# بررسی آزمایشگاهی ملات ژئوپلیمری بر پایه سرباره و مطالعه تأثیر پارامترهای نسبت ماسه به سرباره و مولاریته هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

**محمد کاظم شربتدار[1]، وحید قدکی[2]**

۱- دانشیار دانشکده عمران دانشگاه سراسری سمنان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده عمران دانشگاه سراسری سمنان

v.ghadaki@semnan.ac.ir

**چکیده**

با توجه به تولید زیاد حجم زیاد تولید آلودگی توسط صنعت سیمان، باید به دنبال مواد جایگزین برای سیمان پرتلند معمولی بود. در این مقاله، سعی شده تا با استفاده از مواد و مصالح موجود در کشور، و با توجه به ظرفیت‌های موجود، طرح اختلاطی مناسب برای تولید ملات ژئوپلیمریکه می تواند جایگزینی مناسب برای بتن ژئوپلیمری باشد، ارائه شود. با توجه به وجود کارخانجات ذوب آهن در کشور و حجم بالای تولید سرباره به عنوان پسماند صنعتی توسط این صنعت، تصمیم گرفته شد تا از سرباره به عنوان یک منبع آلومیناسیلیکاتی برای تولید ملات ژئوپلیمری استفاده شود. همچنین از هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم، برای ساخت محلول فعالساز استفاده شده است. در این تحقیق ۹ طرح اختلاط با ایجاد تغییر در مقادیر و نسبت‌های مواد سازنده ملات ژئوپلیمری، به دست آمده است. دو پارامتر در این طرح اختلاط‌ها با یکدیگر تفاوت دارند و هدف از ایجاد این تفاوت‌ها، بررسی تأثیر هریک از این پارامترها بر مقاومت فشاری نمونه‌های بدست آمده است. دو پارامتر مورد نظر عبارتند از: غلظت هیدروکسید سدیم که در این تحقیق برابر با سه مقدار ۱۲ و ۱۵ و ۱۸، در نظر گرفته شده است و نسبت ماسه به سرباره که سه نسبت برابر با ۱,۵ و ۲ و ۲,۵ در نظر گرفته شد. از هر طرح اختلاط، ۵ نمونه مکعبی ۵۰*۵۰*۵۰ میلی‌متر ساخته شد و میانگین مقاومت آن‌ها به عنوان مقاومت فشاری طرح در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفتند. به صورت خلاصه مشاهده شد که طرح‌های با غلظت هیدروکسید سدیم بیشتر مقاومت بالاتری از خود نشان دادند و افزایش مولاریته، مقاومت فشاری نمونه‌ها را بالا برد. همچنین از بین سه نسبت ماسه به سرباره، طرح‌های با نسبت ۱,۵ مقاومت بیشتری از سایر نمونه‌ها داشتند و کمترین مقاومت مربوط به نمونه‌های با نسبت ماسه به سرباره ۲,۵ بود و این نتیجه حاصل شد که بالا رفتن این نسبت، سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود.

**کلمات کلیدی: ملات ژئوپلیمری، سرباره، هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، مقاومت فشاری**

## ۱. مقدمه

در جهان امروز، هرچه رو به جلو گام بر می‌داریم، دایره نیازهای بشر وسیع‌تر شده و شعاع آن به سرعت رو به رشد است. انسان‌ها با توجه به این نیازها به دنبال راه حل‌های گوناگونی می‌روند که ممکن است مناسب یا برای مدتی جوابگوی مشکلات باشد و پس از مدتی، همان راه حل قبلی، خود تبدیل به مشکلی بزرگ شود. در مباحث عمرانی نیز، با توجه به پیچیده شدن شرایط زندگی از جمله افزایش جمعیت و کره زمین و به تبع آن تولید آلودگی بیشتر، نیاز به توسعه پایدار و زیر ساخت‌ها روز به روز بیشتر می‌شود و برای ایجاد زیر ساخت‌های جدید، مصرف مصالح ساختمانی از جمله سیمان پرتلند معمولی افزایش می‌یابد. طبق مطالعات صورت گرفته، تقاضای جهانی برای سیمان پرتلند معمولی حدود چهار میلیارد تن در سال می‌باشد. این حجم از تقاضای بالا،

سیمان را به پر مصرف‌ترین ماده پس از آب تبدیل کرده است و پیش بینی می‌شود که در سال‌های آینده این عدد با رشدی ۸ تا ۱۰ درصدی همراه باشد[۱-۳]. استفاده از سیمان پرتلند معمولی برای ساخت بتن ممکن است در گذشته چه از لحاظ اقتصادی و چه از لحاظ مقاومتی، ایده‌ای بسیار مناسب و کار آمد بوده باشد ولی در حال حاضر استفاده از این نوع سیمان در صنعت ساخت و ساز، خود به مشکلی بزرگ برای محیط زیست مبدل شده است و در فرآیند تولید آن که نیاز به انرژی گرمایی بسیار بالایی دارد، حجم زیادی از سوخت‌های فسیلی برای تامین این انرژی مصرف می‌شود که این امر با مفهوم توسعه پایدار کاملا در تضاد است. این صنعت، سهم عمده‌ای در انتشار گاز کربن دی اکسید در جو را داراست و طبق منابع مختلف، در فرآیند تولید سیمان، به ازای تولید هر تن سیمان، یک تن کربن دی اکسید تولید می‌شود[۳]. از طرفی طبق برآوردها تا سال ۲۰۲۰، میزان انتشار گاز کربن دی اکسید در جو رشدی ۵۰ درصدی خواهد داشت[۴و۵]. حدودا ۷ درصد از حجم کل گاز کربن دی اکسید تولیدی در جهان، مربوط به کارخانجات تولید سیمان است. از این رو، باید به دنبال مصالح جایگزین مناسب بود که هم از لحاظ مقاومتی توانایی رقابت با سیمان پرتلند معمولی را داشته باشد و هم مفهوم توسعه پایدار و حفظ محیط زیست را در نظر بگیرد. از ژئوپلیمرها می‌توان به عنوان گزینه‌ای مناسب نام برد که تقریبا تمامی جنبه‌ها و موارد فوق الذکر را ارضاء می‌نماید. ژئوپلیمر یا پلیمرهای معدنی اصطلاحا به موادی اطلاق می‌شود که از فعال سازی قلیایی ترکیبات غنی از آلومینا و سیلیکا بدست می‌آیند. استفاده از ژئوپلیمرها مزیت‌هایی چون: کاهش تولید کربن دی اکسید، کاهش هزینه‌ها، دوام بالا در محیط‌های مهاجم و در برابر عوامل خورنده، کسب مقاومت در زمان بسیار کوتاه، انرژی تولید بسیار کمتر نسبت به سیمان پرتلند معمولی، استفاده مؤثر از تولیدات جانبی و پسماندهای صنعتی همچون خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و خاکستر پوسته برنج و ... را دارد که همه این ویژگی‌ها، این نوع چسباننده‌ها را تبدیل به جایگزینی مناسب برای سیمان پرتلند معمولی و در کنار آن دوستدار محیط زیست کرده است. حال در بحث کیفیت و مقاومت و سایر مشخصات مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمری، باید گفت که عوامل و متغیرهای بسیاری در این بین دخیل هستند. از مواد آلومیناسیلیکاتی مختلف گرفته تا انواع محلول قلیایی و مقادیر آن‌ها که در طرح‌های اختلاط مختلف می‌توان در تهیه ژئوپلیمرها از آن‌ها بهره برد. استفاده از مواد آلومیناسیلیکاتی مختلف مثل خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و سرباره کوره بلند، زئولیت، متاکائولن و ... به عواملی همچون موقعیت جغرافیایی و نوع معادن و صنایع موجود در منطقه و اقتصادی بودن و فراوانی ماده و کاربردی بودن آن بستگی دارد. در کشور ما با توجه به وجود صنعت ذوب آهن و فولاد، می‌توان از محصول جانبی و ضایعات این کارخانجات که همان سرباره کوره بلند می‌باشد به عنوان یک ماده آلومیناسیلیکاتی نسبتا اقتصادی و در دسترس بهره برد. در مورد محلول قلیایی و نقشی که در تولید بتن ژئوپلیمری ایفا می‌کنند نیز، می‌توان گفت که وظیفه این مواد ایجاد یک محیط قلیایی در مخلوط برای ادامه فرآیند هیدراسیون است و از جمله موادی که در تولید این محلول از آن‌ها استفاده می‌شود عبارتند از : هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم یا همان آب شیشه، هیدروکسید پتاسیم، کربنات سدیم و ... نام برد.ژئوپلیمریزاسیون به طور کلی فرآیندی است که در آن اتم های سیلیسیم و آلومینیوم و اکسیژن، حلقه‌هایی از مولکول‌های چهار وجهی $SiO_4$ و $AlO_4$ متناوبا و با به اشتراک گذاشتن اتم‌های اکسیژن، تشکیل می‌دهند[۷و۸].حلالیت آلومینوسیلیکات‌های قلیایی در آب بسیار کم می‌باشد و این به این معنی است که وقتی محلول‌های پایدار سیلیکات و آلومینات در تماس با هم قرار می‌گیرند، محلول آلومینوسیلیکاتی، برای تشکیل ژئوپلیمری با زئولیت، ژل شده یا رسوب می‌دهد. بنابراین در دوغاب‌های آلومینوسیلیکات قلیایی، حضور Al برای سخت شوندگی شیمیایی برگشت ناپذیر، لازم است[۹]. کاتیون‌های قلیایی یا قلیایی خاکی همچون $Na^+$ و $K^+$ و $Ca^+$ نیز نقش ایجاد تعادل در بار الکتریکی یون‌های منفی را بر عهده دارند[۱۰].

## ۲. معرفی مصالح

- **سرباره کوره بلند(GGBFS)**

سرباره به ضایعات کارخانه ذوب آهن گفته می‌شود که در فرآیند ذوب سنگ آهن در کارخانجات ذوب آهن و به عنوان پسماند صنعتی تولید می‌شود. سرباره به عنوان جزء اصلی و پیش ماده و یک منبع غنی آلومینوسیلیکاتی در ساخت بتن ژئوپلیمری در این پروژه به کار برده شده که علاوه بر به ارمغان آوردن مشخصات مکانیکی مناسب برای بتن ژئوپلیمری، یک ماده ارزان و در دسترس در کشور ما می‌باشد. سرباره مورد استفاده در این پروژه، محصول جانبی کارخانه ذوب آهن اصفهان بوده و بلین[۱] آن برابر با $۴۰۰۰cm^2/g$ است و وزن مخصوص آن نیز برابر با $۲,۷۵۴gr/cm^3$ می‌باشد. ترکیبات شیمیایی آن پس انجام آنالیز شیمیایی (XRF) در جدول ۱ آورده شده است.

---

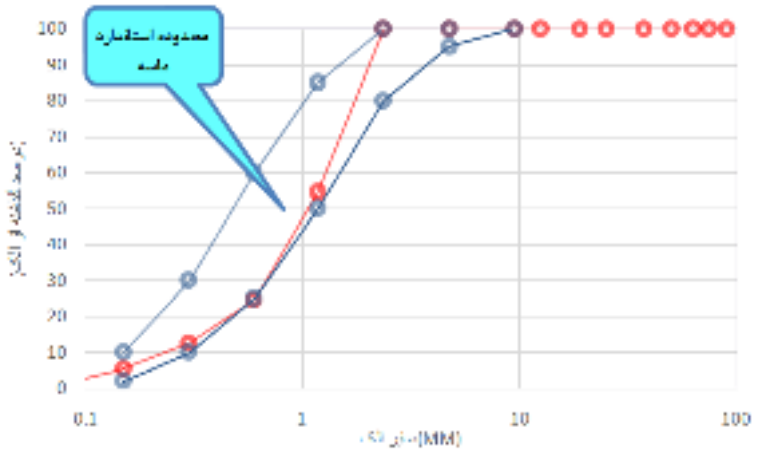
۱: Blaine: میزان ریز بودن ذرات تشکیل دهنده یک ماده پودر شده

جدول۱- آنالیز شیمیایی ترکیبات موجود در سرباره مورد استفاده در پروژه

| $MnO$ | $Cl$ | $Na_2O$ | $K_2O$ | $MgO$ | $CaO$ | $Fe_2O_3$ | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | سایر |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۰٫۹۸ | ۰٫۰۳ | ۰٫۶ | ۰٫۷۰ | ۱۰ | ۴۲ | ۰٫۴۲ | ۱۰٫۰ | ۲۸٫۲ | ۰٫۲۰ |

- **ماسه(Sand)**

ماسه مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها، ماسه معمولی شسته شده و عبوری از الک نمره ۸ و اندازه بزرگترین دانه آن برابر با ۲,۳۶ میلیمتر بوده است. ماسه مورد نیازاز شهر سمنان تهیه شده و درصد جذب آن برابر با ۱,۳۵ اندازه‌گیری شد. نمودار دانه بندی آن در شکل ۱ می‌باشد.




شکل ۱- نمودار دانه بندی ماسه به کار رفته در ساخت نمونه‌ها

- **هیدروکسید سدیم (NaOH)**

هیدروکسید سدیم یک ترکیب آلی جامد و سفید رنگ با قدرت بسیار بالای قلیایی است. چگالی این ماده برابر با $2,13gr/cm^3$ و جرم مولی آن برابر با $40,01gr/mol$ می‌باشد.با توجه به این که یکی از اهداف این تحقیق، بررسی تأثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر مشخصات مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری است، بنابراین از سه غلظت یا مولاریته متفاوت با مقادیر ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ استفاده شده است. این ماده یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده محلول فعال‌ساز می‌باشد. در واقع یکی از دلایل اصلی استفاده از مواد قلیایی در ساخت بتن ژئوپلیمری، بالا نگه داشتن pH مخلوط است. در صورتیکه سرباره یا مواد آلومینوسیلیکاتی، که نقش چسباننده در بتن ژئوپلیمری را ایفا می‌کنند، تنها با آب مخلوط شوند، یک لایه محافظ ناکارآمد، پیرامون ذرات سرباره را فرا می‌گیرد که از ادامه واکنش‌ها جلوگیری می‌کند. وجود یک محلول قلیایی همچون هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم، سبب بالا رفتن pH مخلوط و افزایش یون‌های $OH^-$ در محیط مخلوط شده و در نتیجه باعث شکسته شدن لایه‌های محافظ پیرامون ذرات آلومینوسیلیکاتی و در نتیجه ادامه واکنش‌ها می‌گردد[۱۱]. در این تحقیق از سود پرک ۹۸ درصد محصول شرکت کیمیا تهران اسید استفاده شده است.

- **سیلیکات سدیم($Na_2SiO_3$)**

سیلیکات سدیم یا آب شیشه یا متاسیلیکات سدیم نوعی سیلیکات قلیایی حل شدنی است که اولین بار توسط ون هلمونت کشف شد. فرمول شیمیایی آن ($Na_2SiO_3$) است و جرم مولی آن برابر $122,07gr/mol$ بوده و pH آن در محدوده قلیایی و حدودا برابر بین ۱۳-۱۲ می‌باشد. این ماده محلول در آب است و حتی در آب سرد به سادگی حل می‌شود. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم است در محلول فعال ساز ثابت و برابر ۲ می‌باشد.سیلیکات سدیم بسته به نسبت اکسید سیلیس بر اکسید سدیم موجود در ترکیب آن، انواع و کاربردهای متفاوتی دارد. این نسبت که اصطلاحا به آن Ratio سیلیکات سدیم گفته می‌شود، به صورت $Ratio= SiO_2/Na_2O$ می‌باشد و در این تحقیق از سیلیکات سدیم محلول با Ratio=۲,۳۵ یا ریشو بینابینی با غلظت ۴۸٪

استفاده شده که محصول شرکت صنایع سیلیکات ایران می‌باشد. ترکیبات شیمیایی سیلیکات سدیم استفاده شده در این آزمایش، در جدول ۲ آورده شده است.

**جدول ۲-درصد ترکیبات شیمیایی سیلیکات سدیم مورد استفاده در این تحقیق**

| ترکیب شیمیایی | درصد |
|---|---|
| $Na_2O$ | ۱۴,۳۰٪ |
| $SiO_2$ | ۳۳,۶۰٪ |
| $H_2O$ | ۵۲٪ |

- **آب(Water)**

آب یکی از مهمترین عوامل در ساخت انواع بتن‌هامی‌باشد و نسبت آب مورد استفاده در کل مخلوط که شامل آب موجود در محلول‌های سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم و آبی که به صورت خالص و مستقیم برای استفاده در مخلوط از آن استفاده می‌شود، هست، نباید از مقدار مشخصی تجاوز کند، چرا که آب بیش از اندازه، مشکلاتی همچون آبرفتگی، ضعف در مقاومت نهایی بتن، پدید آمدن ترک‌های ریز و کاهش دوام و ... را به دنبال خواهد داشت. در این تحقیق از آب لوله کشی شهری برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است.

## ۳. جزئیات طرح اختلاط‌ها و شرح نحوه اختلاط مصالح و عمل آوری و آزمایش

- **جزئیات طرح اختلاط‌ها**

در این تحقیق سعی شده تا با ایجاد تغییر در نسبت‌ها و مقادیر مواد سازنده ملات ژئوپلیمری، تأثیر این تغییرات بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گیرد و با رسم نمودارهایی، مقایسه واقعی و نسبی بین مقاومت فشاری طرح‌های مختلف انجام شده است. دو پارامتر مورد نظر عبارتند از: الف- غلظت یا مولاریته محلول هیدروکسید سدیم که سه محلول هیدروکسید سدیم با غلظت‌های ۱۲و ۱۵و ۱۸ تهیه گردید. ب- نسبت مقدار ماسه به مقدار پیش ماده یا منبع آلومیناسیلیکاتی که همان سرباره می‌باشد. برای این پارامتر نیز سه نسبت برابر با ۱,۵و ۲و ۲,۵ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که نسبت‌های در نظر گرفته شده برای پارامتهای مورد نظر، با مطالعه منابع مختلف و بررسی‌های کافی در زمینه طرح اختلاط های به کار گرفته شده توسط افراد مختلف، انتخاب شده‌اند. میزان آب استفاده شده در تمامی طرح‌ها با نسبت ثابت و یکسان در نظر گرفته شده که این نسبت به صورت (پیش‌ماده/آب)و برابر با ۰,۱۵ می‌باشد. همچنین نسبت مایع فعال ساز به پیش ماده نیز در همه طرح‌ها ثابت و برابر با ۰,۴ در نظر گرفته شده است.همچنین پارامتر زمان ونیز تأثیر آن بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری نیز مورد بررسی قرار گرفته و نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه از هر طرح اختلاط ساخته شده است. در مجموع ۹ طرح اختلاط برای ساخت ملات ژئوپلیمری بدست می‌آید. از هر طرح اختلاط، تعداد ۵ نمونه مکعبی به ضلع ۵۰میلی‌مترساخته شده و میانگین مقاومت این ۵ نمونه، به عنوان مقاومت آن طرح در نظر گرفته شده است. مجموعا، کل نمونه‌های فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه ساخته شده، ۹۰ عدد می‌باشد. در جدول ۳، طرح اختلاط نمونه‌ها و مقادیر مصالح استفاده شده برای ساختهر طرح اختلاط، به ازای یک متر مکعب ملات ژئوپلیمری و نیز مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه هر طرح آورده شده است.

جدول ۳- طرح اختلاط و مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات ژئوپلیمری در سنین ۷ و ۲۸ روزه

| Sand/Slag | molarity of NaOH | ss/sh | نام طرح | slag (kg/m³) | sand (kg/m³) | water (kg/m³) | NaOH (kg/m³) | $Na_2SiO_3$ (kg/m³) | Activator (kg/m³) | مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa) | مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲٫۵ | ۱۲ | ۲ | S۱-۱ | ۵۱۸٫۵ | ۱۲۹۶ | ۷۷٫۷۸ | ۶۹٫۱۳ | ۱۳۸٫۲۷ | ۲۰۷٫۴ | ۶۸٫۲۲ | ۷۳٫۱۳ |
| | ۱۵ | ۲ | S۱-۲ | ۵۱۸٫۵ | ۱۲۹۶ | ۷۷٫۷۸ | ۶۹٫۱۳ | ۱۳۸٫۲۷ | ۲۰۷٫۴ | ۸۰٫۲۴ | ۸۴٫۴۲ |
| | ۱۸ | ۲ | S۱-۳ | ۵۱۸٫۵ | ۱۲۹۶ | ۷۷٫۷۸ | ۶۹٫۱۳ | ۱۳۸٫۲۷ | ۲۰۷٫۴ | ۸۱٫۶۶ | ۸۶٫۹۷ |
| ۲ | ۱۲ | ۲ | S۲-۱ | ۵۹۱٫۶ | ۱۱۸۳ | ۸۸٫۷۳ | ۷۸٫۸۷ | ۱۵۷٫۷۵ | ۲۳۶٫۶۲ | ۸۴٫۶۵ | ۸۰٫۶۸ |
| | ۱۵ | ۲ | S۲-۲ | ۵۹۱٫۶ | ۱۱۸۳ | ۸۸٫۷۳ | ۷۸٫۸۷ | ۱۵۷٫۷۵ | ۲۳۶٫۶۲ | ۸۴٫۸۶ | ۸۷٫۰۷ |
| | ۱۸ | ۲ | S۲-۳ | ۵۹۱٫۶ | ۱۱۸۳ | ۸۸٫۷۳ | ۷۸٫۸۷ | ۱۵۷٫۷۵ | ۲۳۶٫۶۲ | ۸۶٫۵۶ | ۸۲٫۵۸ |
| ۱٫۵ | ۱۲ | ۲ | S۳-۱ | ۶۸۸٫۵ | ۱۰۳۳ | ۱۰۳٫۳ | ۹۱٫۸۰ | ۱۸۳٫۶۱ | ۲۷۵٫۴۱ | ۸۶٫۱۳ | ۸۳٫۲۶ |
| | ۱۵ | ۲ | S۳-۲ | ۶۸۸٫۵ | ۱۰۳۳ | ۱۰۳٫۳ | ۹۱٫۸۰ | ۱۸۳٫۶۱ | ۲۷۵٫۴۱ | ۸۹٫۷۷ | ۸۸٫۷۵ |
| | ۱۸ | ۲ | S۳-۳ | ۶۸۸٫۵ | ۱۰۳۳ | ۱۰۳٫۳ | ۹۱٫۸۰ | ۱۸۳٫۶۱ | ۲۷۵٫۴۱ | ۹۰٫۵۸ | ۹۴٫۳۷ |

- **نحوه اختلاط مصالح**

در این تحقیق، یک روش اختلاط و ساخت ملات ژئوپلیمری، متناسب با شرایط موجود در نظر گرفته شد که در ادامه شرح داده می‌شود. در ابتدا طبق مقادیر آورده شده در جدول ۳، مقدار مواد مورد نیاز برای ساخت ملات ژئوپلیمری، وزن می‌شود. در مرحله اول، مواد خشک از جمله پیش ماده‌ها شامل سرباره و ماسه به مدت ۶۰ ثانیه به صورت خشک مخلوط می‌شوند تا مخلوط به صورت همگن درآید. در مرحله دوم، محلول فعال کننده که از اختلاط هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم با نسبت‌های مورد نظر بدست آمده، به مخلوط خشک اضافه می‌شود و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط می‌شوند. پس از افزودن و اختلاط محلول فعال ساز با مخلوط خشک، در مرحله سوم، آب به مخلوط افزوده می‌شود و اختلاط به مدت ۶۰ ثانیه ادامه می‌یابد. پس از این ۶۰ ثانیه، میکسر خاموش شده و ملات با ابزاری مناسب، در داخل ظرف مخلوط، زیر و رو می‌شود تا اطمینان حاصل شود که در قسمت پایین ظرف، مخلوط خشکی باقی نمانده است. پس از این وقفه، در مرحله آخر، دوباره اختلاط به مدت ۹۰ ثانیه ادامه می‌یابد و و پس از ۹۰ ثانیه، ملات ژئوپلیمری آماده ریختن در قالب است.

- **نحوه عمل آوری**

پس ریختن ملات به داخل قالب، نوبت به مرحله عمل آوری می‌رسد و این مرحله به ویژه در بتن‌های ژئوپلیمری، یکی از مسائل حائز اهمیت می‌باشد و باید توجه بسیاری به آن داشت. در بحث عمل آوری بتن‌های ژئوپلیمری، راهکارها و شیوه‌های متنوعی در منابع مختلف به کار گرفته و ارائه شده است که در این بین می‌توان به چند روش عمل آوری از جمله: عمل آوری در هوای آزاد، عمل آوری به صورت مرطوب که خود به چند شاخه تقسیم می‌شود، عمل آوری حرارتی در آون، عمل آوری در پلاستیک‌های بدون منفذ برای جلوگیری از ورود و خروج هوا و رطوبت و یا عمل آوری‌های ترکیبی که چند روش مختلف با یکدیگر تلفیق می‌شوند و ... . پس از مطالعه نتایج تحقیقات مختلف در بحث عمل آوری بتن‌های ژئوپلیمری، این موضوع روشن شد که یکی از روش‌های مناسب جهت عمل آوری که سبب کسب مقاومت بیشتر و گیرش سریعتر می‌گردد، عمل آوری در آون و تحت دماهای مختلف است. بنابراین روش اتخاذ شده در این تحقیق جهت عمل آوری نمونه‌ها، عمل آوری حرارتی در آون و در دمای $60^{o}C$ و به مدت ۲۴ ساعت می‌باشد. نکته مهمی که در

عمل آوری نمونه‌ها در این تحقیق رعایت شده است، استفاده از پوشش نایلونی به دور قالب‌ها، جهت جلوگیری از کاهش رطوبت نمونه‌ها در مدت زمان حضور در آون می‌باشد.

- **آزمایش مقاومت فشاری**

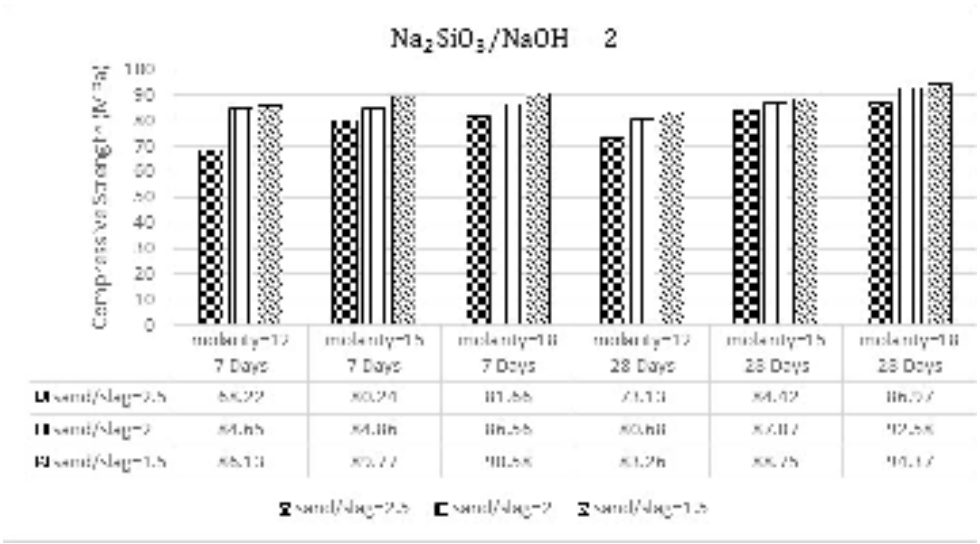
این آزمایش بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد (۵۰*۵۰*۵۰mm) و طبق استاندارد ASTM C۳۹ انجام می‌گیرد. روند آزمایش به این صورت است که نمونه‌های مکعبی زیر جک هیدرولیکی قرار داده می‌شوند و در جهت قائم، تحت فشار قرار می‌گیرند تا در آخر از هم گسیخته شد و بیشترین فشار یا تنشی که برای شکستن نمونه بر حسب MPa مورد نیاز بوده است، توسط دستگاه ثبت می‌شود. ظرفیت دستگاه مورد استفاده ۳۰۰۰ کیلونیوتون می‌باشد.

## ۴. بررسی و تحلیل نتایج

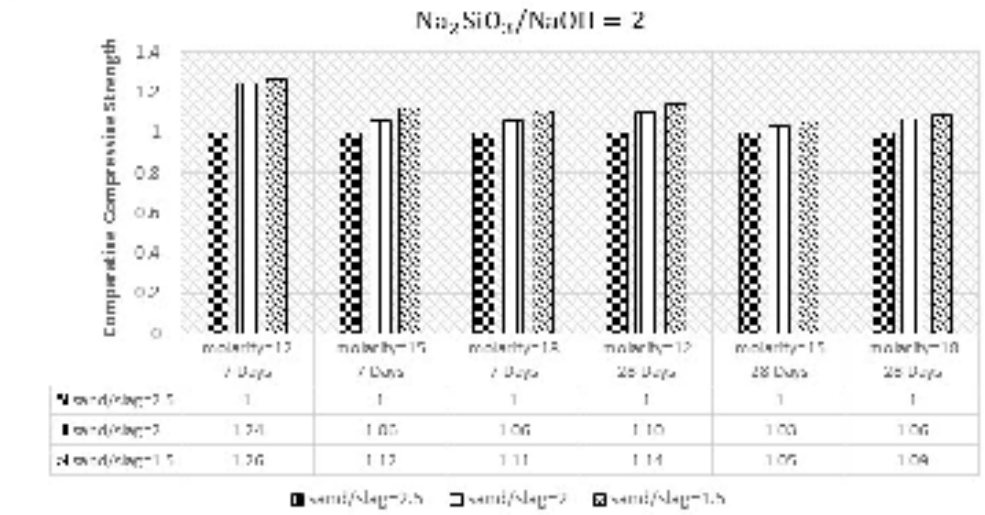
پس از مشاهدات اولیه و جمع‌آوری داده ها و بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری بر روی ۱۸۰ نمونه مکعبی به ابعاد (۵۰*۵۰*۵۰mm)، برای پی بردن به تأثیر جداگانه هریک از پارامتر های نسبت ماسه به سرباره، نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم و غلظت محلول هیدروکسید سدیم، باید نمودار ها و جدول های متعددی رسم شود. در ادامه به بررسی جداگانه تأثیر هر پارامتر بر مقاومت فشاری نمونه ها پرداخته می شود.

- **بررسی تأثیر نسبت ماسه به سرباره بر مقاومت فشاری**

با توجه به نمودارها و جداول، می توان این نکته را دریافت که با کاهش این نسبت از ۲,۵ به ۲ و در نهایت ۱,۵، مقاومت فشاری در همه دسته ها با افزایش همراه است. به عبارتی با بالاتر رفتن مقدار سرباره در مخلوط که نقش چسباننده را در این بین ایفا می کند، مقاومت فشاری افزایش می یابد. همچنین با نگاه به نمودار اشکال ۲ و ۳ که مقاومت فشاری نمونه ها را به صورت نسبی بررسی کرده، اینگونه برداشت می شود که در مولاریته ۱۲ هیدروکسید سدیم، روند تغییر مقاومت فشاری با تغییر نسبت ماسه به سرباره با شیب تندتری همراه بوده و در نسبت های ماسه به سرباره ۲ و ۱,۵، به ترتیب با ۲۴ و ۲۶ درصد رشد مقاومت فشاری در سن هفت روزه نسبت به طرح با نسبت ماسه به سرباره ۲,۵ همراه بوده است. این روند در مولاریته های ۱۵ و ۱۸ هیدروکسید سدیم نسبتا مشابه و با شیب کمتری صورت پذیرفته است و این روند در سن ۲۸ روزه نیز مشاهده می گردد.




**شکل ۲- بررسی تأثیر نسبت ماسه به سرباره بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری در سنین ۷ و ۲۸ روزه**

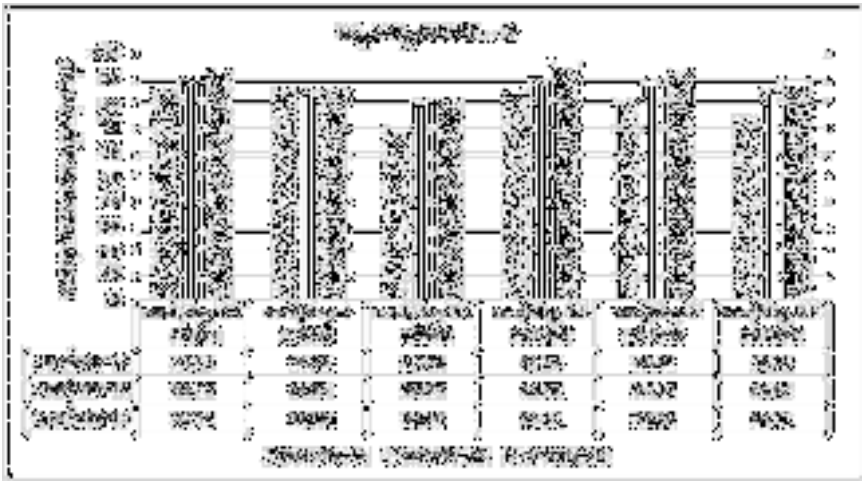



**شکل ۳- بررسی نسبی تأثیر نسبت ماسه به سرباره بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری در سنین ۷ و ۲۸ روزه (بصورت بی بعد)**

به طور کلی مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۷ روزه، با کاهش نسبت سرباره به ماسه از ۲,۵ به ۲ و ۱,۵، در مولاریته‌های ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ به ترتیب در بازه‌های (٪۲۴ تا ۲۶٪) و (٪۶ تا ۱۲٪) و (٪۶ تا ۱۱٪) با تغییر و افزایش مقاومت همراه بوده است.در نمونه های مکعبی ۲۸ روزه نیز، افزایش مقاومت فشاری با کاهش نسبت ماسه به سرباره در همه غلظت های هیدروکسید سدیم دیده شد. رشد مقاومت در نمونه های ۲۸ روزه با شیب ملایم‌تری نسبت به نمونه های ۷ روزه صورت گرفته است. به طوریکه مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۲۸ روزه، با کاهش نسبت ماسه به سرباره از ۲,۵ به ۲ و ۱,۵، در مولاریته‌های ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ به ترتیب در بازه‌های (٪۱۰ تا ۱۴٪) و (٪۳ تا ۵٪) و (٪۶ تا ۹٪) با تغییر و افزایش مقاومت همراه بوده است. با توجه به مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه این موضوع برداشت شد که پارامتر نسبت ماسه به سرباره، بر مقاومت فشاری نمونه‌های با مولاریته هیدروکسید سدیم کمتر، تأثیر بیشتری دارد.

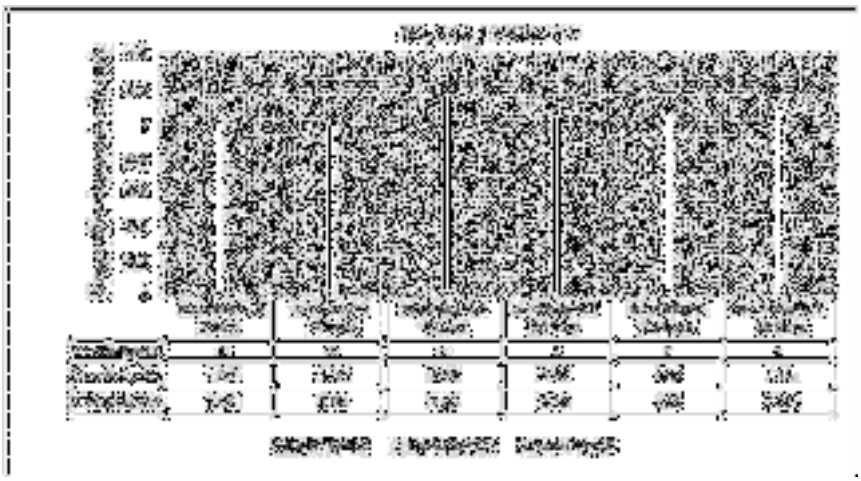
- **تأثیر مولاریته هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری**

از سه مولایته یا غلظت هیدروکسید سدیم متفاوت با مقادیر ۱۲ و ۱۵ و ۱۸ مولار جهت ساخت نمونه های ملات ژئوپلیمری و مطالعه تأثیر این پارامتر بر مقاومت فشاری استفاده شده است.از یک نسبت ثابت برابر با ۰,۴، برای نسبت محلول فعالساز به پیش‌ماده استفاده شده است و در همه طرح اختلاط‌ها، مقدار کل محلول فعالساز نسبت به پیش ماده همواره مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است. در نمودارهای اشکال ۴ و ۵ ، تأثیر این پارامتر، در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. به طور کلی، در بیشتر موارد، افزایش مولاریته هیدروکسید سدیم، منجر به بالا رفتن مقاومت فشاری نمونه ها شده است.نکته‌ای که در این جا جلب توجه می کند، این است که در طرح اختلاط های با نسبت ماسه به سرباره بیشتر( مقدار سرباره کمتر) و به صورت خاص نسبت ماسه به سرباره ۲,۵، افزایش مولاریته هیدروکسید سدیم در سن ۷ روزه، تأثیر بیشتری بر افزایش مقاومت فشاری گذاشته است. به طوریکه افزایش مولاریته از ۱۲ تا ۱۵ و از ۱۲ تا ۱۸به ترتیب باعث رشد مقاومت فشاری به میزان ٪۱۸ و ٪۲۰ شده است.



**شکل ۴- بررسی تأثیر مولاریته هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری در سنین ۷ و ۲۸ روزه**

با ملاحظه نمودارهای مربوط به مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها، مشاهده می شود که در سنین بالا، افزایش مولاریته در افزایش مقاومت فشاری نمونه های با نسبت ماسه به سرباره بیشتر(مقدار سرباره کمتر)، تأثیر بیشتری دارد. به طوریکه در نسبت ماسه به سرباره برابر با ۲.۵، افزایش مولاریته از ۱۲ تا ۱۵ و از ۱۲ تا ۱۸به ترتیب باعث رشد مقاومت فشاری به میزان ٪۱۵ و ٪۱۹ شده است. این در حالیست که در نسبت ماسه به سرباره ۲، افزایش مولاریته هیدروکسید سدیم از ۱۲ تا۱۵و از ۱۲ تا ۱۸به ترتیب باعث رشد مقاومت فشاری به میزان ٪۸ و ٪۱۵ شده است و در نسبت ماسه به سرباره ۱,۵، میزان رشد با تغییر مولاریته از ۱۲ تا ۱۵و از ۱۲ تا ۱۸به ترتیب باعث رشد مقاومت فشاری به میزان ٪۷ و ٪۱۳ بوده است. مشابه این روند در نمونه های ۷ روزه نیز تکرار شد. همچنین مشابه نمونه‌های ۷ روزه، این موضوع مشاهده می‌شود که شیب رشد مقاومت از مولاریته ۱۲ تا ۱۵، بیشتر از شیب رشد در تغییر مولاریته از ۱۵ تا ۱۸ است.



**شکل ۵- بررسی نسبی تأثیر مولاریته هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری در سنین ۷ و ۲۸ روزه**

## ۵. نتیجه گیری

پس از بررسی نمودارها و داده‌ها در قسمت قبل، می توان عواملی که تأثیر مثبت بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری دارند را شناسایی کرده و در پروژه-های کاربردی، از این موارد در جهت ساخت یک طرح اختلاط مناسب بهره برد. بدون شک با استفاده از این نوع بتن به جای بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی، می‌توان از ورود حجم زیادی از مواد آلاینده به محیط زیست جلوگیری کرد. به طور کلی مشخص شد که عوامل افزایش دهنده مقاومت فشاری،نسبت ماسه به سرباره پایین، مولاریته بالای هیدروکسید سدیم می‌باشد. مقادیر و نسبت‌های مورد نیاز برای رسیدن به بالاترین مقاومت، در هر بخش

آورده شده است. با توجه به قیمت تأمین این مصالح، عواملی که هزینه را بالا می‌برند، عبارتند از: بالا رفتن مولاریته هیدروکسید سدیم، پایین آمدن نسبت ماسه به سرباره. در نتیجه در هر پروژه با توجه به نوع نیاز، بودجه و عوامل دیگر، می‌توان طرح مورد نظر را با تغییر نسبت مواد سازنده این نوع ملات، در محدوده منطقی بدست آورد.

## ۶. مراجع


[۱] WilsonA.P. (۲۰۱۵), "Establishing a mix design procedure for Geopolymer concrete", Bachelor of Engineering (Civil) project. University of Southern Queensland.

[۲] Suhendro B. (۲۰۱۴), "Toward green concrete for better sustainable environment." Procedia Engineering ۹۵: ۳۰۵-۳۲۰.

[۳] Davidovits J. (۱۹۹۴), "Global warming impact on the cement and aggregates industries." World resource review ۶, no. ۲: ۲۶۳-۲۷۸.

[۴] Malhotra V. M. (۲۰۰۲), "Introduction: sustainable development and concrete technology." Concrete International ۲۴, no. ۷.

[۵] Salloum T. (۲۰۰۷), "Effect of fly ash replacement on alkali and sulphate resistance of mortars." PhD diss., Concordia University.

[۶] Vickers L., Riessen A., Rickard W.D. (۲۰۱۵), "Fire-resistant geopolymers: Role of fibres and fillers to enhance thermal properties". Singapore: Springer.

[۷] Hongling Wang, Haihong Li and Fengyuan Yan (۲۰۰۵), "Synthesis andmechanical properties of metakaolinite-based geopolymer"Colloids Surf. A: Physiocochem. Eng. Aspects, , ۲۶۸, ۱–۶.

[۸] Davidovits J. (۱۹۹۴), "Geopolymers: man-made rocks, geosynthesis andthe resulting development of very early high strength cements", J.Mater. Educ., ۱۶, ۹۱–۱۳۹.

[۹] Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A. and van Deventer J.S.(۲۰۰۷), "Geopolymer technology: the current state of the art." Journal of materials science ۴۲, no. ۹: ۲۹۱۷-۲۹۳۳.

[۱۰] Davidovits J. (۱۹۹۹),"Chemistry of geopolymeric systems, terminology",Proc. Int. Conf. Geopolymer, France, pp. ۹–۴۰.

[۱۱] Weil, M., Dombrowski, K. and Buchawald, A., (۲۰۰۹). “Life-cycle analysis ofGeopolymers”. Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Applications.Cambridge: Woodhead Publishing Limited Abington Hall, ۱۹۴-۲۱۰.

[۱۲]موسوی کاشی، اعظم، "مروری بر پلیمرهای معدنی دوست دار محیط زیست وکاربرد آن ها در دنیای امروزه"، فصلنامه سرامیک ایران، شماره ۵۱، پاییز ۹۶.