

مطالعه آزمایشگاهی خواص مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی سرباره، پودر کائولن و پلیمر

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد^(۱)

آرین درویشعلی نژاد^(۲)

چکیده با توجه به میزان مصرف بالای ملات و بتن بویژه در سازه‌ها و نیاز روز افزون به تولید سیمان، توجه به اثرات مخرب زیست محیطی این ماده ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش قصد دارد تأثیر پودر سرامیک کائولن، سرباره کوره آهنگدازی (GGBFS) و پلیمر استایرن بوتادین رابر را بر روی خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری بررسی کند. در این تحقیق آزمایشگاهی از پودر کائولن و سرباره با درصدهای مختلف و پلیمر (SBR) استفاده شده است. به منظور دستیابی به اهداف نمونه‌های ۱۲ طرح اختلاط تحت آزمایش‌های مختلف نظیر مقاومت فشاری، خمشی، کششی، مدول الاستیسیته، زمان گیرش بتن (سوزن ویکات) و بررسی ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) قرار گرفتند. استفاده از پودر کائولن در آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی باعث افت مقاومت نمونه‌های ترکیبی شد؛ اما در آزمایش مقاومت کششی نمونه طرح اختلاط SC50-4 (2.79 Mpa) و نمونه طرح شاهد S8 (3.08 Mpa) نسبت به سایر نمونه طرح‌های اختلاط، مقاومت بیشتری را از خود نشان دادند. زمان گیرش اولیه و نهایی کلیه طرح‌های حاوی پودر کائولن در مولار 4 بیشتر از مولار 8 بود.

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

Experimental Study of Mechanical Properties of Geopolymeric Mortars Containing Slag, Kaolin Powder and Polymer

S. H. Ghasemzadeh Mousavinejad

A. Darvishalinezhad

Abstract Considering the high consumption of mortar and concrete, especially in structures, and the increasing demand for cement production, it seems necessary to pay attention to the harmful environmental effects of this material. This research aims to investigate the effect of kaolin ceramic powder, blast furnace slag (GGBFS) and styrene butadiene rubber polymer on the mechanical properties of geopolymer concrete. In this laboratory research, kaolin powder and slag with different percentages as well as polymer (SBR) have been used. In order to achieve the goals, samples of 12 mixing plans were subjected to various tests such as compressive strength, flexure, tensile strength, modulus of elasticity, setting time of concrete (Vicot needle) and scanning electron microscope (SEM) microstructure examination. The use of kaolin powder in the compressive and flexural strength tests caused a decrease in the strength of the composite samples; However, in the tensile strength test, the SC50-4 mixing design sample (2.79 Mpa) and the S8 control design sample (3.08 Mpa) showed more resistance than other mixing design samples. The initial and final setting time of all designs containing kaolin powder in molar 4 was higher than molar 8.

Key words Geopolymer Mortar, GGBFS, Kaolin, Compressive Strength, Mechanical Properties.

آلودگی هوا و در میان آلاینده‌ها، کربن دی اکسید تولیدی ناشی از صنعت سیمان بخش بزرگی را به خود اختصاص می‌دهد. از سوی دیگر سیمان جزء اصلی در ترکیبات بتن محسوب می‌شود. از این رو پژوهشگران در زمینه جایگزین نمودن مواد با خاصیت سیمانی نظیر

مقدمه

با افزایش آلودگی‌های محیط زیست، یافتن راهکارهای مناسب برای رفع این گونه مخاطرات امری ضروری است. در میان آلودگی‌ها،

سرباره کوره آهنگدازی، و پوزولانی مانند خاکستر بادی، متاکائولن، و پوزولان‌های طبیعی و ... تحقیق کرده‌اند. این ترکیبات هنگامی که در ساختار بتن به کار می‌روند، علاوه بر محاسن زیست محیطی، موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن نیز می‌شوند. هنگامی که سرباره کوره آهنگدازی به عنوان جایگزین درصدی از سیمان در ساخت ترکیبات بتن به کار می‌رود، عمدتاً با مقاومت فشاری کمتری در سنین اولیه نسبت به بتن معمولی همراه است [۲۰۱]. برای حل این مشکل یکی از راهکارهای نوین فعالسازی قلیایی سرباره است. در واقع بتن‌های ژئوپلیمری بتن‌هایی هستند که ترکیب آنها از دو بخش ماده پایه (دارای ترکیبات آلومینوسیلیکاتی) و ماده فعالساز تشکیل شده است. بنابراین پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی از آنجا که منابع غنی از این ترکیبات هستند، می‌توانند به عنوان ماده پایه به کار روند. محلول‌ها با خاصیت قلیایی که موجب فعال شدن ماده پایه می‌شوند به عنوان ماده فعالساز مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توان به سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات و سدیم کربنات اشاره کرد. در این تحقیق بتن‌های ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهنگدازی و پودر کائولن مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق تحقیقات انجام شده این دسته از بتن‌های ژئوپلیمری عملکردهای مطلوبی از خود نشان داده‌اند. مقاومت فشاری بالا حتی در سنین اولیه، نفوذپذیری کمتر، میزان حرارت هیدراتاسیون پایین‌تر، دوام مناسب در برابر حملات شیمیایی و محیط‌های خورنده و مقاومت در برابر دماهای بالا از امتیازات این گونه بتن‌های ژئوپلیمری هستند. البته معایب اجرایی نظیر کارایی نسبتاً کم، جمع شدگی زیاد، ایجاد شوره در سطح، واکنش قلیایی سنگدانه و تغییرپذیری مقاومت برای این نوع بتن‌ها ذکر شده است. در واقع در بتن‌های ژئوپلیمری از آن جهت که اندرکنشی از چند پارامتر مختلف بر روی مقاومت تأثیر می‌گذارد، پیش‌بینی مقاومت به سهولت بتن‌های معمولی با سیمان پر تلند نیست [۳-۶].

یکی از مسائلی که لزوم تحقیق به لحاظ محدود بودن تعداد مطالعات در آن زمینه احساس می‌شود، بررسی خواص مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمری است. 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 سه ماده کائولن، سرباره کوره آهنگدازی (GGBFS) و پلیمر بوتادین استایرن رابر (SBR) در مولار ۴ و ۸ بر خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری خواهیم پرداخت. تاکنون

تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با خواص مکانیکی و دوام ملات‌های ژئوپلیمری انجام شده است که در اینجا به چند پژوهش مرتبط اشاره می‌شود:

یونشنگ و همکاران در سال (۲۰۱۰) طراحی، ترکیب و خصوصیات ریزساختاری سیمان ژئوپلیمر بر پایه کائولن کلسینه شده سیمان ژئوپلیمر پرداختند. آنها با مقایسه طیف IR9 خمیر دریافتند که سیمان Na-PSDS با بالاترین استحکام به طور کامل واکنش داده و دارای بیشترین مقدار ژئوپلیمر است. تجزیه و تحلیل میکروسکوپی نشان داد که سیمان Na-PSDS دارای ویژگی‌های ساختاری مشابه با طیف گسترده‌ای از Si است؛ اما چارچوب چهاروجهی SiO_4 تا حدی با Al_4 جایگزین شده است [۷].

اوکی و همکاران در سال (۲۰۱۵) به بررسی خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی یا کائولن با فعال ساز قلیایی پرداختند و دریافتند که مقاومت فشاری با افزایش دما، زمان پخت و نوع فعال‌کننده‌های قلیایی افزایش می‌یابد. فوق روان‌کننده بر پایه نفتالین سولفونات عملکرد بهتری نسبت به سایر فوق روان‌کننده‌ها داشت. استحکام فشاری با افزودن ۱٪ فوق روان‌کننده نفتالین سولفونات در بتن ژئوپلیمری به ترتیب ۲۳/۳٪ و ۳۰/۹٪ بیشتر از ملامین فرمالدئید و پلی‌کربوکسیلات استر شد [۸].

راماسامی و همکاران در سال (۲۰۱۶) به بررسی رابطه بین کائولن، نسبت مایع قلیایی و مقاومت ژئوپلیمر کائولن پرداختند. پژوهشگران دریافتند که پوشش ژئوپلیمر کائولن روی چوب مطلوب‌ترین سختی و استحکام خمشی ۹۴/۷۳ مگاپاسکال را نشان می‌دهد [۹].

مرمداس 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 اندازه‌گیری 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 [۱۰].

شارما و همکاران در سال (۲۰۱۷) در مورد فاکتورهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی دریافتند 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 [۱۱].

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 [۱۲].

مطالعات مربوط به کارپذیری، مقاومت و دوام مخلوط‌های پایه سیمانی حاوی هر دو مواد الیاف پلاستیکی و پلیمر (پایه آبی) استاتیرن بوتادین رابر به صورت همزمان 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 [۱۳-۱۵].

لئو و همکاران در سال (۲۰۲۰) خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن‌های سیمان پرتلند اصلاح شده با سه نوع پلیمر استاتیرن بوتادین رابر، پلی آکریلیک استر و سیلیکون آلی ضد آب را بررسی کردند و دریافتند که این پلیمرها، مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد و خاکستر بادی اثر منفی آن را بهبود می‌بخشد. همچنین، این پلیمرها می‌تواند نفوذپذیری بتن را کاهش دهد [۱۶].

یانگ کوگ در سال (۲۰۲۰) با بررسی چسبندگی به سطوح زیرین ملات‌های سیمان پرتلند اصلاح شده با سه نوع پلیمر اتیلن وینیل استات، استاتیرن بوتادین رابر و استاتیرن وینیل آکریلیک استر در چهار شرایط عمل‌آوری مرطوب، خشک، استاندارد و تحت دمای بالا برای تعیین چسبندگی ملات‌های اصلاح شده به سطح زیرین خود دریافت که در شرایط استاندارد و شرایط عمل‌آوری خشک به ترتیب پلیمرهای اتیلن وینیل استات، استاتیرن بوتادین رابر و استاتیرن آکریلیک استر در مقایسه با سایر شرایط عمل‌آوری نتایج بهتری داشته‌اند [۱۷].

چهارازی و همکاران در سال (۲۰۲۰) در بررسی و مقایسه مشخصات مکانیکی و دوام مخلوط پایه سیمان پرتلند اصلاح شده با اتیلن وینیل استات، استاتیرن آکریلیک و استاتیرن بوتادین دریافتند که خواص دوام با استفاده از مواد پلیمری بهبود می‌یابد و پلیمر اتیلن وینیل استات نسبت به پلیمر استاتیرن آکریلیک با نسبت ۵٪ به ۱۵٪

خواص مکانیکی و دوام را به مراتب بیش از پلیمر استاتیرن آکریلیک بهبود می‌بخشد [۱۸].

متالکه و همکاران در سال (۲۰۲۰) به مطالعه بهبود خواص مکانیکی ژئوپلیمر کائولن با استفاده از هیدرو اکسید سدیم و اکسید کلسیم پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزودن ۵٪ وزنی هیدروکسید سدیم و ۱۰٪ وزنی اکسید کلسیم، مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر را در دمای اتاق به ترتیب ۹۰٪ و ۱۰۵٪ افزایش می‌دهد. افزودن ۵٪ وزنی هیدروکسید سدیم با ۱۰٪ وزنی اکسید کلسیم نیز پایداری آب ملات ژئوپلیمر را تا حدود ۱۲۰٪ بالا می‌برد [۱۹].

جنبه نوآوری این پژوهش وجود کائولن و پلیمر بوتادین استاتیرن رابر (SBR) در خمیر ملات ژئوپلیمری است که با توجه به بررسی تحقیقات پیشین، تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه انجام نشده است. پژوهش حاضر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری با درصد‌های ۵۰٪ و ۷۵٪ کائولن در مولار ۴ و ۸ در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی را بررسی می‌کند. در این راستا از سرباره (GGBFS) و کائولن به عنوان مواد اولیه ساخت ملات ژئوپلیمری استفاده شد. ۱۲ نوع طرح اختلاط با درصد‌های ۵۰٪ و ۷۵٪ کائولن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته شد و تأثیر آن بر مقاومت فشاری، خمشی، کششی، مدول الاستیسیته، زمان گیرش و ریزساختار ملات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید. مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت خمشی، کششی، مدول الاستیسیته، زمان گیرش و بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی در سن ۲۸ روز تعیین شد.

۲- مصالح مورد استفاده

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

۲-۱- سدیم هیدروکسید (سود)

سدیم هیدروکسید یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH ماده‌ای جامد و سفید رنگ با دمای ذوب 318°C و چگالی 2.13 g/cm^3 است. در این پژوهش از محلول سود ۴ و ۸ مولار برای ساخت ملات‌های ژئوپلیمری استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات هیدروکسید سدیم^۲

درصد خلوص	حلالیت	انحلال پذیری در آب °C	اسیدی	دمای ذوب °C	دمای جوش °C	چگالی g/mol	جرم مولی g/mol	فرمول شیمیایی
۹۸-۹۹٪	در آب، اتانول و متانول محلول است	۲۰	۱۳	۳۱۸	۱۳۸۸	۲/۱۳	۳۹/۹۹۷	هیدروکسید سدیم (NaOH)

جدول ۲-۲: سدیم سیلیکات (آب شیشه)

دانسیته	۲/۶۱ g/cm ³
نقطه ذوب	۱۰۸۹ °C
حلالیت در آب	۲۲/۲ gr/۱۰۰ mol (۲۰°C)
	۱۶۰/۶ gr/۱۰۰ mol (۸۰°C)
ضریب شکست	۱/۵۲
انحلال پذیری	نامحلول در الکل

سدیم سیلیکات یا آب شیشه نام عمومی ترکیب سدیم متاسیلیکات (Na₂SiO₃) است که به صورت محلول آبی و جامد در دسترس است. سدیم سیلیکات طبق تعریف فون وگنر نوعی سیلیکات قلیایی حل شدنی است [۲۰]. براساس استاندارد ASTM ۱۸۸-۸۹ C چگالی پودر این ماده برابر ۲/۴ g/cm³ اندازه گیری شد و میانگین چگالی محلول مورد استفاده نیز برابر ۱/۶ g/cm³ به دست آمد. در جدول ۲ مشخصات سدیم سیلیکات مصرفی آمده است.

جدول ۲-۳: سرباره

برای ساخت ژئوپلیمرها از سه جزء استفاده می شود: جزء اول ماده آلومیناسیلیکاتی به عنوان ماده پایه، جزء دوم سدیم سیلیکات و جزء آخر ماده قلیایی است. در این پژوهش از سرباره به عنوان ماده پایه و از پودر سدیم سیلیکات با نسبت های مشخصی با آب ترکیب شده و محلول ساخته شده از پودر سدیم هیدروکسید به عنوان ماده قلیایی استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سرباره در جدول ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۲: مشخصات سیلیکات سدیم^۲

مشخصات	محلول سیلیکات سدیم
فرمول شیمیایی	Na ₂ SiO ₃
وزن مولکولی	۱۲۲/۰۶ g/mol

جدول ۳: مشخصات فیزیکی پودر سرباره^۴

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

جدول ۴: آنالیز شیمیایی سرباره^۵

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	نمونه
۳۶/۰	۰/۶۰	۳۸/۱۰	۶/۶	۱۳/۰۰	۰/۵۰	۱/۱۰	۰/۶۰	سرباره (%)

کائولن از نظر صنعتی به رس هایی اطلاق می شود که دارای مقدار قابل توجهی کائولینیت باشند. از نظر کانی شناسی کائولن جزء گروهی از کانی های سیلیکات های آلومینیوم هیدراته است و

جدول ۲-۴: کائولن

۱- <https://www.petroakam.com>

۲- <https://www.famcocorp.com>

۳ و ۴- <https://www.iranslag.com>

۵- <http://www.aryapowder.ir>

کائولینیت، دیکیت، ناکریت، هالوویت، متاهالوویت و خاک‌نسوز را شامل می‌شود. 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 با نیازهای مختلف در صنایع خاصیت انطباق‌پذیری بالایی دارد. هم

اکنون از آن در 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. با توجه به رنگ روشن کائولن این ماده می‌تواند در معماری دارای جذابیت-هایی باشد. مشخصات فیزیکی پودر کائولن در جدول ۵ و ترکیب شیمیایی آن با استفاده از آنالیز XRF در جدول ۶ آمده است.

جدول ۵: مشخصات فیزیکی پودر کائولن^۶

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^۷

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

۵-۲- 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 (SBR) به کار رفته در مخلوط از ۵۰٪ بیشتر 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) پایین‌تر 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 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^۸

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

۶-۲- ماسه

۶- <http://www.aryapowder.ir>

۷- <https://masa-co.ir>

اندازه اسمی ۴/۷۵ mm در جدول ۷ مشاهده می‌شود. شکل ۱ نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول ۸: مشخصات فیزیکی ماسه

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

سنگدانه به عنوان یکی از پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی در ملات و بتن شناخته می‌شود. سنگدانه نه تنها به عنوان ماده پرکننده در مخلوط بلکه به عنوان یکی از اجزای اصلی تأثیر چشم‌گیری بر خواص محصول نهایی خواهد داشت. در پژوهش حاضر ماسه رودخانه‌ای و گردگوشه که از معدن آسمان‌رود رودسر تهیه شده برای ساخت ملات ژئوپلیمری به کار گرفته شد. ماسه مصرفی با بزرگترین



شکل ۱: منحنی دانه بندی ماسه مصرفی بر اساس ASTM C۳۳ [۲۱]

به طرح اختلاط نهایی استفاده شد. نام گذاری نمونه‌ها به این شرح است: S نشانگر سرباره کوره آهنگدازی، CP پودر سرامیک کائولن، SBR پلیمر استایرن بوتادین رابر، BS پودر چسباننده جامد، SH فرمول شیمیایی NaOH، SS برگرفته از Sodium Silicate، SBR برگرفته از Styrene Butadiene Rubber و اعداد بعدی به ترتیب مولاریته و درصد پودر کائولن است.

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

در جدول ۸ طرح اختلاط‌های مختلف برای ماده کائولن بر اساس تجربیات مندرج در مرجع شماره [۲۳ و ۲۴] تعیین گردید و از همین نتایج و مرجع [۲۴ و ۲۵] برای تعیین مقدار سرباره، برای رسیدن

جدول ۹: طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری.

Name	BS	Slag		CP		M	Na ₂ SiO ₃	NaOH	SS + SH/BS	SS/SH	SBR		Sand
	Kg/m ³	%BS	Kg/m ³	%BS	Kg/m ³	Mol/L	Kg/m ³	Kg/m ³			%BS	Kg/m ³	
S۴	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۴-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۴-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
S۸	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۸-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
SC۸-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۰	۰	۱۱۹۵
BS۴	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۴-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۴-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۴	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BS۸	۷۰۰	۱۰۰	۷۰۰	۰	۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۸-۵۰	۷۰۰	۵۰	۳۵۰	۵۰	۳۵۰	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵
BSC۸-۷۵	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۷۵	۵۲۵	۸	۲۵۰	۱۰۰	۰/۵	۲/۵	۱	۷	۱۱۹۵

در جدول ۹ طرح اختلاط، وزن ماسه مورد استفاده با توجه به واکنش پذیری بالای سرباره و میزان ریزی آن 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 افزودن مقدار کائولن در طرح اختلاط نیز در افزایش مقاومت فشاری تغییری حاصل نشد؛ درصد کائولن با سرباره یکسان در نظر گرفته شد. در طرح اختلاط استفاده شده از سرباره با ثابت نگه داشتن مقدار سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری بهتری به دست آمد. در نهایت نمونه شماره ۱ در مولار ۴ و نمونه شماره ۴ در مولار ۸ انتخاب شد. دلایل انتخاب این طرح اختلاط از بین تمام نمونه‌ها به عوامل زیر بستگی داشت:

۳-۱- روش اجرای طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

برای دستیابی به اهداف مورد نظر در این پژوهش، ۱۲ طرح از ملات ژئوپلیمری ساخته شد. نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس غلظت مولاریته هیدروکسید سدیم مولار ۴ و ۸ دسته‌بندی شدند و برای هر کدام یک طرح شاهد (Ctrl) فاقد پودر کائولن در نظر گرفته شد. ملات به دست آمده را در سه مرحله درون قالب‌های آغشته به

۱- تخلخل. ۲- افزایش حجم پس از گیرش اولیه ملات. ۳- میزان چسبندگی. ۴- زمان گیرش در مقایسه با سایر طرح اختلاط- های ملات. برای مثال در نمونه طرح ۳ و ۶، تخلخل نمونه‌ها به طور محسوسی با بقیه طرح اختلاط‌های سرباره، تفاوت فاحشی داشت. به طور کلی در بتن ژئوپلیمر معیار چشمی و مقایسه طرح اختلاط‌ها با هم نقش مهمی دارد و علت آن تشکیل نشدن پیوندهای ژئوپلیمراسیون در طرح اختلاط‌های معیوب به دلیل رئولوژی نامناسب است.

روغن ریخته و هر بار با چکش مخصوص کوبش انجام شد. با توجه به نوع قالب‌های مورد استفاده با چند آزمون و خطای اولیه در ملات تازه تخلخل زیادی مشاهده گردید که دلیل آن چسبندگی بالای ملات به دیواره قالب بود. به کمک دستگاه ویبره حباب‌های هوای محبوس در داخل و اطراف قالب تا حد ممکن خارج شد. در انتها طبق شرایط عمل‌آوری یکسان قالب‌ها در گرم‌خانه قرار گرفت. جزئیات مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۹ ارائه شده است.



شکل ۲: نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از سرباره کوره آهن‌گدازی و کائولن

۴- برنامه آزمایش‌ها

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

با توجه به این که نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش از نوع ملات هستند؛ آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر، بر اساس استاندارد [۲۶] ASTM C109 و پس از عمل‌آوری نمونه‌ها در حوضچه آب با دمای حدود 24°C در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده است. به منظور انجام این آزمایش نمونه پس از عمل‌آوری تا سن مورد نظر از حوضچه خارج شده و پس از خشک نمودن سطح نمونه، داخل دستگاه جک

فشاری برای شروع آزمایش قرار می‌گیرد تا در اثر نیروی فشاری قائم که از سوی جک فشاری با سرعتی ثابت اعمال می‌شود، گسیخته شود. پس از گسیخته شدن نمونه نیروی فشاری ماکزیمم توسط دستگاه ثبت می‌شود. عدد ثبت شده در لحظه شکست توسط گیج دستگاه به عنوان مقدار بار فشاری P در رابطه زیر قرار داده می‌شود. تنش فشاری مکعبی حاصل مطابق رابطه (۱) با تقسیم این نیرو بر سطح مقطع نمونه به دست می‌آید. شکل ۳ لحظه شکست نمونه را نشان می‌دهد.

$$f = \frac{P}{A} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱) f، مقاومت فشاری (MPa)؛ P، نیروی حداکثر فشاری (N)؛ A، سطح مقطع بتن (mm^2) است.



شکل ۳: مقاومت فشاری نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از کائولن و سرباره

۴-۲- آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

میلی‌متر انجام پذیرفت. نمونه‌ای از این آزمایش در شکل ۴ قابل مشاهده است هر نمونه را در دو لایه قالب‌گیری 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 0.2 Mpa/Sec در نظر گرفته شده است.

است. در این روش پس از ساختن بتن با استفاده از الک نمره چهار سنگدانه‌های درشت آن جدا می‌شوند. این آزمایش بر اساس مقادیری در برابر نفوذ یک میله فولادی به اندازه 25 ± 2 میلی-متر در خمیر استوار است. طبق تعریف وقتی که مقادیر مقاومت خمیر در برابر نفوذ به ترتیب به $3/5$ و $27/6$ مگاپاسکال برسند، گیرش‌های اولیه و نهایی حاصل می‌شود. البته زمان‌های گیرش را می‌توان با استفاده از روش سوزن ویکت عنوان شده در آیین‌نامه انگلستان (BS 4550) و یا آیین‌نامه آمریکا (ASTM C ۱۹۱) و یا سوزن گیلور (ASTM C ۲۶۶) نیز تعیین کرد. اما روش‌های فوق برای بتن چندان مناسب نیستند، چرا که نسبت آب به مصالح سیمانی به کار رفته در این روش‌ها با این نسبت در بتن متفاوت است [۲۸]. تنها شیوه استاندارد روش مقاومت در برابر نفوذ است که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است. نمونه‌ای از این آزمایش در شکل شماره ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۶: گیرش نمونه آزمایشی تحت آزمایش ویکت

۴-۵- آزمایش مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته بتن خاصیتی از بتن است که با ضریب زاویه یا برابر با تانژانت منحنی تنش-کرنش (تغییر طول نسبی) بتن می‌باشد. برای محاسبه ضریب ارتجاعی بتن یا همان مدول الاستیسیته از نمونه استوانه‌ای استاندارد (ارتفاع ۳۰ و قطر ۱۵ سانتی‌متر) و عمل‌آوری شده تا سن ۲۸ روزه استفاده می‌شود.

آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C ۲۹۳ [۲۷] به کمک نمونه‌هایی با ابعاد $40 \times 40 \times 160$



شکل ۴: مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از کائولن و سرباره

۴-۳- آزمایش کشش برزیلی یا شکافت استوانه‌ای

آزمایش کشش بتن به روش غیر مستقیم یا برزیلی براساس استاندارد ASTM C ۴۹۶ انجام می‌شود [۲۶]. نمونه‌ای از این آزمایش در شکل شماره ۵ قابل مشاهده است. نمونه‌های استوانه‌ای مطابق استاندارد ASTM C ۱۹۲ [۲۷] 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 ۵: نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش کشش برزیلی

۴-۴- آزمایش زمان گیرش بتن (سوزن ویکت)

از روش مقاومت در برابر نفوذ [۲۹] (ASTM ۴۰۳) برای تعیین زمان‌های گیرش اولیه و نهایی بتن استفاده شده

این میکروسکوپ یکی از روش‌های تولید تصاویر به وسیله روبش یک پرتو الکترونی بر روی سطح نمونه است. توسط این روش تصاویر سه بعدی از ساختار 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. با هدف از تصویربرداری برای بررسی ریزساختار ملات استفاده شده است [۳۱].

۵- بحث و بررسی نتایج

۵-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمونه‌های مکعبی حاوی ملات ژئوپلیمری پس از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت با دمای اون 110°C عمل‌آوری شد. آزمونه‌ها پس از قالب‌برداری در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت فشاری آنها با قرار دادن در دستگاه بتن‌شکن به دست آمد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سنین مختلف در شکل ۸ آمده است.

مقاومت فشاری (MPa)	S4	SC50-4	SC75-4	S8	SC50-8	SC75-8	BS4	BSC50-4	BSC75-4	BS8	BSC50-8	BSC75-8
7 روزه	۱۵/۵۹	۱۱/۵۹	۹/۲۶	۲۵/۱۹	۱۰/۵۱	۶/۹۵	۱۰/۶۸	۹/۸۵	۸/۲۹	۱۸/۱۶	۹/۱۱	۷/۱۷
28 روزه	۲۴/۵۹	۱۶/۲۵	۱۳/۹۱	۳۶/۵۹	۲۰/۰۱	۱۱/۴۲	۲۱/۱۲	۱۵/۸۸	۱۲/۱۳	۳۲/۲۳	۱۶/۳۵	۹/۹۶
90 روزه	۴۱/۳۹	۲۱/۲۹	۱۲/۷۷	۵۰/۴۵	۲۳/۵۴	۹/۹۴	۳۰/۸۴	۱۹/۱۳	۱۲/۸۳	۳۸/۰۵	۲۰/۱۹	۱۰/۲۴

شکل ۸: مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ملات‌های ژئوپلیمری

بیشترین اثرگذاری ناشی از افزایش غلظت هیدروکسید سدیم به طرح SC75 مربوط بود؛ به طوری که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از مولار ۴ به ۸ باعث افت ۲۵٪ مقاومت فشاری ۷ روزه برای این نمونه طرح شده است.

بررسی افزایش غلظت هیدروکسید سدیم در نمونه‌های حاوی ۷۵٪ پودر کائولن و مقایسه آن با نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن

مطابق با شکل ۷ برای انجام این آزمایش ابتدا استوانه بتنی را درون دو حلقه فلزی که فاصله عمودی آنها از یکدیگر ۱۵۰ میلی‌متر است قرار داده شد و در آن کرنش‌سنجی تعبیه شد. سپس به همراه استوانه قائم در زیر دستگاه فشار قرار داده شد. با محاسبه نیروی متناظر تنش در محدوده ارتجاعی بتن، تعداد دورهای کرنش‌سنج پس از رسیدن عقربه دستگاه به نیروی محاسبه شده قرائت گردید و سپس در عدد 0.02 ضرب شد تا بدین ترتیب تغییر طول نمونه بین دو نوار فلزی که به فاصله 150mm از یکدیگر است، به دست آید. برای به دست آوردن کرنش متناظر در محدوده ارتجاعی بتن، تغییر طول نمونه بین دو نوار فلزی به فاصله اولیه آن (150mm) تقسیم می‌شود. با تقسیم تنش اعمال شده به کرنش به دست آمده مدول الاستیسیته بتن محاسبه می‌شود. محدوده تنش خطی بتن به صورت $f_c' < 0.4 \times F_c'$ تعریف می‌شود، که در آن F_c' مقاومت فشاری نهایی و f_c' تنش متناظر با $0.4 F_c'$ بتن است. این روش استاندارد توسط ASTM C 469 [۳۰] پیشنهاد شده است.



شکل ۷: نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش مدول الاستیسیته

۶-۴- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه نشان می‌دهد در نمونه‌های حاوی سدیم هیدروکسید با غلظت مولار ۴، جایگزینی پودر کائولن با سرباره در تمام درصدهای وزنی باعث کاهش مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری شد. افزایش غلظت مولاریته هیدروکسید سدیم در مخلوط ملات ژئوپلیمری باعث افت مقاومت فشاری در سنین اولیه (۷ روز) برای تمامی نمونه‌ها شده است.

هیدروکسید سدیم باعث افزایش روند مقاومت فشاری زودرس می-شود؛ دلیل این امر احتمالاً ناشی از افزایش میزان انحلال و در نتیجه تسریع روند ژئوپلیمریزاسیون است.

۲-۵- نتایج آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

بررسی نتایج به دست آمده از شکل ۹ 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 ۴-BSC۷۵ 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 ۴-SC۵۰ و ۸-۵۰ BSC نکته جالبی به این شرح حاصل شد. به کار بردن پلیمر بوتادین استایرن رابر در نمونه ۸-BSC۵۰ و ۵۰٪ پودر سرامیک کائولن و ۵۰٪ 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 ۸-BSC۵۰ 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 سورفکتنت در ساختار خود به منظور ممانعت از کلوخه شدگی ذرات و افزایش روانی، سبب حباب‌سازی در ریز ساختار ملات تازه می‌شوند. 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 نمونه‌های ژئوپلیمری مورد مطالعه تأثیر مستقیم داشته باشند.

در نمونه ۴-BSC۷۵ به دلیل استفاده از پلیمر و ۷۵٪ پودر سرامیک کائولن و ۲۵٪ سرباره در مولاریته ۴ کمترین مقاومت خمشی نسبت به بقیه نمونه‌های طرح اختلاط مشاهده گردید؛ در حالی که در نمونه طرح ۸-BSC۷۵ با توجه به استفاده از پلیمر و ۷۵٪ کائولن و ۲۵٪ سرباره در مولار ۸ مقاومت خمشی بهتری نسبت به نمونه طرح ۴-

بر بهبود مقاومت فشاری ۷ روزه، اثرگذاری کمتری را نشان داد؛ به طوری که میزان کاهش مقاومت برای طرح‌هایی با جایگزینی ۷۵٪ پودر کائولن به طور میانگین به ۱۹/۵٪ رسید؛ اما این عدد برای نمونه-هایی با جایگزینی ۵۰٪ پودر کائولن ۸٪ بود. دلیل این امر مقدار اضافی پودر سرامیک کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ کائولن است که واکنش ژئوپلیمراسیون ایجاد نکرده و باعث خودخشکیدن بتن شده است. به عبارت دیگر کائولن آب مورد نیاز بتن را جذب کرده و آب کافی برای انجام واکنش هیدراسیون از بین رفته است [۳۲].

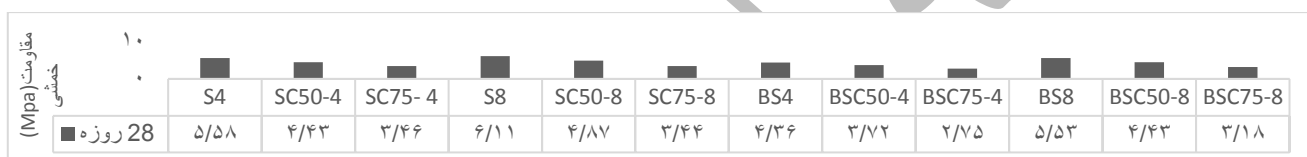
با توجه به شکل ۸ بررسی نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز نشان داد که مقاومت نمونه‌ها با مولار ۴ و ۸ نسبت به طرح شاهد افت داشته است. نمونه طرح ۸-SC۵۰ در مقایسه با نمونه شاهد S۴ نسبت به سایر نمونه‌ها عملکرد مطلوبی را از خود نشان داد. در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره، افزایش غلظت سدیم هیدروکسید سبب بهبود عملکرد نمونه‌ها گردید؛ به طوری که باعث رشد ۱۹٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه در این طرح‌ها شد. دلیل احتمالی ممکن است از محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار باشد که مقدار بیشتری از سرباره را در خود حل کرده و مقاومت فشاری بهتری را ارائه می‌کند.

نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان داد که افزایش سن عمل‌آوری تا ۹۰ روز، باعث افت مقاومت فشاری در نمونه‌هایی با جایگزینی پودر کائولن و سرباره نسبت به طرح شاهد می‌شود. برای مثال در طرح ۸-SC۵۰ مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه شاهد S۴ حاصل شد. در میان نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن نسبت به طرح شاهد S۴، افت مقاومت فشاری ۵۷٪ را نشان داد. علت آن می‌تواند ناشی از مقدار اضافی پودر سرامیک کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ کائولن است که باعث خودخشکیدن بتن شده است [۳۲].

مطالعه نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین مختلف نشان داد که جایگزینی پودر کائولن با سرباره در درصدهای وزنی مختلف اثر مستقیم بر نتایج مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری دارد؛ چنانکه در تمام سنین برای نمونه طرح‌ها جایگزینی ۵۰٪ پودر کائولن با سرباره باعث افت عملکرد می‌شود و افزایش درصد جایگزینی پودر کائولن در نمونه‌ها باعث افت مقاومت فشاری می‌گردد. بررسی نتایج نشان داده-اند که غلظت محلول هیدروکسید سدیم از دیگر پارامترهای موثر بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری بوده است. این موضوع به ویژه در نتایج مربوط به مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز قابل توجه بود؛ به طوری که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از مولار ۴ به ۸، سبب شد مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نمونه طرح ۸-SC۵۰، ۲۰٪ افزایش یابد؛ اما این مقدار برای سن ۹۰ روزه ۱۰٪ به دست آمد. زیرا افزایش غلظت محلول

آب مورد نیاز بتن جذب شده و آب لازم را برای انجام واکنش از دست داده بود [۳۲]. با توجه به استفاده از مواد چسباننده جامد در نمونه طرح BS۴ و مقایسه آن با نمونه طرح ۸-SC۵۰، نمونه دوم که ترکیبی از ۵۰٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره بود، مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه شاهد از خود به روز داد. دلیل آن را می توان 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 نمونه های ۵۰٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره شده است؛ ولی نسبت به نمونه طرح شاهد، مقاومت خمشی کمتری داشته است. در نهایت با توجه به شکل ۹ در آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه ای نمونه ۸-SC۵۰ در مولار ۸ نسبت به بقیه نمونه های ترکیبی، مقاومت بیشتری را از خود نشان می دهد.

BSC۷۵ حاصل شد. دلیل این امر ترکیب محلول سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات بود. محلول های سدیم هیدروکسید با غلظت مولار ۸، بیشترین مقدار ماده را از پیش منبع در خود حل کرده و بیشترین مقدار مقاومت خمشی را ارائه می کند. در مقایسه دو نمونه طرح شاهد S۴ و BS۸ با توجه به استفاده از مواد چسباننده جامد در نمونه BS۸، مقاومت خمشی تقریباً یکسانی وجود داشت. دلایل این امر وجود مواد چسباننده جامد در نمونه طرح BS۸، چسبندگی عالی خمیر ژئوپلیمر به ذرات سنگدانه، شکنندگی قابل توجه ژئوپلیمر و مقدار ماسه در ملات بود که بر مقاومت خمشی ملات ژئوپلیمر تأثیرگذار بودند [۳۳]. در دو نمونه طرح SC۷۵ در مولار ۴ و ۸ با توجه به استفاده از ۷۵٪ پودر کائولن و ۲۵٪ سرباره، مقاومت خمشی تقریباً یکسانی مشاهده شد. دلیل این امر به مقدار اضافی کائولن بتن در ملات ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ پودر کائولن مرتبط بود که واکنش ژئوپلیمریزاسیون نداده و باعث خودخشکیدن بتن شد. بدین معنا که

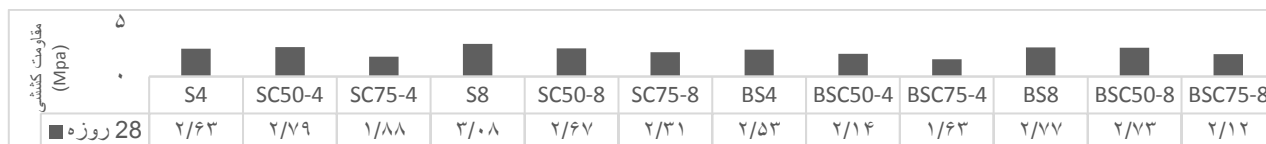


شکل ۹: مقاومت خمشی سه نقطه ای ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سرباره کوره آهنگدازی

گسترده تری را در ساختار مخلوط های ژئوپلیمری تشکیل دهد. مطابق شکل افزودن پودر سرامیک کائولن به ملات ژئوپلیمری سبب افزایش مقاومت کششی نمونه ها شد. همان گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می شود بیشینه مقاومت کششی به نمونه طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک کائولن (SC۵۰-۴، ۸-SC۵۰، BS۵۰-۸) و ۸-SC۵۰) مرتبط است. به طور کلی خواص مکانیکی بتن های ژئوپلیمری وابستگی زیادی به نسبت SiO_2/Al_2O_3 دارد. با افزایش این نسبت، میزان حلالیت یون ها و فرآیند پلیمریزاسیون افزایش می یابد که این امر سبب بهبود مقاومت کششی نمونه ها می شود [۳۴]. به عبارت دیگر با افزودن پودر سرامیک کائولن، SiO_2 فعال بیشتر می شود و این امر سبب ایجاد پیوندهای سیلیکونی ($Si-O-Si-O$) می گردد. این پیوند زنجیری شکل تمامی اجزای بتن را در کنار یکدیگر نگه می دارد و یک ترکیب پیوسته ایجاد می کند. ضمناً نرمی بالای ذرات کائولن و شکل کروی آنها با پر کردن خلل و فرج بتن، سبب ایجاد ساختار متراکم تری در آن می شود.

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

نمونه های استوانه ای 10×20 cm ملات ژئوپلیمری پس از قالب ریزی به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه عمل آوری شدند. پس از قالب برداری و نگهداری در محیط آزمایشگاه در سن ۲۸ روز شکست برزیلی روی آنها انجام گرفت. نتایج شکل ۱۰ نشان می دهد کمترین مقاومت کششی مربوط به نمونه طرح BSC۷۵-۴ و بیشترین مربوط به نمونه طرح S۸ است. علت آن را باید در طرح ترکیبی ۷۵٪ کائولن و ۲۵٪ 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 ارتجاعی پلیمر پس از پلیمریزاسیون در ساختار مخلوط) و تا حدودی به ابعاد ذرات پلیمر بستگی داشته باشد؛ به طوری که هر چه ابعاد ذرات پلیمر بزرگ تر باشد، می تواند فیلم های



شکل ۱۰: مقاومت کششی برزیلی نمونه‌های ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سرباره کوره آهنگدازی

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

با توجه به شکل ۱۰ در مورد نمونه‌های طرح شاهد به جز S8 با وجود مواد چسباننده جامد، مقاومت کششی کمتری مشاهده شد. نمونه‌های طرح اختلاط SC50-8، SC50-4 و BSC50-8 به ترتیب در مقایسه با نمونه طرح‌های اختلاط شاهد BS4، BS8 و S4 مقاومت کمتری را از خود نشان دادند. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که با توجه به نسبت ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره 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.

۴-۵- نتایج آزمایش زمان گیرش بتن (سوزن و یکات)

طبق روش ارائه شده در [۲۹] ASTM C 403 زمانی که مقدار مقاومت در برابر نفوذ ملات به ترتیب برابر ۳/۵ و ۲۷/۶ مگاپاسکال باشد، گیرش‌های اولیه و نهایی حاصل می‌گردد. در شکل ۱۱ مقدار گیرش‌های اولیه و نهایی مخلوط ملات‌های ژئوپلیمری ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزینی سرباره از مقدار ۵۰٪ به ۲۵٪ و پودر کائولن از ۵۰٪ به ۷۵٪ به جای سیمان، مقادیر گیرش اولیه و نهایی افزایش می‌یابد؛ زیرا پودر کائولن در ابتدا از نظر شیمیایی فعال نیست و پس از هیدراتاسیون سرباره و تولید کلیسم هیدروکسید است که می‌تواند فعالیت پوزولانی خود را آغاز کند [۳۵]. در واقع چون با افزایش پودر کائولن مقدار سرباره مخلوط کاهش می‌یابد، زمان بیشتری لازم است که بتن جوان دارای سرباره کمتر در برابر نفوذ مشخصی از خود مقاومت نشان دهد. البته با افزایش مقدار پودر کائولن و کاهش مقدار سرباره، نسبت فوق روان‌کننده به سرباره افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به عنوان دلیل افزایش زمان

مطابق شکل ۱۰ نمونه طرح‌های اختلاط BSC75-4، BS8، SC4، SC75-8 و BSC75-8 با ترکیب ۷۵٪ پودر سرامیک کائولن و ۲۵٪ سرباره کوره آهنگدازی به ترتیب چگونگی مقاومت کششی را نشان می‌دهد. در نمونه طرح‌های BSC4-50، SC50-8، BS8 و BSC50-8 با ترکیب ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره به ترتیب از مقاومت کششی کم به زیاد نمایش داده شده است. عوامل زیادی از جمله نوع سنگدانه، نحوه توزیع آنها در بتن، تعداد فضاهای خالی و اندازه آنها و همچنین پیوستگی بین خمیر ملات و سنگدانه‌ها بر مشخصات مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارند. به طور کلی مقاومت کششی به یک پارچگی 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 کائولن ۵۰٪ و سرباره ۵۰٪ باشد مقاومت بالاتری نسبت به نمونه طرح‌های اختلاط پودر سرامیک کائولن ۷۵٪ و سرباره ۲۵٪ مشاهده می‌شود. به جز نمونه طرح اختلاط BSC50-4 در مولار ۴ که مقاومت کمتری را از خود نشان داد. علت آن به طرح ترکیبی ۷۵٪ کائولن و ۲۵٪ سرباره و اثر منفی مقدار اضافه پودر کائولن بر روی مقاومت کششی مرتبط است؛ به طوری 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٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره شده است. نکته قابل توجه در مورد نمونه طرح BSC75-8 در مولار ۴ و ۸ این است که نمونه طرح BSC75-8 نسبت به نمونه طرح BSC75-4 مقاومت بالایی داشت؛ اگر چه در هر دو از پلیمر بوتادین استایرن رابر استفاده شده بود. در مقایسه نمونه‌های طرح BSC50-8 در مولار ۴ و ۸ شاهد مقاومت بالاتری در نمونه طرح BSC50-8 بودیم. نکته جالب توجه در آزمایش مقاومت کششی به روش برزیلی در دو نمونه طرح BS8 و BSC50-8 این است که در نمونه BSC50-8 با

مخلوط وابسته است و در زمان‌های اولیه دمای مخلوط بسیار بالاست، اما پس از گذشت حدود یک ساعت از ساخت آن و با کاهش دما این واکنش‌ها بسیار کند می‌شود. افزایش پودر کائولن موجب کاهش میزان مواد شیمیایی لازم برای سرباره شده و فرآیند تشکیل ژئوپلیمر را با سختی روبه‌رو می‌کند و زمان گیرش نهایی افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت سدیم هیدروکسید، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی کاهش می‌یابد. مشاهدات حین ساخت نشان داد که بین دو محلول ساخته شده شیمیایی، سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات، محلول اول بیشترین دما را داشت. علت کاهش زمان گیرش، به افزایش دمای ایجاد شده مربوط است. دمای اولیه محلول سدیم هیدروکسید مولار ۴، در حدود 75°C و با غلظت مولار ۸، نزدیک به 90°C است. به این ترتیب کاهش زمان گیرش به علت افزایش دمای مخلوط، ناشی از افزایش غلظت می‌باشد.

گیرش با افزایش مقدار پودر کائولن عنوان شود. زمان گیرش اولیه ملات‌های ژئوپلیمری بین ۱۱۵ تا ۴۴۰ دقیقه و زمان گیرش نهایی بین ۱۳۵ تا ۵۱۵ دقیقه اندازه‌گیری شده است. به طوری که هر چه مقادیر چسب ژئوپلیمری، شامل سرباره و محلول‌های شیمیایی بیشتر باشد، زمان گیرش کمتری لازم است. دلیل این امر افزایش دمای تولید شده بر اثر بیشتر بودن چسب ژئوپلیمری است، به طوری که با افزایش دمای مخلوط به سبب اضافه شدن مواد اولیه شیمیایی، فرآیند واکنش‌های ژئوپلیمری تسریع می‌یابد و زمان گیرش آن کاهش پیدا می‌کند. در این پژوهش با افزودن میزان پودر کائولن ۷۵٪ و سرباره ۲۵٪ بین دو طرح اختلاط SC۵۰ و SC۷۵ در مولار ۴، میزان گیرش اولیه بتن حدوداً از ۳ دقیقه به ۵ دقیقه و گیرش نهایی بتن تقریباً از ۴ دقیقه به ۶/۵ دقیقه افزایش داشته است. علت این تفاوت در این است که فرآیند ژئوپلیمریزاسیون به شدت به دمای

	S4	SC50-4	SC75-4	S8	SC50-8	SC75-8	BS4	BSC50-4	BSC75-4	BS8	BSC50-8	BSC75-8
گیرش اولیه (دقیقه)	135	185	295	115	160	285	240	250	440	205	220	360
گیرش نهایی (دقیقه)	160	220	355	135	205	335	275	295	515	235	275	425

شکل ۱۱: مقایسه زمان گیرش (وبیکا) ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سرباره کوره آهن‌گدازی در سن ۲۸ روز

سدیم سیلیکات محلول، بهترین فعال ساز را ایجاد می‌کند. محلول‌های سدیم هیدروکسید با غلظت مولار ۸، مقدار بیشتری از سرباره را در خود حل کرده و مقاومت مدول الاستیسیته بهتری را ارائه می‌کنند. زمانی که در طرح اختلاط از پلیمر استفاده شد در مقایسه دو نمونه طرح ۸-۸ BSC۵۰ با ۸-۸ SC۵۰ در سن ۲۸ روز مقاومت بهتری ایجاد شد. این امر به مقدار اضافی پودر کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۵۰٪ کائولن نسبت به نمونه طرح شاهد ارتباط داشت که واکنش ژئوپلیمراسیون نداده و باعث خود خشکیدن بتن شده است. البته نمونه طرح ۸-۸ SC۵۰ در سن ۲۸ روز مقاومت بهتری را نشان داد؛ چون افت نمونه طرح ۸-۸ BSC۵۰ در سن ۲۸ روز ناشی از وجود پلیمر (SBR) است. در مقایسه دو نمونه طرح شاهد S۴ و S۸، نمونه طرح S۸ به علت سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات در مولار ۸ بیشترین مقاومت را از خود نشان داده است.

۵-۵- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته

نتایج آزمایش مدول الاستیسیته و میزان تأثیر پودر کائولن و سرباره بر نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۱۲ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد افزایش درصد جایگزینی پودر کائولن باعث افت مدول الاستیسیته شده است. با توجه به نتایج شکل ۱۲، کمترین مقاومت مدول الاستیسیته ۲۸ روزه مربوط به نمونه طرح ۴-۴ BSC۷۵ و بیشترین مقاومت مدول الاستیسیته ۲۸ روزه مربوط به نمونه طرح S۸ اختصاص یافت. در نمونه طرح ۴-۴ BSC۷۵ با افزودن ۷۵٪ پودر کائولن در کنار ۲۵٪ سرباره و پلیمر (SBR)، افت مقاومت بسیاری مشاهده شد. در مقایسه نمونه شاهد طرح اختلاط در مولار ۸، مقاومت بهتری نسبت به مولار ۴ حاصل شد زیرا ترکیب سدیم هیدروکسید با

مدول الاستیسیته	S4	SC50-4	SC75-4	S8	SC50-8	SC75-8	BS4	BSC50-4	BSC75-4	BS8	BSC50-8	BSC75-8
28 روزه	26/41	6/73	2/82	30/63	16/86	4/26	12/73	8/61	1/62	20/43	15/78	6/23

شکل ۱۲: مدول الاستیسیته ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سرباره کوره آهن‌گدازی در سن ۲۸ روز

۶-۵- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در شکل ۱۳-۱۵ تصاویر SEM از سطح شکست ۲۸ روزه نمونه BSC۴-۵۰ حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره و پلیمر (SBR) ارائه شده است. در این تصاویر ساختار ترکیبات مختلف، ترک‌ها و حفره‌ها نیز مشاهده می‌شود. نمونه BSC۴-۵۰ دارای ساختارهای منسجم و متراکم C-A-S-H و C-S-H 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 [۳۶]. با مقایسه این تصاویر می‌توان استنباط نمود که چسبندگی بین پودر کائولن و سرباره در نمونه بتن ژئوپلیمری مطلوب است. از طرف دیگر فاز زمینه حاوی پودر کائولن بر روی سطح سرباره الحاق یافته و سطح شکست کائولن ناهموار است؛ اما در نمونه‌هایی که پودر کائولن درون زمینه توزیع نشده‌اند، سطوح سرباره هموار و عاری از هر گونه رزین زمینه روی آن است که حاکی از چسبندگی ضعیف بین زمینه پلیمری و پودر کائولن است.

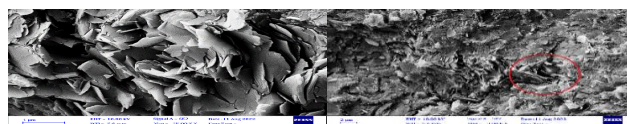
در شکل ۱۳ و ۱۴ تصویر میکروسکوپی از سطح شکست زمینه پودر کائولن ۵۰٪ و سرباره ۵۰٪ و پلیمر (SBR) نشان داده شده است. در این رابطه ناهمواری‌هایی در سطح شکست ملاحظه می‌گردد و انحراف ترک ایجاد شده بر اثر آزمایش مقاومت مشاهده می‌شود که از دلایل اصلی افزایش جذب انرژی در نمونه‌های ژئوپلیمری شامل پوزولان پودر کائولن به شمار می‌رود. با توجه به شکل ۱۳ (الف) کلوخه‌هایی از نانوصفحات 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 می‌گردد 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 [۳۷ و ۳۸].

در ارتباط با نمونه BSC۴-۵۰، چسبندگی مناسبی بین پودر کائولن و زمینه ژئوپلیمری دیده می‌شود. در شکل ۱۴ (ب) حضور آگلومره‌های نانوذرات در نمونه BSC۴-۵۰ مشهود است که این

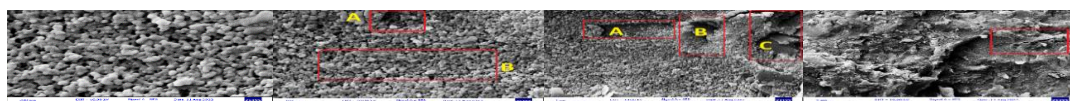
آگلومره‌ها به عنوان نواحی تمرکز تنش در زمینه عمل کرده و به ایجاد و اشاعه ترک و افت خواص مکانیکی کمک شایانی می‌کند [۳۷]. این مشاهدات با نتایج آزمون‌های مکانیکی گزارش شده در بخش قبلی تطابق دارد. میزان درصد وزنی عناصر در بتن ژئوپلیمری در شکل ۱۵ توسط آزمون EDX اندازه‌گیری شد.

نانوساختار C-S-H و C-A-S-H دارای تنوع گسترده‌ای است و با توجه به چگونگی 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 برای ایجاد پیوند محکم‌تر و برای از بین بردن منافذ در ژئوپلیمرها به وجود می‌آید. با توجه به نسبت وزنی عناصر نمونه‌های ژئوپلیمری با آزمون EDX، می‌توان نتیجه گرفت محیط مناسبی برای تشکیل نانو ساختارهای C-S-H وجود دارد. پژوهش‌ها نشان داده که با افزایش دما تا حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس به علت تبخیر شدن آب فیزیکی، ساختار نمونه تراکم بیشتری پیدا کرده است و با رشد نانو ساختارهای C-A-S-H و C-S-H این میکرو ترک‌ها از بین رفته است [۳۹ و ۴۰]. نسبت بالای Si/Al ژئوپلیمریزاسیون بسیار مناسبی را در ترکیب نشان می‌دهد. از طرفی با توجه به مقدار Ca موجود می‌توان نتیجه گرفت که ساختار N-A-S-H تشکیل شده در ژئوپلیمر، در عین داشتن مشخصات مقاومتی مناسب، ترکیبات قلیایی ناپایدار در PH های کمتر از ۱۲ محسوب می‌شود. با حضور مقدار مناسب Ca ناشی از وجود 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 ۱۳ و ۱۴ برخی ذرات کائولن واکنش نداده نیز ملاحظه می‌شوند. در 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 کند. در شکل ۱۴ (الف و ب) ناحیه اتصال بین سنگدانه و خمیره مشاهده می‌شود. چنانکه در تصویر مشخص است، جداشدگی در برخی نواحی ITZ قابل تشخیص است و این امر می‌تواند به وجود آب در این نواحی مربوط باشد که بعد از قرارگیری در حرارت به علت فشار ناشی از خروج بخار آب باعث جداشدگی و ترک در ناحیه انتقال شده است که می‌توان آن را به واکنش‌های کائولن در ساختار نمونه نسبت داد.



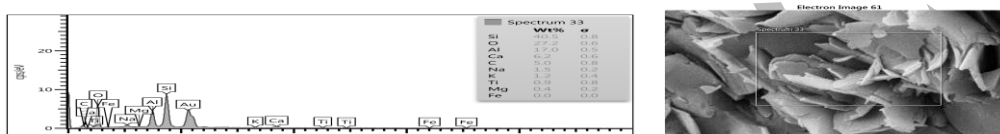
(الف) (ب)

شکل ۱۳: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه BSC50-4



(الف) (ب) (ج) (د)

شکل ۱۴: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه BSC50-4

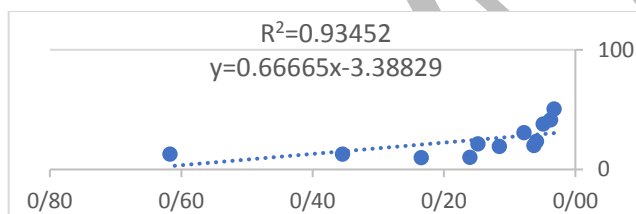


شکل ۱۵: آنالیز EDS نمونه طرح BSC50-4 حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره کوره آهنگدازی و پلیمر استایرن بوتادین رابر (SBR)

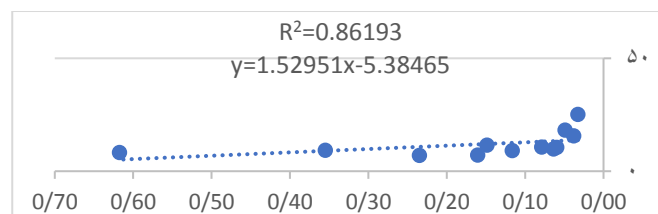
۶-۶- همبستگی بین نتایج آزمایش‌ها

خصوصیات آن داشته باشیم. به این منظور نتایج آزمایش‌ها در سنین مختلف با هم مقایسه شده‌اند و ارتباط میان داده‌ها با عبور خطی که کمترین پراکندگی را نسبت به داده‌ها داشته باشد مشخص شده است. به این منظور از بین خطوط عبوری خطی که بیشترین R^2 را داشته باشد انتخاب شد. ارتباط بین نتایج مختلف به دست آمده در آزمایش‌های انجام شده در شکل‌های ۱۷-۲۱ دیده می‌شود.

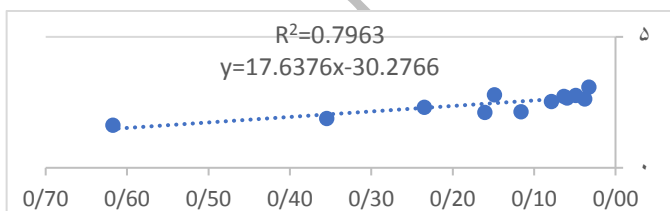
در این قسمت با مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف سعی داریم رابطه بین آن‌ها و میزان همبستگی نتایج آزمایش‌ها را تعیین کنیم. تعیین ارتباط میان آزمایش‌های مختلف ما را قادر می‌سازد تا با آگاهی از بعضی خصوصیات بتن، پیش‌بینی نزدیکی نسبت به دیگر



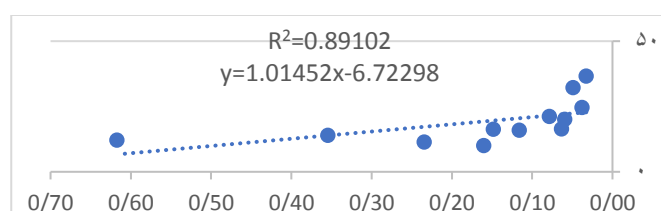
شکل ۱۹: ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۹۰ روزه ملات ژئوپلیمری.



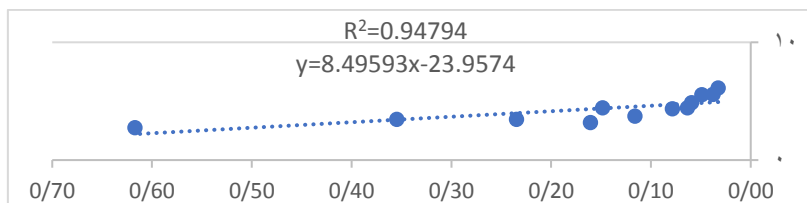
شکل ۱۷: ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۷ روزه ملات ژئوپلیمری.



شکل ۲۰: ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت کششی ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری.



شکل ۱۸: ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری.



شکل ۲۱: ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت خمشی ۲۸ روزه ملات ژئوپلیمری.

نکته قابل توجه در مورد نمونه طرح BSCY5 در مولار ۴ و ۸ این است که نمونه طرح ۸-BSCY5 نسبت به نمونه طرح ۴-BSCY5 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 می‌یابد که علت این امر کامل شدن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر و در نتیجه افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها است. نکته حائز اهمیت در آزمایش مقاومت کششی دو نمونه طرح BS8 و 8-BSC50 این است که در نمونه 8-BSC50 با وجود استفاده از پلیمر بوتادین استایرن رابر و نسبت ۵۰٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره، مقاومت تقریباً یکسانی نسبت به نمونه طرح BS8 دیده می‌شود.

در صورت وجود کائولن نتایج به دست آمده از آزمایش زمان گیرش بتن حاکی از افزایش زمان‌های گیرش اولیه و نهایی بتن است. با افزایش درصد کائولن از ۵۰٪ به ۷۵٪ مقدار کندگیری مخلوط افزایش می‌یابد. در تمام آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش مقدار و نوع فوق روان کننده مصرف شده ثابت نبوده است. نظریه غالب پژوهشگران آن است که افزایش همزمان میزان کائولن و فوق روان کننده در مخلوط نیز بر میزان کندگیری بتن می‌افزاید.

افزایش درصد جایگزینی پودر کائولن باعث افت مدول الاستیسیته شده است؛ به طوری که با افزایش درصد جایگزینی پودر کائولن از ۵۰٪ به ۷۵٪ در نمونه طرح 4-BSCY5 مدول الاستیسیته (۱/۴۲Gpa) را نشان می‌دهد. همچنین ارتباط مشخصی بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن ژئوپلیمری مشاهده شد. در مقایسه نمونه شاهد طرح اختلاط در مولار ۸، مقاومت بهتری نسبت به مولار ۴ حاصل شد؛ زیرا ترکیب سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات محلول، بهترین فعال ساز را ایجاد می‌کند. محلول‌های سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار، مقدار بیشتری از سرباره را در خود حل کرده و مقاومت مدول الاستیسیته مطلوبی را ارائه می‌کنند.

ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته ۲۸ روزه و مقاومت فشاری (۷، ۲۸، ۹۰) روزه در شکل ۱۷-۱۹ ارائه شده است. ضریب همبستگی مدول الاستیسیته ۲۸ روزه با مقاومت فشاری ۹۰ روزه عملکرد مطلوبی را نشان داد. دلیل آن رخ دادن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری است. با توجه به شکل ۲۰ ضریب همبستگی بالایی بین مدول الاستیسیته و مقاومت کششی ۲۸ روزه برقرار نیست. مطابق شکل ۲۱ ضریب همبستگی بین مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی ۲۸ روزه به دلیل فرآیند هیدراتاسیون مطلوب نتیجه بهتری از خود نشان داد.

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 در بر داشت.

نمونه‌های طرح 4-SC50 و 8-BSC50، با توجه به استفاده از پلیمر در نمونه 8-BSC50، مقاومت خمشی هر دو نمونه یکسان و عدد ۴/۴۳ مگاپاسکال بدست آمد که عدم تأثیرگذاری پلیمر را در مقاومت خمشی بیان می‌کند.

نمونه طرح‌های شاهد S4 و BS8 به سبب مواد چسباننده جامد در نمونه BS8، مقاومت خمشی تقریباً یکسانی مشاهده شد. با توجه به استفاده از ۷۵٪ پودر سرامیک کائولن و ۲۵٪ سرباره در دو نمونه طرح SCY5 در مولار ۴ و ۸، 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 می‌شود؛ بجز نمونه طرح اختلاط 4-BSC50 در مولار ۴ که مقاومت کمتری را از خود نشان می‌دهد.

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 تصویربرداری 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.

با توجه به نتایج بدست آمده ترکیب کائولن و سرباره با درصد مساوی نسبت به طرح‌های شاهد توصیه می‌شود؛ چرا که ۷۵٪ پودر کائولن و ۲۵٪ سرباره باعث افت خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری می‌شود.

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.

مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در ارتباط با نمونه‌های حاوی ۷۵٪ پودر کائولن نسبت به نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن، به علت آگلومره شدن نانوذرات، افت خواص مکانیکی در نانوذرات مشاهده شد که به دلیل تجمع نانوذرات در این درصد وزنی است.

منابع

- [1] A.A., Ramezani pour, A., Kazemian, M.A., Moghaddam, F., Moodi, and A.M., Ramezani pour, Studying effects of low-reactivity GGBFS on chloride resistance of conventional and high strength concretes. *Materials and Structures*, pp.1-13. (2015).
- [2] A.A., Ramzani pour, A., Zulfiqaransab, F., Bahmanzadeh, M.R., Pourabrahimi, S., Hasanpour, R., Bushehri, & A.M. Ramzani pour, "Evaluation of the performance of strong concrete against sulfuric acid attack", 7th Annual Conference of Iranian Concrete, Tehran. (2014).
- [3] X. C., Pu, C. C., Gan, S. D. Wang, and C. H. Yang, "Summary reports of research on alkali activated slag cement and concrete," Chongqing Institute of Architecture and Engineering, Chongqing, pp. 1-6. (1988).
- [4] S. A., Bernal, R. M., de Gutiérrez, A. L., Pedraza, J. L., Provis, E. D. Rodriguez, and S. Delvasto, "Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes," *Cement and Concrete Research*, 41(1), pp. 1-8. (2011).
- [5] C., Shi, P.V. Krivenko, and D. Roy, "Alkali-Activated Cements and Concretes," Taylor & Francis, New York. (2006).
- [6] S. D., Wang, X. C., Pu, K. L. Scrivener, and P. L. Pratt, "Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems," *Advances in Cement Research*, 7(27), pp. 93-102. (1995).
- [7] Z. Yunsheng, S., Wei, & L. Zongjin, Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*, 47(3-4), 271-275. (2010). doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.002.
- [8] F. N., Okoye, J., Durgaprasad, & N. B. Singh, Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 685-691. (2015). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.009.
- [9] S., Ramasamy, K., Hussin, M. M. A. B., Abdullah, C. M. R., Ghazali, M., Binhussain, & A. V. Sandu, (2016, June). Interrelationship of kaolin, alkaline liquid ratio and strength of kaolin geopolymer. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 133, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- [10] K., Mermerdaş, S., Manguri, D. E., Nassani, and S. M. Oleiwi, Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(6), pp. 1642-1652. (2017). doi:10.1016/j.jestch.2017.11.009.
- [11] A., Sharma, J., Ahmad, Experimental study of factors influencing compressive strength of geopolymer concrete, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(5), pp. 1306-1313. (2017).
- [12] Y.J., Patel, N. Shah, Study on Workability and Hardened Properties of Self Compacted Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature, *Indian Journal of Science and Technology*, 11(1), pp. 1-12. (2018). doi: 10.17485/ijst/2018/v11i1/117698.
- [13] A. C., Bhogayata, & N. K. Arora, Workability, strength, and durability of concrete containing recycled plastic fibers and styrene-butadiene rubber latex. *Construction and Building Materials*, 180, pp. 382-395. (2018). doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.175.
- [14] L. K., Aggarwal, P. C., Thapliyal, & S. R. Karade, Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions.; 21(2), pp. 379-383. (2007). doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.007.
- [15] A. R. Bagheri, & S. Hashemi, Influence of (SBR) Latex and Silica Fume on Properties and Performance of Cement-based Repair Concretes. *jame*. 26 (2), pp. 33-47. (2008).
- [16] B., Liu, J., Shi, M., Sun, Z., He, H., Xu, & J., Tan, Mechanical and permeability properties of polymer-modified concrete using hydrophobic agent. *Journal of Building Engineering*, 31(9) 101337. (2020). doi:10.1016/j.job.2020.101337.

- [17] Y.K., Jo, Adhesion in tension of polymer cement mortar by curing conditions using polymer dispersions as cement modifier. *Construction and Building Materials*, 242, 118134. (2020). doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118134.
- [18] H. Chehrazi Sefiddashti, H. Madani, & A. Saeedikia, " Investigation and properties of cement based mixtures containing different type of polymers ", *Sharif Journal*, 36.2(3.2) pp.135-145. (2020).
- [19] F., Matalkah, R., Aqel, & A. Ababneh, Enhancement of the mechanical properties of kaolin geopolymers using sodium hydroxide and calcium oxide. *Procedia Manufacturing*, 44, 164-171. (2020). doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.218.
- [20] N., Greenwood, & A., Earnshaw, *Chemistry of the Elements* (second ed.), Butterworth-Heinemann, pp. 224-226. (2012).
- [21] ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2003).
- [22] I., Luhar, S., Luhar, M.M.A.B., Abdullah, M., Nabiałek, A.V., Sandu, J., Szmidla, A., Jurczyńska, R.A., Razak, I. H., Aziz, N.H., Jamil, & L.M., Deraman, Assessment of the suitability of ceramic waste in geopolymer composites: An appraisal. *Materials*, 14(12), 3279. (2021). doi:10.3390/ma14123279.
- [23] I.A. Bello, O.B. Olalusi, F.A. Olutoge, Effect of Salt Water on the Compressive Strength of Ceramic Powder Concrete. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6(4), pp. 158-163. (2017).
- [24] S. Yaseri, G. Hajiaghahi, F. Mohammadi, M. Mahdikhani, & R. Farokhzad, The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, 157, pp. 534-545. (2017). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.102.
- [25] H., Peng, C., Cui, C.S., Cai, Y., Liu, & Z., Liu, Microstructure and microhardness property of the interface between a metakaolin/GGBFS-based geopolymer paste and granite aggregate. *Construction and Building Materials*, 221, pp. 263-273. (2019). doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.090.
- [26] ASTM C109 / C109M-20a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2020).
- [27] ASTM C293. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials. (2016).
- [28] Aashto, T. "132- 87 Standard method of test for tensile strength of hydraulic cement mortars." AASHTO (2009).
- [29] ASTM C403/C403M-08. "Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. " Compression." ASTM International: West Conshohocken, PA, USA (2017).
- [30] ASTM C469 /C469M-22. "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression." ASTM International: West Conshohocken, PA, USA (2022).
- [31] M., Alizadeh Zolbin, S., Ghofrani, and A., Almasi, "Basics of Sample Preparation for Scanning Electron Microscope (SEM)" in "Specialized Quarterly of Iranian Laboratory Science", Iran, Tehran, Materials Engineering and Metallurgy, Materials and Energy Research Institute, (2013).
- [32] M., Elchalakani, M., Dong, A., Karrech, G., Li, M.S., Mohamed Ali, T., Xie, & B., Yang, Development of Fly Ash-and Slag-Based Geopolymer Concrete with Calcium Carbonate or Microsilica. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12) pp. 04018325-1 - 04018325-14. (2018) . doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002527.
- [33] M., Cyr, R., Idir, T., Poinot, Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science*, 47(6), 2782–2797. (2012). doi:10.1007/s10853-011-6107-2.
- [34] R., Prasanna Venkatesan, and K.C., Pazhani, Strength and durability properties of geopolymer concrete made with grafted blast furnace slag and black rice husk ash. *KSCE Journal of civil engineering*, 20(6), pp. 2384-2391. (2016). doi:10.1007/978-981-15-9162-4_22.
- [35] A.M., Neville, *Properties of Concrete*, 4th Edition, Longman, (1995).
- [36] M.A., Yazdi, M., Liebscher, S., Hempel, J., Yang, & V., Mechtcherine, Correlation of microstructural and mechanical properties of geopolymers produced from fly ash and slag at room temperature. *Construction and Building materials*, 199, 330-341. (2018).
- [37] N., Jamali, A., Rezvani, H., Khosravi, and E., Tohidlou, "On the Mechanical Behavior of Basalt Fiber/Epoxy Composites filled
- [38] H., Khosravi, R., Eslami-Farsani, and H., Ebrahimnezhad-Khaljiri, "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. (2016).
- [39] M., Aryanpour, & M., Amiri, 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. (2019).
- [40] M., Amiri, & M., Aryanpour, The Effect of High Temperatures on the Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 52 (12), pp. 2987-3002. (2021).

واژه نامه

GGBFS	XRF	Binder Solid	ASTM	انجمن
سربراره کوره آهنگدازی آمریکایی آزمایش و مواد	آنالیز طیف سنج فلورسانس اشعه ایکس		پودر چسباننده جامد	
SBR	Ceramic Powder	Sand	Alkali-Activated Materials	
استایرن بوتادین رابر	پودر سرامیک	شن	مواد فعال شده قلیایی	

SEM
ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی

Slag
سرباره

EDS-EDX
ناحیه انتقال در بتن طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس

ITZ

NaOH
هیدروکسید سدیم

Sodium Silicate
سدیم سیلیکات

MPa
مگاپاسکال

GPa
گیگاپاسکال

نسخه آماده انتشار