۳

جدول ۳. مواد تشکیل دهنده محلول سیلیکات سدیم

مشخصات شیمیایی	H ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O
درصد وزنی	۶۴	۲۷	۸/۲

۴-۲ نسبت‌های مخلوط و نحوه ساخت نمونه‌ها

مواد سیمانی بتن ژئوپلیمری مواد جامدی هستند که از سرباره، دوده سیلیسی، خاکستر بادی، سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم ساخته شده است. جهت ساخت بتن، ابتدا کل مصالح سنگی درشت دانه را در داخل مخلوط کن ریخته و همراه با ۵۰ درصد فعال‌کننده و ۵۰ درصد ماده سیمانی (سرباره، دوده سیلیسی و خاکستر بادی) به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد، سپس کل مصالح ماسه و ۵۰ درصد باقی مانده ماده سیمانی و فعال‌کننده اضافه شد و به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شدند. اختلاط به وسیله همزن مکانیکی صورت گرفته سپس مخلوط آماده شده را در داخل قالب‌هایی که



شکل ۳. عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آب آهک

جدول ۴. نسبت‌های مخلوط بتن قلیا فعال سرباره‌ای

طرح اختلاط	سود	سیلیکات سدیم	آب	سیمان	سرباره	دوده سیلیسی	خاکسترپادی	درشت دانه	ریز دانه
	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
سرباره ۱۰۰٪ (AAS)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۴۰۰	-	-	۹۱۵	۸۸۵
سرباره ۹۵٪ و دوده سیلیسی ۵٪ (AASSi5)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۳۸۰	۲۰	-	۹۱۵	۸۸۵
سرباره ۹۰٪ و دوده سیلیسی ۱۰٪ (AASSi10)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۳۶۰	۴۰	-	۹۱۵	۸۸۵
سرباره ۸۵٪ و دوده سیلیسی ۱۵٪ (AASSi15)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۳۴۰	۶۰	-	۹۱۵	۸۸۵
سرباره ۸۰٪ و دوده سیلیسی ۲۰٪ (AASSi20)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۳۲۰	۸۰	-	۹۱۵	۸۸۵
سرباره ۸۰٪ و خاکسترپادی ۱۰٪ (AASF10)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۳۶۰	-	۴۰	۹۱۵	۸۸۵
سرباره ۸۵٪ و خاکسترپادی ۱۵٪ (AASF15)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۳۴۰	-	۶۰	۹۱۵	۸۸۵
سرباره ۸۰٪ و خاکسترپادی ۲۰٪ (AASF20)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۳۲۰	-	۸۰	۹۱۵	۸۸۵
سرباره ۷۰٪، دوده سیلیسی ۱۰٪ و خاکسترپادی ۲۰٪ (AASSi10F20)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۲۸۰	۴۰	۸۰	۹۱۵	۸۸۵
سرباره ۶۰٪، دوده سیلیسی ۲۰٪ و خاکسترپادی ۲۰٪ (AASSi20F20)	۱۶۱	۶۳	۱۵۷/۲	-	۲۴۰	۸۰	۸۰	۹۱۵	۸۸۵
سیمان (OPC)	-	-	۱۸۰	۴۰۰	-	-	-	۹۱۵	۸۸۵

۳-۴ آزمایش‌ها

۳-۳-۱ مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری طبق استاندارد BS 1881-116 صورت گرفت، در این آزمایش نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰mm ساخته شدند و در جهت عمود بر جهت بتن‌ریزی زیر جک قرار گرفتند، سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه اجرا شد، برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از دستگاه تست یونیورسال ۱۰۰ تنی استفاده گردید، شکل ۴ دستگاه آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نحوه تنظیم دستگاه آزمایش مقاومت فشاری

۴-۳-۲ دوام در برابر محلول سولفات منیزیم، سولفات

سدیم و اسید سولفوریک

حمله سولفاتی و اسیدی یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در کاهش دوام بتن است. برای بررسی دوام بتن ژئوپلیمری در برابر محیط‌های شیمیایی، طبق استاندارد ISIRI 3206 نمونه‌ها به ابعاد $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ ساخته شد. نمونه‌ها بعد از ۷ روز عمل‌آوری در آب آهک از حوضچه خارج شدند و توسط ترازو دیجیتال وزن شدند، سپس در محلول اسید سولفوریک ۳ درصد، سولفات منیزیم ۵ درصد و سولفات سدیم ۵ درصد قرار گرفتند. نمونه‌ها درون ظرف هر چند وقت یکبار جابجا شدند تا اثرات محلول‌ها شیمیایی بطور یکنواخت بر تمامی سطوح اعمال گردد. بعد از ۱۸۰ روز نمونه‌ها را از محلول‌ها خارج کرده و شستشو و پاک نموده، آنها را به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و وزن کرده، سپس با تفریق وزن نمونه قبل از قرارگیری در محیط خورنده به بعد از قرارگیری در محیط خورنده، کاهش وزن بدست آمد، در نهایت مقاومت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. شکل ۵ وزن کشی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵. وزن نمونه‌ها بعد از قرارگیری در محلول‌های شیمیایی

۴-۳-۳ نفوذپذیری یون کلر

نفوذ یون کلر به بتن و خوردگی آرماتورها، داول‌ها و تای بارها مدفون در آن یکی از علل خرابی زودرس روسازی‌های بتنی می‌باشد. مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر از روش تسریع شده انتقال یون کلر در بتن، مطابق استاندارد ASTM-C1202 صورت گرفت. بعد از بتن ریزی در قالب‌ها، قالب‌ها توسط حوله نمدار به مدت ۲۴ ساعت پوشانده شدند، سپس نمونه‌ها از قالب‌ها خارج کرده و درون آب آهک اشباع قرار داده تا ضمن عمل‌آوری، از نشت Ca_2OH از بتن به خارج جلوگیری شود. این آزمایش بر روی بتن ۲۸ روز عمل‌آوری شده صورت گرفت. در این روش میزان کل جریان عبوری از نمونه‌های بتنی اشباع به قطر ۱۰ و ضخامت ۵ سانتی‌متر تحت جریان ثابتی با اعمال ۶۳ ولت اختلاف پتانسیل از نمونه‌ها عبور داده شد و بعد از ۶ ساعت، میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نمونه‌های بتنی از یک وجه با محلول NaCl و از وجه دیگر با محلول NaOH در تماس قرار می‌گیرند و با ایجاد اختلاف پتانسیل، جریان الکتریکی از نمونه‌ها عبور کرده و یون‌های کلر به درون بتن رانده می‌شود. فرض بر این است که عبور جریان از نمونه و از طریق محلول منفذی بتن که به عنوان الکترولیت عمل می‌کند، صورت می‌گیرد. مقدار و پیوستگی منافذ نمونه‌های متخلخل با منافذ پیوسته دارای جریان عبوری زیاد و نمونه‌های با تخلخل و پیوستگی منافذ کم دارای جریان عبوری کم است. این روش در حقیقت میزان بار الکتریکی عبوری از میان نمونه بتنی را در طول زمان آزمایش به عنوان شاخص نفوذپذیری یون کلر بتن اندازه‌گیری می‌کند. شکل ۶ دستگاه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر (RCPT) را بصورت شماتیک را نشان می‌دهد.

۴-۳-۴ کشش غیر مستقیم

مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی نمونه‌های عمل‌آوری ۲۸ روز در آب آهک طبق استاندارد ASTM C496 صورت گرفت، در این روش آزمون، با اعمال نیروی فشاری قطری روی نمونه بتن استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر که بصورت افقی بین

می‌کند، از مقاومت خمشی استفاده می‌شود. مقاومت خمشی طبق استاندارد ASTM C78 صورت گرفت. نمونه‌های آزمایش مقاومت خمشی در ابعاد $500 \times 100 \times 100$ mm ساخته شدند و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب آهک آزمایش مقاومت خمشی تحت بار ناشی از خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. شکل ۷ نحوه تنظیم دستگاه UTM و نمونه بتنی را نشان می‌دهد.



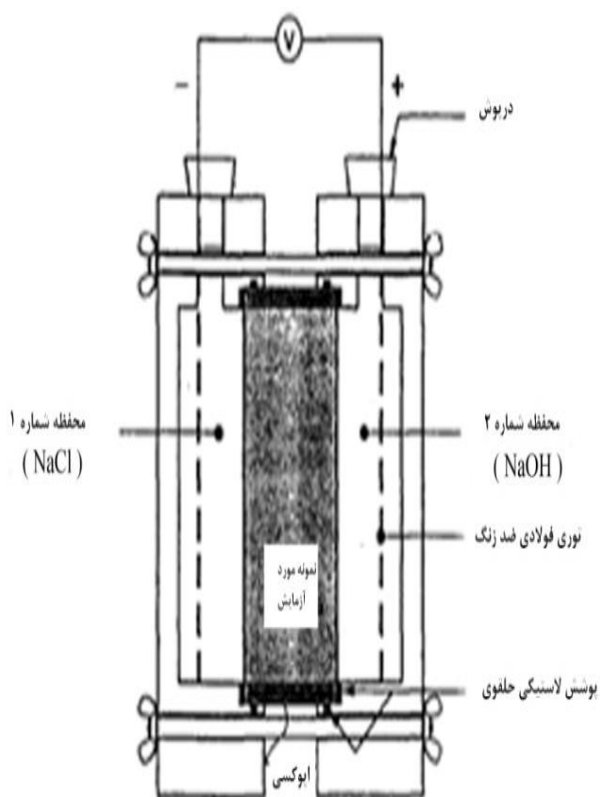
شکل ۷. نحوه تنظیم دستگاه UTM و نمونه بتن

ژئوپلیمری کاهش یافت، علت این کاهش مقاومت آن است که با بیشتر بودن مقدار سرباره، عمل کریستالیزه شدن در بتن ژئوپلیمری سریع‌تر صورت می‌گیرد و مقاومت فشاری ۷ روزه آن بیشتر می‌شود اما با کاهش سرباره مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود، میزان ۱۰ درصد خاکستر بادی عملکردی به مراتب بهتر از ۲۰ درصد آن در نمونه‌ها داشته است. این درحالی است که نمونه دارای تماماً سرباره (AAS) مقاومت

دو صفحه دستگاه آزمایش قرار گرفته، بار بطور مداوم، یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی با سرعت ثابتی در حدود ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلو پاسکال بر دقیقه تا هنگام گسیختگی بتن اعمال می‌شود.

۴-۳-۵ مقاومت خمشی

در رویکرد طراحی روسازی‌های بتنی برای در نظر گرفتن معیار خستگی که ترک خوردگی بتن تحت بارگذاری‌های مکرر را کنترل



شکل ۶. شماتیک دستگاه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر

۵. نتایج و بحث

۵-۱ مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ۷ روز طبق استاندارد BS 1881-116 صورت گرفت. نمودار شکل ۸ نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مختلف بتن را نشان می‌دهد. با افزودن دوده سیلیسی و خاکستر بادی مقاومت فشاری بتن

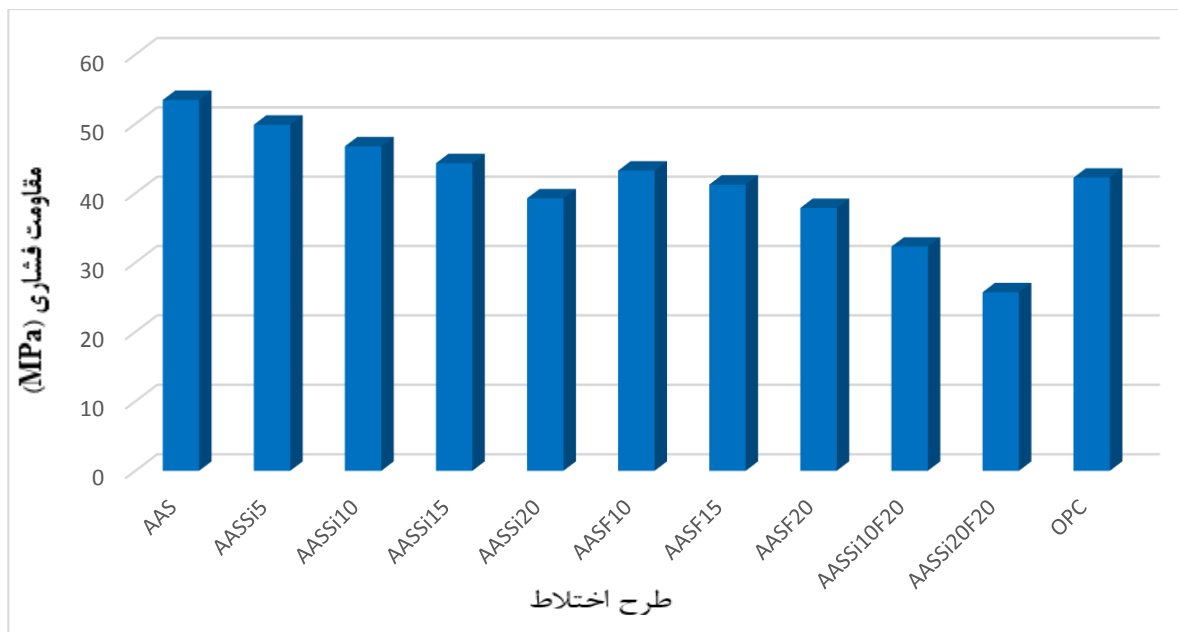
بیشتری از OPC داشته است. با بررسی نتایج افت وزنی نمونه مشاهده شد که AAS کاهش وزن کمتری داشته و نمونه‌های AASF10، AASSi15، AASSi10، AASSi5، AAS و AASF15 کاهش وزن بیشتری از نمونه OPC داشته است. بیشترین دوام مربوط به نمونه AAS می‌باشد، که مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در محلول اسید سولفوریک، سولفات منیزیم و سولفات سدیم به ترتیب ۴۳/۹۲، ۴۴/۸ و ۴۵/۹ مگاپاسکال و همچنین افت وزنی بعد از قرارگیری در این محلول‌ها به ترتیب ۲۱، ۱۴ و ۱۲ گرم می‌باشد. با توجه به این نتایج، افت وزنی نمونه‌ها به ترتیب در اسید سولفوریک بیشتر از سولفات منیزیم و سولفات سدیم است. بنابراین می‌توان دریافت، که محیط اسید سولفوریک برای بتن ژئوپلیمری بسیار مخرب می‌باشد و در این محیط‌ها باید به شدت از بتن محافظت شود. همچنین آسیب پذیری بتن ژئوپلیمری در برابر سولفات منیزیم به مراتب بیشتر از سولفات سدیم است. این نتایج منطبق بر نتایجی است که الکساندر و فوری در گزارشی منتشر کردند. در نتایج ارائه شده مشاهده شد که سرباره کوره آهن‌گدازی سبب بهبود دوام بتن در برابر محیط‌های حاوی اسید سولفوریک شد [Alexander and Fourie, 2011].

بالتری از نمونه بتن شاهد (OPC) دارد. همچنین نمونه‌های AASF10، AASSi15، AASSi10، AASSi5، AAS و AASF15 بهتر از OPC بوده است، به بیانی دیگر به راحتی قابل تشخیص است که بتن سیمانی عملکردی به مراتب ضعیف‌تر از بتن سرباره قلیایی فعال داشته است. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه AAS (۵۳/۴۵ مگاپاسکال) که ۲۶/۵ درصد بیشتر از OPC است. این نتایج با تحقیق راجینی و رائو هم خوانی دارد، و با افزایش میزان سرباره مقاومت فشاری افزایش یافته است. [Rajini, and Rao, 2014].

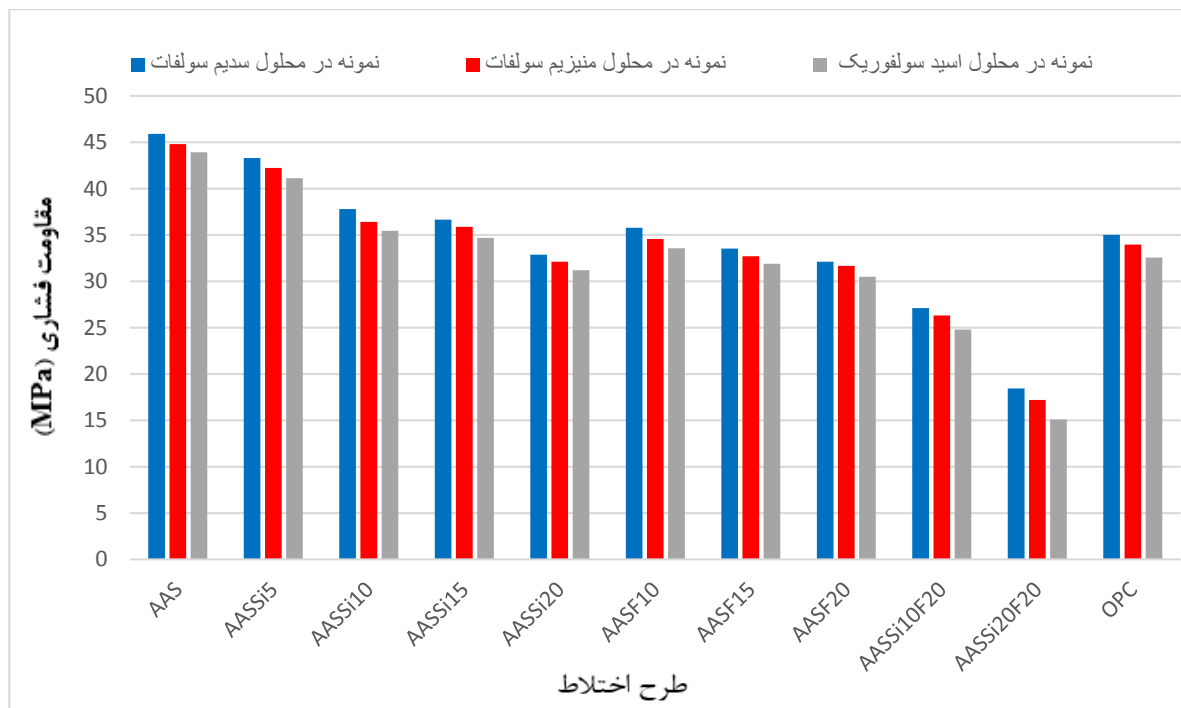
۲-۵ دوام در برابر محلول سولفات منیزیم، سولفات

سدیم و اسید سولفوریک

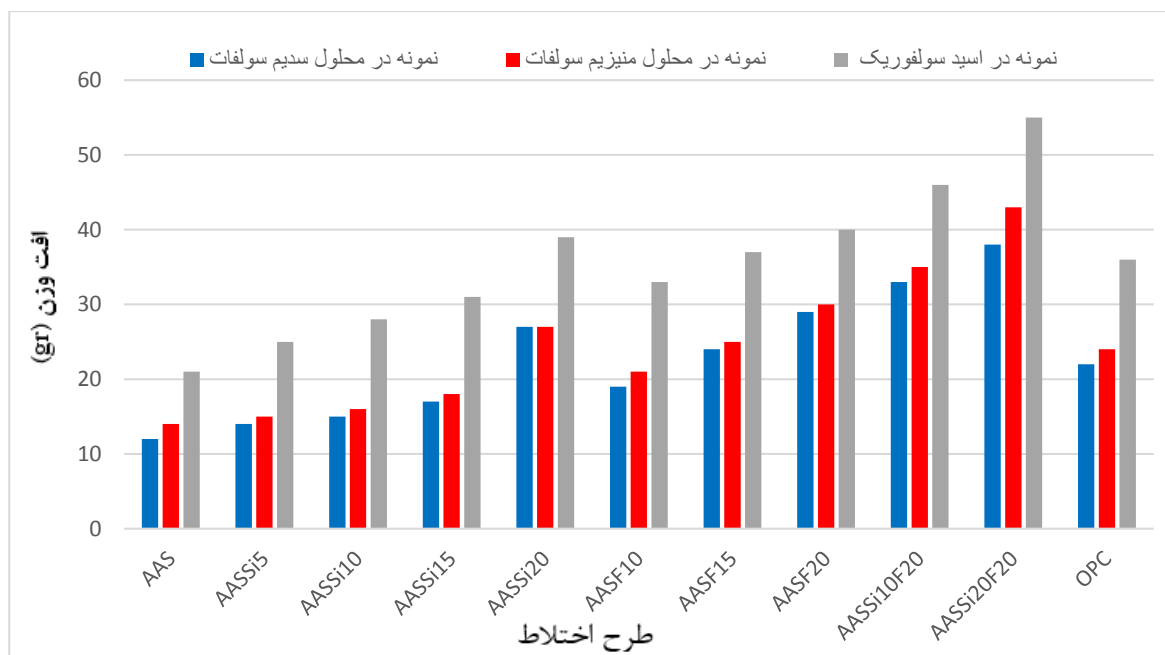
دوام نمونه‌های بتن ژئوپلیمری، طبق ISIRI 3206 بدست آمد. به ترتیب نمودار شکل ۹ و ۱۰ مقاومت فشاری و افت وزنی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که، با افزایش دوده سیلیسی و خاکستر بادی دوام بتن در برابر محیط‌های شیمیایی کاهش می‌یابد. این درحالی است که نمونه AAS از نظر مقاومت در برابر محیط‌های شیمیایی از نمونه OPC بهتر بوده است. همچنین نمونه‌های AASF10، AASSi15، AAS و AASF15 مقاومت فشاری



شکل ۸. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی



شکل ۹. مقاومت فشاری نمونه‌ها در برابر سولفات منیزیم، سولفات سدیم و اسید سولفوریک



شکل ۱۰. میزان افت وزنی در برابر سولفات منیزیم، سولفات سدیم و اسید سولفوریک

این نتایج با نتایج تحقیق رضایانپور، هم خوانی داشته است [Ramezaniapour, 2014].

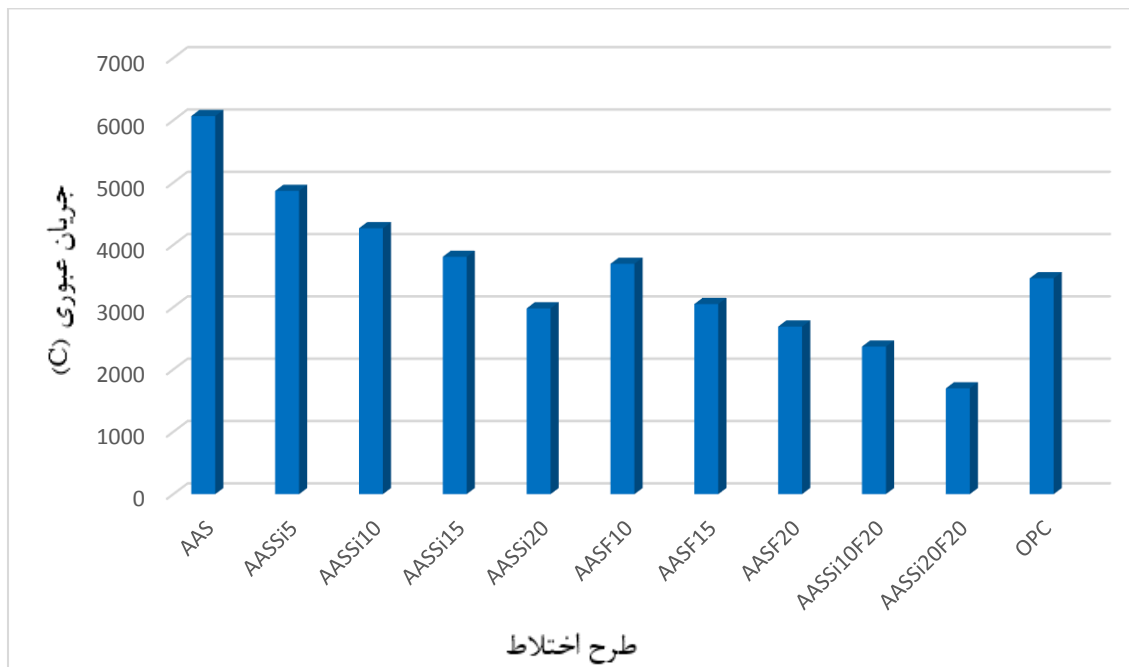
۴-۵ مقاومت کششی غیر مستقیم

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در شکل ۱۲، نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان داد که گسیختگی همه نمونه‌ها از قسمت سنگدانه اتفاق افتاد و نمونه‌های AASSi20F20 و AASSi10F20 به دلیل ضعیف بودن چسبندگی بین ملات و مصالح، از ناحیه ملات دچار گسیختگی شده‌اند. مقدار حداقل مقاومت کششی مربوط به AASSi20F20 (۲/۶ مگاپاسکال) و بیشترین مقاومت کششی مربوط به AAS (۵/۵ مگاپاسکال) می‌باشد. همچنین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های AAS، AASSi5، AASSi10، AASSi15، AASF10 و AASF15 بیشتر از نمونه OPC می‌باشد، علت این کاهش مقاومت کششی آن است که ماده چسباننده ما سرباره می‌باشد، اما با افزایش دوده سیلیسی و خاکستر بادی در بتن ژئوپلیمری از ماده چسباننده کم می‌شود. این نتایج منطبق بر نتایجی است که نیوین و همکاران در گزارشی منتشر

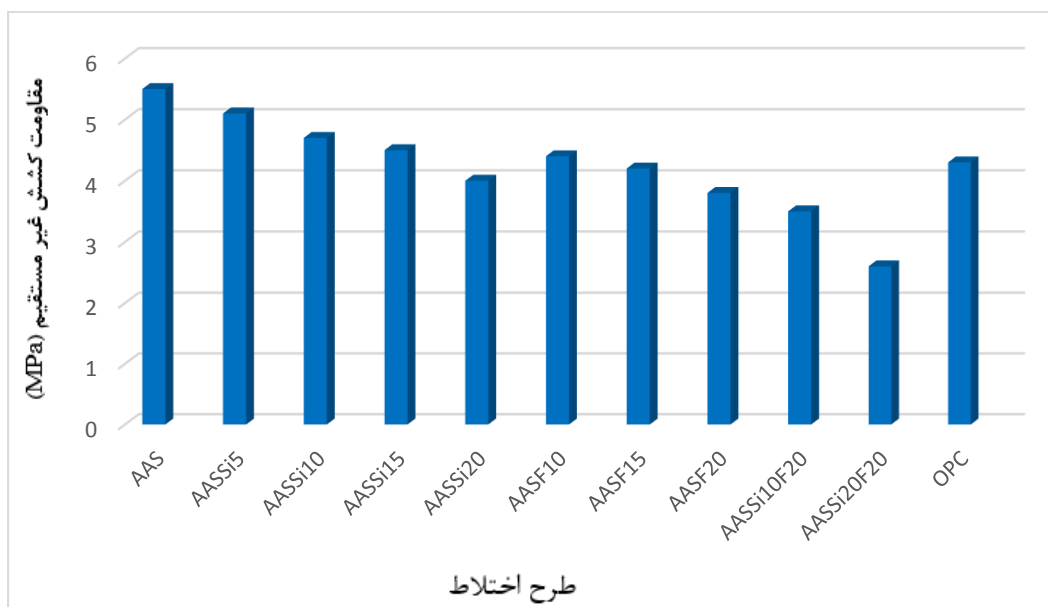
۳-۵ نفوذپذیری یون کلر

مقاومت در برابر نفوذ یون کلر نمونه‌های ۲۸ روزه طبق استاندارد ASTM-C1202 اندازه‌گیری شد. نمودار شکل ۱۱ نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد، بیشترین جریان عبوری مربوط به AAS (۶۰۶۷ کولمب) می‌باشد و کمترین جریان عبوری مربوط به AASSi20F20 (۱۶۹۸ کولمب) می‌باشد. نتایج نشانگر کاهش قابل توجه در نفوذپذیری یون کلر به داخل AAS و در واقع افزایش جریان عبوری شده است. نهایتاً به این نتیجه رسیده شد که با افزایش دوده سیلیسی و خاکستر بادی در بتن ژئوپلیمری، جریان عبوری کاهش می‌یابد. جریان عبوری نمونه AAS نسبت به نمونه OPC ۴۲/۸ درصد بیشتر می‌باشد. همچنین نمونه‌های AAS، AASSi5، AASSi10، AASSi15، AASF10 و AASF15 جریان عبوری بیشتری از OPC داشته است، به بیانی دیگر به راحتی قابل تشخیص است که بتن سیمانی جریان عبوری به مراتب ضعیف‌تر از بتن سرباره قلیایی فعال داشته است.

کردند. در نتایج ارائه شده مشاهده شد که بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن سیمانی مقاومت کششی بالاتری داشته است، Neupane, Chalmers, and] [Kidd, 2018



شکل ۱۱. جریان عبوری در بتن



شکل ۱۲. نمودار نتایج مقاومت کششی ۲۸ روزه

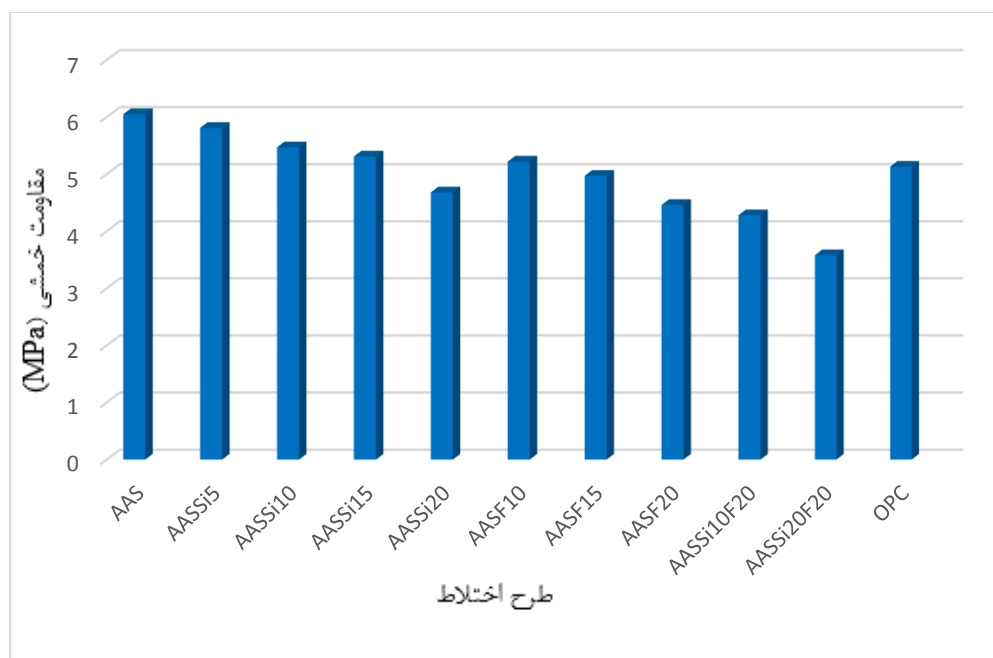
۵-۵ مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی در نمودار شکل ۱۳ برای نمونه‌های مختلف بتن نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش دوده سیلیسی و خاکستر بادی مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. AAS بیشترین مقاومت خمشی را دارد (۶/۰۵ مگاپاسکال) و مقاومت خمشی آن نسبت به OPC، ۱۷/۹ درصد افزایش یافته از آن جهت که مقاومت خمشی مهم‌ترین عامل در طراحی روسازی بتنی است، این نوع بتن جهت استفاده در روسازی بتنی بسیار مناسب می‌باشد. در طرح اختلاط‌هایی که دوده سیلیسی و خاکستر بادی جایگزین سرباره شدند، با افزایش دوده سیلیسی و خاکستر بادی مقاومت خمشی کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که نمونه‌های AAS، AASSi5، AASSi10، AASSi15.

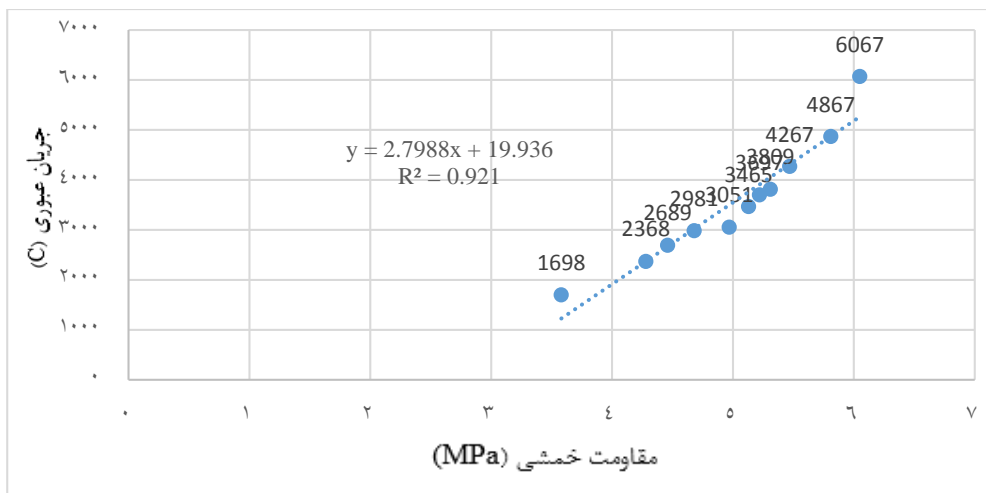
AASF15 و AASF10 بهتر از نمونه OPC بوده است. این نتایج منطبق بر نتایجی است که نیوپن و همکاران در گزارشی منتشر کردند. در نتایج ارائه شده مشاهده شد که بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن سیمانی مقاومت خمشی بالاتری دارد، Neupane, [and Kidd, 2018 Chalmers,].

۶-۵ رابطه بین مقاومت خمشی و نفوذ یون کلر

طبق نمودار شکل ۱۴ با افزایش مقاومت خمشی، جریان عبوری در بتن افزایش می‌یابد. بتن سرباره قلیا فعال خالص به دلیل دارا بودن مقاومت‌های بالاتر نسبت به بتن شاهد، کمتر دچار ترک، ناشی از تنش داخلی می‌شوند که خود باعث کمتر شدن نفوذپذیری یون کلر در بتن شده و جریان عبوری بیشتری دارد.



شکل ۱۳. نمودار نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه



شکل ۱۴. ارتباط بین مقاومت خمشی و جریان عبوری

۶. نتیجه گیری

- ارزیابی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر از روش تسریع شده انتقال یون کلر در بتن نشان می‌دهد، که با افزایش دوده سیلیسی و خاکستر بادی جریان عبوری افزایش می‌یابد.
- بهترین نمونه، بتن ژئوپلیمری سرباره خالص (AAS) می‌باشد که دارای مقاومت فشاری ۵۳/۴۵ مگاپاسکال، مقاومت خمشی ۶/۰۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۵/۵ مگاپاسکال، جریان عبوری یون کلر ۶۰۶۷ کولمب و مقاومت فشاری بعد از قرار گیری در اسید سولفوریک، سولفات منیزیم و سولفات سدیم به ترتیب ۴۳/۹۲، ۴۴/۸ و ۴۵/۹ مگاپاسکال و همچنین افت وزنی بعد از قرار گیری در اسید سولفوریک، سولفات منیزیم و سولفات سدیم به ترتیب ۲۱، ۱۴ و ۱۲ گرم می‌باشد.
- با افزایش مقاومت خمشی، جریان عبوری در بتن افزایش می‌یابد.

۷. منابع

- باقری، ع، زنگنه، ح. (۱۳۹۱). "مقایسه عملکردی روش RCMT برای ارزیابی سریع مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر با روش‌های RCPT و مقاومت الکتریکی". مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره دوازدهم، شماره سه، ص. ۱۱۲-۱۰۳.

در این تحقیق مقاومت خمشی، فشاری، کششی، نفوذپذیری یون کلر و دوام روسازی بتنی ژئوپلیمری در برابر محیط‌های خورنده بررسی گردید. از این پژوهش به طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که:

- با افزایش جایگزینی دوده سیلیسی و خاکستر بادی بجای سرباره در بتن ژئوپلیمری، مقاومت فشاری کاهش و افت وزنی افزایش می‌یابد، این درحالی است که نمونه دارای تماما سرباره از نظر مقاومت در برابر محیط‌های شیمیایی از نمونه بتن شاهد بهتر عمل می‌کند.
- محلول اسید سولفوریک برای بتن ژئوپلیمری بسیار مخرب بوده، در این محیط باید به شدت از بتن محافظت شود.
- آسیب پذیری بتن ژئوپلیمری در برابر محلول اسید سولفوریک به مراتب بیشتر از منیزیم سولفات و سدیم سولفات می‌باشد.
- مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه بتن سرباره قلیا فعال خالص از نمونه‌های بتن شاهد بیشتر است.
- با افزایش دوده سیلیسی و خاکستر بادی در بتن ژئوپلیمری، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن کاهش می‌یابد.

simple beam with third-point loading)". ASTM International.

– Aydın, S., Yiğiter. H, and Baradan, B. (2008) "Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete". Building and Environment., Vol.42, PP. 717-721.

– Chang. Z. T., Song, X., Munn. R, and Marosszky, M. (2005) "Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack". Cement and Concrete Research., Vol.35, PP. 1486-1494.

– Deb, P.S., Nath. P, and Sarker, P.K. (2014) "The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature". Materials & Design., Vol. 62, PP. 32-39.

– Elyamany, H. E., Eloaty. A, and Elshaboury, A.(2018). "Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar". Journal of Construction and Building Materials., Vol. 184, PP. 111-127.

– EN, BS 1889-116. (1983) "Standard Testing Hardened Concrete, Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes".

– Hewayde, H., Nehdi, M., Allouche. E, and Nakhla, G. (2007) "Effect of mixture design parameters and wetting-drying cycles on resistance of concrete to sulfuric acid attack". Journal of materials in Civil Engineering., Vol. 19, PP. 155-163.

– Ismail. I., Bernal, S., Provis. J., Nicolas. R. S., Brice, D. G., Kilcullen. A. R., Hamden. S, and Deventer, J., (2013) "Influence of fly ash on

– رمضانپور، ع.، ذوالفقارنسب، آ. بهمینزاد، ف. رمضانپانپور، ا. (۱۳۹۷). "اثر سرباره گرانوله شده کوره قوس الکتریکی بر دوام بتن در برابر حمله سولفاتی". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره پنجاه، شماره چهار، ص. ۱۳۸-۱۲۱.

– Alexander, M. and Fourie, C. (2011) "Performance of sewer pipe concrete mixtures with portland and calcium aluminate cements subject to mineral and biogenic acid attack". Materials and structures., Vol.44, PP. 313-330.

– Alexander, M., Bertron. A, and De Belie, N. (2013) "Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments". Springer Civil engineering., 56.

– Allahverdi, A. and Skvara, F. (2000) "Acidic corrosion of hydrated cement based materials". Ceramics– Silikaty., Vol.44, PP. 152-160.

– ASTM C1202-18. (2018) "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration". ASTM International.

– ASTM C171-16. (2016) "Standard Specification for Sheet Materials for Curing Concrete". ASTM International.

– ASTM C33-03. (2003) "Standard Specification for Concrete Aggregates". ASTM International.

– ASTM C496-96. (1996) "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens". ASTM International.

– ASTM C78-09. (2009) "Standard test method for flexural strength of concrete (using

- Senhadji, Y., Escadeillas, G., Mouli, M., Khelafi, H., and Benosman, A. S. (2014) "Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar". Powder technology., Vol.254, PP. 314-323.
- Sersale, R., Frigione, G., and Bonavita, L. (1998) "Acid Depositions and Concrete Attack: Main Influences 1". Cement and Concrete Research., Vol.28, PP. 19-24.
- Shahrajabian, F. and Behfarnia, K. (2018) "The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete". Journal of Construction and Building Materials., Vol.176, PP. 172-178.
- Vincke, E., Wanseele, E., Monteny, J., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Gemert, D., and Verstraete, W., (2002) "Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete". International biodeterioration & biodegradation., Vol.49, PP. 283-292.
- Wang, H., Li, H., and Yan, F. (2005) "Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects., Vol.268, PP. 1-6.
- Zhang, W., Yao, X., Yang, T., and Zhang, Z. (2018) "The degradation mechanisms of alkali-activated fly ash/slag blend cements exposed to sulphuric acid". Journal of Construction and Building Materials., Vol.186, PP. 1177-1187.
- the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes". Journal of Construction and Building Materials., Vol. 48, PP. 1187-1201.
- Monteny, J., Vince, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Gemert, D., and Verstraete, W., (2000). "Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete". Cement and Concrete Research., Vol. 30, PP. 623-634.
- Monteny, J., De Belie, N., and Taerwe, L. (2003) "Resistance of different types of concrete mixtures to sulfuric acid". Materials and Structures., Vol.36, PP. 242-249.
- Neupane, K., Chalmers, D., and Kidd, D. (2018) "High-Strength Geopolymer Concrete-Properties, Advantages and Challenges". Journal of Advances in Materials., Vol.7, PP. 15-25.
- Rahmani, H. and Ramazanianpour, A. (2008) "Effect of binary cement replacement materials on sulfuric acid resistance of dense concretes". Magazine of concrete research., Vol.60, PP. 145-155.
- Rajini, B. and Rao, A. N. (2014) "Mechanical properties of geopolymer concrete with fly ash and ggbs as source materials". International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology., Vol.3, PP. 15944-15953.
- Ramezani-pour, A.A. (2014) "Fly ash, in Cement replacement materials". Springer Geochemistry Mineralogy., Vol.47, PP. 148-156.

غلامعلی شفاعبخش، ابوالفضل محمدی جانکی

غلامعلی شفاعبخش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را از دانشگاه علم و صنعت ایران و همچنین دومین کارشناسی ارشد خود در رشته عمران را از دانشگاه INSA فرانسه اخذ نمود. وی در سال ۱۳۷۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران - راه و ترابری، از دانشگاه INSA فرانسه گردید. تالیفات ایشان شامل ۱۲۰ مقاله در مجلات ISI و ISC و ۱۶۰ مقاله در کنفرانس‌های داخلی و خارجی، ۵ کتاب در زمینه‌های راه و آهن و ۴ ثبت اختراع می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، حوزه روسازی راه، فرودگاه، مهندسی راه آهن و ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه سمنان است.



ابوالفضل محمدی جانکی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۹۵ و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه تربیت مدرس تهران اخذ نموده و هم‌اکنون دانشجوی دکتری در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری در دانشگاه سمنان است. تالیفات ایشان شامل ۱۱ مقاله در مجلات ISI و ISC و ۱۵ مقاله در کنفرانس‌های داخلی و خارجی و مولف ۲ کتاب در زمینه‌های تکنولوژی بتن و روسازی راه می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان حوزه روسازی راه و فرودگاه، تکنولوژی بتن و راهسازی بوده و در حال حاضر مدرس حق‌التدریس در چندین دانشگاه دولتی و غیردولتی است.

