

# بررسی تجربی تأثیر نسبت مواد سازنده، ترکیب سر باره - ژئولیت به عنوان پیش ماده الیاف امباس در مشخصات مقاومتی ملات‌های ژئوپلیمری

وحید قدکی (کارشناس ارشد)

محمد کاظم شربندار\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

در نوشتار حاضر، تأثیر نسبت مواد سازنده، ترکیب سر باره و ژئولیت به عنوان پیش ماده و نیز افزودن الیاف امباس در مشخصات مکانیکی ملات ژئوپلیمری، به صورت آزمایشگاهی با ۱۸ نمونه و ۱۸ طرح اختلاط بررسی شدند و پارامترهای نسبت ماسه به سر باره، نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، غلظت محلول، الیاف امباس و در جایگزینی بخشی از سر باره با ژئولیت، پارامترهای مورد نظر بودند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که کاهش نسبت ماسه به سر باره و کاهش نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم و افزایش غلظت هیدروکسید سدیم و الیاف امباس به ترتیب باعث افزایش تا ۲۶، ۶، ۲۰ و ۱۴ درصدی مقاومت فشاری شدند. مدول گسیختگی نمونه‌های الیافی، تا ۳۸٪ رشد را در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف تجربه کرد. با وجود کاهش قابل توجه خواص مقاومتی ملات ژئوپلیمری حاوی ژئولیت، در پروژه‌هایی که هدفشان، کسب مشخصات مقاومتی بسیار بالایی نباشد، می‌توان با توجه به تعداد زیاد معادن ژئولیت طبیعی موجود در کشورمان (ایران) و در نتیجه دسترسی آسان به ژئولیت طبیعی، به صورت ترکیبی از ژئولیت و سر باره استفاده کرد.

واژگان کلیدی: ملات ژئوپلیمری، سر باره‌ی کوره‌ی بلند، ژئولیت، الیاف امباس، مشخصات مکانیکی.

## ۱. مقدمه

اتصال به یکدیگر کنند و ساختارهای پلیمری سه‌بعدی تشکیل شوند.<sup>[۵-۸]</sup> حضور سیلیکات محلول به تنهایی برای ایجاد مواد سخت‌شونده از نظر شیمیایی کافی نیست و وقتی محلول‌های پایدار سیلیکات و آلومینات در تماس با هم قرار می‌گیرند، محلول آلومینوسیلیکاتی، برای تشکیل ژئوپلیمری با ژئولیت به صورت ژل می‌شود یا رسوب می‌دهد.<sup>[۹]</sup> در فرایند تولید بتن ژئوپلیمری، به‌طور کلی از ۴ ماده‌ی اصلی پیش ماده یا ماده‌ی پایه، محلول فعال‌کننده‌ی قلیایی و سیلیکاتی، آب، شن و ماسه استفاده می‌شود. خاکستر بادی در دو گروه F و C و سر باره‌ی کوره‌ی بلند که مقادیر قابل ملاحظه‌ی اکسیدکلسیم و اکسید آهن دارد، به عنوان یکی از مواد فراوان پیش ماده‌ها استفاده می‌شود.<sup>[۱۰-۱۲]</sup>

از سال ۱۹۸۵، کاربردهای بالقوه‌ی سیمان ژئوپلیمری و استفاده از سر باره‌ی کوره‌ی ذوب آهن و خاکستر بادی یا خاکستر پوسته‌ی برنج به عنوان ماده‌ی چسباننده مطرح شده است.<sup>[۱۳]</sup> از هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم، سیلیکات سدیم، سیلیکات پتاسیم، سدیم کربنات و هیدروکسید کلسیم به عنوان محلول فعال ساز قلیایی استفاده می‌شود

نیاز به توسعه‌ی پایدار و زیرساخت‌های عمرانی باعث افزایش مصرف سیمان می‌شود و تاکنون از سیمان برای ساخت بتن به عنوان راه‌حل اقتصادی و مقاومتی استفاده شده است، ولی کم‌کم به مشکلی بزرگ برای محیط زیست تبدیل شده و سهم عمده‌ی در انتشار گاز CO<sub>2</sub> در جو داشته است.<sup>[۱۴]</sup> کاهش تمایل به استفاده از منابع طبیعی و کاهش تولید دی‌اکسید کربن در فرایند تولید سیمان و کسب مقاومت و گیرش اولیه‌ی سریع ۲۴ ساعت اولیه (معادل ۷۰٪ مقاومت نهایی)، از دلایل اهمیت مواد ژئوپلیمری به عنوان جایگزین بتن است.<sup>[۱۵]</sup>

مواد خام در دمای تا ۱۵۰ درجه باید پخته شوند، تا فرایند ژئوپلیمریزاسیون انجام شود و ساختار آمورف و به صورت شبکه‌ی از آلومینوسیلیکات‌ها در معرض محلول قلیایی شکل گیرد و اولیگومرهای به اندازه‌ی کافی بزرگ و پایدار شروع به

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۲/۱۳۹۹، اصلاحیه ۳/۸/۱۳۹۹، پذیرش ۲۵/۸/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55729.2770

## Archive of SID

جهت فعال‌سازی نوعی زئولیت طبیعی استفاده کردند و به مقاومت فشاری حدود ۳۸ مگاپاسکال رسیدند. ویلا و همکارانش (۲۰۱۰)،<sup>[۳۱]</sup> گزارش دادند که ژئوپلیمر ساخته‌شده با زئولیت طبیعی مکزیک به عنوان پیش‌ماده و محلول قلیایی با مولاریته ی هیدروکسید سدیم برابر ۷ با نسبت سیلیکات‌سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۱۰ و دمای نگهداری ۴۰ درجه، تقریباً در همه‌ی سنین ذکر شده، بالاترین مقاومت فشاری را نسبت به سایر نمونه‌ها با نسبت‌ها و دماهای نگهداری متفاوت داشته و مقاومت آن از نمونه‌ی ساخته‌شده با سیمان پرتلند نوع II که به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شده بود، نیز بالاتر بوده است. نتایجی هم از کاربرد زئولیت مکزیک برای تولید ژئوپلیمر گزارش شده است.<sup>[۲۹]</sup>

امروزه از انواع الیاف‌ها با مدول کشسانی و قابلیت انبساط طولی متفاوت برای بهبود خواص بتن معمولی و ژئوپلیمری استفاده می‌شود. در پژوهش دیگری، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن تا ۰/۵ حجمی، باعث افزایش مقاومت فشاری شد و بیش از آن مقدار، اثری منفی به همراه داشت.<sup>[۳۲]</sup> مطالعات دیگری نشان داد که افزودن الیاف فولادی به بتن ژئوپلیمری باعث بهبود ۴۴ درصدی مقاومت کششی و خمشی و افزایش مقاومت ضربه نسبت به نمونه‌های بدون الیاف شده است.<sup>[۳۳]</sup> همچنین عمل‌آوری حرارتی باعث بهبود خواص مقاومتی بتن‌های ژئوپلیمری مسلح به ماکروالیاف فولادی شده و افزودن الیاف پلی‌پروپیلن، تأثیر چندانی در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته است.<sup>[۳۴]</sup> ژو و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۳۵]</sup> نشان دادند که ترکیب بتن ژئوپلیمری خاکستر بادی با الیاف پلی‌وینیل الکل، سبب بهبود عملکرد مقاومت‌های فشاری، خمشی، و کششی، نسبت به نمونه‌های شاهد شده است. دالوند (۲۰۱۹)،<sup>[۳۶]</sup> نیز از سرباره‌ی کوره‌ی بلند به عنوان پیش‌ماده و هیدروکسید سدیم و سیلیکات‌سدیم به عنوان محلول فعال‌ساز برای تولید ملات ژئوپلیمری استفاده کرد. وی میکروالیاف فولادی را در دو درصد حجمی ۰/۵٪ و ۱٪ به ملات افزود. مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری، تقریباً نزدیک به ۲ برابر نمونه‌های ساخته‌شده با سیمان پرتلند معمولی گزارش شد. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی با ۱٪ حجمی الیاف، نسبت به نمونه‌های ژئوپلیمری بدون الیاف، نزدیک به ۷٪ بیشتر شد. نوشینی و همکارانش (۲۰۱۸)،<sup>[۳۷]</sup> به آنالیز مشخصات ساختاری و ماده‌ی بتن ژئوپلیمری بر پایه‌ی خاکستر بادی، که با الیاف مسلح شده بود، پرداختند و دریافتند که نمونه‌های حاوی الیاف درشت پلی‌الفین، بیشترین انرژی گسیختگی را دارند. طبق مطالعات صورت گرفته توسط دیگر پژوهشگران، مدول کشسانی پایین الیاف به‌کار رفته در مخلوط و همچنین افزایش میزان حفره‌ها در داخل بتن و اطراف الیاف می‌تواند از دلایل افت مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح به الیاف باشند.<sup>[۳۸]</sup> در کشور چین،<sup>[۳۹]</sup> مطالعاتی در مورد خصوصیات مکانیکی و ساز و کار ملات ژئوپلیمری بر پایه‌ی خاکستر بادی و سرباره‌ی کوره‌ی بلند مسلح به الیاف فولادی انجام و نتیجه‌گیری شد که الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف بازالت می‌توانند مشخصات مکانیکی را در سنین بالا بهبود بخشند و الیاف فولادی نیز آثار خوبی در سختی و تقویت ژئوپلیمر دارد. طبق نتایج به‌دست آمده، مقدار بهینه‌ی الیاف بازالت، برابر با ۰/۳٪ تا ۰/۴٪ است و در صورت تجاوز از مقدار اخیر، الیاف به گلوله شدن گرایش پیدا می‌کند.<sup>[۴۰]</sup> همچنین الیاف PP، آثار مثبتی در بهبود طاق‌ت دارند و این موضوع با بالا رفتن مقدار الیاف در ملات، بیشتر خود را نشان می‌دهد.<sup>[۴۱]</sup>

به دلیل ضرورت کاهش مصرف سیمان معمولی و یافتن جایگزینی برای این ماده‌ی پر مصرف، هدف اصلی نوشتار حاضر، یافتن چند طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری بر پایه‌ی سرباره و ترکیب با زئولیت برای کاربردهای مختلف و اصلاح مشخصات مقاومتی ملات مخصوصاً مقاومت فشاری با تغییر پارامترهای اصلی و تأثیرگذار بوده و تأثیر افزودن الیاف در مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نیز

دما، کاتیون‌ها و pH به عنوان عوامل مؤثر در فرایند تراکم هستند.<sup>[۴۲]</sup> در بحث فعال‌سازی پیش‌ماده باید pH مخلوط بالا نگه داشته شود و از محلول‌های قلیایی که حاوی یون‌های OH<sup>-</sup> هستند، استفاده شود.<sup>[۱۵، ۱۶]</sup> عوامل گوناگونی همچون نوع سرباره، نوع محلول فعال‌ساز، مقدار و غلظت محلول فعال‌ساز، نوع ماده‌ی قلیایی، بلین یا اندازه‌ی میزان ریز بودن دانه‌های پیش‌ماده، افزودنی‌های شیمیایی و معدنی و زمان اختلاط و وجود CaO در کارایی و روند گیرش خمیر سیمان ژئوپلیمری تازه تأثیرگذار است.<sup>[۱۷، ۱۸]</sup> مطالعات زیادی در سال‌های اخیر در زمینه‌ی مواد و تولید و خواص ملات ژئوپلیمری انجام شده است. خاکستر بادی به عنوان پیش‌ماده در خیلی از پژوهش‌ها استفاده شده و نتایج نشان داده است که با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم و نسبت سیلیکات‌سدیم به محلول هیدروکسید سدیم، مقاومت فشاری ۷ روزه بتن‌های ژئوپلیمری افزایش پیدا کرده است. همچنین نتایج آزمایش‌ها را با توصیه‌ی آیین‌نامه‌ی استرالیا برای بتن ساخته‌شده با سیمان پرتلند معمولی مقایسه و مشاهده کردند که در بیشتر موارد، خواص مهندسی بتن ژئوپلیمری، خواص بهتری از خواص پیش‌بینی‌شده توسط استانداردها مربوط به مخلوط‌های بتن ساخته‌شده با سیمان پرتلند معمولی دارد و همچنین مطالعه‌ی دیگری نشان داد که بتن ژئوپلیمری با خاکستر بادی با محلول قلیایی مخلوط شده‌ی هیدروکسید سدیم و سیلیکات‌سدیم مقاومت بیشتری نسبت به بتن ژئوپلیمری هیدروکسید سدیم دارد.<sup>[۱۹-۲۱]</sup> تاکور و همکارانش (۲۰۰۹)،<sup>[۲۲]</sup> مشاهده کردند که مقدار قلیایی، مقدار سیلیس، نسبت آب به ژئوپلیمر جامد و نسبت ماسه به خاکستر بادی از مخلوط ژئوپلیمر و پارامترهای متغیر فرایند همچنین زمان عمل‌آوری و دمای عمل‌آوری عوامل مؤثر در مقاومت فشاری و شکل‌گیری ریزساختار ژئوپلیمر هستند. همچنین گزارش شده است که مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر حاوی خاکستر بادی با افزایش زمان عمل‌آوری، دمای عمل‌آوری، زمان استراحت، غلظت محلول هیدروکسید سدیم افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت آب به حجم مواد جامد و میزان مصرف مواد افزودنی کاهش می‌یابد.<sup>[۲۳، ۲۴]</sup> با مشاهده‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های XRD مشخص شد که هر قدر مولاریته‌ی هیدروکسید سدیم بیشتر باشد، ژئوپلیمر با پیش‌ماده‌ی متاکاتولن، مقادیر آمورف بیشتری دارد و با افزایش غلظت NaOH، مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها در سن ۷ روزه افزایش می‌یابد.<sup>[۲۵]</sup>

از دو نوع پوزولان طبیعی پومیس به عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی با پیش‌ماده و از KOH و NaOH به عنوان محلول فعال‌کننده و به صورت جداگانه در تولید ژئوپلیمر استفاده شده است. عمل‌آوری به دو روش داخل پلاستیک و داخل اتوکلاو انجام شد. مشاهدات نشان داد که نمونه‌های فعال‌شده به وسیله‌ی KOH، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های فعال‌شده با NaOH داشتند.<sup>[۲۶]</sup> عملکرد مکانیکی و دوام بتن تولیدشده با پیش‌ماده‌ی سرباره‌ی گرانوله شده‌ی کوره‌ی بلند با بتن تهیه شده با سیمان پرتلند معمولی مقایسه و مشاهده شد که بتن با سرباره‌ی ژئوپلیمری جذب آب کمتری دارد و مقاومت فشاری و دوام نمونه‌های ژئوپلیمری، نسبت به بتن معمولی بهتر هستند.<sup>[۲۳-۲۴، ۲۷]</sup> نجیمی و غفوری (۲۰۱۹)،<sup>[۲۸]</sup> از پوزولان طبیعی و سرباره‌ی کوره‌ی بلند به صورت ترکیبی به عنوان پیش‌ماده و هیدروکسید سدیم و سیلیکات‌سدیم به عنوان فعال‌کننده استفاده کردند و دریافتند که بتن‌های قلیا فعال می‌توانند شبیه یا حتی بهتر از نمونه‌های ساخته‌شده با سیمان پرتلند معمولی عمل کنند و نمونه‌های ساخته‌شده با نسبت برابر پوزولان طبیعی و سرباره، بهینه‌ترین طرح اختلاط از بین طرح‌های موجود هستند.

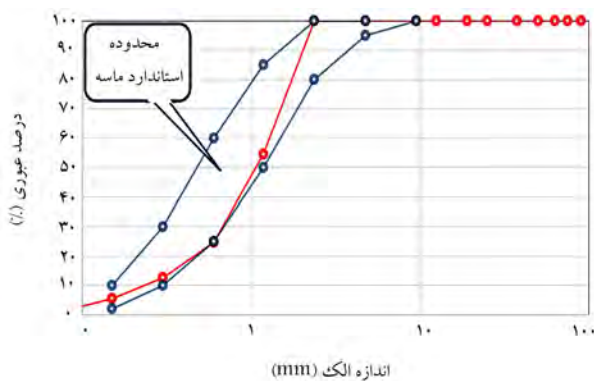
در چندین پژوهش از زئولیت به عنوان پیش‌ماده برای تولید بتن ژئوپلیمری استفاده شده است،<sup>[۲۹-۳۰]</sup> به طوری که از هیدروکسید کلسیم، سیلیکات‌سدیم و کربنات سدیم

جدول ۱. آنالیز شیمیایی ترکیب‌های موجود در سرباره‌ی استفاده شده.

| MnO  | Cl    | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MgO | CaO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | ترکیب شیمیایی |
|------|-------|-------------------|------------------|-----|-----|--------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------|
| ۱/۵۸ | ۰/۰۰۲ | ۰/۶               | ۰/۶۸             | ۱۱  | ۳۷  | ۱/۲                            | ۱۱/۲                           | ۳۵/۷             | درصد          |

جدول ۲. آنالیز شیمیایی ترکیب‌های موجود در زئولیت استفاده شده.

| LOI  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MgO  | CaO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | ترکیب شیمیایی |
|------|-------------------|------------------|------|------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------|
| ۸/۴۱ | ۰/۸۷              | ۰/۸۵۵            | ۱/۵۵ | ۴/۷۱ | ۱/۴                            | ۱۲/۵۵                          | ۶۸/۲۱            | درصد          |



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی به کار رفته در آزمایش براساس استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۷۷.



شکل ۲. الیاف امباس به‌کار رفته در ملات ژئوپلیمری.

pH بین ۱۲-۱۳ است، به عنوان یکی دیگر از مواد اصلی تشکیل‌دهنده‌ی محلول فعال‌ساز قلیایی، برای تهیه‌ی ملات ژئوپلیمری استفاده شده است. دو عدد ۲ و ۲/۵ برای نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم به منظور بررسی مشخصات مکانیکی نمونه‌های ساخته شده با ملات ژئوپلیمری در نظر گرفته شده‌اند. سیلیکات سدیم با نسبت  $SiO_2/Na_2O$  برابر ۲/۳۵ (اکسیدسیلیس بر اکسیدسدیم) و با غلظت ۴۸٪ و آب ۵۲٪ استفاده شد. از الیاف امباس که تصویر آن مطابق شکل ۲ بوده و مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است، به عنوان نوعی الیاف پلیمری اصلاح شده‌ی خالص پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن که به صورت تک‌رشته‌یی است، به منظور بهبود خواص مقاومتی ملات ژئوپلیمری در نمونه‌ها استفاده شده است.

## ۲.۲. مشخصات طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

پژوهش حاضر در سه بخش اصلی دنبال شده است. در بخش اول، سعی شده است تا با ایجاد تغییر در پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری، تأثیر

بررسی شده است. در راستای رسیدن به اهداف یادشده، مواردی دیگری مانند تأثیر مولاریته، نسبت‌های مختلف  $Na_2SiO_3/NaOH$ ، نسبت‌های مختلف ماسه به سرباره آزمایش و بررسی شدند.

## ۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

### ۱.۲. مصالح مصرفی

سرباره‌ی کوره‌ی بلند کارخانه‌ی ذوب آهن اصفهان به عنوان جزء اصلی و پیش‌ماده و یک منبع غنی آلومینوسیلیکاتی در ساخت بتن ژئوپلیمری در نوشتار حاضر استفاده شده است، که علاوه بر به ارعغان آوردن مشخصات مکانیکی مناسب برای بتن ژئوپلیمری، یک ماده‌ی ارزان و در دسترس است و دارای بلین برابر با  $4000 \text{ cm}^2/g$  و وزن مخصوص برابر با  $2/754 \text{ g/cm}^3$  بوده و ترکیب‌های شیمیایی آن پس از انجام آنالیز شیمیایی (XRF)، در جدول ۱ ارائه شده است.

زئولیت، یک ماده‌ی معدنی است که عمده‌ی ساختار آن را آلومینوسیلیکات‌ها تشکیل می‌دهند و به صورت شبکه‌ی کریستالی شامل اکسیژن و آلومینوم یا سیلیس است که به صورت ساختمانی سه‌بعدی در آمده است و خواص فیزیکی و شیمیایی آن بسیار با هم متفاوت هستند. زئولیت به‌کار رفته در ساخت نمونه‌ها، زئولیت طبیعی و تهیه‌شده از معادن استان سمنان است. ترکیب‌های شیمیایی زئولیت استفاده شده در نمونه‌ها، پس از انجام آنالیز شیمیایی (XRF)، در جدول ۲ ارائه شده است. آب به‌کاررفته در تهیه‌ی انواع ملات ساخته شده در پژوهش حاضر، آب شرب شهر سمنان بوده است. ماسه‌ی استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها، ماسه‌ی معمولی شسته شده و عبوری از الک نمره‌ی ۸ است که اندازه‌ی بزرگ‌ترین دانه‌ی آن برابر با  $2/36$  میلی‌متر و درصد جذب آن برابر با  $1/35$  بوده است. نمودار دانه‌بندی آن براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۴۹۷۷ و مطابق شکل ۱ است.

از هیدروکسیدسدیم پرک با چگالی  $2/13 \text{ g/cm}^3$  و جرم مولی  $40/0 \text{ g/mol}$  به عنوان یکی از مواد اصلی تشکیل‌دهنده‌ی محلول فعال‌ساز قلیایی استفاده شده است. با توجه به اینکه یکی از اهداف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر غلظت هیدروکسیدسدیم در مشخصات مکانیکی ملات ژئوپلیمری است، بنابراین از سه غلظت یا مولاریته‌ی متفاوت با مقادیر ۱۲، ۱۵ و ۱۸ استفاده شده است. واکنش انحلال ماده‌ی مذکور در آب، یک واکنش به‌شدت گرمازاست و سبب تبخیر سریع آب محلول می‌شود. به همین دلیل، به هنگام تهیه‌ی محلول آن، باید ظرف محلول را داخل آب سرد قرار داد تا دمای محلول کاهش یابد و کنترل شود و از تبخیر آب محلول جلوگیری به‌عمل آید. از سیلیکات سدیم که نوعی سیلیکات قلیایی حل‌شدنی با فرمول شیمیایی  $(Na_2SiO_3)$  و جرم مولی  $122/07 \text{ g/mol}$

| وزن مخصوص            | طول      | قطر  | رنگ     | نقطه ذوب | مقاومت کششی | مدول کشسانی | درصد ازدیاد طول | مقاومت اسیدی و قلیایی عالی |
|----------------------|----------|------|---------|----------|-------------|-------------|-----------------|----------------------------|
| $1.9 \text{ g/cm}^3$ | 30-50 mm | 3 mm | خاکستری | 170 °C   | 55-70 MPa   | 6-7 GPa     | 12%             | عالی                       |

### ۳.۲. آزمایش‌ها و روش ساخت و عمل‌آوری

در این پژوهش، دو پارامتر مقاومت فشاری و مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) ملات ژئوپلیمری بررسی شده‌اند. آزمایش مقاومت فشاری، طبق استاندارد (ASTM C 39) و بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد  $50 \times 50 \times 50$  میلی‌متر انجام گرفته و در ادامه، نتایج به دست آمده بر حسب مگاپاسکال ارائه شده است. آزمایش بعدی، آزمایش مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) به منظور به دست آوردن مدول گسیختگی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری است که طبق استاندارد ASTM C 293-08 و با فرمول  $R = 3PL/2bd^2$  به دست می‌آید. نمونه‌هایی که برای این منظور آزمایش شدند، تیرهای با ابعاد  $160 \times 40 \times 40$  میلی‌متر بودند.

### ۴.۲. روش ساخت

در مرحله اول، مواد خشک از جمله پیش‌ماده‌ها، شامل سرباره و یا سرباره و زئولیت به صورت ترکیبی و ماسه به مدت ۶۰ ثانیه به صورت خشک مخلوط شدند تا مخلوط به صورت همگن در آید. در مرحله دوم، محلول فعال‌ساز که از اختلاط هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم که با نسبت‌های مشخص و به مدت ۲۴ ساعت در یک ظرف مختلط بوده‌اند، به مخلوط خشک اضافه شد و پس از ادامه اختلاط به مدت ۳۰ ثانیه، آب به مخلوط افزوده شد و اختلاط به مدت ۱۵۰ ثانیه ادامه یافت و ملات ژئوپلیمری به دست آمد. برای ساخت ملات ژئوپلیمری الیافی، تفاوت فقط در روند اختلاط بود، که پس از مرحله اول که اختلاط خشک مواد به مدت ۶۰ ثانیه بود، ایجاد شد. الیاف با درصد حجمی مورد نظر، وزن و به مخلوط خشک افزوده شدند و اختلاط الیاف و مخلوط خشک، به مدت ۶۰ ثانیه ادامه یافت و سپس سایر مراحل، مشابه روند ساخت ملات ژئوپلیمری بدون الیاف طی شد.

### ۵.۲. عمل‌آوری ملات ژئوپلیمری

روش اتخاذ شده در پژوهش حاضر جهت عمل‌آوری نمونه‌ها، عمل‌آوری حرارتی در آن تحت دمای  $60^\circ\text{C}$  و به مدت ۲۴ ساعت بود. برای جلوگیری از کاهش رطوبت ملات در معرض حرارت و در نتیجه ایجاد ترک در نمونه‌ها، از سلفون به منظور پوشاندن سطح نمونه‌ها استفاده شد. بدین ترتیب که قالب‌های حاوی ملات ژئوپلیمری، قبل از قرار گرفتن در آن، با سلفون پوشانده شدند. پس از پایان عمل‌آوری با شرایط ذکر شده، نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه و دمای معمولی، تا رسیدن به سنین ۷ و ۲۸ روزه نگهداری شدند و سپس تحت آزمایش قرار گرفتند.

### ۳. تجزیه و تحلیل نتایج

در بخش حاضر به ارائه نتایج آزمایشگاهی و بررسی و تحلیل آن‌ها به صورت نمودار و جدول پرداخته شده است. در بخش اول، تأثیر نسبت ماسه به سرباره

هر یک از پارامترهای مذکور به صورت جداگانه بررسی شود. در اثر ایجاد تغییرات ذکر شده در مقدار و نسبت و غلظت مواد سازنده ملات ژئوپلیمری، ۱۸ طرح اختلاط مختلف به دست آمد. سه پارامتری که دستخوش تغییر شده‌اند، عبارت‌اند از: الف) غلظت یا مولاریته محلول هیدروکسید سدیم که برای آن سه غلظت ۱۲، ۱۵ و ۱۸ در نظر گرفته شده است، ب) نسبت وزنی ماسه به پیش‌ماده (سرباره) که برای آن سه نسبت ۱/۵، ۲ و ۲/۵ انتخاب شده است، پ) نسبت محلول سیلیکات سدیم به محلول هیدروکسید سدیم در محلول فعال‌ساز که برای آن دو نسبت ۲ و ۲/۵ در نظر گرفته شده است. نسبت‌های (پیش‌ماده/آب) و (پیش‌ماده/میع فعال‌ساز) در تمامی طرح‌های اختلاط ثابت و به ترتیب برابر با  $0.15/0.4$  و  $0.15/0.4$  در نظر گرفته شدند. در بخش اول، از سرباره فقط به عنوان پیش‌ماده استفاده شد و از هر طرح اختلاط، ۵ نمونه مکعبی با ابعاد  $(50 \times 50 \times 50)$  میلی‌متر جهت آزمایش در سن ۷ روزه و به همین تعداد و ابعاد نمونه جهت آزمایش در سن ۲۸ روزه ساخته شدند که در مجموع، تعداد نمونه‌ها در بخش کنونی به ۱۸ عدد رسید. میانگین مقاومت ۵ نمونه ساخته شده از هر طرح اختلاط، به عنوان مقاومت طرح در نظر گرفته شد. در جدول ۴، طرح اختلاط نمونه‌های بخش اول و مقادیر مصالح استفاده شده برای ساخت هر طرح اختلاط، به ازاء ۱ مترمکعب ملات ژئوپلیمری ارائه شده است. طرح‌های موجود در بخش اول، بر مبنای نسبت ماسه به سرباره، به سه دسته کلی تقسیم شده‌اند. نام طرح‌ها از یک حرف S که نشانگر پیش‌ماده سرباره (Slag) است و سه عدد بعد از حرف S، تشکیل شده است. عدد اول، نشانگر نسبت وزنی ماسه به سرباره است. عدد دوم، نشانگر مولاریته هیدروکسید سدیم است و عدد سوم، نسبت وزنی سیلیکات سدیم بر هیدروکسید سدیم را در محلول فعال‌ساز نشان می‌دهد. پس از انجام آزمون‌های مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه، نتایج به دست آمده تجزیه و تحلیل شدند و تأثیر پارامترهای متغیر در خواص مکانیکی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری مشخص شد. در بخش دوم، سه طرح از بخش اول با ویژگی‌های متفاوت از نظر ترکیب‌ها و مقاومت انتخاب شدند و به هر کدام از سه طرح مذکور، سه درصد حجمی متفاوت از الیاف امباس افزوده شد، تا تأثیر آن در مقاومت فشاری و مدول گسیختگی ملات ژئوپلیمری بررسی شود. این سه طرح عبارت‌اند از:  $S2/5 - 12 - 2/5$  و  $S2/5 - 15 - 2/5$  و  $S2 - 18 - 2/5$ . الیاف امباس در سه درصد حجمی  $0.35/0.7$  و  $0.7/1$  (معادل  $3/185$ ،  $6/37$  و  $9/1$  کیلوگرم در ۱ مترمکعب ملات) به هر کدام از سه طرح اخیر افزوده شد. در مجموع ۱۰۵ نمونه شامل ۴۵ نمونه تیر الیافی و ۱۵ نمونه تیر بدون الیاف به عنوان نمونه‌های شاهد جهت آزمایش خمش و ۴۵ نمونه مکعب مربع به ضلع ۵ سانتی‌متر جهت آزمایش مقاومت فشاری، در بخش دوم ساخته و پس از ۲۸ روز آزمایش شدند. در بخش سوم، طرح اختلاط  $S2/5 - 12 - 2/5$  از بخش اول انتخاب شد و ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد از پیش‌ماده آنکه سرباره است، با زئولیت جایگزین شد، تا تأثیر استفاده ترکیبی دو پیش‌ماده سرباره و زئولیت، در مقاومت فشاری و مدول گسیختگی ملات ژئوپلیمری بررسی شود. نام‌های  $SZ30$ ،  $SZ45$  و  $SZ15$  برای سه طرح اخیر در نظر گرفته شدند. در بخش حاضر، مجموعاً ۳۰ نمونه شامل ۱۵ نمونه تیر و ۱۵ نمونه مکعبی ساخته شدند.

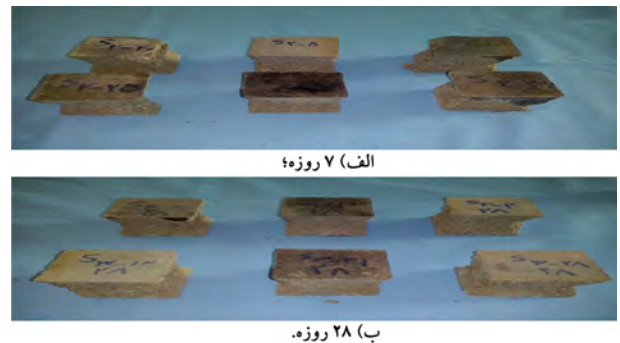
| Activator<br>(kg) | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub><br>(kg) | NaOH<br>(kg) | water<br>(kg) | sand<br>(kg) | slag<br>(kg) | mix design<br>name | ss/sh | molarity<br>of NaOH<br>(mol/liter) | Sand<br>Slag |
|-------------------|--|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------------|-------|------------------------------------|--------------|
| ۲۰۷/۴             | ۱۳۸/۲۷                                   | ۶۹/۱۳        |               |              |              | S۲/۵-۱۲-۲          | ۲     | ۱۲                                 |              |
|                   | ۱۴۸/۱۴                                   | ۵۶/۲۹        |               |              |              | S۲/۵-۱۲-۲/۵        | ۲/۵   |                                    |              |
|                   | ۱۳۸/۲۷                                   | ۶۹/۱۳        | ۷۷/۷۸         | ۱۲۹۶/۳       | ۵۱۸/۵        | S۲/۵-۱۵-۲          | ۲     | ۱۵                                 | ۲/۵          |
|                   | ۱۴۸/۱۴                                   | ۵۶/۲۹        |               |              |              | S۲/۵-۱۵-۲/۵        | ۲/۵   |                                    |              |
|                   | ۱۳۸/۲۷                                   | ۶۹/۱۳        |               |              |              | S۲/۵-۱۸-۲          | ۲     | ۱۸                                 |              |
|                   | ۱۴۸/۱۴                                   | ۵۶/۲۹        |               |              |              | S۲/۵-۱۸-۲/۵        | ۲/۵   |                                    |              |
| ۲۳۶/۶۲            | ۱۵۷/۷۵                                   | ۷۸/۸۷        |               |              |              | S۲-۱۲-۲            | ۲     | ۱۲                                 |              |
|                   | ۱۶۹                                      | ۶۷/۶۱        |               |              |              | S۲-۱۲-۲/۵          | ۲/۵   |                                    |              |
|                   | ۱۵۷/۷۵                                   | ۷۸/۸۷        | ۸۸/۷۳         | ۱۱۸۳/۱       | ۵۹۱/۵۵       | S۲-۱۵-۲            | ۲     | ۱۵                                 | ۲            |
|                   | ۱۶۹                                      | ۶۷/۶۱        |               |              |              | S۲-۱۵-۲/۵          | ۲/۵   |                                    |              |
|                   | ۱۵۷/۷۵                                   | ۷۸/۸۷        |               |              |              | S۲-۱۸-۲            | ۲     | ۱۸                                 |              |
|                   | ۱۶۹                                      | ۶۷/۶۱        |               |              |              | S۲-۱۸-۲/۵          | ۲/۵   |                                    |              |
| ۲۷۵/۴۱            | ۱۸۳/۶۱                                   | ۹۱/۸         |               |              |              | S۱/۵-۱۲-۲          | ۲     | ۱۲                                 |              |
|                   | ۱۹۶/۷۲                                   | ۷۸/۹۶        |               |              |              | S۱/۵-۱۲-۲/۵        | ۲/۵   |                                    |              |
|                   | ۱۸۳/۶۱                                   | ۹۱/۸         | ۱۰۳/۲۸        | ۱۰۳۲/۸       | ۶۸۸/۵۲       | S۱/۵-۱۵-۲          | ۲     | ۱۵                                 | ۱/۵          |
|                   | ۱۹۶/۷۲                                   | ۷۸/۹۶        |               |              |              | S۱/۵-۱۵-۲/۵        | ۲/۵   |                                    |              |
|                   | ۱۸۳/۶۱                                   | ۹۱/۸         |               |              |              | S۱/۵-۱۸-۲          | ۲     | ۱۸                                 |              |
|                   | ۱۹۶/۷۲                                   | ۷۸/۹۶        |               |              |              | S۱/۵-۱۸-۲/۵        | ۲/۵   |                                    |              |

### ۱.۳. مقاومت فشاری

#### ۱.۱.۳. نتایج گروه اول

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی بخش اول، به تفکیک با بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای سه‌گانه‌ی یادشده ارائه شده است. تأثیر نسبت ماسه به سربراه‌ی کوره‌ی بلند در مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه‌ی ملات ژئوپلیمری در جدول‌های ۵ الی ۷ و شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، مقاومت فشاری با کاهش نسبت ماسه به سربراه از ۲/۵ به ۱/۵ افزایش یافته و با بیشتر شدن درصد سربراه‌ی موجود در مخلوط به عنوان چسباننده، مقاومت فشاری افزایش یافته است. همچنین در مولاریته‌ی ۱۲ هیدروکسید سدیم، روند تغییر مقاومت فشاری با تغییر نسبت ماسه به سربراه با شیب تندتری همراه بوده است. این روند در مولاریته‌های ۱۵ و ۱۸ هیدروکسید سدیم نسبتاً مشابه و با شیب کمتری صورت پذیرفته است. بنابراین از نحوه‌ی رشد مقاومت در نمودارهای اخیر می‌توان به این نتیجه رسید که تأثیر پارامتر نسبت ماسه به سربراه در مقاومت فشاری، به ویژه در سن ۷ روزه، در مولاریته‌های پایین‌تر هیدروکسید سدیم، بیشتر خود را نشان داده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که اگر در یک پروژه و بنا به دلایلی، امکان افزایش مولاریته‌ی هیدروکسید سدیم بیش از یک مقدار معین فراهم نباشد، می‌توان از راه حل کاهش نسبت ماسه به سربراه در یک مولاریته‌ی پایین هیدروکسید سدیم، به عنوان یک راه جایگزین برای افزایش مقاومت فشاری بهره برد. به‌طور کلی مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۷ روزه، در هر دو نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۲ و ۲/۵، با کاهش نسبت ماسه به سربراه از ۲/۵ به ۲



شکل ۳. نحوه‌ی شکست فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری.

نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، و مولاریته‌ی هیدروکسید سدیم در مقاومت فشاری ۱۸° نمونه‌ی مکعبی در قالب ۱۸ طرح اختلاط و در سنین ۷ و ۲۸ روزه بررسی شده است. نحوه‌ی شکست فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

در بخش دوم، تأثیر افزودن الیاف امباس در سه درصد حجمی متفاوت در مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری متعلق به سه طرح اختلاط منتخب از بخش اول بررسی شده است. در نهایت و در بخش سوم، تأثیر جایگزینی درصد‌های وزنی متفاوت از سربراه‌ی موجود در پیش‌ماده با زئولیت، در مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری مطالعه شده است. نتایج به تفکیک و در دو قسمت مقاومت فشاری و مدول گسیختگی ارائه شده است.

جدول ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف و با الیاف امباس.

| مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی ۲۸ روزه (MPa) |       |       | طرح مورد استفاده برای افزودن الیاف | مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف (MPa) |        | نام طرح         |
|---|-------|-------|------------------------------------|---|--------|-----------------|
| درصد حجمی الیاف به کار رفته در نمونه‌ها     |       |       |                                    | ۲۸ روزه                                 | ۷ روزه |                 |
| ٪۱  | ٪۰/۷  | ٪۰/۳۵ |                                    |   |        |                 |
| ۸۴/۸۷                                       | ۷۷/۷۶ | ۷۵/۸۷ | S۲/۵ - ۱۲ - ۲/۵                    | ۷۳/۱۳                                   | ۶۸/۲۲  | S۲/۵ - ۱۲ - ۲   |
|   |       |       |                                    | ۷۴/۶۱                                   | ۶۹/۱۳  | S۲/۵ - ۱۲ - ۲/۵ |
|   |       |       |                                    | ۸۴/۴۲                                   | ۸۰/۲۴  | S۲/۵ - ۱۵ - ۲   |
|   |       |       |                                    | ۷۵/۷۷                                   | ۶۸/۷۱  | S۲/۵ - ۱۵ - ۲/۵ |
|   |       |       |                                    | ۸۶/۹۷                                   | ۸۱/۶۶  | S۲/۵ - ۱۸ - ۲   |
|   |       |       |                                    | ۸۱/۴۰                                   | ۸۱/۴۶  | S۲/۵ - ۱۸ - ۲/۵ |
| ۹۱/۵۵                                       | ۸۸/۶۵ | ۸۶/۲۶ | S۲ - ۱۵ - ۲/۵                      | ۸۰/۶۸                                   | ۸۴/۶۵  | S۲ - ۱۲ - ۲     |
|   |       |       |                                    | ۷۷/۱۸                                   | ۸۰/۳۳  | S۲ - ۱۲ - ۲/۵   |
|   |       |       |                                    | ۸۷/۰۷                                   | ۸۴/۸۶  | S۲ - ۱۵ - ۲     |
|   |       |       |                                    | ۸۵/۹۶                                   | ۷۹/۴۵  | S۲ - ۱۵ - ۲/۵   |
|   |       |       |                                    | ۹۲/۵۸                                   | ۸۶/۶۵  | S۲ - ۱۸ - ۲     |
|   |       |       |                                    | ۸۹/۰۸                                   | ۸۴/۲۱  | S۲ - ۱۸ - ۲/۵   |
| ۱۰۰/۲۳                                      | ۹۵/۴۶ | ۹۴/۴۸ | S۱/۵ - ۱۸ - ۲                      | ۸۳/۲۶                                   | ۸۶/۱۳  | S۱/۵ - ۱۲ - ۲   |
|   |       |       |                                    | ۸۲/۷۳                                   | ۸۲/۳۳  | S۱/۵ - ۱۲ - ۲/۵ |
|   |       |       |                                    | ۸۸/۷۵                                   | ۸۹/۷۷  | S۱/۵ - ۱۵ - ۲   |
|   |       |       |                                    | ۸۵/۸۶                                   | ۸۵/۶۴  | S۱/۵ - ۱۵ - ۲/۵ |
|   |       |       |                                    | ۹۴/۳۷                                   | ۹۰/۵۸  | S۱/۵ - ۱۸ - ۲   |
|   |       |       |                                    | ۹۱/۴۱                                   | ۸۶/۵۸  | S۱/۵ - ۱۸ - ۲/۵ |

جدول ۶. مدول گسیختگی نمونه‌های بدون الیاف و با الیاف امباس.

| مدول گسیختگی نمونه‌های الیافی ۲۸ روزه (MPa) |      |       | مدول گسیختگی نمونه‌های بدون الیاف ۲۸ روزه (MPa) | نام طرح         |
|---|------|-------|---|-----------------|
| درصد حجمی الیاف به کار رفته در نمونه‌ها     |      |       |   |                 |
| ٪۱  | ٪۰/۷ | ٪۰/۳۵ |   |                 |
| ۵/۴۶  | ۶/۱۴ | ۶/۲۰  | ۵/۶۷  | S۲/۵ - ۱۲ - ۲/۵ |
| ۴/۹۴  | ۷/۷۷ | ۷/۴۴  | ۵/۴۲  | S۲ - ۱۵ - ۲/۵   |
| ۴/۹۶  | ۵/۵۰ | ۵/۵۹  | ۴/۰۴  | S۱/۵ - ۱۸ - ۲   |

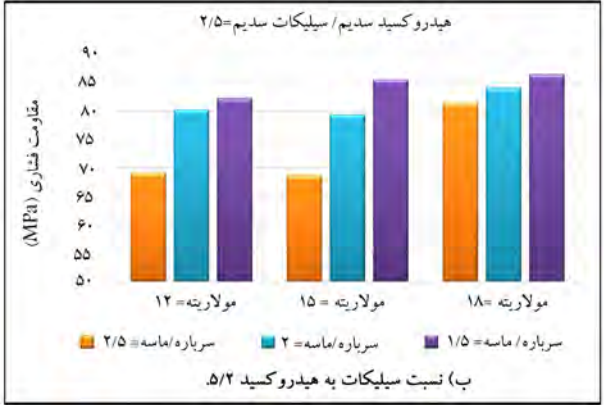
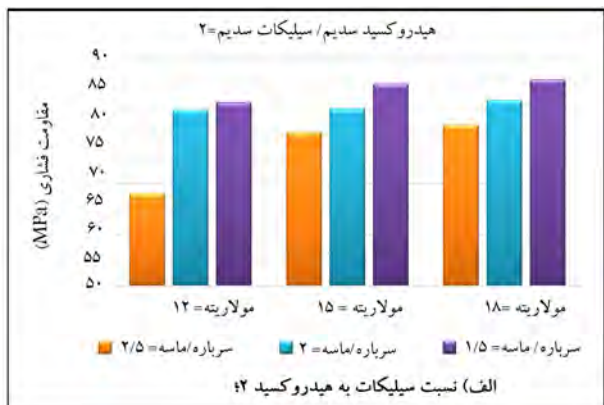
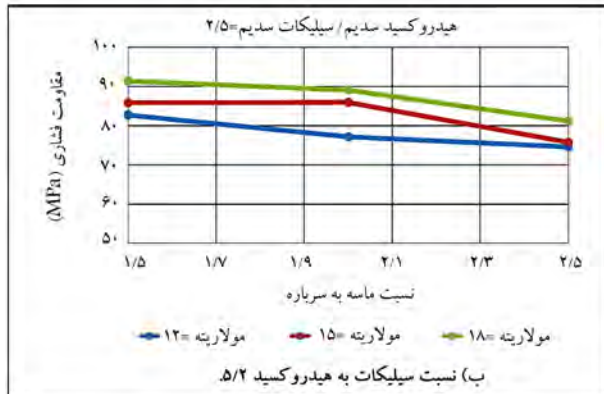
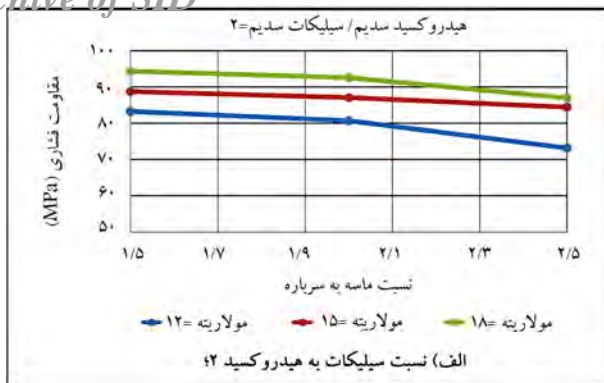
جدول ۷. مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نمونه‌های با و بدون زئولیت.

| مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه (MPa) |             | مدول گسیختگی نمونه‌های ۲۸ روزه (MPa) |             | درصد وزنی زئولیت در کل پیش ماده (٪) | نام طرح         |
|--------------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-----------------|
| با زئولیت                            | بدون زئولیت | با زئولیت                            | بدون زئولیت |                                     |                 |
| ۶۱/۳۲                                |             | ۴/۸۲                                 |             | ۱۵                                  |                 |
| ۵۰/۵۸                                | ۷۴/۶۱       | ۴/۰۲                                 | ۵/۶۷        | ۳۰                                  | S۲/۵ - ۱۲ - ۲/۵ |
| ۳۰/۳۴                                |             | ۲/۳۰                                 |             | ۴۵                                  |                 |

نمونه‌های ۲۸ روزه، با بالاتر رفتن نسبت ماسه به سر باره در شکل ۶ مشاهده می‌شود. تأثیر مولاریته‌ی هیدروکسید سدیم در مقاومت فشاری ملات زئولیمیری در شکل‌های ۷ و ۸، در سنین ۷ و ۲۸ روزه مشاهده می‌شود. افزایش مولاریته‌ی هیدروکسید سدیم، منجر به بالا رفتن مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است و این موضوع

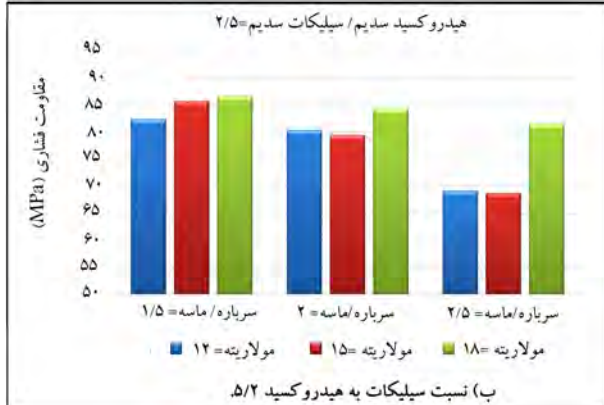
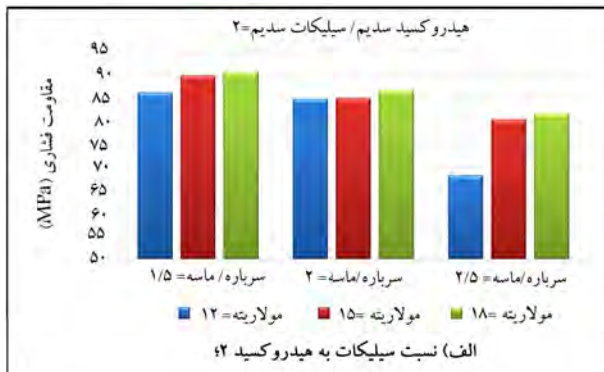
و ۱/۵، در مولاریته‌های ۱۲، ۱۵ و ۱۸ به ترتیب در بازه‌های (۱۶٪ - ۲۶٪) و (۶٪ - ۲۶٪) و (۳٪ - ۱۱٪) با تغییر و افزایش همراه بوده است. در نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه نیز با کاهش نسبت ماسه به سر باره، در همه‌ی غلظت‌های هیدروکسید سدیم، افزایش مقاومت فشاری دیده شد. روند تغییر شیب و کاهش مقاومت فشاری متوسط





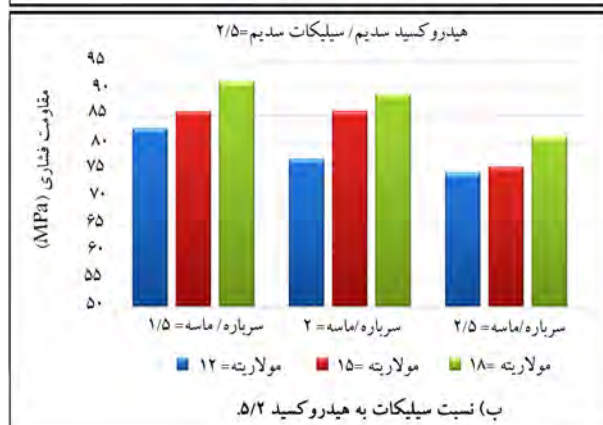
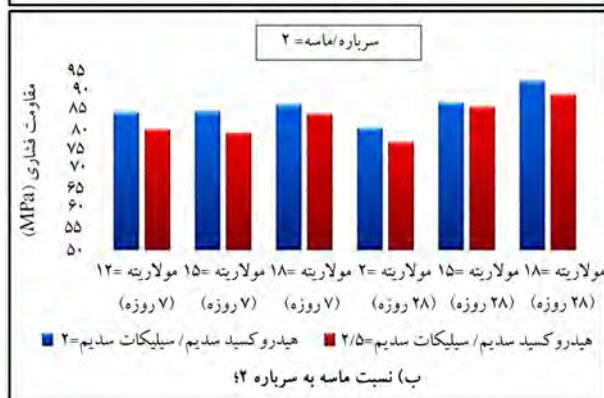
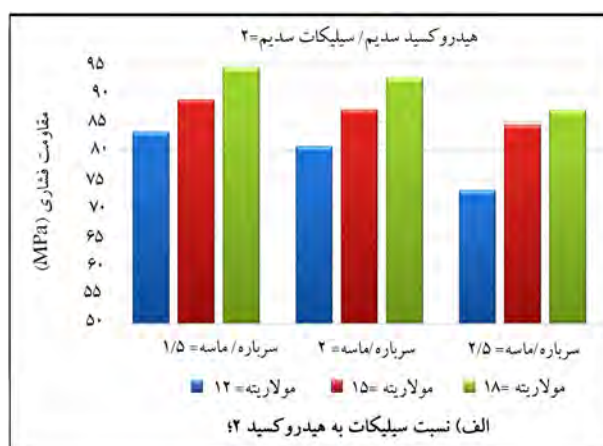
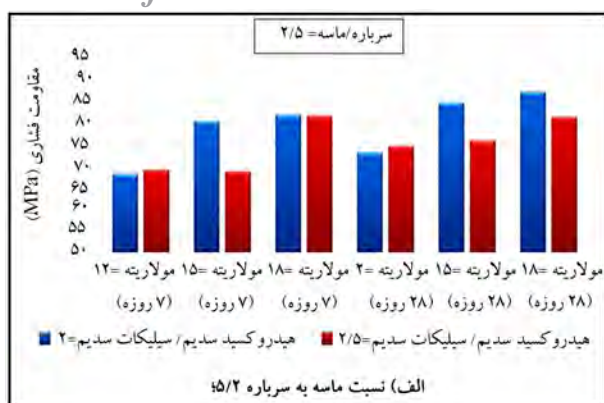
شکل ۶. روند تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزهی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری با تغییر در نسبت ماسه به سرباره.

شکل ۴. نمودار بررسی تأثیر نسبت ماسه به سرباره در مقاومت فشاری ۷ روزهی نمونه‌های مکعبی در سه غلظت متفاوت هیدروکسید سدیم.



شکل ۷. نمودار بررسی تأثیر مولارته‌ی هیدروکسید سدیم در مقاومت فشاری ۷ روزهی نمونه‌های مکعبی در سه نسبت متفاوت ماسه به سرباره.

شکل ۵. نمودار بررسی تأثیر نسبت ماسه به سرباره در مقاومت فشاری ۲۸ روزهی نمونه‌های مکعبی در سه غلظت متفاوت هیدروکسید سدیم.



شکل ۹. تأثیر نسبت سلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم در مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها.

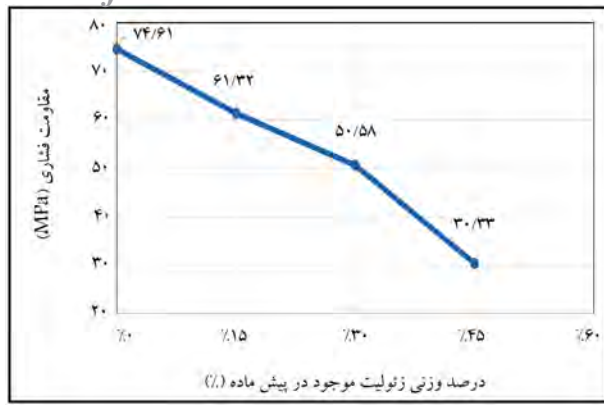
شکل ۱۰. تأثیر نسبت سلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم در مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها در سه نسبت متفاوت ماسه به سرباره.

در همه‌ی نسبت‌های ماسه به سرباره و در همه‌ی سنین، کم و بیش مشاهده می‌شود. این مورد در مطالعات برخی پژوهشگران نیز مشاهده شده است، که از جمله می‌توان به پژوهش دوکسان و همکارانش (۲۰۰۷) [۲۵] که از متاکاتولن به عنوان یک پیش ماده با منشأ طبیعی و از هیدروکسید سدیم و سلیکات سدیم نیز به عنوان محلول فعال ساز برای ساخت ژئوپلیمر استفاده کرده‌اند، اشاره کرد. در آزمایش‌های ایشان مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت NaOH، مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ روزه افزایش یافته است. NaOH با غلظت بیشتر، توانایی حلالیت بالاتری داشته و کمک کرده است که ذرات پیش ماده به میزان بیشتری حل و اتصالی مؤثر بین مونومرها ایجاد شود، که منجر به افزایش مقاومت اتصال بین مولکولی در ژئوپلیمر شده است.

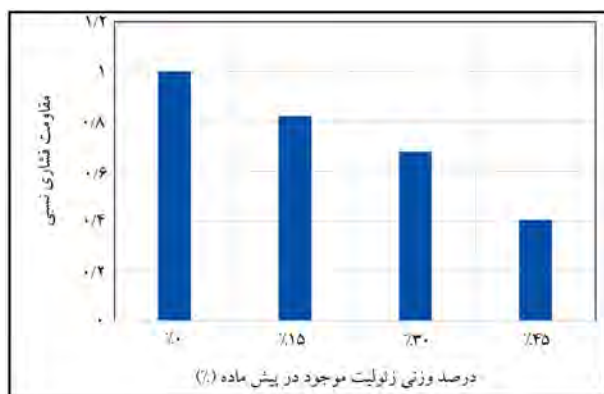
رفتار دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد، افزایش مولاریته در نمونه‌های با مقدار سرباره‌ی بیشتر (به ویژه در نسبت‌های ماسه به سرباره‌ی ۲ و ۱/۵) است، که تأثیر خود را در افزایش مقاومت، دیرتر و در سن ۲۸ روزه نشان داده است. تأثیر نسبت سلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم در مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری در شکل ۹ مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت سلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم از ۲ به ۲/۵، مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه در همه‌ی نسبت‌های ماسه به سرباره و همه‌ی مولاریته‌های هیدروکسید سدیم، کاهش کمی تا ۱۰٪ و در یک مورد خاص تا ۱۴٪ را تجربه کرده است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که اگر مقدار سلیکات سدیم از حد معینی تجاوز کند، تأثیر منفی در مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری می‌گذارد. اساساً افزایش نسبت سلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، منجر به افزایش مقدار سدیم در

مخلوط می‌شود و از طرفی، سدیم نقش مهمی در شکل‌گیری ژئوپلیمرها ایفا می‌کند و یون‌های سدیم به عنوان یون‌های متعادل‌کننده‌ی بار عمل می‌کنند. با وجود این، سلیکات سدیم اضافی، مانع از تبخیر آب و تشکیل ساختار می‌شود؛ لذا با بالا رفتن نسبت سلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، مقاومت فشاری کاهش یافته است. [۲۳] تأثیر زمان در مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. نمونه‌های ملات ژئوپلیمری در همان سنین اولیه‌ی ۷ روزه، چیزی حدود ۹۰٪ مقاومت فشاری نهایی ۲۸ روزه‌ی خود را کسب کردند و با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که بیش از ۶۰٪ طرح اختلاط‌ها با گذشت زمان، رشد ۳ تا ۱۰ درصدی در مقاومت فشاری و بیش از ۲۰٪ طرح‌ها بدون رشد مقاومت مشخصه‌ی ذکر شده، بتن ژئوپلیمری را تبدیل به یکی از گزینه‌های مناسب برای





شکل ۱۲. نمودار تغییرات مقاومت فشاری با درصد وزنی زئولیت و سرباره.



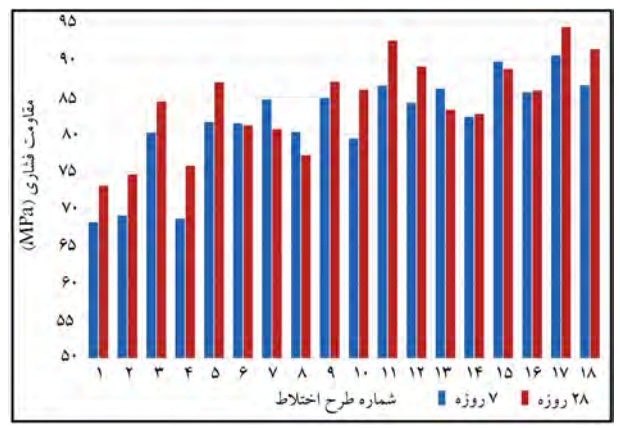
شکل ۱۳. تأثیر زئولیت در مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری با پیش‌ماده ترکیبی زئولیت و سرباره.

پیش‌ماده در ساخت ژئوپلیمرها توجه کرد. از طرفی، برخلاف سرباره و خاکستر بادی، زئولیت یک محصول وابسته به صنایع دیگر نیست و می‌توان به صورت طبیعی به آن دسترسی داشت. لذا طرح اختلاط ۲/۵ - ۱۲ - ۵/۲ از گروه اول انتخاب شد و با جایگزین کردن ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد وزنی از سرباره موجود در آن با زئولیت، به ترتیب سه طرح نمونه‌ی SZ15، SZ30 و SZ45 به دست آمدند که نتایج مقاومت فشاری متوسط آن‌ها در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

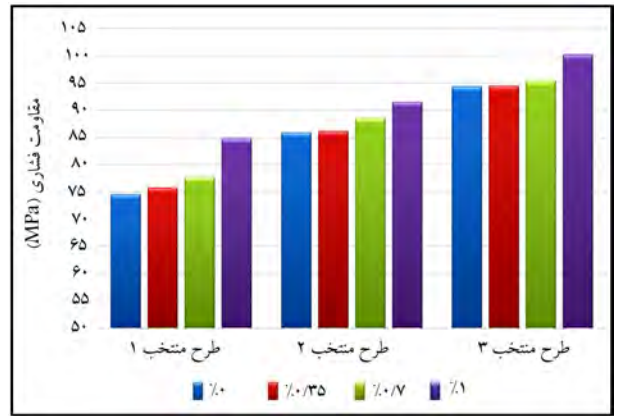
طرح SZ15 با ۱۵٪ زئولیت، افت مقاومت فشاری ۱۸ درصدی نسبت به طرح مبنا (۲/۵ - ۱۲ - ۵/۲) داشته و با بالا رفتن درصد زئولیت در طرح‌های SZ30 و SZ45، به ترتیب میزان کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح مبنا برابر با ۳۸٪ و ۵۹٪ شده است. همچنین با توجه به شکل ۱۲، شیب کاهش مقاومت فشاری در بازه‌های ۰٪ الی ۱۵٪ و ۱۵٪ الی ۳۰٪، تقریباً یکسان بوده است؛ ولی پس از اینکه درصد زئولیت موجود در پیش‌ماده از ۳۰٪ تجاوز کرد، کاهش مقاومت فشاری با شیب تندتری همراه بوده است. به طور کلی، نمونه‌های حاوی درصدی از زئولیت در پیش‌ماده‌ی خود، تا حدودی از لحاظ مقاومتی قابل قبول هستند و می‌توان با توجه به فراوانی معادن زئولیت موجود در کشور، ایده‌ی استفاده از پیش‌ماده‌ی ترکیبی برای ساخت بتن ژئوپلیمری را کاربردی دانست.

### ۲.۳. مدول گسیختگی

تغییرات مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) در نمونه‌های گروه دوم، که حاوی الیاف امباس با درصد‌های حجمی ۳۵٪، ۷٪ و ۱٪ و گروه سوم که پیش‌ماده‌ی



شکل ۱۰. مقایسه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری در سنین ۷ و ۲۸ روزه.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های ملات ژئوپلیمری الیافی و بدون الیاف.

استفاده در پروژه‌هایی می‌کند که در آن‌ها محدودیت زمانی برای بهره‌برداری وجود دارد.

### ۲.۱.۳. نتایج گروه دوم

سه طرح (۲/۵ - ۱۲ - ۵/۲)، (۲/۵ - ۱۵ - ۲/۵) و (۲/۵ - ۱۸ - ۵/۲) از ۱۸ طرح اختلاط بررسی شده در گروه اول انتخاب و تأثیر افزودن الیاف امباس در سه درصد حجمی ۳۵٪، ۷٪ و ۱٪ به آن‌ها مطالعه شده است. تأثیر الیاف امباس در مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری نمونه‌های گروه ۲ در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که مطابق آن مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات ژئوپلیمری در سن ۲۸ روزه با رشد همراه بوده است. نمودار تغییرات مقاومت فشاری با درصد وزنی زئولیت و سرباره در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

با افزودن الیاف به میزان ۳۵٪، ۷٪ و ۱٪ درصد حجمی به ملات، مقاومت فشاری سه طرح اختلاط موجود، به ترتیب ۲، ۴ و ۱۴ درصد نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف با افزایش همراه بوده است. بنابراین، درصد مناسب الیاف برای رسیدن به بیشترین رشد در مقاومت فشاری، ۱٪ حجمی است. همچنین تغییرات مقاومت فشاری در بازه‌ی ۷٪ تا ۱٪، محسوس‌تر از تغییرات آن در بازه‌های ۳۵٪ تا ۷٪ و ۳۵٪ تا ۷٪ است.

### ۳.۱.۳. نتایج گروه سوم

از جهت فراوانی معادن زئولیت در کشورمان، می‌توان به استفاده از زئولیت به عنوان

## Archive of SID

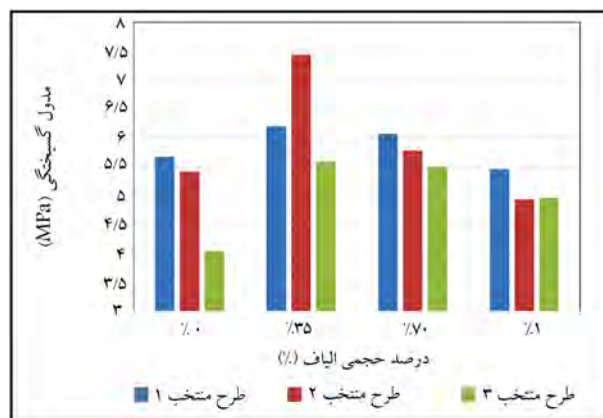
شیب مثبت شده و با تجاوز الیاف از مقدار مذکور، شیب نمودار منفی شده است، به طوری که اضافه کردن ۱٪ حجمی الیاف امباس، در دو طرح اختلاط ۲ - ۱۸ - ۵/۱ و ۲/۵ - ۱۵ - ۳۲، سبب کاهش مدول گسیختگی تا ۹٪ نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف شده است. میزان افزایش مدول گسیختگی با افزودن ۳۵٪ حجمی الیاف امباس، بین ۹٪ تا ۳۸٪ نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف متناظر و با افزودن ۷٪ میزان رشد مدول گسیختگی ملات، بین ۷٪ تا ۳۶٪ بوده است. بنابراین، مناسب‌ترین درصد حجمی الیاف امباس برای اصلاح مدول گسیختگی ملات ژئوپلیمری، برابر با ۳۵٪ حجمی است. یکی دیگر از آثار الیاف امباس، تغییر در نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های تیر بود، به طوری که گسیختگی در نمونه‌های بدون الیاف، کاملاً به صورت ترد و ناگهانی صورت گرفت، ولی در نمونه‌های الیافی، حتی پس از به وجود آمدن ترک‌های اصلی در بدنه‌ی نمونه، با توجه به خاصیت پل‌زنی الیاف و همچنین چسبندگی مناسب بین الیاف و ملات ژئوپلیمری، نمونه‌ها همچنان استحکام نسبی داشتند و تا مدتی، الیاف از گسیختگی کامل و نصف شدن نمونه و جداسدن اجزاء آن از یکدیگر جلوگیری کردند. در مجموع استفاده از الیاف امباس باعث بهبود نحوه‌ی شکست نمونه‌ها در آزمایش مدول گسیختگی شد و سبب انسجام بهتر و رفتار شکل‌پذیرتر و انعطاف‌پذیرتر و در نتیجه شکست نرم نمونه‌های ژئوپلیمری الیافی پس از ایجاد ترک شد.

در نمودار شکل ۱۵، روند کاهش مدول گسیختگی نمونه‌های حاوی زئولیت در مقایسه با نمونه‌های بدون زئولیت مشاهده می‌شود و مشخص است که طرح‌های SZ۳۰، SZ۱۵ و SZ۴۵ به ترتیب با میزان ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ زئولیت در پیش‌ماده‌ی خود، کاهش مدول گسیختگی ۱۵، ۲۹ و ۵۹ درصدی را تجربه کرده‌اند. با مقایسه‌ی مقاومت فشاری و مدول گسیختگی می‌توان متوجه شد که روند کاهش مدول گسیختگی، شباهت بسیاری به روند کاهش مقاومت فشاری دارد. همچنین مشاهده می‌شود که در بازه‌های ۱۵٪ الی ۱۵٪ و ۳۰٪ الی ۳۰٪، شیب یکسانی در کاهش مقاومت طی می‌شود، ولی پس از تجاوز از ۳۰٪، کاهش مقاومت با شیب تندتری صورت می‌پذیرد.

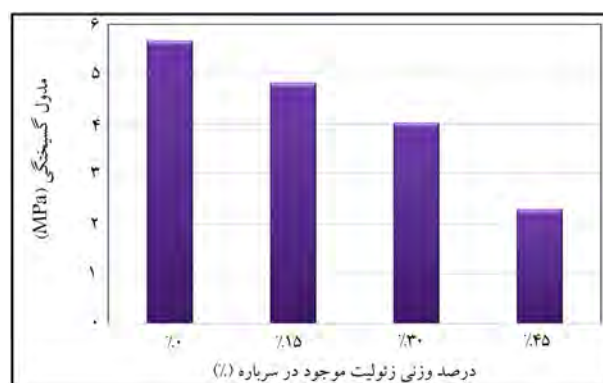
### ۴. نتیجه‌گیری

پارامترهای مقاومت فشاری و خمشی (مدول گسیختگی) نمونه‌های متعدد ملات ژئوپلیمری با هدف بررسی تأثیر مواد سازنده و نسبت‌های آن‌ها، تأثیر الیاف امباس و نیز تأثیر استفاده از پیش‌ماده‌ی ترکیبی (سرباره و زئولیت) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و این نتایج به‌دست آمده است:

- با کاهش نسبت ماسه به سرباره، رشد مقاومت فشاری در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب در بازه‌های (۳٪ الی ۲۶٪) و (۳٪ الی ۱۴٪) مشاهده شد.
- با افزایش مولاریته‌ی هیدروکسیدسدیم، رشد مقاومت فشاری در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه تا ۲۰٪ مشاهده شد و بیشترین تأثیرپذیری را نمونه‌های با نسبت ماسه به سرباره‌ی ۲/۵ تجربه کردند.
- بیشترین میزان تأثیرگذاری نسبت سیلیکات‌سدیم به هیدروکسیدسدیم در مقاومت فشاری نمونه‌های با نسبت ماسه به سرباره کمتر بوده است.
- با افزودن الیاف امباس به ملات ژئوپلیمری، مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی رشد ۱۴ درصدی داشته‌اند.



شکل ۱۴. تغییرات مدول گسیختگی در طرح اختلاط‌های متناسب با درصدهای الیاف.



شکل ۱۵. نمودار تأثیر مقدار زئولیت موجود در پیش‌ماده در مدول گسیختگی نمونه‌های ژئوپلیمری با پیش‌ماده ترکیبی زئولیت و سرباره.

آن‌ها ترکیبی از سرباره و زئولیت بود، در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شوند که در آن‌ها مقایسه‌ی مدول گسیختگی نمونه‌های الیافی با نمونه‌های متناظر بدون الیاف آن‌ها صورت گرفته و تأثیر الیاف در مدول گسیختگی نمونه‌ها مشخص شده است. روند رشد مدول گسیختگی برعکس روند رشد مقاومت فشاری بوده است، به طوری که طرح ۲ - ۱۸ - ۵/۱ که بیشترین مقاومت فشاری در بین سه طرح منتخب را داشت، کمترین مدول گسیختگی و طرح ۲/۵ - ۱۲ - ۳۲ با کمترین مقاومت فشاری، بیشترین مدول گسیختگی را داشتند. این رویه در نمونه‌های الیافی با سه درصد حجمی متفاوت الیاف نیز مشاهده شد که این موضوع خود می‌تواند دلیلی بر اتفاقی نبودن این رویه‌ی معکوس در مقاومت فشاری و مدول گسیختگی باشد. از آنجایی که سه طرح اشاره شده در پارامترهای مختلفی با یکدیگر تفاوت داشتند و مواد سازنده و نسبت‌های آن‌ها به کلی در سه طرح اخیر متفاوت بوده است، بنابراین نمی‌توان قطعاً نظر داد که کاهش افتادگی در مدول گسیختگی، تأثیر کدام پارامتر بوده است. از طرفی، به دلیل تنوع و حجم زیاد مطالب و موضوعات بررسی شده در نوشتار حاضر، علت بروز روند معکوس اشاره شده در پژوهش حاضر مطالعه نشده و فقط به ارائه‌ی گزارشی از نتایج به‌دست‌آمده پرداخته شده است.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که الیاف امباس سبب بالا رفتن مدول گسیختگی و بهبود عملکرد تیرهای ساخته شده از هر طرح در خمش شده است. همچنین افزودن الیاف تا ۳۵٪ حجمی، سبب افزایش مدول گسیختگی و تغییرات با

• مقاومت فشاری طرح‌های با مقادیر ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد وزنی زئولیت از پیش‌ماده، به ترتیب کاهش می‌یابد. به میزان ۱۸، ۳۲ و ۵۹ درصد داشتند. مدول گسیختگی سه طرح مذکور نیز به ترتیب به میزان ۱۵، ۲۹ و ۵۹ درصد کاهش داشت.

• با افزودن الیاف با ۳۵٪ حجمی، مدول گسیختگی در مقایسه با مقاومت فشاری، رشد بیشتری برابر ۳۸٪ داشت و با افزایش درصد الیاف و به دلیل گلوله شدن و در هم تنیده شدن الیاف و پخش ناهمگن آن‌ها، درصد میزان افزایش، کاهش یافت و به سقف ۹٪ رسید.

### منابع (References)

- Suhendro, B. "Toward green concrete for better sustainable environment", *Procedia Engineering*, **95**, pp. 305-320 (2014).
- Salloum, T. "Effect of fly ash replacement on alkali and sulphate resistance of mortars", PhD dissertation, Concordia University (2007).
- Vickers, L., Riessen, A. and Rickard, W.D. "Fire-resistant geopolymers: Role of fibres and fillers to enhance thermal properties", Springer, Singapore (2015).
- Mehta, P.K. and Meryman, H. "Tools for reducing carbon emissions due to cement consumption", *Structure Magazine*, **1**, pp.11-15 (2009).
- Guo, X. and Pan, X. "Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar", *Construction and Building Materials*, **179**, pp. 633-641 (2018).
- Davidovits, J. "Geopolymers: inorganic polymeric new materials", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **37**(8), pp. 1633-1656 (1991).
- Barbosa, V.F., MacKenzie, K.J. and Thaumaturgo, C. "Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers", *International Journal of Inorganic Materials*, **2**(4), pp. 309-317 (2000).
- Zhuang, X.Y., Chen, L., Komarneni, S. and et al. "Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications", *Journal of Cleaner Production*, **125**, pp. 253-267 (2016).
- andez-Jimenez, A., Provis, J.L. و Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., "Geopolymer technology: The current state of the art", *Journal of Materials Science*, **42**(9), pp. 2917-2933 (2007).
- Davidovits, J. "Geopolymers: inorganic polymeric new materials", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **37**(8), pp. 1633-1656 (1991).
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J. and Schwartzman, A. "The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics", *Minerals Engineering*, **12**(1), pp. 75-91 (1999).
- ASTM, "Standard specification for ground granulated blast-furnace slag for use in concrete and mortars", In ASTM (2003).
- Lloyd, N. and Rangan, B. "Geopolymer concrete with fly ash", *Second Int. Conf. on Sustainable Constr. Mater. Technol*, **3**, pp. 1493- 1504 (2010).
- Comrie, D.C. and Kriven, W.M. "Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application", In *Geopolymers Advances in Ceramic Matrix Composites IX*, Proceedings, pp. 211-225 (2004).
- Weil, M., Dombrowski, K. and Buchwald, A. "Life-cycle analysis of geopolymers", In *Geopolymers*, Woodhead Publishing, pp. 194-210 (2009).
- Li, Z., Ding, Z. and Zhang, Y. "Development of sustainable cementitious materials", In *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, pp. 55-76 (2004).
- Zhang, Z.H., Zhu, H.J., Zhou, C.H. and et al. "Geopolymer from kaolin in China: an overview", *Applied Clay Science*, **119**(part 1), pp. 31-41 (2016).
- Majidi, B. "Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: A review", *Materials Technology*, **24**(2), pp. 79-87 (2009).
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M. and et al. "On the development of fly ash-based geopolymer concrete", *Materials Journal*, **101**(6), pp. 467-472 (2004).
- Bakharev, T. "Resistance of geopolymer materials to acid attack", *Cement and Concrete Research*, **35**(4), pp. 658-670 (2005).
- Fernandez-Jimenez, A.M., Palomo, A. and Lopez-Hombrados, C. "Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete", *ACI Materials Journal*, **103**(2), pp. 106-112 (2006).
- Thakur, R.N. and Ghosh, S. "Effect of mix composition on compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer composites", *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, **4**(4), pp. 68-74 (2009).
- Vora, P.R. and Dave, U.V. "Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete", *Procedia Engineering*, **51**, pp. 210-219 (2013).
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M. and et al. "Geopolymer concrete: A review of some recent developments", *Construction and Building Materials*, **85**, pp. 78-90 (2015).
- Duxson, P.S.W.M., Mallicoat S.W., Lukey G.C. and et al. "The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **292**(1), pp. 8-20 (2007).

26. Bondar, D., Lynsdale, C.J. and Milestone, N.B. "Geopolymer cement from alkali-activated natural pozzolans: Effect of addition of minerals", *In 2nd International Conference On Sustainable Construction Materials and Politecnica delle Marche*, Ancona, Italia, pp. 28-30 (2010).
27. Bernal, S.A., Mejia de Gutierrez, R., Pedraza, A.L. and et al. "Effect of binder content on the performance of alkaliactivated slag concretes", *Cement and Concrete Research*, **41**(1), pp. 1-8 (2011).
28. Najimi, M. and Ghafoori, N. "Engineering properties of natural pozzolan/slag based alkali-activated concrete", *Construction and Building Materials*, **208**, pp. 46-62 (2019).
29. Nikolov, A., Rostovsky, I. and Nugteren, H. "Geopolymer materials based on natural zeolite", *Case Studies in Construction Materials*, **6**, pp. 198-205 (2017).
30. Ortega, E.A., Cheeseman, C., Knight, J. and et al. "Properties of alkali-activated clinoptilolite", *Cement and Concrete Research*, **30**(10), pp. 1641-1646 (2000).
31. Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R. and et al. "Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite", *Construction and Building Materials*, **24**(11), pp. 2084-2090
32. Zhang, Z.H., Yao, X., Zhu, H.J. and et al. "Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer", *Journal of Central South University of Technology*, **16**, pp. 49-52 (2009).
33. Islam, A., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z. and et al. "Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, **152**, pp. 964-977 (2017).
34. Bhutta, A., Borges, P.H., Zanotti, C. and et al. "Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers", *Cement and Concrete Composites*, **80**, pp. 31-40 (2017).
35. Xu, F., Deng, X., Peng, C. and et al. "Mix design and flexural toughness of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer composites", *Construction and Building Materials*, **150**, pp. 179-189 (2017).
36. Dalvand, M.H. "Experimental and statistical Investigation of strength characteristics of Geopolymer Mortars", MS Thesis, Faculty of Civil Engineering, Semnan University (2019).
37. Noushini, A., Hastings, M., Castel, A. and et al. "Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, **186**, pp. 454-475 (2018).
38. Nam, J., Kim, G., Lee, B. and et al. "Frost resistance of polyvinyl alcohol fiber and polypropylene fiber reinforced cementitious composites under freeze thaw cycling", *Composites Part B: Engineering*, **90**, pp. 241-250 (2016).
39. Guo, X. and Pan, X. "Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar", *Construction and Building Materials*, **179**, pp. 633-641 (2018).
40. Ruan, M.H. and Liu, H.W. "Mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete", *Highway Eng*, **42**, pp. 275-282 (in Chinese) (2017).
41. Zhu, Y. and Ma, Q.Y. "Experiment research on compressive and tensile strength of nano-SiO<sub>2</sub> concrete with basalt fiber", *Sci. Tech. Eng*, **16**, pp. 240-243 (in Chinese) (2016).
42. Reed, M., Lokuge, W. and Karunasena W. "Fibre-reinforced geopolymer concrete with ambient curing for in situ applications", *Journal of Materials Science*, **49**(12), pp. 4297-4304 (2014).
43. Morsy, M.S., Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y. and et al. "Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder", *Arabian journal for Science and Engineering* **39**(6), pp. 4333-4339 (2014).