

مطالعه آزمایشگاهی اثر غلظت محلول‌های سیلیکات سدیم و پتاسیم هیدروکسید و دمای ساخت بر زمان گیرش و مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری

هادی نظریور^{۱*}، سید میلاد جمالی^۲

۱-استاد یار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

چکیده

ژئوپلیمرها به عنوان یک بتن بدون سیمان توجه بسیاری از محققین را در سال‌های اخیر جلب کرده است. در ساخت این نوع بتن‌ها به جای سیمان از مواد مختلفی (دارای ساختار آلومینوسیلیکاتی) مانند متاکائولن، ژئولیت و... استفاده می‌شود. برای تشکیل ماده چسباننده از محلول‌های شیمیایی جهت تکمیل فرآیند ژئوپلیمراسیون استفاده می‌شود. تهیه محلول‌های شیمیایی معمولاً گرمای زیادی آزاد می‌کند. در این تحقیق از سرباره کوره‌های آهنگدازی به عنوان جایگزین سیمان و از محلول‌های سیلیکات سدیم و پتاسیم هیدروکسید به عنوان محلول‌های شیمیایی استفاده شده است. در این تحقیق اثرات مواد شیمیایی و دمای ساخت در خواص تازه و سخت شده خمیر و ملات ژئوپلیمری ارزیابی شده است. بدین منظور ۲۰ نسبت اختلاط مختلف ساخته شد و زمان گیرش، دمای ساخت، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای آنها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد هرچه میزان مواد شیمیایی بیشتر باشد زمان گیرش کمتر شده و همزمان دمای ساخت و مقاومت فشاری بیشتری در نمونه‌ها بدست آمده است. همچنین در بین دو محلول سیلیکات سدیم و پتاسیم هیدروکسید، اثرات غلیظ تر کردن محلول سیلیکات سدیم در افزایش مقاومت و کاهش زمان گیرش بیشتر است. اثر این دو محلول بر دمای ساخت نیز بررسی شد و برای بررسی معنی داری رابطه بین آن‌ها تحلیل آماری صورت گرفت. همچنین رابطه بین مدول الاستیسیته ملات‌های ساخته شده با مقاومت فشاری بدست آمد. عکس‌های میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها با بیشترین و کمترین میزان مقاومت نشان داد، بیشتر بودن مواد شیمیایی و دمای ساخت موجب تشکیل بیشتر ژل ژئوپلیمر سخت شده گردیده و عرض ترک‌های مشاهده شده در طرح با محلول‌های شیمیایی کمتر، نزدیک به ۳ برابر بیشتر است. همچنین آزمایش پرتو نگاری اشعه X برای نمونه‌ها نشان داد شدت بازتابش در نمونه با مقاومت پایین بیشتر بوده که حاکی از کمتر از تشکیل شدن ژئوپلیمر سخت شده به دلیل کاهش غلظت مواد شیمیایی بوده است.

کلمات کلیدی: ملات ژئوپلیمری، سرباره کوره‌های آهنگدازی، دمای ساخت، زمان گیرش، مقاومت فشاری، عکس میکروسکوپ الکترونی

*نویسنده مسئول: هادی نظریور

پست الکترونیکی: h.nazarpour@nit.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

۱- مقدمه

سیمان پرتلند پرکاربردترین ماده چسباننده هیدرولیکی برای تولید بتن در دنیا است. با این حال تولید سیمان پرتلند فرآیندی بسیار انرژی بر است، به طوری که برای تولید هر تن سیمان حدود ۴ گیگاژول انرژی مصرف می شود. این انرژی با استفاده از سوخت های فسیلی تأمین می شود و تولید هر تن سیمان با تولید تقریباً یک تن دی اکسید کربن همراه است، به طوری که صنعت سیمان سهم ۷ درصدی در تولید دی اکسید کربن تولید شده در جهان را دارد. هزینه های بالای انرژی مصرفی در تولید سیمان پرتلند و آلاینده های ناشی از تولید این ماده، منجر به تلاش های فراوانی برای کاهش میزان تولید کلینکر سیمان پرتلند و در نتیجه یافتن موادی برای جایگزینی آن شده است [۱].

در این راستا توجه ویژه ای به پوزولان ها به عنوان جایگزین کامل سیمان پرتلند در بتن با هدف تولید سیمان ها و بتن های ژئوپلیمری (بتن های بدون سیمان) شده است. تولید و استفاده از سیمان های ژئوپلیمری از چند دهه قبل مورد توجه عده ای کمی از دانشمندان قرار گرفته است. ژئوپلیمرها به دلیل خواص بسیار خوب و عملکرد مناسبشان، از اواخر قرن بیستم به عنوان جایگزین مصالح ساختمانی مورد توجه قرار گرفتند. در دهه های گذشته به دلیل کاربرد این مواد در زمینه های مختلف مهندسی، تحقیقات گسترده ای در این زمینه انجام شده است. ژئوپلیمرها گروهی از مواد سیمانی مقاوم و بادوام هستند که در دمای زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد سخت می شوند [۱].

اصطلاح ژئوپلیمر را اولین بار فردی به نام جوزف دیویدو ویتس^۱ در سال ۱۹۷۹ مطرح کرد. او ژئوپلیمرها را بعنوان شاخه ای جدید از مواد آلومیناسیلیکاتی با ساختار سه بعدی معرفی نمود. بدنبال توسعه تکنولوژی پلیمرها، فرصت بسیار خوبی برای رشد و تولید محصولات گوناگون بر پایه پلیمرها فراهم گشت [۱]. بتن ژئوپلیمر بتنی است که در آن از مصالح آلومیناسیلیکاتی غنی از سیلیکون (Si) و آلومینیوم (Al) و محلول قلیایی بعنوان چسباننده استفاده می شود. از مزایای بتن های ژئوپلیمری علاوه بر انرژی تولید پایین، می توان خواص مکانیکی مطلوب و دوام بالا در محیط های خورنده را برشمرد.

یکی از موادی که دارای ساختار آلومیناسیلیکاتی است، سرباره محصول فرعی کوره ی بلند آهنگدازی می باشد. استفاده از سرباره ی کوره آهنگدازی اواخر دهه ۱۸۰۰ میلادی بر می گردد، اما استفاده فعلی آن به عنوان یک ماده جایگزین سیمان در آفریقای جنوبی بیش از ۵۰ سال پیش آغاز شد. این ایده سپس به انگلستان (دهه ۱۹۶۰)، کانادا (دهه ۱۹۷۰) و سپس به ایالات متحده آمریکا (دهه ۱۹۸۰) منتقل شد [۲]. امروزه استفاده از این ماده ی جایگزین سیمان در بتن به دلیل مزایای فنی، اقتصادی و زیست محیطی آن گسترش یافته است. بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر پوسته شدن و نفوذ یون کلراید را می توان به عنوان تاثیر مثبت استفاده از سرباره کوره آهنگدازی در بتن های حاوی سیمان های آمیخته ی دو و سه جزیی نام برد [۳-۵].

همچنین نتایج تحقیقات نشان داده است مخلوط های بتنی حاوی سرباره در صورتی که بدرستی طرح و اجرا شود، می تواند واکنش قلیایی-سیلیسی مخرب را کنترل و دوام در برابر محیط سولفاتی را افزایش دهد [۲]. اثرات سودمند استفاده از سرباره در بتن، نتیجه ی ریزساختار اصلاح شده ی ماتریس سیمانی می باشد، که تعداد بیشتری از منافذ مویینه ی آن توسط ژل سیلیکاتی (C-S-H) کم تراکم (نسبت به خمیر سیمان پرتلند) پر شده است [۶-۷]. از سوی دیگر، نتایج بسیاری از مطالعات نشان داده است که مقاومت اولیه بتن حاوی سرباره می تواند به طور قابل ملاحظه ای کاهش یابد. با این حال معمولاً با گذشت زمان مقاومت فشاری بهبود می یابد، به طوری که در سنین بعد از ۵۶ روز مقادیر مشابه با مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سیمان پرتلند می شود [۸-۱۰]. ترکیبات شیمیایی اصلی سرباره شامل CaO ، SiO_2 و Al_2O_3 می باشد. همچنین این ماده حاوی مقدار بسیار کمی MgO ، FeO و سولفید (به شکل CaS ، MnS و FeS) می باشد [۵]. سرباره با آب در محیط قلیایی و سپس با $Ca(OH)_2$ واکنش می دهد تا محصولات هیدراسیون سیمان را از طریق واکنش پوزولانی به صورت ژل C-S-H اضافی در خمیر تبدیل کند [۱۱].

در سال ۲۰۱۳ واکسیا^۲ و همکارانش مقاومت خاکستر بتن ژئوپلیمری در برابر اسید سولفوریک را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق دوام بتن ژئوپلیمری را در هنگام استفاده خاکستر ساییده شده همراه با مواد قلیایی فعال زمانی که در معرض ۲٪ محلول اسید سولفوریک تا

^۱ Joseph Davidovits^۲ Waksia

مدت ۱۸ ماه را بررسی کرد. نتایج نشان داد بتن ژئوپلیمری وقتی در معرض ۲٪ محلول اسید سولفوریک قرار می‌گیرد به دلیل اثر متقابل آلومینوسیلیکات پایداری بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد [۱۲].

تحقیقی در سال ۲۰۱۷ توسط مرمداس^۱ و همکاران بر روی تاثیر سنگدانه‌های ریز بر خواص مکانیکی و جذب آب ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده با خاکستر بادی انجام شد. ماسه طبیعی، ماسه شکسته و ترکیبی از این دو برای ساخت ملات ژئوپلیمری استفاده شد و میزان کارایی، مقاومت فشاری و جذب آب در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ملات‌های با ماسه طبیعی کارایی بهتر و نمونه‌های با ماسه شکسته مقاومت فشاری بیشتری دارند در حالی که جذب آب نمونه‌های با ماسه ترکیبی کمترین میزان بود [۱۳]. مقاومت فشاری و ریز ساختار ملات ژئوپلیمری ساخته شده با خاکستر بادی و سرباره در دمای بالا، عنوان پژوهش دیگری در این زمینه توسط پن^۲ و همکاران بود که در سال ۲۰۱۸ انجام شد. ملات‌های ساخته شده در این تحقیق تحت دمای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و آزمایش‌های SEM، XRD و FTIR برای نمونه‌های انجام شد. نتایج نشان داد نمونه‌های ساخته شده با خاکستر بادی بهترین عملکرد را در دمای بالا داشته اند [۱۵].

مقاومت در برابر اسید ملات ژئوپلیمری در تحقیقی توسط کواسنی^۳ و همکاران انجام شد و نتایج حاکی از مقاومت بهتر ملات ژئوپلیمری نسبت به ملات سیمان پرتلند معمولی است [۱۶]. این نتایج در تحقیق ژانگ^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۷ تایید شده است به طوری که مقاومت ملات‌های ژئوپلیمری در شرایط نگهداری در اسید سولفوریک حداکثر ۱۵٪ کاهش داشته است، در حالی که این کاهش برای ملات‌های سیمان پرتلند در حدود ۶۰ درصد بوده است [۱۷].

تاثیر نانو مواد بر خواص مکانیکی ملات و بتن ژئوپلیمری ساخته شده با خاکستر بادی توسط سینغ^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد با اضافه شدن نانو تیتانیوم خصوصیات مکانیکی ژئوپلیمرها افزایش چشمگیری داشته است [۱۸]. مطالعه آزمایشگاهی برای ساخت ملات ژئوپلیمری با خاکستر بادی و ترکیب آن با سیمان پرتلند توسط شادنیا و همکاران انجام شد. نتایج نشان داد ملات ژئوپلیمری با خاکستر بادی و سیمان پرتلند به صورت ترکیبی ظرفیت گرمایی بیشتری داشته است [۱۹]. خواص مکانیکی و ریز ساختار ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده با خاکستر بادی با استفاده از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در مطالعه ای توسط المشهدانی^۶ و همکاران انجام شد و نتایج نشان داد مقاومت خمشی ژئوپلیمری ساخته شده به ترتیب بین ۳۱ و ۳۹ درصد با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف فولادی افزایش یافته است. [۲۰]. در همین زمینه ریز ساختار و خصوصیات مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده با الیاف کربن تحت دمای ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد افت مقاومت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد حداقل ۱۹ و در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حداقل ۴۲ درصد بوده است [۲۱].

در کشور ما تحقیقاتی در زمینه ژئوپلیمرها آغاز شده است و در دانشگاه‌های امیرکبیر، گیلان و... تحقیقاتی در این زمینه در حال انجام است. در سال ۲۰۱۱ بندر^۷ و همکاران در تاثیر دمای عمل‌آوری را بر مقاومت و خواص مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمری با ۵ پوزولان مختلف ارزیابی کردند [۲۲]. جعفری ندوشن و رضانیانپور در سال ۱۳۹۶ به بررسی خواص مکانیکی خمیرهای ژئوپلیمری و بهینه‌سازی مدول سیلیکات سدیم پرداختند [۲۳].

در تحقیق حاضر اثرات دمای ساخت بر زمان گیرش ملات‌های ژئوپلیمری با ماده پایه سرباره فولاد بررسی شده است. بدین منظور با ۲۰ نسبت اختلاط متفاوت خمیر ژئوپلیمری ساخته شد و دمای ساخت، روند کاهش دما و میزان نفوذ آن بدست آمد. در ادامه با ساخت ملات‌های ژئوپلیمری از نسبت‌های مرحله قبل، مقاومت‌های فشاری این نمونه‌ها بررسی گردید و جهت تکمیل کار آزمایش‌های XRD و SEM از برخی نمونه‌ها انجام شد.

¹ Mermedas

² pan

³ Kwasny

⁴ Jizhang

⁵ Singh

⁶ Almashhadani

⁷ Bondar

۲- مطالعه آزمایشگاهی

۲-۱ معرفی مواد و خصوصیات آن

۲-۱-۱ سرباره کوره‌های آهنگدازی

برای ساخت ژئوپلیمرها از سه جزء استفاده می‌شود. جزء اول ماده آلومینا سیلیکاتی به عنوان ماده پایه، جزء دوم سدیم سیلیکات (که به دو شکل پودر و مایع موجود است) و جزء آخر ماده قلیایی می‌باشد. در این تحقیق از سرباره کوره‌های آهنگدازی به عنوان ماده پایه، سدیم سیلیکات پودری شکل که با نسبت‌های مشخصی با آب ترکیب شده و محلول ساخته شده از پودر پتاسیم هیدروکسید به عنوان ماده قلیایی استفاده شده است. نمونه‌های سرباره استفاده شده در مقیاس صنعتی در کارخانه سیمان سپاهان اصفهان تولید شده اند. خواص فیزیکی و ترکیبات شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی مورد استفاده در این مطالعه و سیمان پرتلند جهت مقایسه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های سرباره کوره آهنگدازی و سیمان پرتلند معمولی

سرباره	سیمان پرتلند	ترکیب شیمیایی (درصد)
۳۷/۵	۲۰/۸	SiO ₂
۶/۴	۴/۳	Al ₂ O ₃
۰/۵۱	۲/۲	Fe ₂ O ₃
۳۴/۸	۶۵/۳	CaO
۰/۳۸	۰/۳۶	Na ₂ O
۰/۹	۰/۶۳	K ₂ O
۸/۶	۲/۱۷	MgO
-	۰/۲۶	TiO ₂
-	۲/۵۷	SO ₃
خواص فیزیکی		
۲/۸۵	۲/۱۵	وزن مخصوص (gr/cm ³)
۴۱۵	۳۲۰	سطح مخصوص (m ² /kg)

۲-۱-۲ سیلیکات سدیم

سیلیکات سدیم نام عمومی ترکیب سدیم متاسیلیکات (Na₂ SiO₃) است و هم چنین به نام (آب شیشه) نیز شناخته شده است و به صورت محلول آبی و جامد در دسترس است. سیلیکات سدیم طبق تعریف (راهنمای فناوری شیمیایی) نوشته ی فون و گنر^۱ نوعی سیلیکات قلیایی حل‌شدنی است که اولین بار توسط (ون هلمونت^۲) در سال ۱۶۴۰ کشف شد [۲۴]. بر اساس استاندارد ASTM C188-89 چگالی پودر این ماده برابر ۲,۴ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری و میانگین چگالی محلول مورد استفاده نیز برابر ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب بدست آمد.

۲-۱-۳ پتاسیم هیدروکسید

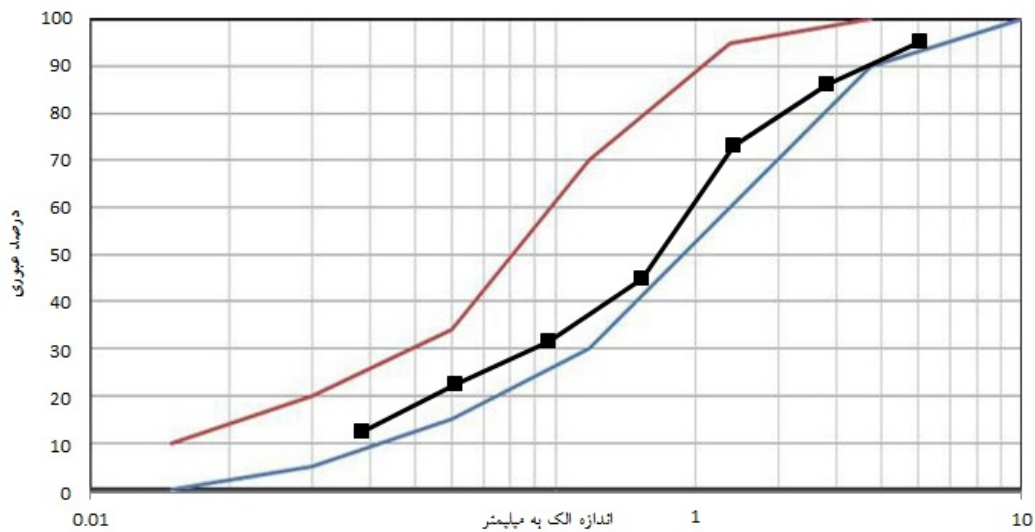
پتاسیم هیدروکسید، از مهم ترین ترکیبات هیدروکسیدها می‌باشد که در صنعت، از اهمیت به سزایی برخوردار است. پتاس یا پتاسیم هیدروکسید به فرمول KOH که معمولا به نام کاستیک پتاس نامیده می‌شود، یکی از ترکیبات اکسیدی پتاسیم است که دارای دمای ذوب ۳۰۶ درجه سانتی‌گراد و دمای جوش ۱۳۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این ترکیب، مانند سود در آب محلول بوده، به طور کامل به یون‌های

^۱ Fon vanger^۲ Van helmont

تشکیل دهنده اش K^+ و OH^- تفکیک می شود. بنابراین، محلول قلیایی قوی در آب ایجاد می کند [۲۴]. چگالی پودر این ماده برابر $2/1$ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری و میانگین چگالی محلول مورد استفاده نیز برابر $1/5$ گرم بر سانتی متر مکعب بدست آمد.

۲-۱-۴ ماسه

از ماسه طبیعی منابع خطیر کوه نیز به عنوان مصالح سنگدانه برای ساخت ملات های ژئوپلیمری استفاده شده است. وزن مخصوص و جذب آب ماسه به ترتیب $2/56$ گرم بر سانتی متر مکعب و $2/6$ درصد اندازه گیری شد. دانه بندی ماسه استفاده شده بر اساس استاندارد ASTM C136 مطابق شکل ۱ بدست آمد.



شکل ۱: دانه بندی ماسه مصرفی

۲-۲ نسبت های اختلاط

در مجموع تعداد ۲۰ نسبت برای ساخت خمیر ژئوپلیمری برای بررسی دمای ایجاد شده هنگام ساخت و میزان نفوذ و گیرش آن ساخته شد. مقدار سرباره مصرف شده برای طرح های اختلاط ۴۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب، میزان محلول آب شیشه ۲۷۰ کیلوگرم در هر متر مکعب (با نسبت های پودر به آب ۳۰٪، ۳۵٪، ۴۰٪، ۵۰٪ و ۶۰٪) و میزان محلول پتاسیم هیدروکسید ۱۸۰ کیلوگرم در هر متر مکعب (با نسبت های مولی ۱۰، ۸، ۶ و ۱۲) در نظر گرفته شد. برای ساخت ملات های ژئوپلیمری نیز همین نسبت ها با اضافه شدن ۱۱۰۰ کیلوگرم ماسه در هر متر مکعب استفاده شد. نسبت های اختلاط در جدول ۴ نشان داده شده است. در شکل ۲ تصویر نمونه ساخته شده از ملات ژئوپلیمری با سرباره کوره آهنگدازی آورده شده است.



شکل ۲: نمونه‌های ساخته شده از ملات ژئوپلیمری با پایه سرباره کوره‌های آهن‌گدازی

فرآیند اختلاط با ساخت محلول‌های سیلیکات سدیم و پتاسیم هیدروکسید با نسبت و غلظت مشخص شروع شده و پس از ترکیب این دو محلول سرباره فولاد به آن اضافه گردید. زمان اختلاط هر محلول ۱ دقیقه و زمان اختلاط ترکیب آن دو با سرباره فولاد ۲ دقیقه در نظر گرفته شد. در طول عملیات دما و زمان به عنوان پارامترهای اصلی اندازه گیری شدند. برای نمونه‌های مقاومت فشاری ماسه قبل از اضافه شدن سرباره در مخلوط ریخته می شد و زمان اختلاط به ۳ دقیقه افزایش یافت. پس از اتمام عملیات اختلاط و قالب‌گیری، نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در قالب باقی مانده و سپس تا رسیدن به سن آزمایش، عمل آوری آنها در دمای محیط انجام شده است.

جدول ۴. نسبت‌های اختلاط در خمیر ژئوپلیمری

ردیف	شناسه مخلوط	سرباره فولاد (kg/m ³)	نسبت پودر به آب در محلول سیلیکات سدیم (%)	نسبت مولی محلول پتاسیم هیدروکسید (mol)	میزان ماسه (kg/m ³)
۱	A1	۴۰۰	۴۰	۶	۱۱۰۰
۲	A2	۴۰۰	۴۰	۸	۱۱۰۰
۳	A3	۴۰۰	۴۰	۱۰	۱۱۰۰
۴	A4	۴۰۰	۴۰	۱۲	۱۱۰۰
۵	B1	۴۰۰	۳۰	۶	۱۱۰۰
۶	B2	۴۰۰	۳۰	۸	۱۱۰۰
۷	B3	۴۰۰	۳۰	۱۰	۱۱۰۰
۸	B4	۴۰۰	۳۰	۱۲	۱۱۰۰
۹	C1	۴۰۰	۵۰	۶	۱۱۰۰
۱۰	C2	۴۰۰	۵۰	۸	۱۱۰۰
۱۱	C3	۴۰۰	۵۰	۱۰	۱۱۰۰
۱۲	C4	۴۰۰	۵۰	۱۲	۱۱۰۰
۱۳	D1	۴۰۰	۶۰	۶	۱۱۰۰
۱۴	D2	۴۰۰	۶۰	۸	۱۱۰۰
۱۵	D3	۴۰۰	۶۰	۱۰	۱۱۰۰
۱۶	D4	۴۰۰	۶۰	۱۲	۱۱۰۰
۱۷	E1	۴۰۰	۳۵	۶	۱۱۰۰
۱۸	E2	۴۰۰	۳۵	۸	۱۱۰۰
۱۹	E3	۴۰۰	۳۵	۱۰	۱۱۰۰
۲۰	E4	۴۰۰	۳۵	۱۲	۱۱۰۰

۳-۲ روند آزمایشات

۳-۲-۱ بررسی‌های زمان گیرش و دما

برای بررسی اثر دما بر خواص گیرش و خواص مقاومتی ملات‌های ژئوپلیمری برای هر طرح اختلاط پارامترهای زیر مشاهده و ثبت شدند. با استفاده از دستگاه سوزن و یکات میزان نفوذ هر خمیر ساخته شده در هر ۲ دقیقه ثبت گردید. دمای محلول‌های شیمیایی پس از ترکیب، دمای مخلوط خمیر ژئوپلیمری پس از تکمیل زمان اختلاط و دمای متناظر با هر بار آزمایش سوزن و یکات، نیز در هر طرح اندازه گیری شد.

۳-۲-۲ مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ملات

با اضافه شدن ماسه در هر طرح اختلاط، ملات ژئوپلیمری برای هر طرح ساخته شد و پس از ۲۴ ساعت نگهداری در قالب در محیط مرطوب، برای عمل آوری در شرایط عادی محیط نگهداری شدند. نمونه‌ها در ابعاد ۵*۵*۵ سانتی متری مطابق ASTM C109-90 ساخته شده و در سنین ۱، ۳، ۷ و ۲۸ روز تحت فشار شکسته شدند و در سن ۲۸ روز مدول الاستیسیته آن‌ها نیز بدست آمد.

۳-۳-۲ آزمایش SEM

میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM^۱ نوعی میکروسکوپ الکترونی است که قابلیت عکس برداری از سطوح با بزرگنمایی ۱۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیکی کمتر از ۱ تا ۲۰ نانومتر (بسته به نوع نمونه) را دارد. در این میکروسکوپ ابتدا باید یک ستون الکترون ایجاد شود که برای این کار از تفنگ‌های الکترونی استفاده می‌شود. هرچه تعداد این الکترون‌ها بیشتر و در عین حال قطر این ستون کمتر باشد، مطلوبتر خواهد بود ضمن اینکه هم سرعت بودن این الکترون‌ها نیز از دیگر خصوصیات مثبت آن‌ها تلقی می‌شود. پس از تولید این ستون از الکترون‌ها، بر حسب شرایط مورد نظر کاربر با ایجاد یک میدان الکتریکی به آن‌ها شتاب داده می‌شود و به کمک چندین لنز الکترومغناطیسی شعاع آن را تا حد مطوب کوچک می‌کنند. س از اینکه الکترون‌ها به سرعت مورد نظر دست یافتند و شعاع ستون نیز تنظیم شد، این ستون از الکترون‌ها تحت کنترل کامل با نقطه خاصی از جسم برخورد می‌کنند و نتیجه اندرکنش آن‌ها با نمونه توسط حسگرهای خاص ثبت می‌شود. از نمایش نتایج حاصل بر روی یک نمایشگر تصویری حاصل می‌شود که می‌تواند خصوصیت مورفولوژی یا ترکیب نمونه در لایه‌های سطحی آن را بیان کند.

۳-۳-۴ آزمایش XRD

دستگاه XRD^۲ یا دستگاه پراش اشعه ایکس یکی از تجهیزات منحصر بفرد برای آنالیز و تعیین مشخصات کریستال‌ها در آزمایشگاه می‌باشد. اصول طراحی دستگاه XRD بر پایه تابش پرتو X به نمونه در زوایای مختلف و تحلیل الگوی پراش یا بازتابش آن می‌باشد. الگوی پراش اشعه X برای هر ماده، یکتا و منحصر به فردی می‌باشد.

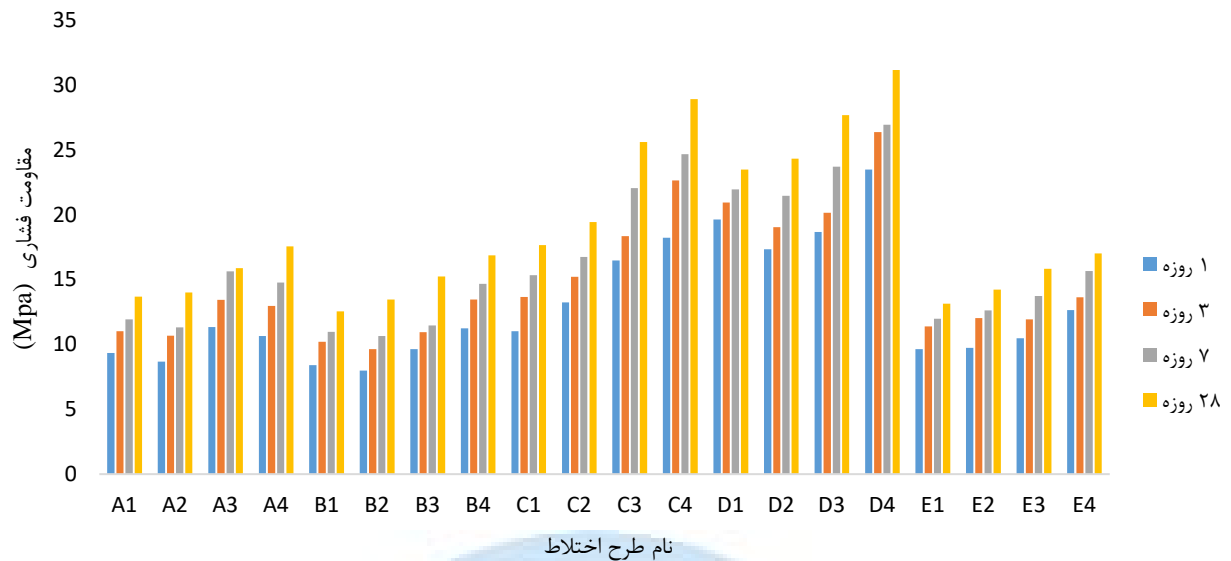
۳- نتایج و تحلیل‌ها

۳-۱ مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C109-90 در سنین مختلف بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی متر انجام شد و نتایج بدست آمده در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد هر چه میزان غلظت پتاسیم هیدروکسید بیشتر شود مقاومت فشاری ملات‌های ژئوپلیمری با پایه سرباره بیشتر است.

^۱ Scanning electron microscope

^۲ X-ray powder diffraction

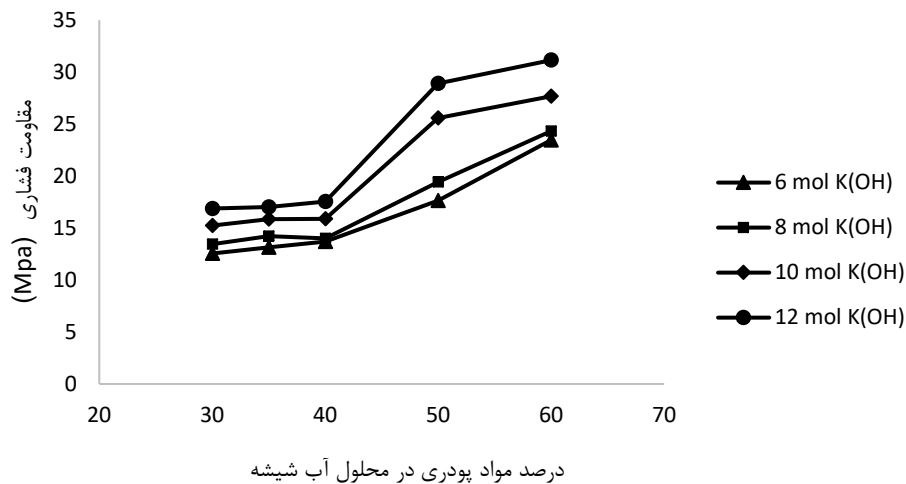


شکل ۳: مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های ساخته شده در سنین مختلف

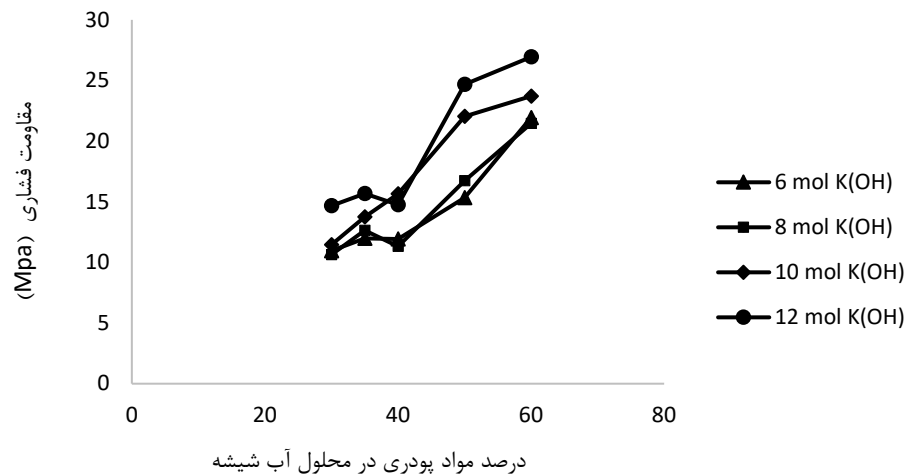
در طرح‌های سری A تا E میزان مولاریته محلول پتاسیم هیدروکسید ۶ تا ۱۲ مول بوده است و در تمامی طرح‌ها با افزایش مولاریته مقاومت فشاری افزایش یافته است. بیشترین این افزایش مربوط به طرح‌های سری D با میانگین افزایش مقاومت فشاری ۶۵ درصدی از غلظت ۶ مولار تا ۱۲ مولار می‌باشد. در سری C نسبت پودر در محلول سیلیکات سدیم به میزان ۵۰ درصد ثابت بوده است. نتایج نشان داد هر چه میزان نسبت پودر در محلول سیلیکات سدیم بیشتر باشد اثر افزایش مقاومت فشاری ناشی از اضافه شدن غلظت پتاسیم هیدروکسید از ۶ تا ۱۲ مولار بیشتر شد اما در طرح‌های سری D با نسبت پودری ۶۰ درصدی در محلول سیلیکات سدیم، این میزان رشد کاهش یافته است. این موضوع می‌تواند به دودلیل باشد، نخست آنکه با اضافه شدن درصد پودر در محلول سیلیکات سدیم به ۶۰ درصد محلول به حد اشباع رسیده و با کاهش دما در هنگام اختلاط کمی از پودر ته نشین شده و وارد فرآیند ژئوپلیمراسیون نشده است. علت دوم نیز به ثابت بودن میزان سرباره کوره‌های آهنگدازی در تمامی طرح‌های اختلاط بر می‌گردد به نحوی که در طرح D4 با حداکثر مواد شیمیایی استفاده شده، دیگر سرباره‌ی کافی برای انجام واکنش وجود نداشته و افزایش مقاومت بیشتری اتفاق نیفتاده است.

بیشترین مقاومت ۲۸ روزه در طرح D4 با نسبت پودری ۶۰٪ در محلول سیلیکات سدیم و نسبت مولی ۱۲ در محلول پتاسیم هیدروکسید به مقاومت ۳۱،۱۵ مگا پاسکال مشاهده شده است. کمترین مقاومت ۲۸ روزه نیز در EI با نسبت پودری ۳۵٪ در محلول سیلیکات سدیم و نسبت مولی ۶ در محلول پتاسیم هیدروکسید با مقاومت ۱۲،۵۵ مگا پاسکال اندازه گیری شد.

با مقایسه طرح‌های اختلاط با غلظت‌های ثابت محلول پتاسیم هیدروکسید مشخص شد افزایش مقاومت ناشی از اضافه شدن درصد پودر در محلول سیلیکات سدیم بسیار بیشتر از اثر اضافه شدن غلظت پتاسیم هیدروکسید است به نحوی که از حدود درصد پودر ۵۰ در محلول سیلیکات سدیم مقاومت‌های فشاری رشد بسیار زیادی داشته اند. در شکل ۴ مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی ملات‌های ژئوپلیمری در یک نسبت مولی ثابت نشان داده شده است. در شکل ۵ همین مقایسه در مورد مقاومت کوتاه مدت ۷ روزه انجام شده است. مطابق شکل‌های ۴ و ۵ در یک نسبت مولی ثابت با افزایش درصد مواد پودری در محلول سیلیکات سدیم مقاومت فشاری زیاد شده است به طوری که با افزایش درصد پودر به آب از ۳۰ به ۶۰٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه افزایشی در حدود ۸۰ درصد در همه نسبت‌های مولی محلول پتاسیم هیدروکسید داده است. برای مقاومت ۷ روزه و ۳ روزه این میزان افزایش بیشتر بوده و در طرح‌ها با نسبت مولی ۶ و ۱۲ در محلول پتاسیم هیدروکسید، حدود ۱۰۰ درصد افزایش مقاومت مشاهده گردید.



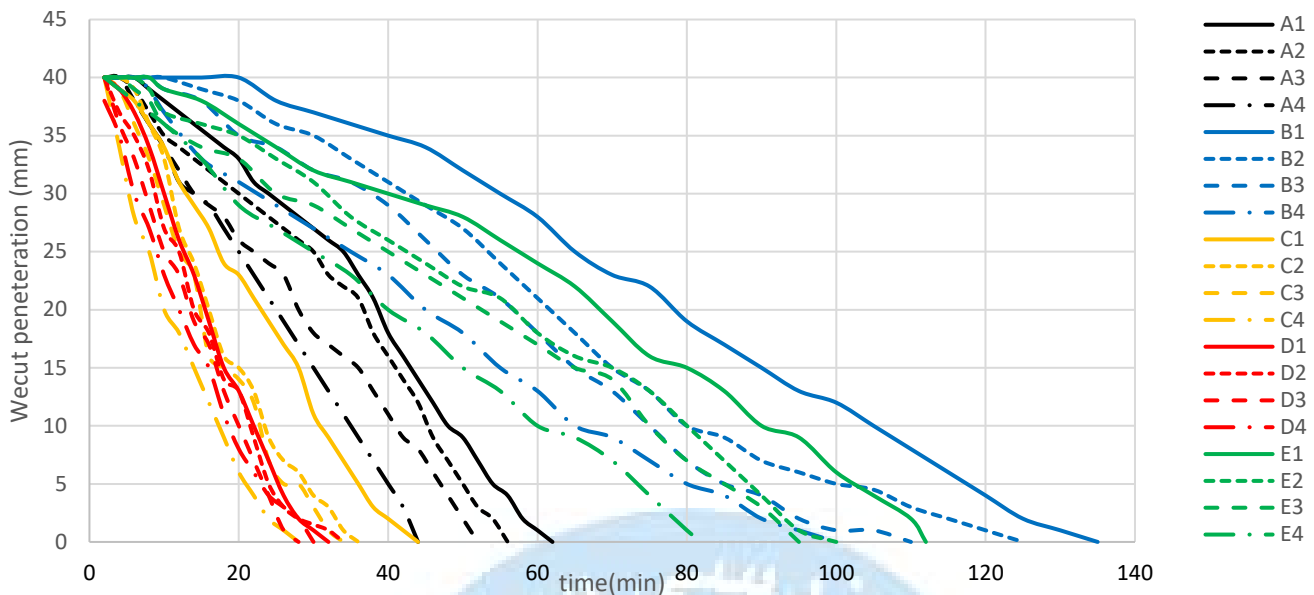
شکل ۴: مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های دارای مولاریته ثابت در محلول پتاسیم هیدروکسید



شکل ۵: مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه طرح‌های دارای مولاریته ثابت در محلول پتاسیم هیدروکسید

۲-۳ زمان گیرش و دمای ساخت

همانطور که در بخش ۱-۲-۳ بیان شد دمای محلول‌ها و مخلوط ساخته شده و میزان نفوذ دستگاه سوزن ویکات برای هر طرح اندازه گیری شد. نتایج آزمایش سوزن ویکات در شکل ۶ آورده شده است. نتایج زمان‌های گیرش و دمای اولیه ساخت در جدول ۵ آورده شده است.

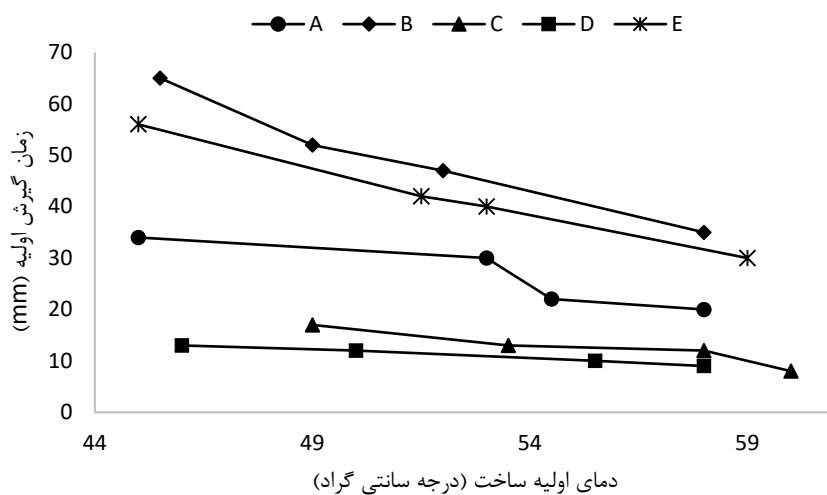


شکل ۶: نتایج آزمایش زمان گیرش

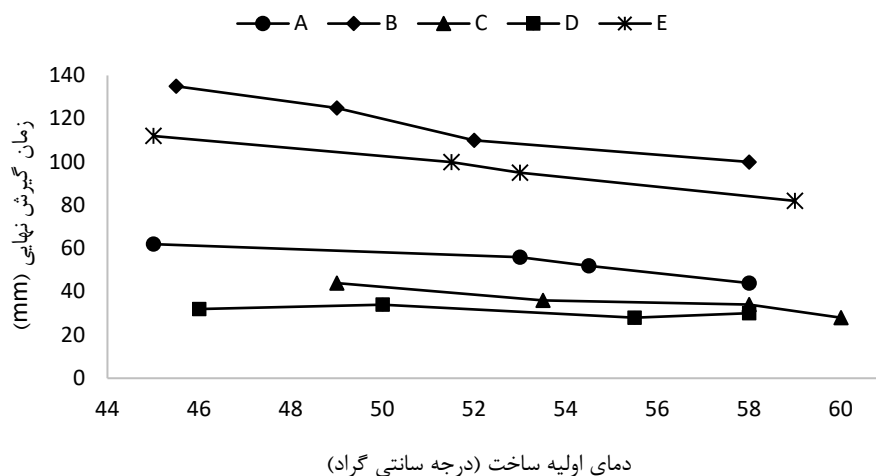
جدول ۵: نتایج آزمایش زمان گیرش و دمای ساخت

نام طرح	دمای اولیه ساخت	زمان گیرش اولیه	زمان گیرش نهایی
A1	۴۵	۳۴	۶۲
A2	۵۳	۳۰	۵۶
A3	۵۴/۵	۲۲	۵۲
A4	۵۸	۲۰	۴۴
B1	۴۵/۵	۶۵	۱۳۵
B2	۴۹	۵۲	۱۲۵
B3	۵۲	۴۷	۱۱۰
B4	۵۸	۳۵	۱۰۰
C1	۴۹	۱۷	۴۴
C2	۵۲/۵	۱۳	۳۶
C3	۵۸	۱۲	۳۴
C4	۶۰	۸	۲۸
D1	۴۶	۱۳	۳۲
D2	۵۰	۱۲	۳۴
D3	۵۵/۵	۱۰	۲۸
D4	۵۸	۹	۳۰
E1	۴۵	۵۶	۱۱۲
E2	۵۱/۵	۴۲	۱۰۰
E3	۵۳	۴۰	۹۵
E4	۵۹	۳۰	۸۲

بر این اساس با توجه به دمای اولیه ساخت خمیر ژئوپلیمر زمان گیرش اولیه و نهایی آن مطابق شکل‌های ۷ و ۸ تغییر کرده است. بر اساس جدول ۵ بیشترین میزان زمان گیرش اولیه مربوط به طرح B1 با کمترین میزان مواد شیمیایی بوده (۳۰٪ نسبت پودری در محلول سیلیکات سدیم و ۶ مولار غلظت در محلول پتاسیم هیدروکسید) و کمترین زمان گیرش مربوط به طرح D4 با بیشترین میزان مواد شیمیایی (۶۰٪ نسبت پودری در محلول سیلیکات سدیم و ۱۲ مولار غلظت در محلول پتاسیم هیدروکسید) اندازه‌گیری شده است. همچنین شکل‌های ۷ و ۸ نشان داد هرچه میزان درصد پودر سیلیکات سدیم در مخلوط اولیه بیشتر باشد زمان گیرش اولیه و زمان گیرش نهایی یافته، به طوری که در طرح‌های سری B با میزان ۳۰ درصدی مواد پودری در محلول سیلیکات سدیم میانگین زمان گیرش اولیه نزدیک به ۵۰ دقیقه مشاهده شد اما در طرح‌های سری D با میزان ۶۰ درصدی مواد پودری در محلول سیلیکات سدیم این میانگین به ۱۱ دقیقه کاهش یافت. برای زمان گیرش نهایی در طرح‌های سری B میانگین ۱۱۸ دقیقه ای ثبت شد در حالی که در طرح D این میانگین به ۲۸ دقیقه رسید.



شکل ۷: نمودار تغییرات زمان گیرش اولیه بر اساس دمای اولیه ساخت

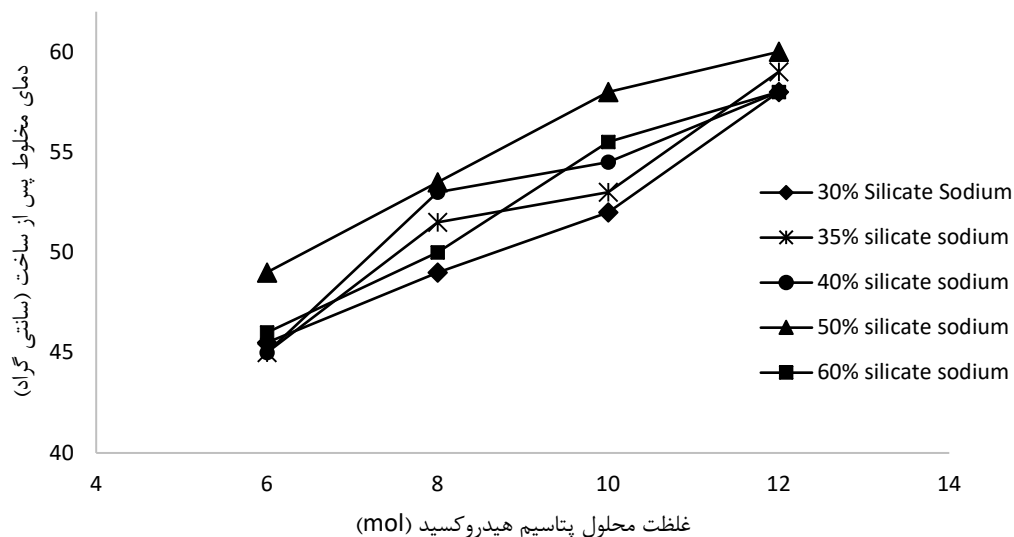


شکل ۸: نمودار تغییرات زمان گیرش نهایی بر اساس دمای اولیه ساخت

در همه‌ی طرح‌ها، دمای اولیه ساخت نزدیک به ۱۰٪ افزایش یافت. به طوری که با غلظت ۶ مولار (در محلول پتاسیم هیدروکسید) میانگین دمای اولیه ساخت با دمای حدود ۴۶ درجه سانتی گراد به میانگین ۵۸ درجه سانتی گراد در غلظت ۱۲ مولار رسید. همچنین زمان گیرش با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید کاهش یافته است و این میزان کاهش در طرح‌هایی که سیلیکات سدیم کمتری داشته اند محسوس تر بوده است به طوری که در طرح‌های سری B با میزان ۳۰ درصدی مواد پودری در محلول سیلیکات سدیم، افزایش غلظت محلول پتاسیم هیدروکسید از ۶ به ۱۲ مولار به میزان ۴۶٪ از زمان گیرش اولیه و ۲۶٪ از گیرش نهایی کاست، اما در طرح‌های سری D با میزان ۶۰ درصدی مواد پودری در محلول سیلیکات سدیم، این میزان کاهش برای گیرش اولیه و نهایی به ترتیب ۳۰٪ و ۱۲٪ بدست آمد.

۳-۳ اثر غلظت محلول‌های شیمیایی بر دمای ساخت

در شکل ۹ اثر حضور محلول‌های شیمیایی بر دمای مخلوط نشان داده شده است. بر اساس مشاهدات هنگام ساخت دمای محلول پتاسیم هیدروکسید بیشتر از محلول سدیم سیلیکات اندازه گیری شده است و دمای ساخت مخلوط‌ها در شرایط یکسان پس از یک دقیقه اختلاط اندازه گیری شده است. دمای سرباره کوره آهنگدازی و ماسه مصرفی ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتی گراد بوده است.



شکل ۹: تغییرات دمای ایجاد شده در مخلوط‌ها با غلظت‌های محلول پتاسیم هیدروکسید

با توجه به شکل ۹ با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید در محلول ساخته شده با آن دمای مخلوط افزایش یافت، به طوری که با افزایش غلظت این محلول از ۶ مول به ۱۲ مول در هر سری طرح اختلاط حدود ۲۸٪ دمای ساخت اضافه شده است. همچنین با اضافه شدن درصد مواد پودری در محلول سدیم سیلیکات افزایش دمای ساخت مشاهده گردید اما میزان افزایش دما ناشی از افزایش مواد پودری در محلول سدیم سیلیکات بسیار کمتر از افزایش غلظت در محلول پتاسیم هیدروکسید بوده است، به طوری که با اضافه شدن درصد مواد پودری از ۳۰٪ تا ۶۰٪، افزایشی به میزان حداکثر ۸٪ در دمای ساخت ایجاد شده است. همچنین با اضافه شدن میزان مواد پودری در یک غلظت ثابت میزان افزایش دما به صورت منظم تغییر نکرده است.

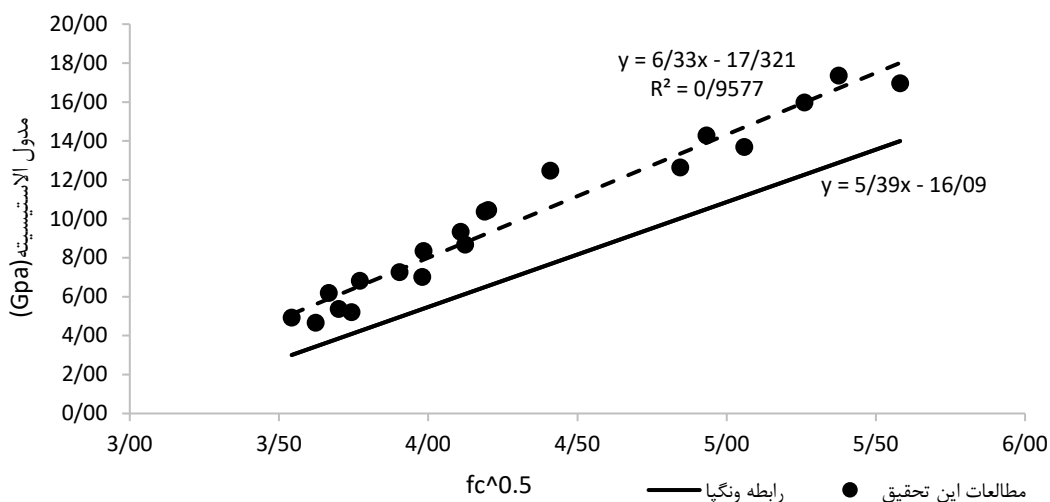
جدول ۶: تحلیل واریانس ANOVA جهت تعیین میزان معنی داری

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	f	P-value (معنی داری)
غلظت پتاسیم هیدروکسید	۳	۴۱۸/۳	۴۳/۹۲	۰/۰۰
درصد مواد پودری در محلول سدیم سیلیکات	۴	۳۵/۲	۰/۳۰۴	۰/۸۰۷

برای بررسی معنی داری بین دمای ساخت با هر یک از متغیرهای یاد شده در محلول‌های شیمیایی از تحلیل آماری مرتبه اول استفاده گردید. در جدول ۶ نتایج تحلیل واریانس مرتبه دوم برای اثبات معنی داری روابط بین متغیرهای غلظت محلول پتاسیم هیدروکسید و درصد مواد پودری در محلول سدیم سیلیکات با دمای ساخت آورده شده است. همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، معنی داری رابطه بین تغییرات غلظت پتاسیم هیدروکسید با دمای ساخت بر اساس سطح معنی داری قابل قبول حداکثر ۵٪ اثبات شده است در حالی که این موضوع برای رابطه بین درصد مواد پودری با دمای ساخت معنی دار نبوده است. نتایج حاصل از تحلیل آماری اثر قابل توجه غلظت پتاسیم هیدروکسید بر دمای ساخت را در شکل ۹ تایید کرده است.

۳-۴ مدل الاستیسیته

برای ۲۰ طرح اختلاط ساخته شده در جدول ۴ مدل الاستیسیته بدست آمد. نتایج بدست آمده با مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها مقایسه شد و در شکل ۱۰ آورده شده است. رابطه بدست آمده در شکل ۱۰ با رابطه داده شده توسط ونگپا^۱ مقایسه شد. مطابق شکل ۱۰ همبستگی خوبی بین نتایج این تحقیق وجود دارد و نتایج این تحقیق به طور میانگین ۳۰ درصد بیشتر نسبت به رابطه ونگپا (که برای ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده با خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی تعیین شده بود) محاسبه شد.

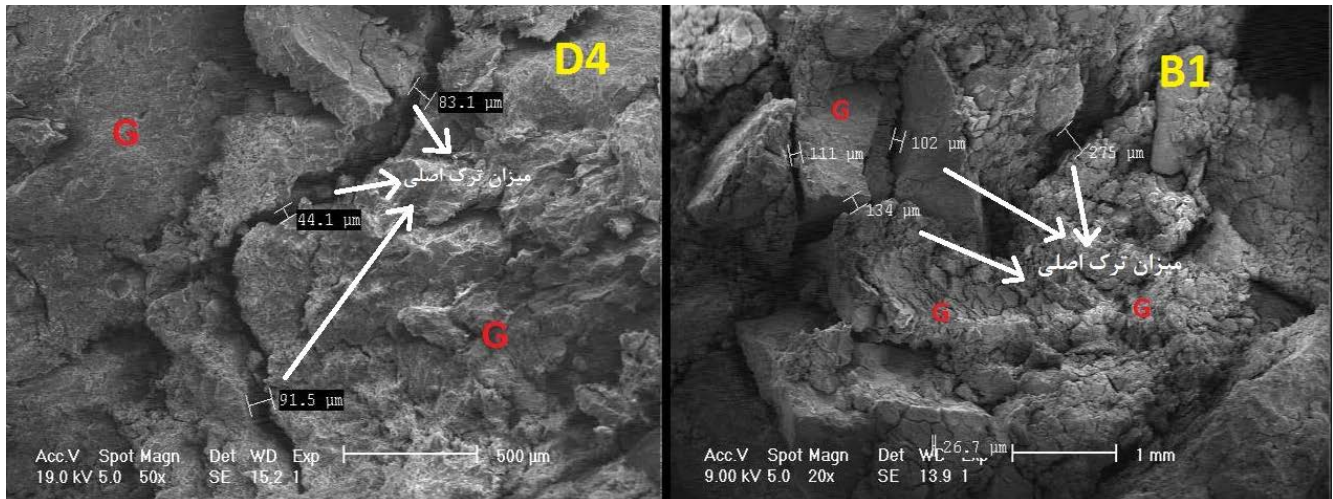


شکل ۱۰: رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بدست آمده در تحقیق حاضر و مقایسه با رابطه ونگپا

^۱ wongpa

۳-۵ آزمایش SEM

برای بررسی بیشتر دو نمونه از طرح‌هایی که کمترین و بیشترین مقاومت را بدست آورده اند برای تهیه عکس میکروسکوپ الکترونی استفاده شدند. از نمونه‌های طرح B1 به عنوان کمترین میزان مقاومت و طرح D4 با بیشترین مقاومت پس از شکست عکس‌های میکروسکوپ الکترونی تهیه شد.

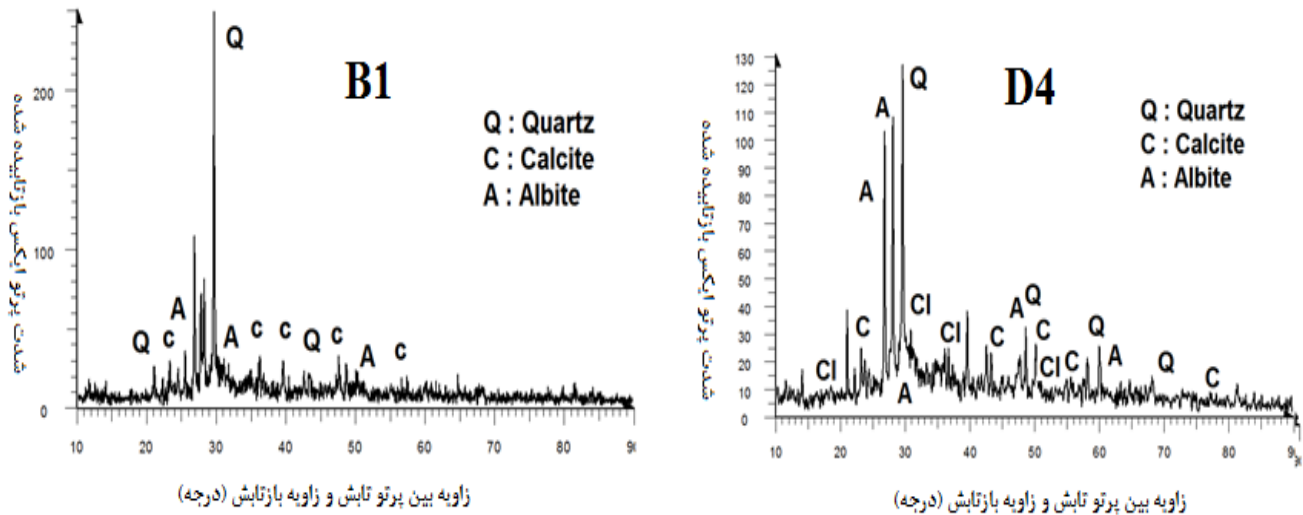


شکل ۱۰: عکس میکروسکوپ الکترونی تهیه شده برای نمونه‌ی شکسته شده طرح‌های B1 و D4

در شکل ۱۰ ژئوپلیمر سخت شده‌ی تشکیل شده از سه ماده اصلی خمیر ژئوپلیمری (سرباره کوره‌های آهنگدازی، محلول پتاسیم هیدروکسید و محلول سیلیکات سدیم) با حرف G نشان داده شده است. میزان ترک‌های اصلی نمونه طرح D4 بین ۴۰ تا ۹۰ میکرومتر و در نمونه شکسته شده طرح B1 میزان ترک‌های اصلی مطابق شکل ۱۰ حداقل ۱۰۰ و حداکثر ۲۷۵ میکرومتر اندازه گیری شده است. با توجه به وجود بیشتر مواد شیمیایی تشکیل دهنده واکنش‌های ژئوپلیمرزاسیون در طرح D4 (غلظت ۱۲ مولاری پتاسیم هیدروکسید و میزان ۶۰ درصدی مواد پودری در محلول سیلیکات سدیم) فرایند این واکنش‌ها تکمیل تر و ژئوپلیمر تشکیل شده با ترک‌های کمتر و یکنواخت تر دیده شده است اما در طرح B1 با کم شدن غلظت پتاسیم هیدروکسید از ۱۲ به ۶ مولار و کاهش درصد مواد پودری در محلول سیلیکات سدیم از ۶۰ به ۳۰ درصد، ژئوپلیمر سخت شده کمتری تشکیل شد و ناحیه مرزی بین قطعات (ITZ) گسترش یافته و میانگین میزان ترک‌های آن نیز نزدیک به ۳ برابر بیشتر شده است. تفاوت مقاومت فشاری ۲۸ روزه این دو طرح (۳۱،۱۵ مگاپاسکال برای طرح D4 و ۱۲،۵۵ مگا پاسکال برای طرح B1) نیز ناشی از عدم تشکیل ژئوپلیمری سخت شده کافی مطابق شکل ۸ بوده است.

۳-۶ آزمایش XRD

دو نمونه از طرح‌های ساخته شده که بیشترین و کمترین مقاومت فشاری را بدست آوردند پس از شکست جهت پرتو نگاری اشعه X مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج این آزمایش در شکل ۱۱ آمده است. مهمترین مواد یافت شده در دو نمونه آزمایش شده کلسیت، آلبیت و کوارتز بودند. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است کوارتز بیشترین شدت میزان بازتابش پرتو X را در هر دو طرح داشته است. مطابق شکل نمودار طرح B1 شدت بیشتری از پرتو ایکس بازتابیده شده در زاویه ۳۰ درجه بدست آمده است (تزدیک به دو برابر بیشتر). این موضوع نشان داد در طرح B1 میزان سرباره واکنش نداده در فرایند ژئوپلیمرزاسیون بیشتر بوده و مقاومت کمتری بدست آمده است.



شکل ۱۰- نمودار آزمایش پرتوگرافی اشعه X برای نمونه طرح های B1 و D4

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی زمان گیرش، مقاومت فشاری و ریز ساختار ملات‌های ژئوپلیمری با سرباره کوره‌های آهن‌گدازی با تفاوت در دمای ساخت و میزان محلول‌های شیمیایی بکار رفته در ساخت آن‌ها بوده است. بر این اساس ۲۰ طرح اختلاط با میزان سرباره و ماسه ثابت، ۴ متغیر در مقدار غلظت پتاسیم هیدروکسید و ۵ متغیر در میزان درصد مواد پودری برای محلول سیلیکات سدیم ساخته شد. نتایج اصلی تحقیق به شرح زیر است:

- ۱- اضافه شدن غلظت پتاسیم هیدروکسید موجب افزایش مقاومت فشاری در همه سنین مورد ارزیابی شده است به طوری که افزایش غلظت این محلول از ۶ به ۱۲ مولار تا ۶۵ درصد موجب ازدیاد مقاومت فشاری ۲۸ روزه شد. نتایج این تحقیق نشان داد، اضافه شدن درصد مواد پودری در محلول سیلیکات سدیم اثر بیشتری نسبت به اضافه شدن غلظت پتاسیم هیدروکسید دارد به نحوی که با اضافه شدن نسبت مواد پودری در محلول سیلیکات سدیم از ۳۰ درصد به ۶۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۸۰ درصد رشد داشته است. این رشد در مقاومت‌های کوتاه مدت بیشتر بوده و تا ۱۰۰ درصد نیز مشاهده شده است.
- ۲- نتایج آزمایش نفوذ سوزن و یکتا نشان داد با اضافه شدن هر دو محلول شیمیایی زمان گیرش کاهش یافته است. بیشترین زمان گیرش مربوط به طرح B1 با کمترین میزان مواد شیمیایی با زمان گیرش اولیه ۶۵ دقیقه و زمان گیرش نهایی ۱۳۵ دقیقه بدست آمد. افزایش مواد شیمیایی زمان گیرش را به شدت کاهش داده است به طوری که در طرح D4 با بیشترین مواد شیمیایی زمان گیرش اولیه به ۱۳ دقیقه و زمان گیرش نهایی به ۳۶ دقیقه رسید. این موضوع نشان داد که افزایش مقاومت در ملات ژئوپلیمری ممکن است منجر به کاهش چشمگیر زمان گیرش شود.
- ۳- دمای ساخت یکی از پارامترهای مهم در تعیین خواص تازه و سخت شده ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده بوده است. دمای ساخت بسته به میزان مواد شیمیایی تغییر کرد به طوری که با اضافه شدن میزان غلظت پتاسیم هیدروکسید ۱۰ درصد دمای مخلوط‌ها بالاتر رفته است. نتایج نشان داد در یک میزان مشخص مواد شیمیایی هرچه دمای اولیه ساخت بیشتر باشد زمان گیرش کم تر است. لذا یک راهکار جهت افزایش زمان گیرش ملات‌های ژئوپلیمری با مواد شیمیایی بالاتر اختلاط در دمای کمتر است. همچنین مقاومت فشاری ملات‌ها با توجه به دمای اولیه ساخت تغییر کرده است و بیشتر شده است.

- ۴- اثر غلظت دو ماده شیمیایی استفاده شده در مخلوط های ساخته شده بر دمای ساخت بررسی گردید. با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید از ۶ مول به ۱۲ مول در هر سری طرح اختلاط حدود ۲۸٪ دمای ساخت اضافه شده است اما میزان افزایش دما ناشی از افزایش مواد پودری در محلول سدیم سلیکات بسیار کمتر بوده است، به طوری که با اضافه شدن درصد مواد پودری از ۳۰٪ تا ۶۰٪، افزایشی به میزان حداکثر ۸٪ در دمای ساخت ایجاد شده است. تحلیل آماری برای اثبات معنی داری روابط این دو متغیر با دمای ساخت انجام شد و معنی داری رابطه بین غلظت پتاسیم هیدروکسید با دمای ساخت اثبات گردید اما بین دمای ساخت با میزان افزایش درصد مواد پودری در سدیم سلیکات رابطه معنی داری وجود ندارد.
- ۵- رابطه مقاومت فشاری بین ملات های ساخته شده با مدول الاستیسیته برای طرح های اختلاط ساخته شده با همبستگی مناسبی بدست آمد. رابطه فوق در مقایسه با رابطه مشابه برای ملات های ژئوپلیمری ساخته شده با ماده پایه خاکسترپوسته برنج و خاکستر بادی نشان داد به طور متوسط مدول الاستیسیته بدست آمده در این تحقیق ۳۰ درصد بیشتر بوده است.
- ۶- عکس های میکروسکوپ الکترونی (SEM) گرفته شده از نمونه های ساخته شده با بیشترین و کمترین مقاومت نشان داد تشکیل ژل ژئوپلیمر سخت شده وابسته به میزان غلظت محلول های شیمیایی است، به طوری که در طرح D4 با بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه ژل ژئوپلیمر تشکیل شده دارای حجم بیشتر بوده است و میانگین عرض ترک در ترک های اصلی نزدیک به ۷۰ میکرومتر دیده شده است اما در طرح B1 با کمترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه، حجم ژئوپلیمرهای تشکیل شده بسیار کمتر و میانگین عرض ترک در ترک های اصلی نزدیک به ۲۰۰ میکرومتر اندازه گیری شده است. نتایج آزمایش XRD برای دو نمونه با بیشترین و کمترین مقاومت نیز نشان دهنده تفاوت در میزان سرباره واکنش نداده در ملات ژئوپلیمری سخت شده بود، به طوری که شدت بازتابیده شده پرتو X در نمونه طرح B1 نزدیک به دوبرابر بیشتر از نمونه طرح D1 بوده است. این موضوع به علت کمتر بودن مواد شیمیایی در طرح B1 و ناکافی بودن مواد اولیه جهت واکنش های ژئوپلیمری بوده است.

مراجع

- [1] Davidovits, J. 4th edition, (2015), *Geopolymer Chemistry and Applications*, Institute Geopolymer, 3-5.
- [2] Hooton, R. D. (2007), Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, 44-59.
- [3] Chidiac SE, P. D. (2008), Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days, *Cement and Concrete Composites*, 30, 63-71.
- [4] Ahmed, S. O., Anderson W M. (2008), Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods, *Cement and Concrete Composites*, 30, 576-582.
- [5] Kumar, S., Bandopadhyay, A., Alex, T. Ravi Kumar C. (2008), Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of Portland slag cement, *Cement and Concrete Campsites*, 30, 679-685.
- [6] Arya, Y. X. (1995), Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete, *Cement and concrete Research*, 25, 893-902.
- [7] Glass B. R., Buenfeld N.R. (2000), Corrosion inhibition in concrete arising from its acid neutralization capacity, *Corrosion Science*, 42, 1587-1598.
- [8] Binici H., et al. (2007), The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice, *Construction and Building Materials*, 21, 1122-1128.
- [9] Gopalakrishnan B. K. Krishnamoorthy S, Bharatkumar BH. (2001), Investigation on the flexural behaviour of reinforced concrete beams containing supplementary cementitious materials, *ACI Materials Journal*, 645-643.

- [10] Johari M., et al. (2011), Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 25, 2639-2648.
- [11] Song H. W., Saraswathy V. (2006), Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground-granulated blast furnace slag-an overview. *Journal of hazardous materials*, 138, 226-233.
- [12] BS 6699:1992. (1992), *Specification for ground granulated blast furnace slag for use with Portland cement*, 1Ed.
- [13] Van Jaarsveld JGS, Van Deventer JSJ. (2013), the effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers, *Cement and Concrete Research*, 29, 189-200.
- [14] Mermerdas K., Manguri S. (2017), Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20, 1642-1652.
- [15] Pan Z., et al. (2017), Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature, *Cement and Concrete Composites*, 86, 9-18
- [16] Kwasny, J., et al, (2018), Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars, *Construction and building materials*, 166, 537-553.
- [17] JiZhuang, H., et al, (2017), Resistance of geopolymer mortar to acid and chloride attacks, *Procedia Engineering*, 210, 126-131.
- [18] Singh, N.B. et al, (2018), Effect of nanomaterials on the properties of geopolymer mortars and concrete, *Materials today proceeding*, 5(1), 9035-9040.
- [19] Shadnia. R. et al, (2015), Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM, *Construction and Building Materials*, 84, 95-102.
- [20] Almashahadani, M. et al, (2018), Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, 167, 505-513.
- [21] Behra. P. et al, (2018), Microstructure and mechanical properties of carbon microfiber reinforced geopolymers at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 160, 733-743.
- [22] Bondar. D. et al, (2011), Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans, *Construction and Building Materials*, 25, 4065-4071.
- [23] Nadoushan, M, Ramezaniapor, A.A, (2018), Mechanical Properties of Slag- based Geopolymer Pastes and Determination of Optimum Parameters, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Article in press.
- [24] Greenwood, N., Earnshaw, A. (1997), Chemistry of the Elements (second ed.), *Butterworth-Heinemann*, 224-226.