

Evaluation of mechanical properties and durability of geopolymer mortar based on the granulated blast furnace slag replaced with partial replacement of kaolin in different molarity

Seyed. Hosein Ghasemzadeh mousavinejad^{1*}, Arian Darvishalinezhad²

- 1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Technical Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran
2- MSc Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

ABSTRACT

Geopolymers are aluminosilicate materials that can be a suitable alternative to all types of concrete, because they help preserve the environment by removing pollutants such as CO₂. The present study examines the mechanical characteristics and durability of slag-based geopolymer mortars (GGBFS) and its replacement with different percentages of kaolin in several molar amounts. Sodium hydroxide with a concentration of 4 and 8 M and sodium silicate have been used as activators. The mentioned basic materials have been examined alone and in combination with other components of the mixture. For this purpose, kaolin powder has been mixed with slag in the percentages of 50% and 75%, which, including non-combined mixtures, has made a total of 12 mixing designs. The studied properties included: compressive, bending and tensile strengths, percentage of water absorption and electrical resistance at the age of 28 days. The compressive strength of geopolymer samples at the ages of 7, 28 and 90 days was determined and the following results were obtained: The use of polymer in the 7 and 28 day compressive strength test in the BS8 design sample compared to the S4 control design improved the strength of the samples by 15% and 24%, respectively. In the tensile test of the SC50-4 mixing design sample (2.79 Mpa) compared to the control S4 design sample (2.63 Mpa), the strength of the sample improved by 6%. In the flexural strength test, no significant difference was observed between the S4 design sample and the BS8 design sample. In the final water absorption test, the samples of mixing designs containing kaolin powder next to slag had almost the same water absorption.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 July 2022
Revise Date: 08 October 2022
Accept Date: 21 October 2022

Keywords:

Geopolymer Mortar
GGBFS
Kaolin
Durability
Compressive Strength
Mechanical Properties

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.351034.2872>

*Corresponding author: Seyed. Hosein Ghasemzadeh mousavinejad
Email address: h.mosavi@guilan.ac.ir

ارزیابی خواص مکانیکی و دوام ملات های ژئوپلیمری بر مبنای سرباره کوره آهنگدازی و جایگزینی با درصدهایی از کائولن در مولار مختلف

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد^{۱*}، آریین درویشعلی نژاد^۲

۱- دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

ژئوپلیمرها مواد آلومینوسیلیکاتی هستند که می توانند جایگزین مناسبی برای انواع بتن باشند، زیرا با حذف آلاینده هایی نظیر CO_2 به حفظ محیط زیست کمک می کنند. پژوهش حاضر به بررسی مشخصات مکانیکی و دوام ملات های ژئوپلیمری بر مبنای سرباره (GGBFS) و جایگزینی با درصدهایی از کائولن در چند مولار مختلف می پردازد. از سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ و ۴ مولار و سدیم سیلیکات به عنوان فعال کننده استفاده شده است. مواد پایه مذکور به صورت تنها و به صورت ترکیب با اجزای دیگر مخلوط بررسی شده اند. بدین منظور پودر کائولن در درصد های ۵۰٪ و ۷۵٪ با سرباره مخلوط شده اند که با احتساب مخلوط های غیر ترکیبی در مجموع ۱۲ طرح اختلاط ساخته شده است. خصوصیات مورد بررسی شامل: مقاومت فشاری، خمشی، کششی، درصد جذب آب و مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روزه بوده است. مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تعیین گردید و نتایج زیر حاصل شد: استفاده از پلیمر در آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در نمونه طرح BS_8 نسبت به طرح شاهد S_4 به ترتیب باعث بهبود ۱۵٪ و ۲۴٪ مقاومت نمونه ها شد. در آزمایش کششی نمونه طرح اختلاط SC_{50-4} (۲/۷۹ Mpa) نسبت به نمونه طرح شاهد S_4 (Mpa) ۲/۶۳ باعث بهبود ۶٪ مقاومت نمونه شد. در آزمایش مقاومت خمشی بین نمونه طرح شاهد S_4 نسبت به نمونه طرح BS_8 تفاوت معناداری مشاهده نشد. در آزمایش جذب آب نهایی، نمونه طرح های اختلاط حاوی پودر کائولن در کنار سرباره جذب آب تقریباً یکسانی داشتند.

کلمات کلیدی: ملات ژئوپلیمر، سرباره، کائولن، دوام، مقاومت فشاری، خواص مکانیکی.

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
https://doi.org/10.22065/jsce.2022.351034.2872	۱۴۰۱/۰۷/۱۶	۱۴۰۱/۰۷/۲۹	۱۴۰۱/۰۷/۲۹	۱۴۰۱/۰۷/۲۹	۱۴۰۲/۰۵/۳۱
doi: 10.22065/jsce.2022.351034.2872	۱۴۰۱/۰۴/۲۸				
*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد h.mosavi@guilan.ac.ir					

۱- مقدمه

پدیده گرمایش جهانی و اثرات مخرب آن بر محیط زیست، پژوهشگران و دانشمندان حوزه‌های مختلف علوم مهندسی را بر آن داشته که راه‌های گوناگونی را برای مواجهه با این پدیده پیشنهاد دهند. از جمله این راه‌ها کاهش گازهای گلخانه‌ای به ویژه گاز دی اکسید کربن است. مصالح سیمانی به دلیل داشتن مزایایی مانند دسترسی راحت به مواد تشکیل دهنده آن، حمل و نقل آسان، مقاومت فشاری بالا، اجرای آسان و ... امروزه در بسیاری از پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. متوسط مصرف سرانه این ماده به خصوص در کشورهای در حال توسعه همچون کشور ما بسیار زیاد است. افزایش تقاضا برای تولید فرآورده‌های سیمانی سبب افزایش تولید سیمان به عنوان یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده فرآورده‌ها شده و نگرانی‌هایی را در خصوص انتشار گازهای آلاینده ایجاد کرده است. از این رو محققان در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای را درباره استفاده از مواد با خاصیت پوزولانی در مخلوط‌های سیمانی (به عنوان سیمان ژئوپلیمری یا سیمان سبز) انجام داده‌اند. استفاده از این مواد می‌تواند نتایج مطلوبی بر بهبود خواص مکانیکی و دوامی مصالح سیمانی داشته باشد و راه حل مؤثری برای کاهش گازهای گلخانه‌ای معرفی شود.

در ساختار بتن ژئوپلیمری خمیر چسباننده از ترکیب یک ماده پایه و محلول فعالساز ایجاد می‌شود که می‌تواند گامی مؤثر برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار محسوب شود. استفاده از برخی مواد معدنی در مخلوط‌های بتنی نقش تأثیرگذاری بر بهبود مشخصات دوامی و مکانیکی خواهد داشت. در پژوهش حاضر به بررسی اثر دو ماده کائولن و سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) به صورت انفرادی و ترکیبی در چند مولار مختلف بر خواص مکانیکی و دوامی ملات ژئوپلیمری خواهیم پرداخت. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با خواص مکانیکی و دوام ملات‌های ژئوپلیمری انجام شده است که در اینجا به آنها اشاره می‌شود:

ایپ و همکاران در سال ۲۰۰۵ نیز در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که ترکیب سرباره (زیر ۴۰٪) و متاکائولن در افزایش مقاومت فشاری، دوام بتن و بهبود میکروساختار سیمان ژئوپلیمری تأثیر بسزایی دارد [۱]. برنال و همکاران در سال ۲۰۱۱ در آزمایشی از ترکیب سرباره و متاکائولن نتیجه گرفتند که استفاده از ۴۰٪ سرباره به جای متاکائولن، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری را افزایش می‌دهد [۲]. در سال ۲۰۱۳ واکسیا و همکارانش با بررسی مقاومت بتن ژئوپلیمری در برابر اسیدسولفوریک دریافتند که وقتی بتن ژئوپلیمری در معرض ۲٪ محلول اسیدسولفوریک قرار می‌گیرد به دلیل اثر متقابل آلومینوسیلیکات، پایداری بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد [۳]. پژوهشگرانی نفوذپذیری را در مخلوط‌های اصلاح شده پلیمری بررسی کردند و دریافتند که افزودن پلیمر می‌تواند سبب کاهش میزان نفوذپذیری مخلوط‌ها شود [۴، ۵]. مطالعه رفتار بتن‌های اصلاح شده پلیمری حاوی سنگدانه‌های بازیافتی نیز توسط اسعد و داعو در سال ۲۰۱۶ نشان داد که افزودن پلیمر استاتیرن بوتادین به میزان ۱٪ تا ۳٪ وزن سیمان، سبب افزایش کارایی و خواص مکانیکی بتن در مقایسه با مخلوط‌های بتنی با سنگدانه‌های بازیافتی فاقد پلیمر می‌شود [۶]. مرمرداس و همکاران در سال ۲۰۱۷ پژوهشی بر روی تأثیر سنگدانه‌های ریز بر خواص مکانیکی و جذب آب ملات‌های ژئوپلیمری با خاکستر بادی انجام دادند که ماسه طبیعی، ماسه شکسته و ترکیبی از این دو را برای ساخت ملات ژئوپلیمری استفاده کردند. مطالعه اندازه گیری میزان کارایی، مقاومت فشاری و جذب آب در نمونه‌ها نشان داد که ملات‌ها با ماسه طبیعی کارایی بهتر و نمونه‌ها با ماسه شکسته مقاومت فشاری بیشتری داشتند در حالی که جذب آب نمونه‌ها با ماسه ترکیبی کمترین میزان بود [۷]. شارما و همکاران در سال ۲۰۱۷ در مورد فاکتورهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، نتیجه گیری کردند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۶ مول، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش بیشتر غلظت تا ۱۸ مول، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری دیده نمی‌شود. در رابطه با افزایش نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی (خاکستر بادی) از ۰/۳۵ تا ۰/۴۵، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش بیشتر این نسبت تا ۰/۵، مقاومت فشاری به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۸]. در سال ۲۰۱۸ پژوهش کوانسی و همکاران در بررسی مقاومت ملات ژئوپلیمری در برابر اسید نشان داد که ملات ژئوپلیمری نسبت به ملات سیمان پرتلند معمولی مقاومت بهتری دارد [۹]. این نتایج در تحقیق ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ تایید شده است [۱۰]. پاتل و همکاران در سال ۲۰۱۸ در مورد کارایی و خواص سخت شده بتن ژئوپلیمر خودتراکم در دمای محیط دریافتند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۲ مول در بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و افزایش غلظت به بیش از ۱۲ مول سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود [۱۱]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸

رفتار و خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر را پس از اعمال حرارت بررسی کردند و به این نتایج رسیدند که مقاومت خمشی و کششی در دمای زیاد، کاهش پیدا می‌کند؛ اما پیوند و مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی کاهش کمتری می‌یابد. به طور کلی مقاومت ملات ژئوپلیمر نسبت به ملات سیمانی در محدوده دمای ۲۵ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس بیشتر است [۱۲]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی مطالعه عملکرد بعد از حرارت ملات سیمانی حاوی میکروسیلیس یا سرباره آسیاب شده کوره بلند پرداختند و دریافتند که وقتی ملات مذکور در معرض دماهای پایین و بالا قرار گیرد مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش دما، اندازه ذرات نمونه‌های حاوی SF یا GBFS در مقایسه با نمونه کنترل کمتر می‌شود [۱۳]. پاچیده و قلحکی در سال ۲۰۲۰ به بررسی آزمایشگاهی روی تاثیر افزایش دما و مشخصات عینی بتن حاوی فیر فلزی بازیافتی پرداختند نتایج نشان داد که استفاده از چشمه‌های فلزی قدرت بتن را تا ۸۰٪ افزایش می‌دهد. در میان انواع مختلف الیاف اضافه شده به بتن فبره‌هایی با قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر و الیاف فولادی به ترتیب می‌توانند بطور مؤثری مقاومت فشاری و کششی را بهبود بخشند [۱۴]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی مطالعه اثر ضایعات پوزولانی بر خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار ملات های سیمانی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از پوزولان‌ها تا جایگزینی ۱۴٪، مقاومت فشاری را در مقایسه با نمونه کنترل تا ۲۸٪ بهبود می‌بخشد. آنها دریافتند اگر چه مقاومت کششی از یک روند کاهشی پیروی می‌کند اما تا ۲۸٪ جایگزینی، مقاومت کششی بیشتر از نمونه کنترل است، بطور کلی نتیجه گرفتند که استفاده از ۷٪ پوزولان می‌تواند مقاومت کششی را افزایش دهد [۱۵]. سارانی و همکاران در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی به بررسی عملکرد اتصال‌های تیر به ستون بتن ژئوپلیمری تهیه شده از سرباره و دولومیت تحت بار یکنواخت پرداختند. براساس نتایج آنها حداکثر مقاومت فشاری در نسبت ۳۰٪ دولومیت و ۷۰٪ سرباره به دست آمد. آنها رفتار شکل پذیرتر، جذب انرژی و چقرمگی بالاتر را در نمونه‌هایی که به آنها الیاف فولادی افزوده شده بود، مشاهده کردند [۱۶]. مطالعات فیترا و همکاران در سال ۲۰۱۳ درباره واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه در مخلوط‌های پایه سیمانی حاوی پلیمر (پایه آبی) نشان داد که مقاومت فشاری کاهش و مقاومت خمشی افزایش یافته است، همچنین در نمونه‌های اصلاح شده با پلیمر، ریزترک‌های ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی بسیار کمتر از نمونه‌های فاقد پلیمر بوده است [۱۷]. گانسیان و همکاران در سال ۲۰۱۴ با بررسی تأثیر ترکیبی پلیمرهای استایرن بوتادین رابر و اپوکسی در کسب مقاومت فشاری مخلوط‌های پایه سیمان پرتلند دریافتند که ترکیب دو پلیمر مذکور با یکدیگر سبب کاهش خواص مکانیکی مخلوط‌های اصلاح شده نسبت به مخلوط کنترل (فاقد پلیمر) می‌شود [۱۸]. در سال ۲۰۱۶ دوژان و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر کولپلیمر استایرن بوتادین رابر در بتن‌های با مقاومت بالا پرداختند و آثار کاهش مقاومت فشاری را نشان دادند [۱۹]. مطالعات مربوط به کارپذیری، مقاومت و دوام مخلوط‌های پایه سیمانی حاوی مواد الیاف پلاستیکی و پلیمر (پایه آبی) استایرن بوتادین رابر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان دهنده بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی، افزایش مقاومت خمشی و کاهش میزان نفوذ آب و مواد شیمیایی به درون مخلوط سخت شده است [۲۰-۲۲]. در سال ۲۰۲۰ لیو و همکاران با مطالعه خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن های سیمان پرتلند اصلاح شده با سه نوع پلیمر استایرن بوتادین رابر، پلی آکرلیک استر و سیلیکون آلی ضد آب به این نتیجه رسیدند که این پلیمرها مقاومت فشاری را کاهش می‌دهند و خاکستر بادی اثر منفی آنها را بهبود می‌بخشد. همچنین این پلیمرها نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهند [۲۳]. یانگ کوگ در سال ۲۰۲۰ با بررسی چسبندگی به سطوح زیرین ملات‌های سیمان پرتلند اصلاح شده با سه نوع پلیمر اتیلن وینیل استات، استایرن بوتادین رابر و استایرن وینیل اکریلیک استر در چهار شرایط عمل‌آوری مرطوب، خشک، استاندارد و تحت دمای بالا برای تعیین چسبندگی ملات های اصلاح شده به سطح زیرین خود دریافت که در شرایط استاندارد و شرایط عمل‌آوری خشک به ترتیب پلیمرهای اتیلن وینیل استات، استایرن بوتادین رابر و استایرن اکریلیک استر نتایج بهتری در مقایسه با سایر شرایط عمل‌آوری داشته‌اند [۲۴]. در سال ۲۰۲۰ چهارازی و همکاران در بررسی و مقایسه مشخصات مکانیکی و دوام مخلوط پایه سیمان پرتلند اصلاح شده با اتیلن وینیل استات، استایرن اکریلیک و استایرن بوتادین دریافتند که خواص دوام با استفاده از مواد پلیمری بهبود می‌یابد و پلیمر اتیلن وینیل استات نسبت به پلیمر استایرن اکریلیک با ۵٪ به ۱۵٪ استفاده، خواص مکانیکی و دوام را به مراتب بیش از پلیمر استایرن اکریلیک بهبود می‌بخشد [۲۵].

پژوهش حاضر خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری با درصد‌های مختلف کائولن در چند مولار در سنین عمل‌آوری مختلف و دوام ملات ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی را بررسی می‌کند. در این راستا از سرباره (GGBFS) و کائولن به عنوان مواد اولیه ساخت ملات

ژئوپلیمری استفاده شده است. آنچه این پژوهش را از تحقیقات پیشین متمایز می‌کند استفاده از سرباره کوره آهنگدازی با میزان کلسیت بالا و آلومینات پایین است که در مطالعات قبلی سرباره‌های مورد استفاده در ژئوپلیمر، دارای آلومینات بالا بود و در نتیجه پیوندهای ناشی از آن نیز در ژئوپلیمریزاسیون بسیار قوی و بتن ژئوپلیمر ناشی از آن نیز دارای خواص بالایی بوده است در حالی که سرباره مورد استفاده در این پژوهش با توجه به میزان پایین آلومینات، موجب تقویت پیوندهای ژئوپلیمریزاسیون شد. نکته دوم بررسی همزمان دو ماده کائولن و سرباره (GGBFS) و استفاده از سدیم هیدروکسید در غلظت‌های ۴ و ۸ مولار و سدیم سیلیکات به عنوان فعال کننده است. ۱۲ نوع طرح اختلاط با درصدهای ۵۰٪ و ۷۵٪ کائولن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته شد و تاثیر آن بر مقاومت فشاری، خمشی، کششی و جذب آب ملات ژئوپلیمری بررسی شد. مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای و مقاومت کششی به روش برزیلی و جذب آب در سن ۲۸ روز تعیین گردید.

رضانیانپور و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی تأثیر مقدار ماده پایه و نسبت آب به مواد سیمانی در نفوذ یون‌های کلراید در بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره پرداختند و از سرباره با کلسیت ۳۶/۷۵٪ و آلومینات ۱۱/۵۶٪ استفاده کردند و نتیجه گرفتند که عملکرد بتن‌های ژئوپلیمری در برابر تغییرات ماده پایه و نسبت آب به مواد سیمانی نسبتاً مشابه بتن‌های معمولی است [۲۶]. جعفری ندوشن و رضانیانپور در سال ۲۰۱۹ به بررسی خواص مکانیکی خمیر سیمان‌های ژئوپلیمری با پایه سرباره کوره آهنگدازی پرداختند و از سرباره با کلسیت ۳۶/۷۵٪ و آلومینات ۱۱/۵۶٪ استفاده کردند و نتیجه گرفتند که افزودن سیلیکات سدیم به مخلوط خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه سرباره باعث افزایش پخش شدگی خمیر تازه و همچنین افزایش مقاومت فشاری می‌گردد [۲۷]. نجمی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی اثر میکروسلیس و الیاف پلیمر تقویت شده با فیبر کربنی (CFRP) بر خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمری پایه سرباره کوره بلند آهن پرداختند و از سرباره با کلسیت ۳۸/۵٪ و آلومینات ۹/۵٪ استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزودن میکروسلیس تا ۵٪ باعث افزایش ۱۱٪ مقاومت فشاری، ۷/۵٪ مقاومت کششی، ۱۰٪ کاهش جذب آب، ۲۴٪ کاهش نفوذ پذیری یون کلر و ۸۸٪ افزایش مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمری شد؛ این در حالی بود که افزودن ۳٪ الیاف CFRP سبب افت ۱۸٪ مقاومت فشاری، ۱/۵٪ مقاومت کششی، ۷٪ افزایش جذب آب، ۲۰٪ افزایش نفوذپذیری یون کلر و ۱۹٪ کاهش مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمری شد [۲۸]. مودی و همکاران در سال ۲۰۲۱ دوام ملات‌های پوششی با پایه سیمانی و ژئوپلیمری را در برابر تهاجم اسید سولفوریک بررسی و از سرباره با کلسیت ۳۶/۷۵٪ و آلومینات ۱۱/۵۶٪ استفاده کردند. نتایج حاکی از این بود که استفاده از سرباره و پوزولان طبیعی به جای سیمان، سبب کاهش ۲۵٪ مقاومت فشاری و افزایش ۵۰٪ مقاومت چسبندگی و کاهش تغییر طول و افت وزن و مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در معرض اسید سولفوریک می‌شود. استفاده از ملات‌های ژئوپلیمری در سنین اولیه عملکرد مناسب‌تری در محیط‌های اسیدی نسبت به ملات‌های پایه سیمانی داشت [۲۹]. در پژوهش حاضر از سرباره کوره آهنگدازی با کلسیت بالا (۳۸/۱۰٪) و آلومینات پایین (۱۳/۰۰٪) استفاده شده است.

۲- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده برای آزمایش مورد نظر عبارتند از: سدیم هیدروکسید (سود)، سدیم سیلیکات (آب شیشه)، سرباره، کائولن، پلیمر (SBR) و ماسه.

۲-۱- سدیم هیدروکسید (سود)

سدیم هیدروکسید یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH که ماده‌ای جامد و سفید رنگ با دمای ذوب ۳۱۸ درجه سانتی‌گراد و چگالی ۲/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در این پژوهش از محلول سود ۴ و ۸ مولار برای ساخت ملات‌های ژئوپلیمری استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات هیدروکسید سدیم^۱

درصد خلوص	حلالیت	انحلال پذیری در آب	اسیدی	دمای ذوب	دمای جوش	چگالی	جرم مولی	فرمول شیمیایی
۹۹-۹۸٪	در آب، اتانول و متانول محلول است	۲۰°C	۱۳	۳۱۸°C	۱۳۸۸°C	2.13 g/cm^3	39.97 g/mol	هیدروکسید سدیم (NaOH)

^۱ - <https://www.petroakam.com>

۲-۲- سدیم سیلیکات (آب شیشه)

سدیم سیلیکات نوعی سیلیکات قلیایی حل شدنی است که مایعی شفاف و بی رنگ است که در صابون سازی، مواد شوینده، پاک کننده‌های صنعتی، چسب، سیمان سازی، رنگ، کاغذ، قالب ریخته‌گری، سرامیک و کنترل خوردگی در لوله‌های آب کاربرد دارد [۳۰-۳۱]. در جدول شماره ۲ مشخصات سدیم سیلیکات مصرفی آمده است.

جدول ۲: مشخصات سیلیکات سدیم^۲

مشخصات	محلول سیلیکات سدیم
فرمول شیمیایی	Na_2SiO_3
وزن مولکولی	$122/06 \text{ g/mol}$
دانسیته	$2/61 \text{ g/cm}^3$
نقطه ذوب	$1089 \text{ }^\circ\text{C}$
حلالیت در آب	$22/2 \text{ g/100 mol (} 20^\circ\text{C)}$ $160/6 \text{ g/100 mol (} 80^\circ\text{C)}$
ضریب شکست	۱/۵۲
انحلال پذیری	نامحلول در الکل

۲-۳- سرباره

سرباره فولاد سازی، محصول جانبی صنعت تولید آهن خالص و فولاد است. در این پژوهش از سرباره (GGBFS) به عنوان ماده اولیه حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی استفاده شده است که خواص مکانیکی مناسبی از جمله واکنش پذیری بالایی را داراست. مشخصات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سرباره در جدول شماره ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۳: مشخصات فیزیکی پودر سرباره^۳

درصد باقی روی الک نمبر ۳۰	درصد باقی روی الک نمبر ۵۰	درصد فاز آمورف	نرمی بلین CM^2/gr	نمونه
۲۷	۱۴	۸۷	۳۵۰۰	سرباره پودر شده

جدول ۴: آنالیز شیمیایی سرباره^۴

نمونه	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	SO_3
سرباره (%)	۳۶/۰	۰/۶۰	۳۸/۱۰	۶/۶	۱۳/۰۰	۰/۵۰	۱/۱۰	۰/۶۰

۲-۴- کائولن

کائولن از نظر صنعتی به رس‌هایی که دارای مقدار قابل توجهی کائولینیت باشند اطلاق می‌گردد. از نظر کانی شناسی کائولن جزء گروهی از کانی‌های سیلیکات‌های آلومینیوم هیدراته است و کائولینیت، دیکیت، ناکریت، هالوزیت، متاهالوزیت و خاک نسوز را شامل می‌شود. کائولینیت ماده‌ای است که در حالت خالص به رنگ سفید و یا خاکستری متمایل به زرد و به صورت خاک رس بسیار نرم و ظریفی است که در اثر فشردن بین انگشتان خرد و پودر می‌شود. به آسانی در آب پراکنده می‌شود و نفوذ ناپذیر است و در حالت خشک مقدار زیادی آب از دست می‌دهد اما منبسط نمی‌شود. خمیر آن با آب شکل پذیر است و با پختن شکل و رنگ آن تغییر نمی‌کند. هنگام پخت به شدت منقبض می‌شود و رفتار آن با تغییر دما قابل توجه است. چسبندگی یکی دیگر از خواص مهم فیزیکی کائولن است که با درجه خلوص آن نسبت مستقیم دارد. یعنی هر چه میزان چسبندگی در کائولن بیشتر باشد به همان نسبت درجه خلوص آن نیز افزایش می‌یابد. پودر کائولن استفاده شده در این آزمایش‌ها دارای خاصیت انطباق پذیری بسیار بالایی با نیازهای مختلف در صنایع دارد. هم اکنون از آن در

۲- <https://www.famcocorp.com>
 ۳و۴- <https://www.iranslag.com>

۹۰٪ کارخانجات تولید آجر اصفهان برای تولید آجر نسوز نما در رنگ‌های کرم تا شاموتی استفاده می‌شود. رنگ کلوخه این ماده کرم تا زرد و رنگ پودر آن سفید مایل به کرم است. کاربرد کائولن در بتن با توجه به رنگ روشن این ماده می‌تواند دارای جذابیت‌های معماری باشد. مشخصات فیزیکی پودر کائولن در جدول شماره ۵ آمده است. ترکیب شیمیایی کائولن با استفاده از آنالیز XRF در جدول شماره ۶ آمده است.

جدول ۵: مشخصات فیزیکی پودر کائولن مصرف شده^۵

ضریب انبساط حرارتی	دانسیتته دوغاب	ویسکوزیته دوغاب	جذب آب	انقباض پخت	سیکل کوره	دمای کوره	استحکام پخت	انقباض خشک	استحکام خشک	آزمایش فیزیکی
۷۶	۱/۶۰	۱۶	۸/۳	۶/۵	۶۵ دقیقه	۱۱۵۵°C	۴۵۴	۰/۶۷	۲۰/۳۵	پودر کائولن

جدول ۶: آنالیز شیمیایی کائولن مصرف شده^۶

نمونه	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
کائولن (%)	۷۰/۸۳	۱۹/۱۴	۰/۳۸	۰/۶۳	۰/۵۷	۰/۱۳	۰/۹۳	۰/۳۳	۰/۲۶	۰/۹۱	۵/۵۲

۲-۵- پلیمر

در حالت کلی به کوپلیمر استایرن و بوتادین (میزان بوتادین باید بیشتر از ۵۰٪ باشد) SBR گفته می‌شود. نسبت معمولی مونومرها ۷۰٪ تا ۷۵٪ بوتادین به ۲۵٪ تا ۳۰٪ استایرن است. هر چقدر میزان استایرن به کار رفته در (SBR) از ۵۰٪ باشد محصول به پلاستیک شدن می‌رود و در تولید لاتکس کاربرد پیدا می‌کند. (SBR) به عنوان پلیمر کارایی بسیاری دارد و جزو پر مصرف‌ترین لاستیک‌ها در صنعت به شمار می‌آید. خواص مکانیکی SBR از NR (لاستیک طبیعی) پایین تر است و مانند آن بر اثر کشش بلوری نمی‌شود. استفاده از (SBR) در بتن مقاومت فرسایشی بالایی دارد. هر چه میزان سیس و وینیل بوتادین بیشتری در آن ترکیب شود، مقاومت فرسایشی (SBR) بیشتر افزایش می‌یابد. جهندگی خوب، انعطاف‌پذیری در دمای پایین، مقاومت در برابر سایش و ترک‌خوردگی و حرارت و ضربه از دیگر ویژگی‌های آن هستند. در این پژوهش از (SBR) به منظور مقاومت در مقابل آب و مقاومت در مقابل اسید استفاده شده است. در پژوهش حاضر از ماده پلیمری استایرن بوتادین رابر که از نوع پلیمر الاستومری محسوب می‌شود، استفاده شده است که به صورت لاتکس بوده و مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۸ آمده است.

جدول ۷: مشخصات فیزیکی و شیمیایی پلیمر مصرفی^۷

لزوجت معلق در آب	درصد جامد	ظاهر	چگالی	pH	اندازه ذرات	نام
۸۰۰-۳۰۰ Mpa.s	۵۰±%	مایع سفید رنگ	۱/۰۱ g/cm ³	۹-۷	۱۵۰ μm	استایرن بوتادین رابر

۲-۶- ماسه

ماسه مصرفی با بزرگترین اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر در جدول شماره ۷ مشاهده می‌شود. شکل شماره ۱ نمودار دانه بندی ماسه مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول ۷: مشخصات فیزیکی ماسه مصرف شده

آزمایش فیزیکی	ماسه (۴/۷۵ mm)
وزن مخصوص (در حالت اشباع با سطح خشک SSD)	۲۶۱۱ Kg/m ³
جذب آب (%)	۲/۱۴

^۵ و ^۶ - <http://www.aryapowder.ir>



شکل ۱: نمودار دانه بندی ماسه مصرف شده بر اساس ASTM C۳۳ [۳۲]

۳- طرح مخلوط‌های ساخته شده با کائولن و سربراره کوره آهنگدازی (GGBFS)

در جدول شماره ۸ طرح اختلاط‌های مختلف برای ماده کائولن بر اساس تجربیات مندرج در مرجع شماره [۳۳ و ۳۴] تعیین گردید و از همین نتایج و مرجع [۳۵ و ۳۶] برای تعیین مقدار سربراره، برای رسیدن به طرح اختلاط نهایی استفاده شد. نام گذاری نمونه‌ها به این شرح است: S نشان دهنده سربراره کوره آهنگدازی، C نشان دهنده پودر سرامیک کائولن، B نشان دهنده پلیمر استاتیرن بوتادین رابر، BS نشان دهنده چسب جامد، SH با فرمول شیمیایی NaOH، SS برگرفته از Sodium Silicate، SP نشان دهنده فوق روان کننده، SBR برگرفته از Styrene Butadiene Rubber، اعداد بعدی به ترتیب درصد پودر کائولن و مولاریته است.

جدول ۸: طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

Name	BS		Slag		CP		M	Na_2SiO_3	NaOH	SS + SH/BS	SS/SH	SBR		Sand
	Kg/cm^3	%BS	Kg/cm^3	%BS	Kg/cm^3	%BS	Mol/L	Kg/cm^3	Kg/cm^3			%BS	Kg/cm^3	Kg/cm^3
S۴	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۴-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۴-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
S۸	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۸-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۸-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
BS۴	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۴-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۴-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BS۸	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۸-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۸-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵

در جدول شماره ۸ طرح اختلاط، وزن ماسه مورد استفاده با توجه به واکنش پذیری بالای سربراره کوره آهنگدازی و میزان ریزی آن از طرف دیگر $1195 Kg/m^3$ در نظر گرفته شد. از آنجا که مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن بسیار پایین بود و با تغییر طرح اختلاط نیز تأثیری در افزایش مقاومت فشاری حاصل نشد؛ درصد کائولن با سربراره یکسان در نظر گرفته شد. در طرح اختلاط استفاده شده از سربراره نیز با ثابت نگه داشتن مقدار سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری بهتری بدست آمد. در نهایت نمونه شماره ۱ در مولار ۴ و نمونه شماره ۴ در مولار ۸ انتخاب شد. طرح اختلاط نهایی در جدول ۹ آمده است. دلایل انتخاب این طرح اختلاط از بین تمام نمونه‌های طرح اختلاط به عوامل زیر بستگی داشت:

۱- تخلخل ۲- افزایش حجم پس از گیرش اولیه ملات ۳- میزان چسبندگی ۴- زمان گیرش در مقایسه با سایر طرح اختلاط‌های ملات. برای مثال در نمونه طرح شماره ۳ و ۶، تخلخل نمونه‌ها به صورت محسوسی با بقیه طرح اختلاط‌های سربراره، تفاوت فاحشی داشت.

به طور کلی در بتن ژئوپلیمر معیار چشمی و مقایسه طرح اختلاطها با هم تاثیر چشمگیری دارد که علت آن تشکیل نشدن پیوندهای ژئوپلیمراسیون در طرح اختلاطهای معیوب به دلیل رئولوژی نامناسب است.

جدول ۹: مقدار اجزای تشکیل دهنده برای یک متر مکعب بتن ژئوپلیمری (Kg/m^3)

۱۸۵۶/۱۳	شن
۵۵۹/۴۰	سرباره
۳۰۶/۵۵	سدیم سیلیکات
۱۸۲/۳۳	سدیم هیدروکسید
۴۶/۰۲	آب

۳-۱- روش اجرای طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

ابتدا طبق طرح اختلاط نهایی مصالح اندازه گیری شد. سپس ماسه درون میکسر ریخته شد و بعد از مخلوط شدن به مدت ۱ دقیقه سرباره به میکسر اضافه کرده شد. بعد از ۲ دقیقه که سنگدانه و سرباره به خوبی مخلوط شدند محلول سود (سدیم هیدروکسید) و آب شیشه (سدیم سیلیکات) را با هم مخلوط و به میکسر ملات اضافه شد. ۲ تا ۳ دقیقه فرصت داده شد تا ملات با یکدیگر به خوبی ترکیب شوند و در نهایت آب به آن اضافه گردید. بعد از ۱-۲ دقیقه مخلوط همگن و یکنواختی به دست آمد. ملات بدست آمده را در سه مرحله درون قالبهای روغن کاری شده ریخته و هر بار با چکش مخصوص کوبش انجام شد. با توجه به نوع قالبهای استفاده شده با چند آزمون و خطای اولیه در ملات تازه تخلخل زیادی مشاهده گردید که علت آن چسبندگی بالای ملات و دیواره قالب تخمین زده شد. در نتیجه با استفاده از دستگاه وایبره حبابهای هوای محسوس در داخل و اطراف قالب تا حد ممکن خارج کرده شد. نمونهها به مدت ۱ دقیقه روی دستگاه وایبره قرار داده شد. در انتها قالبها طبق شرایط عمل آوری یکسان در گرمخانه قرار داده شد. نمونههایی از نحوه مناسب تراکم آزمونها در شکل ۳ مشاهده می شود.



شکل ۳: نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از سرباره کوره آهنگدازی و کائولن

۴- انجام آزمایشات

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

یکی از رایج ترین آزمونهای بتن و ملات، آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونههای ملات است که کیفیت بتن را از نظر خصوصیات مکانیکی نشان می دهد. مطابق شکل ۴ آزمایش تعیین مقاومت فشاری مطابق با استاندارد انگلستان (BS 1881-125) [۳۷] روی آزمونهاى مکعبی به ضلع ۵ سانتی متر و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. آزمونها به مدت ۲۴ ساعت با دمای یکسان در آون عمل آوری شدند. سپس به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون باقی ماندند تا کاملاً سرد شوند. پس از خارج کردن آزمونها از آون، آنها را از قالبها خارج و در محیط آزمایشگاه تا سن آزمایش مقاومت فشاری نگهداری شدند. شکل ۴ شکست نمونه بتن ژئوپلیمری را تحت آزمایش مقاومت فشاری نشان می دهد.



شکل ۴: نمونه ملات ژئوپلیمر حاوی کائولن و سرباره تحت آزمایش مقاومت فشاری

۴-۲- آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد [۳۸] ASTM C۲۹۳ به کمک نمونه‌هایی با ابعاد $۴۰ \times ۴۰ \times ۱۶۰$ میلی‌متر انجام پذیرفت. نمونه‌ای از این آزمایش در شکل شماره ۵ قابل مشاهده است هر نمونه را در دو لایه قالب گیری و هر لایه را به کمک میز لرزان متراکم کردیم. تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای انجام این آزمایش ۱۲ نمونه است که در سن ۲۸ روز شکسته شد. نرخ بارگذاری برابر با ۰.۱۲ Mpa/Sec در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه ملات ژئوپلیمر حاوی کائولن و سرباره

۴-۳- آزمایش کشش به روش برزیلی یا دو نیم شدن

آزمایش کشش بتن به روش غیر مستقیم یا برزیلی است که براساس استاندارد ASTM C۴۹۶ صورت می‌گیرد [۳۹]. نمونه‌ای از این آزمایش در شکل شماره ۶ قابل مشاهده است. نمونه‌های استوانه‌ای مطابق استاندارد [۴۰] ASTM C۱۹۲ ساخته و نگهداری می‌شود. نمونه‌ها طوری بین صفحات دستگاه جک بتن شکن قرار می‌گیرد که محور آن افقی باشد. سپس بار افزایش می‌یابد تا گسیختگی به صورت دو نیم شدن در صفحه شامل قطر قائم نمونه به وجود آید. بارگذاری به صورت مداوم و با سرعت یکنواخت اعمال می‌شود تا تنش کششی موجب گسیختگی نمونه شود.



شکل ۶: نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش کشش برزیلی

۴-۴- آزمایش جذب آب

این آزمایش طبق استاندارد [۴۱] ASTM C۶۴۲ انجام شده است. هدف از این آزمایش سنجش میزان کیفیت سطحی بتن و خصوصیات دوام آن است. نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری برای جذب آب مورد بررسی قرار گرفتند. برای آزمایش جذب آب، ابتدا نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتی‌متر ساخته شد که پس از عمل‌آوری در اون، از قالب باز شدند و بعد از قرار دادن نمونه‌ها در دمای محیط، وزن

آنها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها برای حداقل ۴۸ ساعت در داخل آب غرقاب و سپس وزن شده و مجدد ۲۴ ساعت در داخل آب قرار گرفت و مجدداً وزن گردید. در صورتی که تغییرات وزن کمتر از ۰/۵ درصد گردد، نمونه به حالت اشباع رسیده و می‌توان عدد نهایی را گزارش نمود.

۴-۵- آزمایش مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی بتن به عنوان یکی از مؤلفه‌های شاخص در تعیین دوام بتن شناخته می‌شود. در واقع مقدار مقاومت الکتریکی بتن به نفوذپذیری، رطوبت و ساختار شیمیایی آب حفره‌ای بتن بستگی دارد. با روش وینر می‌توان بدون مغزه‌گیری در محل، میزان مقاومت الکتریکی سطحی را به دست آورد. برای انجام این آزمایش از دستگاه موجود در آزمایشگاه خاک سنجش بنیان سازه رشت استفاده شد. از روی اعداد بدست آمده مقاومت الکتریکی سطحی بتن محاسبه گردید. آزمایش مطابق دستورالعمل FM۵-۵۷۸ [۴۲] بر روی نمونه‌های مکعبی ۵×۵ سانتی‌متر در شرایط اشباع با سطح خشک صورت گرفت. بتن تحت اثر میدان الکتریکی یک رفتار الکتریکی را ارائه می‌نماید (مقاومت الکتریکی + خازن الکتریکی). با تغییر فرکانس جریان الکتریکی می‌توان به مقاومت حقیقی بتن دست یافت و با استفاده از مقاومت حقیقی بتن می‌توان مقدار مقاومت ویژه را بدست آورد. بتن‌های با مقاومت ویژه بیشتر از $20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ در برابر نفوذ یون کلر به شدت مقاوم هستند. رابطه مقاومت الکتریکی بتن با آهنگ خوردگی بر اساس پیشنهاد ACI۲۲۲ در جدول شماره ۹ ارائه شده است.

جدول ۱۰: تاثیر مقاومت الکتریکی بتن بر آهنگ خوردگی آرما تور (ACI۲۲۲) [۴۳]

مقاومت ویژه الکتریکی (kΩ.cm)	آهنگ خوردگی
<۵	خیلی زیاد
۵ تا ۱۰	زیاد
۱۰ تا ۲۰	متوسط تا کم
>۲۰	ناچیز

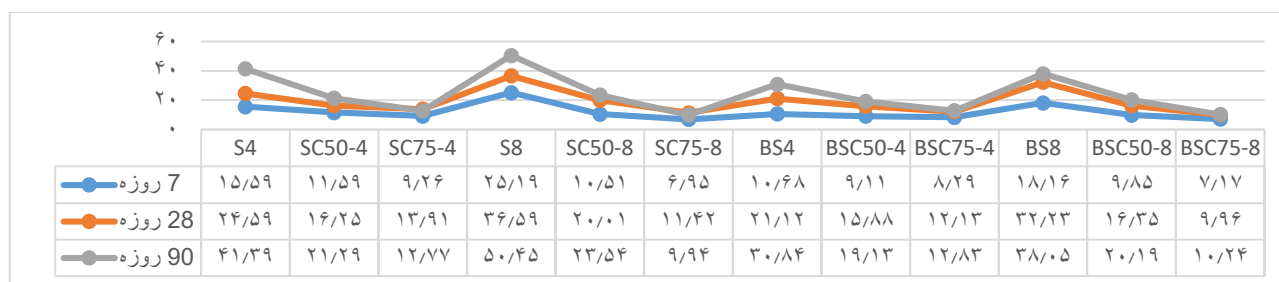
۴-۶- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

یکی از روش‌های تولید تصاویر ریزساختار به وسیله روبش یک پرتو الکترونی بر روی سطح نمونه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام می‌گیرد. توسط این روش تصاویر سه بعدی از ریزساختار نمونه به دست می‌آید. در SEM نمونه با پرتو الکترونی باریکی به قطر ۱۰۰ آنگستروم بمباران می‌شود. در اثر برخورد پرتوهای الکترونی به نمونه، الکترون‌های ماده برانگیخته می‌شوند و در هنگام بازگشت به مدار اصلی خود به شکل پرتو الکترونی از سطح نمونه منتشر شده و توسط یک آشکارساز جمع‌آوری و آنالیز می‌شوند. این پرتوهای برگشتی از نمونه برای مشخصه یابی خواص مختلفی از ماده از قبیل: ترکیب شیمیایی، پستی و بلندی سطح، کریستالوگرافی، خواص الکتریکی و مغناطیسی و غیره به کار می‌روند. ستون حرکت الکترون‌ها و نیز محفظه نگهدارنده نمونه در SEM همیشه باید در خلأ باشد زیرا اگر نمونه در محیط پر از گاز قرار گیرد، به دلیل ناپایداری بالای پرتو، امکان تولید یا القای پرتو الکترونی وجود ندارد. آتش‌گیری گازها و امکان یونیزه شدن الکترون‌ها در محیط گاز، تخلیه بار را احتمالی کرده، منجر به ناپایداری پرتوها می‌شود. درخشندگی و وضوح هر نقطه از تصویر SEM، بستگی به شدت (تعداد) الکترون‌های بازگشتی از سطح نمونه دارد، که آن نیز شدیداً وابسته به کیفیت موضعی سطح است که بدین ترتیب می‌توان معیاری از پستی و بلندی سطح به دست آورد [۲۹].

۵- بحث و بررسی نتایج

۵-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمونه‌های مکعبی حاوی ملات ژئوپلیمری پس از قالب‌گیری، به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط 26°C در معرض عمل‌آوری قرار داده شد. سپس آزمونه‌ها از قالب خارج شد و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مقاومت فشاری آنها با قرار دادن زیر جک بدست آمد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سنین مختلف در شکل ۷ آمده است.



شکل ۷: نمودار مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ملات ژئوپلیمری و نمونه‌های شاهد

با توجه به نتایج شکل ۷، کمترین مقاومت فشاری ۷ روزه مربوط به نمونه طرح SCY5-8 و بیشترین مقاومت فشاری ۷ روزه مربوط به نمونه طرح S8 بود. در نمونه طرح SCY5-8 با افزودن ۷۵ درصد پودر سرامیک کائولن در کنار ۲۵ درصد سرباره، افت مقاومت بسیاری مشاهده شد. نمونه طرح SCY5-8 در مقایسه با نمونه طرح SCY5-4 با نسبت پودر سرامیک کائولن ۵۰ درصد و سرباره ۵۰ درصد در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در مولاریته ۴ نسبت به مولاریته ۸ مقاومت بهتری نشان داد.

در مقایسه دو نمونه شاهد طرح اختلاط در مولار ۸، مقاومت بهتری نسبت به مولار ۴ مشاهده شد. زیرا ترکیب سدیم هیدروکسید با سدیم سلیکات محلول، بهترین فعال ساز را ایجاد می‌کند. محلول‌های سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار، بیشترین مقدار ماده را از پیش منبع در خود حل کرده و بیشترین مقدار مقاومت فشاری را ارائه می‌کنند.

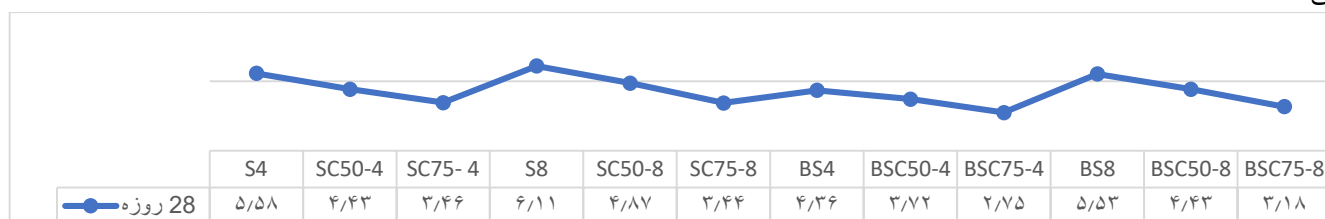
زمانی که در طرح اختلاط از پلیمر استفاده شد در مقایسه دو نمونه طرح BSCY5-8 با SCY5-8 در سنین ۷ و ۹۰ روزه مقاومت بهتری مشاهده شد. دلیل این امر می‌تواند به مقدار اضافی پودر سرامیک کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ کائولن نسبت داده شود که واکنش ژئوپلیمراسیون نداده و باعث خود خشکیدن بتن شده است. البته نمونه طرح SCY5-8 در سن ۲۸ روزه مقاومت بهتری را نشان داد. چون تغییر نمونه طرح BSCY5-8 در سن ۲۸ روز ناشی از وجود پلیمر بوتادین استایرن رابر است. در بررسی نمونه طرح BSCY5-4 با SCY5-4 در مولاریته ۴، مقاومت بهتری در سنین ۷ و ۲۸ روزه دیده شد. در سن ۹۰ روزه تقریباً هر دو نمونه دارای مقاومت یکسانی بودند. همچنین در مقایسه پلیمر و نسبت پودر کائولن ۵۰ درصد با سرباره ۵۰ درصد در دو نمونه طرح SC50 با BSC50 در مولار ۴ و ۸ مقاومت بهتری در نمونه SC50 در مولار ۴ دیده شد. از دلایل اصلی در کاهش مقاومت فشاری نمونه طرح BSC50-8 و نمونه طرح 4-BSCY5 این است که لاتکس (SBR) باعث ایجاد حباب هوا در ساختار ملات ژئوپلیمری می‌شود و همین امر سبب تخریب بیشتر در ملات و کاهش مقاومت خمشی می‌گردد. همچنین کاربرد پلیمر در ملات، فرآیند هیدراسیون را به تعویق می‌اندازد و مقاومت فشاری را نیز کاهش می‌دهد. نتایج نسبت طرح اختلاط ۵۰ درصد پودر سرامیک کائولن با ۵۰ درصد سرباره مقاومت فشاری بهتری را به نسبت طرح اختلاط ۷۵ درصد پودر سرامیک کائولن با ۲۵ درصد سرباره کوره آهنگدازی را نشان می‌دهد. استفاده از ۷۵ درصد پودر سرامیک کائولن باعث افت مقاومت فشاری در نمونه‌های طرح اختلاط خواهد شد. دلیل این امر می‌تواند مقدار اضافی پودر سرامیک کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ کائولن نسبت داده شود که واکنش ژئوپلیمراسیون نداده و باعث خودخشکیدن بتن شده است. زیرا آب مورد نیاز بتن جذب شده و آب کافی برای انجام واکنش از دست می‌رود [۴۴].

۵-۲- نتایج آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

بررسی نتایج بدست آمده از شکل ۸ مربوط به آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت خمشی به نمونه طرح شاهد در مولار ۸ و کمترین مقاومت خمشی به نمونه طرح BSCY5-4 مربوط می‌شود. در دو نمونه طرح اختلاط شاهد، نمونه طرح شاهد در مولار ۸ بیشترین مقاومت خمشی را از خود بروز داد. در آزمایش دو نمونه طرح SC4-50 و BSC50-8 نکته جالبی به این شرح حاصل شد. با توجه به بکار بردن پلیمر بوتادین استایرن رابر در نمونه BSC50-8 و ۵۰ درصد پودر سرامیک کائولن و ۵۰ درصد سرباره کوره آهنگدازی، مقاومت خمشی هر دو نمونه عدد ۴/۴۳ مگاپاسکال بود. مقایسه این دو نمونه طرح در آزمایش مقاومت خمشی، مقاومت یکسانی را به ما نشان داد. یکی از دلایل اصلی در کاهش مقاومت خمشی نمونه طرح BSC50-8 به دلیل این است که لاتکس

(SBR) باعث ایجاد حباب هوا در ساختار ملات ژئوپلیمری می‌شود و همین امر سبب تخلخل بیشتر در ملات و کاهش مقاومت خمشی می‌گردد. همچنین کاربرد پلیمر در ملات فرآیند هیدراسیون را به تعویق می‌اندازد و مقاومت خمشی را نیز کاهش می‌دهد. مواد پلیمر به دلیل داشتن سورفکتانت^۷ در ساختار خود به منظور ممانعت از کلوخه شدگی ذرات و افزایش روانی، سبب حباب سازی در ریز ساختار ملات تازه می‌شوند. لیکن با تراکم نمونه‌ها توسط میز لرزان، بخشی از این حباب کاسته می‌شود و بخش باقی مانده آن به عنوان تخلخل ریز ساختاری می‌تواند سبب کاهش مقاومت خمشی شود. در ارتباط با علت تفاوت میزان مقادیر مقاومت خمشی پلیمر مصرفی نیز می‌توان گفت که نحوه پلیمریزاسیون آنها در ساختار مخلوط‌ها، اندازه ذرات پلیمرها و نوع حالت (سختی و نرمی) پلیمرها پس از انجام پلیمریزاسیون در ساختار مخلوط‌های سخت شده از جمله عللی هستند که می‌توانند بر میزان مقاومت خمشی آزمونه‌های ژئوپلیمری مورد مطالعه تأثیر مستقیم داشته باشند.

در نمونه BSCY5-4 به دلیل استفاده از پلیمر و ۷۵ درصد پودر سرامیک کائولن و ۲۵ درصد سرباره در مولاریته ۴ کمترین مقاومت خمشی نسبت به بقیه نمونه‌های طرح اختلاط مشاهده گردید؛ در حالی که در نمونه طرح BSCY5-8 با توجه به استفاده از پلیمر و ۷۵ درصد کائولن و ۲۵ درصد سرباره در مولار ۸ مقاومت خمشی بهتری نسبت به نمونه طرح BSCY5-4 حاصل شد. دلیل این امر ترکیب محلول سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات بود. محلول‌های سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار، بیشترین مقدار ماده را از پیش منبع در خود حل کرده و بیشترین مقدار مقاومت خمشی را ارائه می‌کند. در مقایسه دو نمونه طرح شاهد S4 و BS8 با توجه به استفاده از مواد چسباننده جامد در نمونه BS8، مقاومت خمشی تقریباً یکسانی وجود داشت. دلایل این امر وجود مواد چسباننده جامد در نمونه طرح BS8، چسبندگی عالی خمیر ژئوپلیمر به ذرات سنگدانه، شکنندگی قابل توجه ژئوپلیمر و مقدار ماسه در ملات بود که بر مقاومت خمشی ملات ژئوپلیمر تأثیر گذار بودند [۴۵]. در دو نمونه طرح SCY5 در مولار ۴ و ۸ با توجه به استفاده از ۷۵ درصد پودر کائولن و ۲۵ درصد سرباره، مقاومت خمشی تقریباً یکسانی مشاهده شد. دلیل این امر به مقدار اضافی کائولن بتن در ملات ژئوپلیمری دارای ۷۵ درصد پودر کائولن مرتبط بود که واکنش ژئوپلیمریزاسیون نداده و باعث خودخشکیدن^۸ بتن شد. بدین معنا که آب مورد نیاز بتن جذب شده و آب لازم را برای انجام واکنش از دست داده بود [۴۴]. با توجه به استفاده از مواد چسباننده جامد در نمونه طرح BS4 و مقایسه آن با نمونه طرح BS8-SC50، نمونه دوم که ترکیبی از ۵۰ درصد کائولن و ۵۰ درصد سرباره بود، مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه شاهد از خود بروز داد. دلیل آن را می‌توان در طرح ترکیبی کائولن و سرباره و اثر منفی کائولن بر روی مقاومت خمشی جستجو کرد؛ به طوری که در سن ۲۸ روز واکنش پوزولانی کائولن و سرباره و تولید ژل C-S-H (سیلیکات کلسیم هیدراته) باعث افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های ۵۰ درصد کائولن و ۵۰ درصد سرباره شده است؛ ولی نسبت به نمونه طرح شاهد، مقاومت خمشی کمتری داشته است. در نهایت با توجه به شکل ۸ در آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه BS8-SC50 در مولار ۸ نسبت به بقیه نمونه‌های ترکیبی، مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهد.



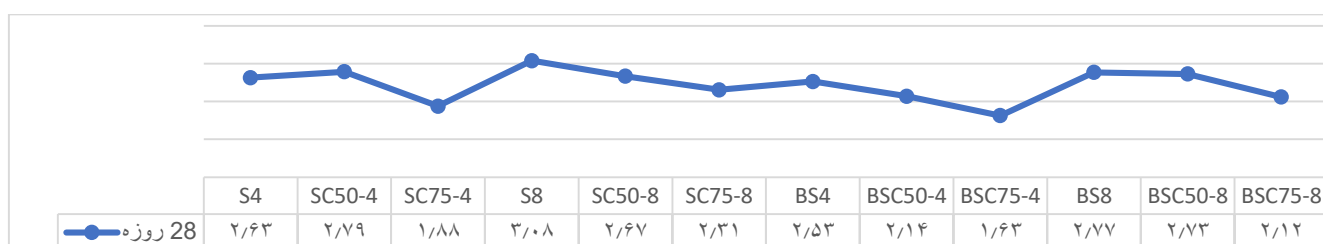
شکل ۸: نمودار مقاومت خمشی سه نقطه‌ای ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری حاوی کائولن و سرباره کوره آهنگدازی

۵-۳- نتایج آزمایش کشش به روش برزیلی یا دو نیم شدن

نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰×۲۰ ملات ژئوپلیمری پس از قالب ریزی عمل آوری شدند و به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار گرفتند. سپس از قالب خارج شدند و شکست برزیلی روی آنها انجام گرفت. نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد کمترین مقاومت کششی مربوط به نمونه طرح BSCY5-4 و بیشترین مربوط به نمونه طرح S8 است. علت آن را باید در طرح ترکیبی ۷۵ درصد کائولن و ۲۵ درصد سرباره و پلیمر (SBR) جست زیرا پودر کائولن و پلیمر بر روی مقاومت کششی اثر منفی داشت. علت دیگر این مسئله ممکن است به نوع پلیمر (حالت

^۷-Surfactant

ارتجاعی پلیمر پس از پلیمریزاسیون در ساختار مخلوط) و تا حدودی ابعاد ذرات پلیمر بستگی داشته باشد؛ به طوری که هر چه ابعاد ذرات پلیمر بزرگتر باشد، می‌تواند فیلم‌های گسترده‌تری را در ساختار مخلوط‌های ژئوپلیمری تشکیل دهد. مطابق شکل افزودن پودر سرامیک کائولن به ملات ژئوپلیمری سبب افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها شد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود بیشینه مقاومت کششی به نمونه طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک کائولن (SC50-4، BSC8-50 و SC50-8) مرتبط است. به طور کلی خواص مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمری وابستگی زیادی به نسبت SiO_2/Al_2O_3 دارد. با افزایش این نسبت، میزان حلالیت یون‌ها و فرآیند پلیمریزاسیون افزایش می‌یابد که این امر سبب بهبود مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود [۴]. به عبارت دیگر با افزودن پودر سرامیک کائولن، SiO_2 فعال بیشتر می‌شود و این امر سبب ایجاد پیوندهای سیلیکونی (Si-O-Si-O-Si-O) می‌گردد. این پیوند زنجیری شکل تمامی اجزای بتن را در کنار یکدیگر نگه می‌دارد و یک ترکیب پیوسته ایجاد می‌کند. ضمناً نرمی بالای ذرات کائولن و شکل کروی آنها با پُر کردن خلل و فرج بتن، سبب ایجاد ساختار متراکم‌تری در آن می‌شود.



شکل ۹: نمودار مقایسه مقاومت کششی به روش برزلی نمونه‌های عمل‌آوری شده در سن ۲۸ روز ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سرباره کوره آهن‌گدازی

مطابق شکل ۹ نمونه طرح‌های اختلاط BSC4-75، SC4-75، BSC8-75 و SC75-8 با ترکیب ۷۵ درصد پودر سرامیک کائولن و ۲۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی به ترتیب چگونگی مقاومت کششی را نشان می‌دهد. در نمونه طرح‌های SC8-50، BSC4-50، BSC8-50 و SC50-8 با ترکیب ۵۰ درصد پودر سرامیک کائولن و ۵۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی به ترتیب از مقاومت کششی کم به زیاد نمایش داده شده است. عوامل زیادی از جمله نوع سنگدانه، نحوه توزین آنها در بتن، تعداد فضاهای خالی و اندازه آنها و همچنین پیوستگی بین خمیر ملات و سنگدانه‌ها بر مشخصات مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارند. بطور کلی مقاومت کششی به یکپارچگی ماتریس مواد و چسبندگی بین خمیر ملات و سنگدانه‌ها وابسته است. مقاومت پایین خمیر ملات و اتصال ضعیف سنگدانه‌ها به آن در بتن سخت شده به دلیل مقدار بالای پودر کائولن نسبت به سرباره پدید می‌آیند و مقاومت کششی بتن را کاهش می‌دهند. به علاوه تعداد فضاهای خالی و اندازه آنها، هوای بین ذرات و وجود ریز ترک‌ها با نسبت پودر کائولن به سرباره ارتباط مستقیم دارند و بر مقاومت کششی بتن تأثیر می‌گذارند. کمترین مقاومت کششی مربوط به نمونه طرح BSC75-4 و بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه طرح S8 بوده است.

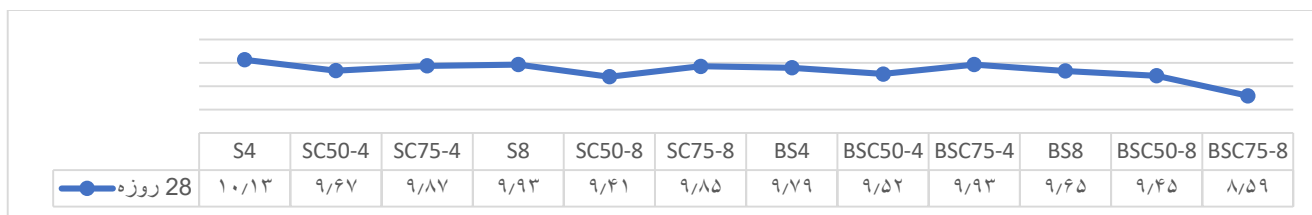
در مقایسه نمونه طرح‌های اختلاط، زمانی که نسبت پودر سرامیک کائولن ۵۰ درصد و سرباره کوره آهن‌گدازی ۵۰ درصد باشد مقاومت بالاتری نسبت به نمونه طرح‌های اختلاط پودر سرامیک کائولن ۷۵ درصد و سرباره کوره آهن‌گدازی ۲۵ درصد مشاهده می‌شود. بجز نمونه طرح اختلاط BSC50-4 در مولار ۴ که مقاومت کمتری را از خود نشان داد. علت آن به طرح ترکیبی ۷۵ درصد کائولن و ۲۵ درصد سرباره و اثر منفی مقدار اضافه پودر کائولن بر روی مقاومت کششی مرتبط است؛ بطوری که در سن ۲۸ روز واکنش پوزولانی کائولن و سرباره و تولید ژل C-S-H (سیلیکات کلسیم هیدراته) باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌های ۵۰ درصد کائولن و ۵۰ درصد سرباره شده است. نکته قابل توجه در مورد نمونه طرح BSC75 در مولار ۴ و ۸ این است که نمونه طرح BSC8-75 نسبت به نمونه طرح BSC75-4 مقاومت بالایی داشت؛ اگر چه در هر دو از پلیمر بوتادین استایرن رابر استفاده شده بود. همچنین در مقایسه نمونه‌های طرح BSC50 در مولار ۴ و ۸ شاهد مقاومت بالاتری در نمونه طرح BSC50-8 بودیم. نکته جالب توجه در آزمایش مقاومت کششی به روش برزلی در دو نمونه طرح BS8 و BSC50-8 این است که در نمونه BSC50-8 با وجود پلیمر و نسبت ۵۰ درصد پودر کائولن و ۵۰ درصد سرباره، مقاومت تقریباً یکسانی با نمونه طرح BS8 دیده شد. علت این امر کامل شدن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات

ژئوپلیمر و تأثیر مقدار ۵۰ درصد پودر کائولن نسبت به سرباره است. همچنین تغییر جزئی ناشی از وجود پلیمر روی مخلوط، قابل توجه نبود.

با توجه به شکل ۹ در مورد نمونه‌های طرح شاهد بجز S8 با وجود مواد چسباننده جامد، مقاومت کششی کمتری مشاهده شد. نمونه‌های طرح اختلاط ۸-SC50، ۵۰-BSC8 و ۴-SC50 به ترتیب در مقایسه با نمونه طرح‌های اختلاط شاهد BS4، S4 و BS8 مقاومت کمتری را از خود نشان دادند. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که با توجه به نسبت ۵۰ درصد پودر سرامیک کائولن و ۵۰ درصد سرباره کوره آهنگدازی و مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری افزایش می‌یابد که علت این امر کامل شدن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر و در نتیجه افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها است.

۵-۴- نتایج آزمایش جذب آب

ژئوپلیمرها دارای جذب آب بسیار پایینی هستند که این مسأله بیانگر دوام خوب این نوع بتن هاست. در مطالعه نمونه‌های طرح اختلاط، جذب آب بتن بعد از گذشت زمان ۲۴ ساعت به عنوان ساده‌ترین آزمایش برای بررسی دوام بتن ژئوپلیمری روی نمونه‌ها انجام شد. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، جذب آب نمونه‌های بتنی ناشی از پدیده مویینگی در بتن است. مطابق شکل شماره ۱۰ نمونه طرح اختلاط با مقدار ۵۰٪ و ۷۵٪ پودر سرامیک کائولن، جذب آب تقریباً یکسانی را نشان داد. به عبارتی در این نمونه طرح‌های اختلاط، تفاوت معنا داری به لحاظ جذب آب بتن دیده نشد. همچنین همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود افزودن ۷۵ درصد پودر کائولن تأثیر مثبت بر افزایش جذب آب بتن دارد. علت این پدیده، تغییر در پیوستگی بتن با افزودن پودر کائولن است که راه را برای نفوذ آب به بتن فراهم می‌کند. طبق جدول شماره ۱۰ نمونه طرح اختلاط ۸-BSC75-4 کمترین جذب آب و نمونه طرح اختلاط ۴-S4 بیشترین جذب آب را داشت. خاصیت جذب آب بالا در سطح ذرات پودر کائولن به دلیل وجود خلل و فرج در سطح آن می‌تواند رابطه مستقیم درصد جذب آب را با درصد اضافه کردن پودر کائولن نشان دهد. بطور کلی ریزدانه بودن پودر کائولن، حجم خمیری ملات را افزایش می‌دهد و در نتیجه سبب ایجاد فاصله بیشتر بین سنگدانه‌ها می‌شود که این خود به تخلخل بیشتر و افزایش درصد جذب آب می‌انجامد. پُر نشدن فضاهای خالی به دلیل تشکیل ژل‌های ثانویه سیلیکاتی حاصل از فعالیت پوزولانی می‌تواند مهمترین دلیل این پدیده باشد. علاوه بر این وجود پودر کائولن در ملات، واکنش ژئوپلیمریزاسیون را پدید می‌آورد و در نتیجه آب اضافی از بتن خارج نمی‌شود و ریز ترک‌ها کاهش نمی‌یابد که خود منجر به افزایش جذب آب بتن می‌شود.



شکل ۱۰: نمودار مقایسه آزمایش جذب آب نمونه‌های عمل‌آوری شده در سن ۲۸ روز ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سرباره کوره آهنگدازی

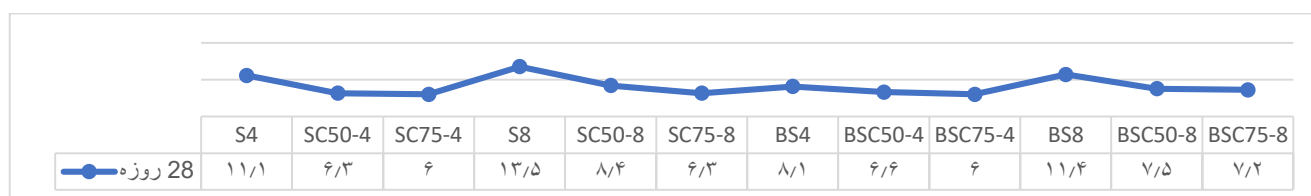
۵-۵- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی به نفوذپذیری بتن و رسانایی آن بستگی دارد. در بتن‌های ژئوپلیمری با توجه به استفاده از محلول‌های قلیایی در ساخت بتن، رسانایی الکتریکی می‌تواند نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی به روش وینر را تحت تأثیر قرار دهد. لذا این آزمایش ژئوپلیمری چندان مناسب نیست [۵]. بررسی نتایج بدست آمده از شکل ۱۱ (آزمایش مقاومت الکتریکی) نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت الکتریکی به نمونه طرح شاهد در مولار ۸ و کمترین مقاومت الکتریکی به نمونه طرح ۴-BSC75-4 و ۴-SC75-4 مربوط می‌شود. نتایج نسبت طرح اختلاط ۵۰ درصد پودر کائولن با ۵۰ درصد سرباره، مقاومت الکتریکی بهتری را نسبت به طرح اختلاط ۷۵ درصد پودر کائولن با ۲۵ درصد سرباره نشان داد. مقایسه نمونه شاهد طرح اختلاط در مولار ۸، مقاومت بهتری نسبت به مولار ۴ نشان می‌دهد. از آنجا که رسانایی الکتریکی بتن بر اثر سهولت ارتباط محلول حفره‌ای در ساختار بتن افزایش می‌یابد، می‌توان افزایش مقاومت الکتریکی بتن را نشانی از

کاهش نفوذپذیری آن دانست. مواد جایگزین سیمان بر اثر واکنش‌های پوزولانی و تولید ژل ثانویه، ضمن پُر کردن ریزساختار بتن (اصلاح اندازه و توزیع حفرات)، ارتباط بین این فضاها را قطع نموده و سبب افزایش مقاومت الکتریکی بتن می‌شوند [۴۶]. با توجه به ناچیز بودن نرخ خوردگی آرماتور در بتن‌هایی با مقاومت الکتریکی ۱۰ تا ۲۰ ($k\Omega \cdot cm$)، می‌توان اظهار داشت که نرخ خوردگی در دو نمونه طرح شاهد در مولار ۸ و نمونه شاهد S۴، با عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز متوسط تا کم خواهد بود.

مطابق شکل شماره ۱۱ بر اساس روش وینر میزان مقاومت الکتریکی در بتن‌های ژئوپلیمری حاوی سرباره و پودر کائولن که با دو محلول سود و آب شیشه فعال شده است، با افزایش مقدار ماده کائولن کاهش پیدا می‌کند. این موضوع بیان می‌کند که نتایج مقاومت الکتریکی در این نوع بتن‌ها رسانایی الکتریکی را نشان می‌دهد و نفوذپذیری عامل تعیین‌کننده مقاومت برای این بتن‌ها نیست. تأثیر ریزتر شدن و گسسته شدن منافذ، روی مقاومت الکتریکی بسیار بالاتر از تأثیر آنها در خواص مقاومتی است. همچنین مقاومت الکتریکی بتن، علاوه بر حجم و ساختار منافذ به ساختار شیمیایی آب منفذی نیز بستگی دارد؛ در صورتی که خواص مقاومتی با این پارامترها ارتباط خاصی ندارد. کاربرد سرباره و کائولن به لحاظ رقیق‌سازی و همچنین قابلیت ترکیب یون‌های مختلف نظیر Na^+ و K^+ در فرآورده‌های واکنش، باعث یون‌های $(OH)^-$ در آب منفذی می‌شوند. با توجه به نقش مهم یون‌های $(OH)^-$ در هدایت الکتریکی بتن، کاهش آنها در بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی می‌تواند باعث افزایش مقاومت الکتریکی شود [۴۷].

نتایج نشان می‌دهد که پودر کائولن و سرباره، به طرز چشمگیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد به طوری که برای بتن‌های حاوی پودر کائولن و سرباره در مواردی حتی تا بیش از ۱/۵ برابر نسبت به نمونه شاهد، کاهش مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود. همچنین هر چه فعالیت پوزولانی کائولن و سرباره کمتر باشد مقدار مقاومت الکتریکی کمتر می‌شود. علت اصلی این امر ساختار حفرات موئینه و نفوذپذیری کم بتن است. آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی به علت رسانایی الکتریکی بتن‌های ژئوپلیمری بر اساس روشی که در این مقاله مطرح شد برای بتن‌های ژئوپلیمری سرباره‌ای توصیه نمی‌شود. با توجه به رابطه مقاومت الکتریکی بتن با آهنگ خوردگی بر اساس پیشنهاد ACI۲۲۲ (جدول شماره ۹) و نمونه طرح‌های اختلاط بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره و پودر سرامیک، این بتن کاملاً در خطر بسیار زیاد خوردگی قرار دارد.



شکل ۱۱: نمودار مقایسه آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های عمل‌آوری شده در سن ۲۸ روز ملات ژئوپلیمری حاوی کائولن و سرباره کوره آهنگدازی

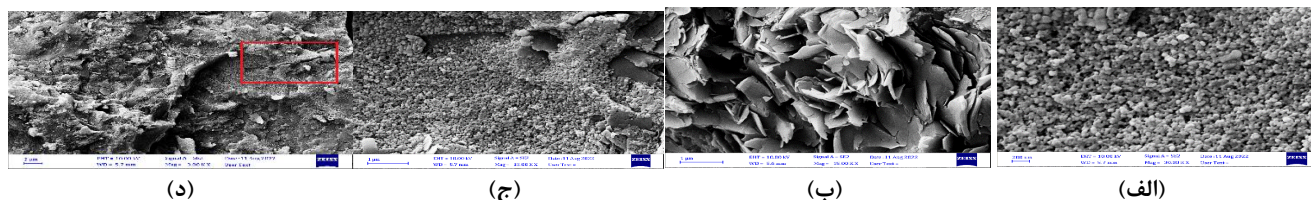
۶-۵- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در شکل ۱۲ تصاویر SEM از سطح شکست ۲۸ روزه نمونه BSC۵۰-۴ حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره و پلیمر (SBR) ارائه شده است. در این تصاویر ساختار ترکیبات مختلف، ترک‌ها و حفره‌ها نیز قابل مشاهده است. نمونه BSC۵۰-۴ دارای ساختارهای منسجم و متراکم C-S-H، C-A-S-H است. سرباره غنی از کلسیم است در طی فرآیند انحلال برخی از یون‌های Al و Ca آزاد می‌شود و نانو ساختار C-A-S-H در حین واکنش محلول قلیایی به وجود می‌آید [۴۸]. با مقایسه این تصاویر می‌توان استنباط نمود که چسبندگی بین پودر کائولن و سرباره در نمونه بتن ژئوپلیمری مطلوب است. از طرفی همان‌طور که ملاحظه می‌گردد فاز زمینه حاوی پودر کائولن بر روی سطح سرباره الحاق یافته است و به عبارتی دیگر سطح شکست کائولن ناهموار است. در حالی که در نمونه‌هایی که پودر کائولن درون زمینه توزیع نشده‌اند، سطوح سرباره هموار و عاری از هر گونه رزین زمینه روی آن است که نشان دهنده چسبندگی ضعیف بین زمینه پلیمری و پودر کائولن است.

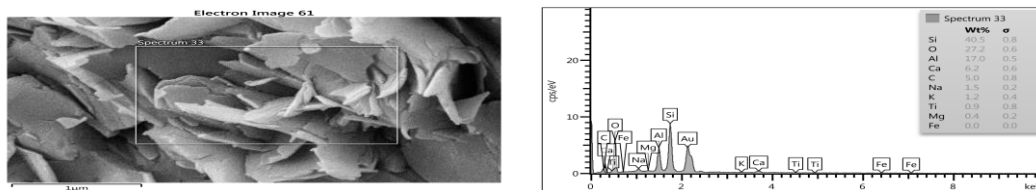
در شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپی از سطح شکست زمینه پودر کائولن ۵۰٪ و سرباره ۵۰٪ و پلیمر (SBR) نشان داده شده است. در این رابطه ناهمواری‌هایی در سطح شکست ملاحظه می‌گردد و انحراف ترک ایجاد شده در اثر آزمایش مقاومت قابل مشاهده است که از دلایل اصلی افزایش جذب انرژی در نمونه‌های ژئوپلیمری شامل پوزولان پودر کائولن به شمار می‌رود. باتوجه به شکل ۱۲ کلوخه‌هایی از نانوصفات گرافن ناشی از توزیع نامطلوب درون زمینه اپوکسی تشکیل شده است که این نقاط منجر به ایجاد تمرکز تنش و افت خواص مکانیکی می‌شود.

در ارتباط با نمونه چند مقیاسی حاوی پودر کائولن، سرباره و پلیمر، چسبندگی خوبی بین پودر کائولن و زمینه مشاهده می‌شود و ترک به جای رشد در امتداد فصل مشترک، در داخل زمینه اشاعه پیدا کرده است. این بدان معناست که در ارتباط با نمونه‌های چندمقیاسی، اشاعه ترک در زمینه مکانیزم غالب شکست است. حضور نانوذرات کربنات کلسیم باعث انحراف مسیر رشد ترک در زمینه می‌شود و به همین دلیل سطح شکست بخش زمینه نمونه چندمقیاسی بر خلاف نمونه شاهد ناهموار است [۴۹ و ۵۰].

در ارتباط با نمونه ۴-۵۰ BSC، چسبندگی قابل توجهی بین پودر کائولن و زمینه ژئوپلیمری قابل مشاهده است. در شکل ۱۲ حضور آگلومره‌های نانوذرات در نمونه ۴-۵۰ BSC مشهود است که این آگلومره‌ها به عنوان نواحی تمرکز تنش در زمینه عمل کرده و به ایجاد و اشاعه ترک و افت خواص مکانیکی کمک شایانی می‌کند [۴۹]. این مشاهدات در تطابق با نتایج آزمون‌های مکانیکی گزارش شده در بخش قبلی است. میزان درصد وزنی عناصر در بتن ژئوپلیمری در شکل ۱۳ توسط آزمون EDX اندازه‌گیری شد. نانوساختار C-S-H و C-A-S-H دارای تنوع گسترده‌ای است و با توجه به تغییرات نسبت Ca/Si، ساختار سیلیکات و محتویات Si-OH و Ca-OH به هم مرتبط می‌شوند. به طور کلی فرض می‌شود نانو ساختار C-S-H همراه با نانو ساختار C-A-S-H در طی فرآیند ژئوپلیمریزاسیون به منظور ایجاد پیوند محکم‌تر و برای از بین بردن منافذ در ژئوپلیمرها به وجود می‌آید. با توجه به نسبت وزنی عناصر نمونه‌های ژئوپلیمری توسط آزمون EDX می‌توان نتیجه گرفت محیط مناسبی برای تشکیل نانوساختارهای C-S-H وجود دارد. پژوهش‌ها نشان داده که با افزایش دما تا حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس به علت تبخیر شدن آب فیزیکی یا آزاد ساختار نمونه تراکم بیشتری پیدا کرده است و با رشد نانوساختارهای C-S-H و C-A-S-H این میکرو ترک‌ها از بین رفته است [۵۱ و ۵۲]. نسبت بالای Si/Al بیانگر ژئوپلیمریزاسیون بسیار مناسب در ترکیب می‌باشد. از طرفی با توجه به مقدار Ca موجود می‌توان نتیجه گرفت که ساختار N-A-S-H تشکیل شده در ژئوپلیمر، که در عین داشتن مشخصات مقاومتی مناسب، ترکیبات قلیایی ناپایدار در PH های کمتر از ۱۲ محسوب می‌شوند، با حضور مقدار مناسب Ca ناشی از استفاده از کائولن، تبدیل به ترکیبات پایدار و مقاوم Na C-A-S-H با مقدار پایین کلسیم یا C-A-S-H شده‌اند که این پدیده از تفاوت‌ها و برتری‌های ملات‌ها و بتن ژئوپلیمری بر مواد فعال شده قلیایی (Alkali-Activated Materials) است. در شکل ۱۲ برخی ذرات کائولن که واکنش نداده ملاحظه می‌شود. با حضور مقادیر بالای سیلیس و کلسیم در برخی مطالعات تشکیل ژل C-S-H نیز دیده شده است که می‌تواند برخی ساختارهای آمورف در اطراف ذرات کائولن را توجیه نماید. در شکل ۱۲(د) ناحیه اتصال بین سنگدانه و خمیر مشاهده می‌شود. همانطور که در این تصویر مشخص است، جدایشی در برخی نواحی ITZ قابل تشخیص است و این امر می‌تواند مربوط به وجود آب در این نواحی باشد که بعد از قرارگیری در حرارت به علت فشار ناشی از خروج بخار آب باعث جدایشی و ترک در ناحیه انتقال شده است لذا می‌توان آن را به حضور و واکنش‌های کائولن در ساختار نمونه نسبت داد.



شکل ۱۲: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه ۴-۵۰ BSC



شکل ۱۳: آنالیز EDS نمونه طرح ۴-۵۰ BSC حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره کوره آهن‌گدازی و پلیمر استایرن بوتادین رابر (SBR)

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با مطالعه بر روی اثر ملات‌های ژئوپلیمری بر مبنای کائولن و سرباره به صورت انفرادی و ترکیبی در چند مولار مختلف نتایج زیر به دست آمد:

نتایج نمونه طرح اختلاط ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره، نسبت به نمونه طرح اختلاط ۷۵٪ پودر کائولن با ۲۵٪ سرباره، مقاومت فشاری و خمشی بهتری را نشان داد. در آزمایش دو نمونه طرح ۴-۵۰ BSC و ۸-۵۰ BSC نتیجه جالب توجهی حاصل شد. با توجه به استفاده از پلیمر در نمونه ۵۰-۸ BSC حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره، مقاومت خمشی هر دو نمونه یکسان و عدد ۴/۴۳ مگاپاسکال بود. در هر دو نمونه طرح شاهد S۴ و BS۸ با توجه به استفاده از مواد چسباننده جامد در نمونه BS۸، مقاومت خمشی تقریباً یکسانی مشاهده شد. در دو نمونه طرح SC۷۵ در مولار ۴ و ۸ با توجه به استفاده از ۷۵٪ پودر سرامیک کائولن و ۲۵٪ سرباره، مقاومت خمشی این دو تفاوت معناداری با هم نداشت. در نتایج نمونه‌ها با نسبت پودر سرامیک کائولن ۵۰٪ و سرباره ۵۰٪ مقاومت کششی بالاتری نسبت به نمونه طرح‌های حاوی پودر کائولن ۷۵٪ و سرباره ۲۵٪ مشاهده شد؛ به استثنای نمونه طرح اختلاط ۴-۵۰ BSC در مولار ۴ که مقاومت کمتری را از خود نشان داد. نکته قابل توجه در مورد نمونه طرح BSC۷۵ در مولار ۴ و ۸ این است که نمونه طرح ۸-۵۰ BSC نسبت به نمونه طرح ۴-۵۰ BSC مقاومت بالایی داشت؛ اگر چه در هر دو از پلیمر بوتادین استایرن رابر استفاده شده بود. با توجه به نسبت ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره و مدت زمان عمل آوری، مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری افزایش یافت که علت این امر کامل شدن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر است. نکته حائز اهمیت در آزمایش مقاومت کششی دو نمونه طرح BS۸ و ۸-۵۰ BSC این است که در نمونه ۸-۵۰ BSC با وجود استفاده از پلیمر بوتادین استایرن رابر و نسبت ۵۰٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره، مقاومت تقریباً یکسانی نسبت به نمونه طرح BS۸ دیده می‌شود. در نمونه طرح‌های اختلاط با مقدار ۵۰٪ و ۷۵٪ پودر کائولن، تفاوت معناداری به لحاظ جذب آب بتن دیده نشد؛ به غیر از نمونه طرح ۷۵-۸ BSC که در آن جذب آب کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده گردید. پودر کائولن و سرباره، به طرز چشمگیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را کاهش داد؛ به طوری که برای بتن‌های حاوی پودر کائولن و سرباره در مواردی حتی تا بیش از ۱/۵ برابر نسبت به نمونه شاهد، کاهش مقاومت الکتریکی مشاهده شد. با توجه به نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر ترکیب کائولن ۵۰٪ و سرباره ۵۰٪ نسبت به طرح‌های شاهد توصیه می‌شود؛ چرا که ۷۵٪ پودر کائولن و ۲۵٪ سرباره باعث افت خواص مکانیکی و دوام ملات ژئوپلیمری می‌شود. مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی و درصد جذب آب نشان می‌دهد که ترکیب سرباره کوره آهن‌گدازی و پودر کائولن ترکیب خوبی برای یک بتن مقاوم نیست. مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که قدرت چسبندگی بین سرباره و پودر کائولن نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی بتن‌های تحت آزمایش مقاومت دارد. با آزمایش (SEM) در نمونه‌های حاوی ۷۵٪ پودر کائولن نسبت به نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن، به علت آگلومره شدن نانوذرات، افت خواص مکانیکی در آنها مشاهده شد که به دلیل تجمع نانوذرات در این درصد وزنی است. نتایج حاصل از بررسی‌های ریزساختاری حاصل از تصویر برداری (SEM) بر روی نمونه‌های بتنی، در هماهنگی و همپوشانی با نتایج سایر آزمون‌ها در این پژوهش قرار داشتند.

سپاسگزاری

در پایان از مدیران محترم آزمایشگاه خاک سنجش بنیان سازه بابت ارائه تجهیزات و همکاری‌های ارزنده کمال تشکر را دارم.

مراجع

- [1] Yip, C.K., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1688–1697. doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.042.
- [2] Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía, R., Gordillo, M., Provis, J. (2011). Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. *Journal of Materials Science*, 46(16), 5477–5486. doi:10.1007/s10853-011-5490-z.
- [3] BS 6699:1992. (1992), Specification for ground granulated blast furnace slag for use with Portland cement, 1Ed.
- [4] Prasanna Venkatesan, R. and Pazhani, K. C. (2016). Strength and durability properties of geopolymer concrete made with gauled blast furnace slag and black rice husk ash. *KSCE Journal of civil engineering*, 20(6), 2384-2391. doi:10.1007/978-981-15-9162-4_22.
- [5] Maddah, M. R. (2013). *The effect of different solutions in geopolymer cement production with two types of pozzolan and evaluation of mechanical properties and chloride ion penetration in these concretes*, M.Sc. Thesis, AmirKabir University of Technology.
- [6] Assaad, J. J. & Daou, Y., (2016). Behavior of structural polymer-modified concrete containing recycled aggregates, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(8) pp. 874-896. doi:10.1080/01694243.2016.1235750.
- [7] Mermerdaş, K., Manguri, S., Nassani, D. E., and Oleiwi, S. M. (2017). Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(6), 1642–1652. doi:10.1016/j.jestch.2017.11.009.
- [8] Sharma, A., Ahmad, J., (2017). Experimental study of factors influencing compressive strength of geopolymer concrete, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(5), 1306-1313.
- [9] Kwasny, J., Aiken, T. A., Soutsos, M. N., McIntosh, J. A. & Cleland, D. J., (2018). Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars, *Construction and building materials*, 166, pp. 537-553. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.129.
- [10] Zhuang, H. J., Zhang, H. Y. & Xu, H., (2017). Resistance of geopolymer mortar to acid and chloride attacks, *Procedia Engineering*, 210, pp. 126-131. doi:10.1016/j.proeng.2017.11.057.
- [11] Patel, Y.J., Shah, N. (2018). Study on Workability and Hardened Properties of Self Compacted Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature, *Indian Journal of Science and Technology*, 11(1), 1-12. doi: 10.17485/ijst/2018/v11i1/117698.
- [12] Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Yan, J., and Yuan, Z. S. (2018). Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 277–285. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.043.
- [13] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars. *Journal of Building Engineering*, 101178. doi:10.1016/j.jobe.2020.101178.
- [14] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2019). On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast- Furnace Slag. *Journal of Building Engineering*, 24, 100757. doi:10.1016/j.jobe.2019.100757.
- [15] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). An experimental into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. *Structural Concrete*. doi:10.1002/suco.201900274.
- [16] Saranya, P., Nagarajan, P., & Shashikala, A. P. (2020). Behaviour of GGBS-dolomite geopolymer concrete beam-column joints under monotonic loading. *Structures*, 25, 47–55. doi:10.1016/j.istruc.2020.02.021.
- [17] Feiteira, J. & Ribeiro, M. S., (2013). Polymer action on alkali-silica reaction in cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 44 pp. 97-105. doi:10.1016/j.cemconres.2012.09.008.
- [18] Ganesan, S., Mydin, M.A., Sani, N.M., Che Ani, A. I., (2014). Performance of Polymer Modified Mortar with Different Dosage of Polymeric Modifier. *MATEC Web of Conferences*, 15 01039. doi:10.1051/mateconf/20141501039.
- [19] Doğan, M., Bideci, A., (2016). Effect of Styrene Butadiene Copolymer (SBR) admixture on high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 112 pp. 378-385. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.204.

- [20] Bhogayata, A. C. & Arora, N. K. (2018). Workability, strength, and durability of concrete containing recycled plastic fibers and styrene-butadiene rubber latex, *Construction and Building Materials*, 180 pp. 382-395. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.175.
- [21] Aggarwal, L. K., Thapliyal, P. C. & Karade, S. R. (2007). Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions, *Construction and Building Materials*, 21(2) pp. 379-383. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.007.
- [22] Bagheri, A. R., & Hashemi, S. (2008). Influence of (SBR) Latex and Silica Fume on Properties and Performance of Cement-based Repair Concretes. *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*. 26 (2) pp. 33-47.
- [23] Liu, B., Shi, J., Sun, M., He, Z., Xu, H., Tan, J., (2020). Mechanical and permeability properties of polymer-modified concrete using hydrophobic agent. *Journal of Building Engineering*, 31(9) 101337. doi:10.1016/j.job.2020.101337.
- [24] Jo, Y.-K. (2020). Adhesion in tension of polymer cement mortar by curing conditions using polymer dispersions as cement modifier. *Construction and Building Materials*, 242 118134. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118134.
- [25] Chehrazi Sefiddashti, H., Madani, H. & Saedikia, A. (2020). " Investigation and properties of cement based mixtures containing different type of polymers ", *Sharif Journal*, 36.2(3.2) pp.135-145.
- [26] Ramezaniapor, A., et al. (2018). Studying the Effect of the Amount of Source Materials and Water to Binder Ratio on Chloride Ions Ingress in Alkali-Activated Slag Concretes, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4), 673-684. doi:10.22060/CEEJ.2016.695.
- [27] Jafari Nadoushan, M. and Ramezaniapor, A.A, (2019). Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Pastes and Determination of Optimum Values of Effective Factors, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(6), 1043-1052. doi: 10.22060/CEEJ.2017.11113.4977.
- [28] Najmi, S., Rahbari, A., Darvishan, E., Adabi, M. (2020). Effect of Microsilica and CFRP Fibers on Mechanical and Durability Properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag-Based Geopolymer Concrete. *Modares Civil Engineering journal*, 20(5), 207-218.
- [29] Moodi, F., et al. (2021). Durability of cementitious and geopolymer coating mortars against sulfuric acid attack, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9), 6-6. doi: 10.22060/CEEJ.2020.18068.6757.
- [30] Rajini, B. and Narasimha 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*, 3(9), 15944-15953.
- [31] Omer, S. A., Demirboga, R., and Khushefati, W. H. (2015). Relationship between compressive strength and UPV of GGBFS based geopolymer mortars exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 94, 189–195. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.006.
- [32] ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- [33] Luhar, I., Luhar, S., Abdullah, M.M.A.B., Nabiałek, M., Sandu, A.V., Szmidla, J., Jurczyńska, A., Razak, R.A., Aziz, I.H.A., Jamil, N.H., et al. (2021). Assessment of the Suitability of Ceramic Waste in Geopolymer Composites: An Appraisal. *Materials*, 14(12) , 3279. doi:10.3390/ma14123279.
- [34] Bello, I.A., Olalusi, O.B., Olutoge, F.A. (2017). Effect of Salt Water on the Compressive Strength of Ceramic Powder Concrete. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6(4), 158-163.
- [35] Yaseri, S., Hajiaghaei, G., Mohammadi, F., Mahdikhani, M. and Farokhzad, R. (2017). The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, 157, 534-545.
- [36] Peng, Hui, et al. (2019). Microstructure and microhardness property of the interface between a metakaolin/GGBFS-based geopolymer paste and granite aggregate. *Construction and Building Materials*, 221, 263-273. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.090Get.
- [37] EN, BS 1881-125. (2013). Testing concrete Methods for mixing and sampling fresh concrete in the laboratory. British Standards Institution.
- [38] ASTM C293. (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
- [39] ASTM C496. (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.

- [40] ASTM C192. (2019). Standard Practice For Making And Curing Concrete Test Specimens In The Laboratory, Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
- [41] ASTM C642. (2021). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.
- [42] Designation: FM 5-578, (2004). Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability.
- [43] ACI: 222R-01, (2010) - Protection of Metals in Concrete Against Corrosion: American Concrete Institute (ACI).
- [44] Elchalakani, M., Dong, M., Karrech, A., Li, G., Mohamed Ali, M. S., Xie, T. and Yang, B. (2018). Development of Fly Ash-and Slag-Based Geopolymer Concrete with Calcium Carbonate or Microsilica. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12), 04018325-1–04018325-14. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002527.
- [45] Cyr, M., Idir, R., Poinot, T. (2012). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science*, 47(6), 2782–2797. doi:10.1007/s10853-011-6107-2.
- [46] Ramezani-pour, A. K. (2014). *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability*, Berlin: Springer, 1–336. doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2.
- [47] Buenfeld, N. R., et al. (1998). Chloride Transport in Concrete Subjected to Electric Field, *A.S.C.E. Journal of Materials in Civil Eng*; 10(4), 220-228.
- [48] Yazdi MA, Liebscher M, Hempel S, Yang J, Mechtcherine V. (2018) Correlation of microstructural and mechanical properties of geopolymers produced from fly ash and slag at room temperature. *Construction and Building Materials*. 191:330-41.
- [49] Jamali, N. Rezvani, A. Khosravi, H. and Tohidlou, E. (2018). “On the Mechanical Behavior of Basalt Fiber/Epoxy Composites filled with silanized graphene oxide nanoplatelets”, *Polymer Composites*, DOI 10.1002/pc.24766.
- [50] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H. (2016) “An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings”, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194. (In Persian.)
- [51] Aryanpour m, Amiri m. (2019). The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (C-S-H). *Concrete Research*, 12(4) pp. 69-80.
- [52] Amiri M, Aryanpour M. (2021). The Effect of High Temperatures on the Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 52(12), pp. 2987-3002. doi: 10.22060/CEEJ.2019.16419.6219.