یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

مقاومت فشاری ملات های ژئوپلیمری برپایه سرباره کوره آهن گدازی دردماهای مختلف

امیرحسین حداد[۱] ،مهدی مهدی خانی[۲]، رامین انصاری[۳]

۱- نویسنده مسئول :دانشجوی کارشناسی ارشد،گرایش مهندسی ومدیریت ساخت،دانشکده فنی ومهندسی،دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوینhaddad96amirhossein@gmail.com

۲-استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین،گروه مهندسی ومدیریت ساخت،دانشکده فنی ومهندسی،دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوینmahdikhani@eng.ikiu.ac.ir

۳-استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین،گروه مهندسی ومدیریت ساخت،دانشکده فنی ومهندسی،دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین

چکیده

مطالعات نشان می دهد ۷٪ آلاینده CO_2 موجود در سطح جهان به علت تولید سیمان پرتلند است. ژئوپلیمر در چند دهه گذشته به عنوان جایگزینی برای مصالح ساختمانی پایدار مورد تحقیق قرار گرفته است که می تواند انتشار $CO_۲$ را با استفاده از محصولات جانبی صنعت به حداقل برساند. حفاظت از سازه ها در برابر آتش از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است و بررسی ویژگی ژئوپلیمردر برابر آتش ضروری است. در این پژوهش مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر دردمای ۶۰-۲۵۰-۵۰۰-۷۵۰-۱۰۰۰درجه سانتی گراد مورد بررسی قرارگرفت.نسبت محلول(سدیم هیدروکسید+سدیم سیلیکات) به چسباننده(سرباره+میکروسیلیس) مقدار ثابت ۰,۴در نظرگرفتیم و نمونه ها پس ازقرارگیری دردماهای بالا(۱۰۰۰درجه سانتی گراد)رنگ نمونه ها تغییر می کند ولی ساختار کلی خود را حفظ می کنند و ترک های ریز بر روی سطح نمونه ها مشاهده می شودو بیش ترین مقاومت فشاری دردمای ۶۰درجه سانتی گراد بدست می آید.

کلمات کلیدی: ژئوپلیمر،ملات،سرباره کوره آهن گدازی،حرارت،توسعه پایدار

۱-مقدمه

بتن بعد از آب پراستفاده ترین ماده توسط انسان است و پرتولیدترین ماده تولیدی بشر به شمار می آید. دلیل فراوانی استفاده آن، ارزانی و فراوانی مواد اولیه می باشد. ساده ترین نوع بتن از ترکیب سنگدانه ریز(ماسه) ، سنگدانه درشت(شن)، سیمان و آب به دست می آید. سیمان به عنوان مهمترین جزء بتن، پرتولیدترین ماده پایه توسط انسان است که در سال ۲۰۱۲ تقاضای جهانی آن حدود ۴ میلیارد تن محاسبه شد.[1].این در حالی است که میزان افزایش سالانه تقاضای آن ٪ ۸-۱۰ است [۲].با وجود مزایای بسیار زیاد بتن مانند ارزانی، فراوانی مصالح اولیه، شکل پذیری و روانی بالا، تولید سیمان فرآیندی به شدت آلاینده و گرماده است. به طوری که تولید هر تن سیمان با ایجاد یک تن CO_2همراه است[۳]. از مزیت ژئوپلیمرها، استفاده گسترده ژئوپلیمر از مواد زائد است که باعث می شود انرژی کم‌تری برای تولید آن مصرف شود.به همین دلیل محققان با توجه به موضوع گرمای جهانی و مفهوم توسعه پایدار تمایل پیدا کردند در مورد استفاده از مواد سیمانی مبتنی بر ژئوپلیمر تحقیق کنند[۴]. از ژئوپلیمر می توان به عنوان سیمان های قلیایی فعال شده نام برد، ژئوپلیمر از خاکستر بادی، GGBFS و...تشکیل می شود. خاکستر بادی (FA) از ضایعات کارخانجات ذغال سنگ و سرباره (SG) محصولات جانبی کارخانجات آهن و فولاد است[۵]. فعال کننده قلیایی عنصر اصلی مواد ژئوپلیمری است که تأثیر زیادی بر روی مقاومت فشاری مواد ژئوپلیمری می‌گذارد. محلول های فعال کننده قلیایی شامل سدیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات، پتاسیم هیدروکسید که به صورت ترکیبی یا مجزا در ساخت سیمان ژئوپلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرند[۶].

ژئوپلیمر از مجموعه پلیمرهای معدنی هستند که از نظر شیمیایی به زئولیت شباهت دارند اما ساختار میکروسکوپی آن آمورف و بی شکل است. محافظت از سازه ها در برابر آتش بسیار حیاتی است، زیرا مطمئناً از هر لحاظ به کاهش تلفات کمک می کند. بنابراین، پژوهش درخصوص ایمنی سازه ها در برابر آتش سوزی مهم است بتن معمولی دارای مقاومت ذاتی در برابر آتش است اما نگرانی اصلی پس از قرار گیری در دمای بالاست .بررسی ها نشان داده که ریزساختار بتن معمولی پس از قرارگیری در دما۹۰۰درجه سانتی‌گراد تجزیه و نابود می شود و میزان خسارتی که توسط آتش وارد می شود بستگی به مدت زمان قرارگیری و دمای آتش دارد و ژئوپلیمر بایستی خواص مکانیکی قابل قبولی در مقایسه با بتن معمولی نشان دهد[۷].

داکسون وهمکاران به این نتیجه رسیدند وضعیت فعلی در فناوری ژئوپلیمر را می توان به شرح زیر خلاصه کرد: کارهای زیادی انجام شده است ، اما هنوز پژوهش های بیش تری باید درخصوص ژئوپلیمر انجام شود. تحقیقات در این زمینه از لحاظ تاریخی متمرکز بر کاربردها بوده است و سازوکارها و فرایندهای زمینه ساز تشکیل ژئوپلیمر و کنترل ساختارهای محصولات این واکنشها ، به تازگی مورد توجه دقیق قرار گرفته اند. با این حال ، پیشرفت در این زمینه در حال انجام است و درکی که تا به امروز ارائه شده است ،

نشان می دهد که فناوری ژئوپلیمر در واقع پتانسیل استفاده در مقیاس گسترده در صنعت ساخت و ساز و همچنین در سایر کاربردهای خاص را دارد[۸].

۲- پیشینه تحقیق

وقتی سیمان برای اولین بار اختراع شد، چیزی کمتر از یک انقلاب نبود. استفاده از این ماده جدید خاکستری رنگ در ساخت و ساز با مقاومت فشاری شدید، ویژگی سخت شدن سریع و نگهداری کم بسیار شگفت انگیز بود به طوری که هر جاده، ساختمان، پل و سد با استفاده از بتن ساخته شد. استفاده از سنگ ها و چوب ها کاملاً از بین رفت و بتن به متداول ترین ماده در تاریخ ساخت تبدیل شد. سیمان پرتلند در اواسط قرن هجدهم در انگلستان اختراع شد و توسط گرم شدن سنگ آهک و چند ماده دیگر در کوره های غول پیکر ساخته می شود. رد پای عظیم CO_2 از دو طریق پدیدار می شود. اولاً، برای رسیدن به دمای بالا در کوره، سوخت های فسیلی زیادی لازم است. دوم، واکنش شیمیایی تولید سیمان پرتلند شامل پختن CO_2 از سنگ آهک است و بتن ساخته شده با سیمان پرتلند تقریباً به اندازه ای که اثر غیر قابل باور محیطی آن اثبات کند، دوام ندارد. پل های بتنی اغلب تنها پس از ۵۰ سال از سرویس خارج می شوند، که دلیل آن شرایط سختی مانند ترافیک کامیون های سنگین و چرخه های انجماد و ذوب است. در اواخر سال ۱۹۷۸، کلمه ژئوپلیمر ابتدا توسط یک پروفسور فرانسوی به نام دیویدووتس ابداع شد[۹]. واکنش یک آلومینو سیلیکات جامد با یک محلول هیدروکسید قلیایی یک ماده آلومینو سیلیکات قلیایی مصنوعی تولید می کند که به طور کلی ژئوپلیمر نامیده می شود[۱۰]. دیویدوویتس اولین بار بیان کرد که یک ترکیب که تنها دارای دو عنصر سیلیکون و آلومینیم باشد می تواند دریک محیط قلیایی تشکیل چسب بدهد و آن را به دلیل این که به طور کامل ارگانیک بود ژئوپلیمر نامید و استفاده ازاصطلاح "poly sialate"مخفف (سیلیکون-آکسو – آلومینات) را برای ساختار پلیمری مواد آلومینوسیلیکات پیشنهاد داد. پلی سیالیت در واقع همان چهاروجهی های دو مادهAL_2O_3 و SiO_2می باشند که با به اشتراک گذاشتن تمام اکسیژن ها به هم متصل می شوند. در این پیکربندی، AL_2O_3 با یک بار منفی و SiO_2با یک بار مثبت ظاهر می شوندکه فلز قلیایی در آن نقش تعادل بار الکتریکی را بر عهده دارد[۱۱]. اگرچه بسیاری از مشخصات ماکروسکوپی ژئوپلیمرهای تهیه شده از منابع آلومینوسیلیکات مختلف ممکن است مشابه به نظر برسند ، ریزساختار و خصوصیات فیزیکی ، مکانیکی ، شیمیایی و حرارتی آنها عمدتا با توجه به ماده اولیه ای که از آن گرفته می شود ، متفاوت است. با وجود شباهت در ساختار مولکولی و ساختار نانو ، تفاوت در خصوصیات ژئوپلیمرهای مشتق شده از مواد اولیه مختلف به وضوح مشهود است[۱۱]. اصلی ترین تفاوت بین ژئوپلیمر و بتن سیمانی در مکانیزم گیرش آنهاست. در سیمان پرتلند پروسه گیرش از طریق فرایند هیدراتاسیون است که به طور عادی به دست آوردن حدود ۸۰ درصد تکمیل پیوند آن تا یک ماه ادامه دارد و تا حدود یک سال کامل شدن آن به طول می انجامد. اما پروسه ژئوپلیمریزاسیون واکنشی بین کاتیون های شیمیایی جهت تشکیل سیلیکات آلومینیم است. اتم های سیلیسیم و آلومینیم با یکدیگر واکنش انجام می دهند و مولکول هایی تشکیل می دهند که از نظر شیمیایی شباهت بسیار زیادی به مواد چسبنده در سنگ را دارد. تفاوت دیگر بین بتن ژئوپلیمر و بتن سیمانی در دمای فرایند تولید آنهاست. فرایند تولید سیمان فرآیندی است که به دمای بسیار بالا احتیاج دارد. همچنین پروسه گیرش آن به شدت گرماده است و این دو عامل باعث آزاد شدن مقادیربسیار زیادی گازهای گلخانه ای و همچنین صرف سوخت های فسیلی زیاد می شود. در صورتی که فرایند تولید وگیرش بتن ژئوپلیمر در دمای محیط انجام می شود و با صرف انرژی و گرمایش بسیار کمتر همراه است.

۲-۱-برخی تحقیقات انجام شده

یاسری وهمکاران به بررسی نسبت های مختلف چسباننده به محلول، سیلیس به آلومینات و کارایی خمیرهای ژئوپلیمری پرداختند. برای انجام آزمایش نمونه هایی مبتنی بر متاکائولن و میکروسیلیس ساخته شد و تمام نمونه ها با غلظت ثابت سدیم هیدروکسید ۱۴ مولار و نسبت آب به فعال کننده های قلیایی نیز ثابت در نظر گرفته شد. در این مقاله از آزمون‌های مینی اسلامپ و زمان جریان برای بررسی کارایی و آزمون ویکات برای زمان گیرش خمیرهای ژئوپلیمر و با آزمون مقاومت فشاری تأثیر نسبت های مختلف چسباننده به محلول و سیلیس به آلومینات را بررسی کردند. نتایجی که در این آزمون‌ها به دست آورند با افزایش نسبت چسباننده به محلول، خمیر چسبناک تر شده وافت نسبی کاهش و زمان جریان افزایش می یابد و در یک مقدار ثابت چسباننده به محلول با افزایش نسبت سیلیس به آلومینات افت نسبی (اسلامپ) افزایش و زمان جریان کاهش می یابد. با افزایش نسبت چسباننده به محلول زمان گیرش نمونه ها کاهش می یابد. هم چنین با افزایش نسبت چسباننده به محلول مقاومت فشاری افزایش می یابد و تأثیر سیلیس به آلومینات (SI/AL) بر مقاومت فشاری نمونه ها متفاوت است در نسبت های چسباننده به محلول پایین تر، افزایش نسبت باعث افزایش مقاومت فشاری می شود و اما در نسبت های چسباننده به محلول بالاتر (B/S=1.6-1.8) مقدار با افزایش سیلیس با آلومینات کاهشی خواهد بود[۱۲].

یاساسوینی به بررسی مقاومت فشاری و خمشی بتن های ژئوپلیمری با مولاریته های مختلف ۱۲، ۱۶ و ۲۰ و نسبت های مختلف محلول های قلیایی ۲ و ۲,۵ و قرارگیری در دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد پرداختند و از محلول های قلیایی سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات استفاده شد. مولاریته های مختلف در معرض ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قرارگرفتند و یک ساعت در دمای ۲۰۰ درجه باقی مانند. نتایج این مقاله نشان می دهد که مقاومت فشاری با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید و عمل آوری در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می یابد و مقاومت خمشی با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید و افزایش دمای عمل آوری افزایش می یابد و نمونه با مولاریته ۱۶ پس از قرار گیری در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد از نمونه با مولاریت ۲۰ مقاومت فشاری بیش تری را نشان می دهد[۱۳].

ژانگ وهمکاران نتایج حاصل از آزمایشات روی چسب های ژئوپلیمر، ترکیب مخلوط متاکائولین (MK) و خاکستر بادی (FA)به عنوان پیش ماده، مخصوصاً برای کاربردهای مقاومت در برابر آتش، ارائه داده است. آزمون‌های مقاومت خمشی و فشاری در دمای محیط و پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا روی تعداد زیادی نمونه خمیر ژئوپلیمر، ملات و بتن در محیط و پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا بود. بر اساس آزمون‌های خاصیت مکانیکی و تجزیه و تحلیل حرارتی، یک نسبت مطلوب MK-FA مورد نیاز در ژئوپلیمرها برای دستیابی به عملکرد مطلوب هم در دمای محیط و هم در دمای بالا ایجاد شده است و با نمونه های خمیر، ملات و بتن با سیمان پرتلند معمولی مقایسه شد. ژئوپلیمر ساخته شده با ۵۰٪ متاکائولین و ۵۰٪ خاکستر بادی خمش و مقاومت فشاری بهینه را هم در دمای محیط و هم پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا فراهم می کنند. مقاومت فشاری و خمشی تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می یابد و از دمای ۱۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهشی است. داده‌های حاصل از آزمون مقاومت نمونه های ژئوپلیمر مبتنی بر MK-FA از نظر مقاومت در برابر خمش و فشار قابل مقایسه با نمونه های سیمان پرتلند معمولی، هم در دمای محیط و هم پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا هستند[۱۴].

هادی وهمکاران باهدف به دست آوردن طرح اختلاط بهینه بتن های ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره کوره آهن گدازی بر حسب مقاومت فشاری استفاده شده است. هدف اصلی تولید بتن ژئوپلیمر با مقاومت بالا با توجه به فاکتورهایی است که مقاومت فشاری را تحت تأثیر قرار می دهند. چهار فاکتور سرباره (۴۰۰،۴۵۰،۵۰۰Kg/m^3)، غلظت مولاریته (۱۰،۱۲،۱۴)، نسبت فعال کننده به

چسباننده (۰,۵۵،۰,۴۵،۰,۳۵) و نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید (۱,۵،۲،۲,۵) است. هرکدام از این فاکتورها در سه سطح در نظر گرفته شده است و با استفاده از روش تاگوچی با ۹ طرح اختلاط، بهینه ترین طرح اختلاط تعیین می شود. پس از اندازه گیری مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به این نتیجه دست یافتند که نمونه با مقدار چسباننده ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت فعال کننده به چسباننده ۰,۳۵، نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲,۵ و غلظت مولاریته ۱۴ مولار بیش ترین مقاومت را دارد. سرباره کوره آهن گدازی زمان گیرش اولیه بسیار سریع است با جایگزینی خاکستر بادی، متاکائولن و میکرو سیلیس از ۱۰ الی ۶۰ درصد به این نتیجه دست یافتند که با افزایش مقدار مصالح جایگزین زمان گیرش اولیه بتن افزایش می یابد و بیش ترین افزایش زمان گیرش مربوط به مخلوط سرباره کوره آهن گدازی و خاکستر بادی است[۱۵].

۳-مصالح وکاربردها

برای ساخت نمونه ها از ماسه،سرباره کوره آهن گدازی،میکروسیلیس،سدیم هیدروکسید(سود)،سدیم سیلیکات وفوق روان کننده وآب استفاده شده است که خصوصیات و ویژگی های مصالح به طورمختصردر زیر توضیح داده شده است.

۳-۱-سرباره کوره آهن گدازی

سرباره کوره آهن گدازی(GGBFS) محصول جانبی کوره های بلند است که برای ساخت آهن استفاده می شود. کوره های بلند در دمای حدود ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد کار می کنند و با مخلوط دقیق آهن، کک و سنگ آهک داخل کوره وارد می شود و سنگ آهن به آهن تبدیل می شود و مواد باقیمانده سرباره ای را تشکیل می دهند که در بالای آهن شناور است. این سرباره به صورت دوره ای به عنوان یک مایع مذاب مورد استفاده قرار می گیرد و اگر قرار است برای تولید GGBFS استفاده شود باید به سرعت در حجم زیادی از آب خاموش شود. این خنک سازی خواص سیمانی را بهینه می کند و گرانول هایی شبیه شن و ماسه درشت تولید می کند. سپس این سرباره "گرانول" خشک شده و به صورت پودر ریز در می آیدکه درشکل ۱ نشان داده شده است[۱۶].

شکل۱-سرباره کوره آهن گدازی

۲-۳-سدیم هیدروکسید

هیدروکسید سدیم به عنوان سود سوز آور نیز شناخته می شود. این ماده یک ماده ساخت مصنوعی است. هنگامی که در آب حل می شود یا با اسید خنثی می شود، مقدار قابل توجهی گرما آزاد می کند، که ممکن است برای اشتعال مواد قابل احتراق کافی باشد. از این ماده شیمیایی برای تولید صابون، ریون، کاغذ، مواد منفجره، مواد رنگی و فرآورده های نفتی استفاده می شود. این ماده همچنین درخشکشویی و سفیدکاری، تمیز کردن و فرآوری فلز، پوشش اکسید استفاده می شود.

۳-۳-سدیم سیلیکات

آب شیشه از قرن نوزدهم تولید می شود و اصول اولیه تولید سدیم سیلیکات از آن زمان تغییر نکرده است. این ماده معمولاً با گرم کردن مقادیر مختلف سدیم کربنات (Na_2CO_3) و ماسه سیلیس (SiO_2) در کوره در دمای بین ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد (تقریباً ۱۸۰۰ تا ۲۵۰۰ درجه فارنهایت) تولید می شود[۱۷].

۴-۳-میکروسیلیس

میکرو سیلیس به طور کلی به عنوان یک ماده مکمل سیمانی دسته بندی می شود. در ابتدا میکرو سیلیس به عنوان ماده جایگزین سیمان مشاهده می شد و می تواند به عنوان مواد افزودنی پوزولانی نیز مورد استفاده قرار گیرد پودر میکرو سیلیس یا دوده سیلیسی محصولی پودری خاکستری رنگ است و دراین مقاله از میکروسیلیس به عنوان جایگزین سرباره استفاده شده است.

۴-ساخت نمونه

پس از وزن کردن سدیم هیدروکسید (سود) در حالت جامد و اضافه نمودن آب آن دو را با هم مخلوط می کنیم و پس از آن، آب شیشه (سدیم سیلیکات) را با توجه به نسبت های در نظر گرفته شده در هر طرح اختلاط اضافه نمودیم. مصالح خشک را برای ساخت نمونه وزن کرده و آب و فوق روان کننده پس از وزن کردن با هم مخلوط می شوند و پس از توزین ابتدا مصالح خشک را در داخل استانبولی قرار داده و به مدت ۲ دقیقه با هم مخلوط می کنیم. پس از آن فعال کننده قلیایی، آب و فوق روان کننده به ترتیب اضافه نموده و پس از چند دقیقه مخلوط کردن ملات آماده می شود. ملات را در قالبهای موردنظر ریخته و برای خارج شدن حباب ها ویبره می شودو پس از ساخت نمونه ها به مدت یک روز در داخل قالب ها قرار گرفته و پس از آن با باز کردن نمونه ها برای عمل آوری در داخل آب اشباع از آهک قرار می‌گیرند. در ساخت ملات فاکتورهای مختلف را با مقادیرمشخص مدنظر قراردادیم که در جدول ۱بیان کردیم.

جدول۱-مقدارفاکتورهای درنظرگرفته شده

	نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید	درصدسنگدانه	مولاریته	میکروسیلیس	حرارت
1	2.0	40%	10	۱0%	60

نسبت محلول به چسباننده در طرح اختلاط را ۰,۴ در نظر گرفتیم وطرح اختلاط نمونه درجدول۴ نشان داده شده است.مقادیر برحسب کیلوگرم برمترمکعب(**Kg/m ^3**) است.

جدول ۲- طرح اختلاط نمونه

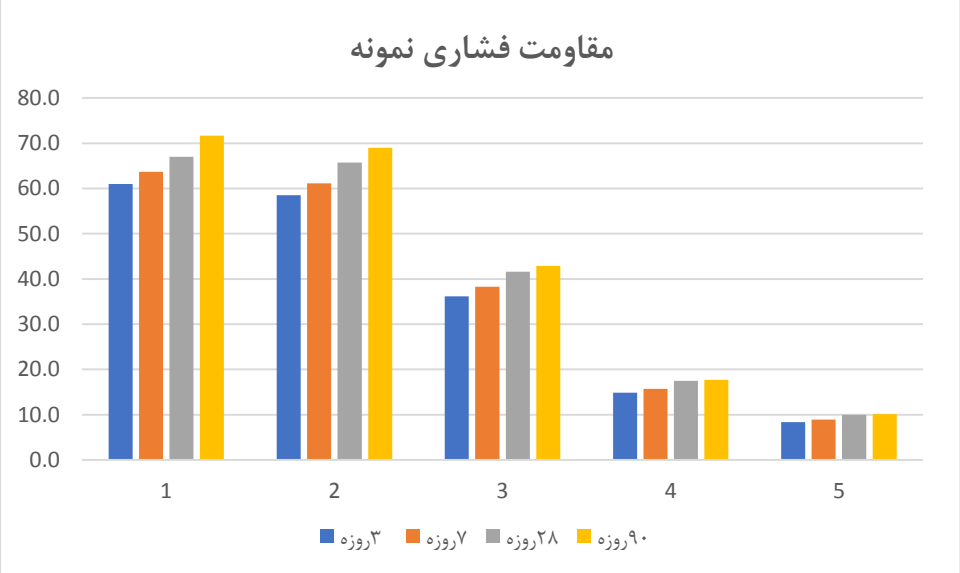
شماره طرح اختلاط	مقدارچسباننده	مقدار آب	سدیم هیدروکسید	سدیم سیلیکات	ماسه	سرباره	میکرو	فوق روان کننده	دما
1	959	75	128.88	257.76	960	959	43.35	10.1	60
2	959	75	128.88	257.76	960	959	43.35	10.1	250
3	959	75	128.88	257.76	960	959	43.35	10.1	500
4	959	75	128.88	257.76	960	959	43.35	10.1	750
5	959	75	128.88	257.76	960	959	43.35	10.1	1000

۵-مقاومت فشاری

نمونه ها را در دماهای مختلف (۶۰-۲۵۰-۵۰۰-۷۵۰-۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) ودرسنین مختلف (۳-۷-۲۸-۹۰روز) آزمایش کردیم. برای بررسی مقاومت فشاری نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل اون در دمای ۶۰ درجه قرار داده می شوند و پس از آن در دمای موردنظر قرار می‌گیرند. برای بررسی نمونه هایی که در دمای بالا قرار می‌گیرند از کوره الکتریکی استفاده شده است. نرخ رشد کوره الکتریکی ۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه است و نمونه ها پس از قرارگیری در داخل کوره و رسیدن به دمای هدف به مدت یک ساعت در دمای هدف قرار می‌گیرند و پس از اتمام کار کوره تا زمان خنک شدن در داخل کوره باقی می مانند و میانگین مقاومت فشاری سه نمونه به عنوان مقاومت فشاری در سن مورد نظر در نظر گرفته می شود.نتایج مقاومت فشاری نمونه ها برحسب مگاپاسکال(**MPA**)درجدول۳وشکل ۱نشان داده شده است.

جدول۳-مقاومت فشاری نمونه ها درسنین مختلف

شماره طرح اختلاط	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه
1	61.0	63.7	67.0	71.7
2	58.5	61.1	65.7	69.0
3	36.2	38.3	41.6	42.8
4	14.9	15.8	17.5	17.7
5	8.4	8.9	10.0	10.2



شکل۲-نمودارمقاومت فشاری نمونه ها درسنین مختلف

۶-شکل ظاهری

نمونه های ژئوپلیمری پس از قرار گیری در دمای بالا تغییر رنگ می دهند و رنگ نمونه ها با افزایش دما از حالت روشن به حالت تیره تغییرمی کند و ترک های ظاهری در دمای پایین مشاهده نمی‌شود اما افزایش دما باعث می شود که ترک‌هایی بر روی سطح نمونه ایجاد شودکه در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل۳-تغییر رنگ نمونه ها در دمای بالا

۷-نتیجه گیری

در این مقاله از سرباره کوره آهن گدازی (GGBFS) به عنوان ماده پایه ،سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید به عنوان فعال کننده های قلیایی درساخت ملات استفاده کردیم و برخی از خصوصیات ملات در دماهای مختلف را بررسی کردیم که به شرح زیر است.

۱-رنگ ظاهری نمونه ها پس از قرارگیری در دمای بالا از رنگ روشن به رنگ قهوه ای تیره تغییر می کند و نمونه ها ساختار کلی خود را پس از قرارگیری در دما بالا حفظ می کنند و ترک های ریز بر روی سطح نمونه ها مشاهده می شود.

۲- مقاومت فشاری نمونه ها در سن ۳ و ۷ روز تقریباً بین ۸۰ تا ۹۵ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه است مقدار مقاومت فشاری از طرح اختلاط ۱ تا طرح اختلاط شماره ۵ با افزایش درجه حرارت کاهش زیادی داشته است.

۳-بیش ترین مقاومت فشاری نمونه ها در سن ۹۰ روز ۷۱,۷ مگا پاسکال و کم‌ترین مقاومت فشاری در سن ۹۰روز ۱۰,۲ مگا پاسکال است. مقدار مقاومت فشاری نمونه هایی که در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند در سن ۹۰ روز بالای ۶۰ مگا پاسکال می باشد که نشان دهنده مقاومت خوب ژئوپلیمرها در این دما است و در دماهای ۵۰۰-۷۵۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد مقدار مقاومت روند کاهشی دارد.

منابع

١. Wilson, A.P., *Establishing a mix design procedure for Geopolymer concrete.* .٢٠١٥

٢. Suhendro, B., *Toward green concrete for better sustainable environment.* Procedia Engineering, ٢٠١٤. ٩٥: p. .٣٢٠-٣٠٥

٣. Radlinski, M., N. Harris, and P. Moncarz, *Sustainable concrete: Impacts of existing and emerging materials and technologies on the construction industry*, in *AEI ٢٠١١: Building Integration Solutions*. ٢٠١١. p. .٢٦٢-٢٥٢

٤. McLellan, B.C., et al., *Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement.* Journal of cleaner production, ٢٠١١. ١٩(١٠-٩): p. .١٠٩٠-١٠٨٠

٥. Colangelo, F., et al., *Thermal cycling stability of fly ash based geopolymer mortars.* Composites part b: engineering, ٢٠١٧. ١٢٩: p. .١٧-١١

٦. Byfors, K., et al ,.*Durability of concrete made with alkali-activated slag.* Special Publication, ١٩٨٩. ١١٤: p. .١٤٦٦-١٤٢٩

٧. Lahoti, M., K.H. Tan, and E.-H. Yang, *A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications.* Construction and Building Materials, ٢٠١٩. ٢٢١: p. .٥٢٦-٥١٤

٨. Duxson, P., et al., *Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, ٢٠٠٥. ٢٦٩(٣-١): p. .٥٨-٤٧

٩. Davidovits, J., *Geopolymers: inorganic polymeric new materials.* Journal of Thermal Analysis and calorimetry, ١٩٩١. ٣٧(٨): p. .١٦٥٦-١٦٣٣

١٠. Palomo, A., M. Grutzeck, and M. Blanco, *Alkali-activated fly ashes: A cement for the future.* Cement and concrete research, ١٩٩٩. ٢٩(٨): p. .١٣٢٩-١٣٢٣

١١. Barbosa, V.F., K.J. MacKenzie, and C. Thaumaturgo, *Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers.* International journal of inorganic materials, ٢٠٠٠. ٢(٤): p. .٣١٧-٣٠٩

١٢. Yaseri, S., et al., *The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste.* Construction and Building Materials, ٢٠١٧. ١٥٧: p. .٥٤٥-٥٣٤

١٣. Yasaswini, K. and A.V. Rao, *Behaviour of geopolymer concrete at elevated temperature.* Materials Today: Proceedings, ٢٠٢٠. ٣٣: p. .٢٤٤-٢٣٩

١٤. Zhang, H.Y., et al., *Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications.* Construction and Building Materials, ٢٠١٤. ٥٥: p. .٤٥-٣٨

١٥. Hadi, M.N., N.A. Farhan, and M.N. Sheikh, *Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method.* Construction and Building Materials, ٢٠١٧. ١٤٠: p. .٤٣١-٤٢٤

١٦. Chesner ,W.H., et al., *User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction.* ٢٠٠٢, Recycled Materials Resource Center.

١٧. Kellogg, D.O., *New American Supplement to the Latest Edition of the Encyclopedia Britannica*. .١٩٠٠