

# نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، (پیاپی ۵۱): صص ۲۳-۱۱

علمی - پژوهشی

## بررسی مقاومت ضربه‌ای، ریزساختاری و کاهش وزن در

### بتن ژئوپلیمر پوزولانی حاوی الیاف، تحت حرارت بالا

محمدحسین منصورقنای<sup>۱</sup>، مرتضی بیک لریان<sup>۲\*</sup>، علیرضا مردوخ پور<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

#### چکیده

امروزه ساخت سازه‌هایی با اهمیت خیلی زیاد (نظیر سازه‌های نظامی، تأسیسات هسته‌ای، بیمارستان‌ها و تأسیسات زیربنایی)، با مقاومت بالا در برابر بارهای ضربه‌ای و حرارت زیاد، در حوزه پدافند غیرعامل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، تولید بتن پر مقاومت و دوستدار طبیعت به عنوان مصالح اصلی به کار رفته در این نوع از سازه‌ها نقش مهمی را ایفاء می‌کند. در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای حاوی ۰ الی ۸ درصد نانوسیلیس و ۱ الی ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین پرداخته شده است. نمونه‌های بتنی ساخته شده در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه و در دمای ۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس تحت آزمون ضربه وزنه‌افتان، کاهش وزن، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) قرار گرفتند، آنالیز طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) نیز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و در سن ۷ روز عمل‌آوری بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. نتایج حاصله حاکی از تضعیف ریزساختار بتن در معرض حرارت بالا است، بهبود نتایج حاصل از آزمون‌ها در بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی مشهود است. بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد در آزمون کاهش وزن نمونه‌ها متعلق به بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف، به ترتیب به میزان ۰/۰۶۱ و ۰/۱۲ درصد افت وزن نمونه می‌باشد. بهترین عملکرد در میزان جذب انرژی ضربه وزنه‌افتان در دمای ۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس متعلق به بتن ژئوپلیمری (حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف) به ترتیب به میزان ۲۹۲۸/۲۵ و ۷۷۳/۴۴ ژول است. بیشترین و کمترین میزان افت در انرژی جذب شده نمونه‌های بتنی تحت دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۲۵ درجه سلسیوس، متعلق به بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری (حاوی ۸ درصد نانوسیلیس) به ترتیب به میزان ۸۳/۳۳ و ۵۳/۳۳ درصد است.

**کلید واژه‌ها:** بتن ژئوپلیمری، سرباره کوره آهن‌گدازی، نانوسیلیس، الیاف پلی‌اولفین، کاهش وزن

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران - (M.biklaryan@iauc.ac.ir) - نویسنده مسئول

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

## ۱- مقدمه

پدافند غیرعامل به یک نوع دفاع غیرنظامی اطلاق می‌گردد که در آن با در نظر گرفتن تمهیداتی لازم می‌توان خسارات وارده مالی و انسانی ناشی از بروز بحران‌های طبیعی و تصنعی را به حداقل رساند، در این راستا ساخت سازه‌ها و استحکامات امن که دارای مقاومت بالایی در برابر بارهای وارده و حرارت بالا باشند به‌عنوان یکی از راهکارها، دارای اهمیت فراوانی است. بتن به‌عنوان یکی از مصالح اصلی به‌کاررفته در ساخت سازه‌ها می‌تواند نقش مهمی را در افزایش مقاومت در برابر بارهای ضربه‌ای و حرارت بالا در سازه ایجاد نماید. ایجاد مقاومت و استحکام بالا در بتن سخت‌شده می‌تواند منجر به راهکاری مؤثر در ساخت سازه در پدافند غیرعامل باشد. از طرفی استفاده از سیمان در بتن با توجه به مزایای فراوان آن، دارای معایبی نیز می‌باشد، از عمده معایب مصرف سیمان در بتن، تغییرات ریزساختاری زیاد در مواجهه با حرارت بالا، مقاومت ضربه‌ای پایین، ایجاد آلودگی محیط‌زیستی به‌واسطه تولید گاز سمی دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ ) و مصرف بالای سوخت‌های فسیلی در فرآیند تولید آن می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که کارخانه‌های تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل  $CO_2$  وارد شده به جو کره زمین می‌باشند [۱]. بتن ژئوپلیمری در راستای کاهش مضرات ناشی از تولید بتن معمولی برای اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسط پروفیسور گلوخفسکی<sup>۱</sup> در اتحاد جماهیر شوروی به‌عنوان جایگزینی برای سیمان معمولی مطرح شد و در ادامه توسط جوزف دی‌ویدویتس در سال ۱۹۷۹ مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت [۲]. تحقیقات نشان می‌دهد که میزان دی‌اکسیدکربن تولیدشده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است [۳]. تولید بتن ژئوپلیمری توسط روش‌های متداول فناوری بتن انجام می‌گیرد [۴]. در تولید بتن ژئوپلیمری از سیمان استفاده نمی‌گردد و به‌جای آن مصالحی حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی فراوان با نقش چسبندگی و پرکنندگی بالا و از محلول قلیافعال به‌عنوان فعال‌ساز شیمیایی استفاده می‌گردد. مواد آلومینوسیلیکاتی با توجه به خواص پوزولانی خود، می‌توانند ضمن مشارکت در واکنش‌پذیری، موجب تسریع در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون گردند و منجر به تولید حجم بالایی از ژل‌های هیدراته شده شوند، این ژل‌ها ضمن ایجاد چسبندگی در اجزای تشکیل دهنده بتن، به خوبی می‌توانند حفرات و منافذ موجود در بخش ریزساختار و کلان‌ساختار بتن را پر نمایند و اتصال بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان در نواحی انتقال بین‌سطحی (ITZ)<sup>۲</sup> را تقویت کنند و از این طریق منجر به تولید بتن متراکم و مستحکم ژئوپلیمری گردند، این فرآیند در بتن معمولی حاوی

سیمان پرتلند با توجه به تولید میزان کمتری از ژل هیدراته سیلیکات کلسیم‌هیدراته (C-S-H)، به شکل ضعیف‌تری انجام می‌پذیرد.

تحقیقات نشان داده است که سرباره‌کوره‌آهن‌گدازی متشکل از سیلیکات کلسیم و آلومینات، الزامات مربوط به مواد پوزولانی را برآورده می‌سازد [۵]. در این راستا تحقیقات نشان داده است که افزودن سرباره‌کوره‌آهن‌گدازی به ترکیب بتن ژئوپلیمری، ساختار منافذ در بتن را بهینه‌سازی می‌کند و توزیع اندازه منافذ به‌طور مناسب‌تر خواهد بود، همچنین ITZ را متراکم می‌نماید [۶]. در سال‌های اخیر کاربرد نانوذرات سیلیس برای بهبود خواص بتن، چشم‌انداز گسترده‌ای در برابر علم فناوری بتن ایجاد کرده است [۷]. نانوذرات به‌علت اندازه ذرات بسیار کوچک و سطح ویژه بالای خود، خصوصیات ویژه‌ای را در طرح مخلوط بتن از خود نشان می‌دهند [۸]. این ذرات به دلیل اندازه کوچک خود می‌توانند با پرکردن خلل و فرج‌های باقی مانده در بتن، باعث بهبود مقاومت آن شوند و به‌عنوان یک مکمل در ساخت بتن به‌کار روند [۹]. الیاف پلی‌اولفین به‌منظور بالا بردن میزان مقاومت بتن در برابر بارهای وارده نقش به‌سزایی را در تولید بتن ایفاء می‌نماید. تحقیقات نشان داده است که استفاده از الیاف‌های گوناگون در بتن جهت بهبود عملکرد مکانیکی آن در برابر بارهای دینامیکی از قبیل وزنه‌افتان، پرتابه‌های کوچک با سرعت بالا و نیز انفجار به دهه‌ها قبل برمی‌گردد [۱۰]. حتی استفاده به میزان کم از الیاف، مقاومت ضربه‌ای و اختلاف بین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه نهایی را نسبت به بتن معمولی افزایش می‌دهد [۱۱].

یکی دیگر از مزایای بتن‌های ژئوپلیمری در مقایسه با بتن معمولی، عملکرد مناسب این نوع از بتن در مواجهه با دمای بالا می‌باشد. در این راستا، تحقیقات نشان داده است که محصولات حاصل از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون مزایای ویژه‌ای از قبیل خواص مکانیکی عالی، مقاومت مناسب در برابر دمای بالا و حملات شیمیایی، جمع‌شدگی کم و دیگر موارد دارند [۱۲]. هنگامی که بتن در برابر آتش یا حرارت زیاد قرار می‌گیرد، ممکن است به دلیل کاهش مقاومت و سختی، ظرفیت باربری پس از آتش‌سوزی در بتن کاهش قابل توجهی یابد [۱۳]. میزان خسارت ناشی از آتش ارتباط مستقیم با مدت و دمای ایجاد شده در بتن دارد [۱۴]. در سال‌های اخیر استفاده از مصالح ژئوپلیمری به‌دلیل پایداری شیمیایی، مقاومت زیاد در برابر حرارت و انقباض کم نسبت به سیمان پرتلند، مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌است [۱۵]. تحقیقات نشان می‌دهد که با توجه به فشار زیاد بین حفره‌ای در ماتریس بتن، خروج آب از فضای پیوند شیمیایی در سیلیکات کلسیم‌هیدراته منجر به خرابی بتن در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس می‌شود، تغییرات قابل توجهی از خواص

<sup>۱</sup> Glukhovsky<sup>۲</sup> Interfacial Transition Zone (ITZ)

واکنش‌پذیری مشارکت نمایند [۲۴]. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II با چگالی ۳۲۵۰ یلوگرم در متر مکعب محصول کارخانه سیمان دیلمان می‌باشد که تحت استاندارد En 197-1 تولید گردیده است. آب مصرف شده به‌منظور تهیه آب آهک و ساخت طرح‌های اختلاط تحقیق پیش‌رو از آب شرب شهر لاهیجان می‌باشد، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و چگالی  $1000 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد. سنگدانه‌های تأمین شده از کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده و الزامات استاندارد ASTM C33 را پوشش می‌دهند.

الیاف مصرفی در این تحقیق از نوع پلی‌الفین بوده که محصول شرکت ایتالیایی دوروچم<sup>۲</sup> خاورمیانه است و تحت استاندارد ASTM D7508/D7508M مورد استفاده در بتن قرار گرفته است. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از الیاف ماکرو پلاستیک برای تقویت بتن به جای استفاده از مش فلزی و الیاف فلزی مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است، صنایع مرتبط با بتن با الیاف مبتنی بر پلی‌الفین بیشترین کاربرد را دارند [۲۵]. ابرروان‌کننده مصرفی در این تحقیق از نسل چهارم بر پایه پلی‌کربوکسیلات-نرمال بوده و محصول شرکت دوروچم ایتالیا است، این ماده جهت جبران ضعف کارایی و حفظ روانی ترکیب ملات در بتن استفاده می‌گردد. محلول قلیاف‌فعال مصرفی در این تحقیق ترکیبی از محلول سیلیکات سدیم و هیدرواکسید سدیم با نسبت وزنی ۲/۵ می‌باشد که با چگالی ترکیبی برابر با ۱۴۸۳ کیلوگرم در متر مکعب مورد استفاده قرار گرفته است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از هیدروکسید سدیم و سیلیکات-سدیم به علت شکل‌گیری مقادیر بیشتری از ژل C-S-H در هنگام استفاده از سیلیکات کلسیم، منجر به استحکام بالاتری نسبت به حالت استفاده تنها از ماده قلیاف‌فعال هیدروکسید کلسیم می‌شود [۲۶].

## ۲-۲- طرح مخلوط

استاندارد مجزایی برای ساخت طرح مخلوط بتن ژئوپلیمری وجود ندارد، بنابراین پیرو مطالعات انجام پذیرفته بر روی سایر تحقیقات با موضوع بتن ژئوپلیمری [۲۷]، در این تحقیق به‌منظور بررسی خصوصیات بتن معمولی و بتن ژئوپلیمر سربراه‌ای حاوی نانوسیلیس و الیاف پلی‌اولفین، ۶ طرح مخلوط با نسبت‌های مختلف مصالح مطابق با جدول (۱) تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89 ساخته شد. در این راستا، یک طرح مخلوط از بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند و ۵ طرح مخلوط از بتن ژئوپلیمری می‌باشد، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در دو گروه کلی جای دارند، گروه اول فاقد الیاف پلی‌اولفین هستند و مقدار نانوسیلیس در آن‌ها از ۰ تا ۸ درصد متغیر است.

بتن تحت دمای بین ۲۷ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس مشاهده نمی‌گردد اما کاهش تا ۴۰ درصد در مقادیر مقاومت، بعد از اعمال دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در مراحل اولیه اتفاق می‌افتد [۱۶]. در سایر تحقیقات نشان داده شده است که حرارت بین ۵۰۰ الی ۹۰۰ درجه سلسیوس می‌تواند موجب تغییرات کریستالی، تخریب ریزساختار ژل‌های هیدراته و تشکیل کانی‌های کربناتی در ماتریس بتن گردد [۱۵، ۱۷ و ۱۸]. مک‌نالتی [۱۹] با مقایسه بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی و بتن ژئوپلیمری، اظهار داشت که ژئوپلیمرها به دلیل ویژگی‌های سرامیکی مانند خود، عملکرد بهتری نسبت به بتن‌های معمولی در مواجهه با آتش دارند [۲۲-۲۰]. بررسی‌ها نشان داده است که تولید سیمان همواره منجر به انتشار گاز سمی  $\text{CO}_2$  در جو می‌گردد، از این رو بتن ژئوپلیمری با توجه به عدم استفاده از سیمان در ترکیب خود، به‌عنوان بتن پاک و دوستدار محیط‌زیست شناخته می‌شود. در این پژوهش آزمایشگاهی، بهبود ریزساختار بتن ژئوپلیمری و افزایش مقاومت ضربه‌ای و حرارتی در بتن ژئوپلیمری (نسبت به بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند) و مصرف سربراه‌آهن‌گذاری انباشته شده در کارخانه‌های ذوب آهن به‌عنوان یکی از مواد مضر محیط‌زیست (با توجه به خواص سمی بودن آن)، شاخص‌های نوآورانه و حافظ محیط‌زیست شناخته می‌شوند، از طرفی تولید بتن ژئوپلیمری فاقد سیمان، با خواص ریزساختاری و دوام فراتر از بتن معمولی، به‌عنوان نوآوری در تولید مصالح اصلی صنعت سازه‌ای در پدافند غیرعامل به‌شمار می‌آید.

## ۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش، سربراه‌آهن‌گذاری تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت، این نوع از سربراه با چگالی ۲۷۹۰ کیلوگرم در متر مکعب محصول کارخانه ذوب آهن اصفهان می‌باشد. تحقیقات نشان دهنده این موضوع است که سربراه‌آهن‌گذاری متشکل از سیلیکات کلسیم و آلومینات (تقریباً ۹۰ درصد)، الزامات مربوط به مواد پوزولانی را برآورده می‌سازد [۲۳]. ذرات نانوسیلیس که دارای ۹۹/۵ درصد سیلیس و با قطر میانگین ۷ تا ۱۴ نانومتر و چگالی ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند، استفاده شده است، نانوسیلیس مصرفی محصول شرکت ایونیک اینداستریز<sup>۱</sup> آلمان می‌باشد. مصرف نانوسیلیس باید به‌صورت بهینه باشد زیرا تحقیقات نشان داده است که با ریزتر شدن اندازه نانو ذرات در مخلوط بتن، به جای این که آن‌ها با آب و سایر مصالح واکنش دهند به همدیگر می‌چسبند و تشکیل کلوخه‌های نانومتری می‌دهند، در نتیجه این ذرات در مخلوط نمی‌توانند پراکنده شوند و در مرحله

<sup>۲</sup> Durocem Italy

<sup>۱</sup> Evonik Industries

جدول (۱): مشخصات طرح مخلوط بتن

شرایط عمل آوری پس از قالب برداری	kg/m <sup>3</sup>									نوع بتن	طرح
	ابروان کننده	ماسه	شن	الیاف	نانو سیلیس	سرباره	محلول قلیافعال	آب	سیمان		
آب	۶/۷۵	۷۶۱	۱۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۵۰	معمولی	۱
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)	۶/۷۵	۸۱۶	۱۰۰۰	۰	۰	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰	۰	ژئوپلیمری	۲
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)	۷/۸	۷۶۷	۱۰۰۰	۰	۱۸	۴۳۲	۲۰۲/۵	۰	۰	ژئوپلیمری	۳
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)	۸/۳	۷۱۸	۱۰۰۰	۰	۳۶	۴۱۴	۲۰۲/۵	۰	۰	ژئوپلیمری	۴
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)	۸/۶	۶۷۲	۱۰۰۰	۹/۲	۳۶	۴۳۲	۲۰۲/۵	۰	۰	ژئوپلیمری	۵
اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)	۹	۶۴۶	۱۰۰۰	۱۸/۴	۳۶	۴۳۲	۲۰۲/۵	۰	۰	ژئوپلیمری	۶

پس از اتمام مرحله مخلوط شدن مصالح، بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری داخل قالب‌های از قبل روغن‌کاری شده ریخته شدند و عمل تراکم برای هر نمونه در سه مرحله و هر بار با ۲۵ ضربه میله انجام گرفت. نمونه‌ها ۲۴ ساعت پس از بتن‌ریزی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند و پس از قالب‌برداری، نمونه‌های بتن معمولی در داخل حوضچه آب آهک تحت دمای ۲۵ (دمای محیط یا اتاق) درجه سلسیوس تا سن انجام آزمایش نگهداری و عمل‌آوری شدند و برای بتن ژئوپلیمری، نمونه‌ها پس از قالب‌برداری به منظور افزایش تراکم و بهبود خواص، در کوره به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تحت حرارت قرار گرفتند و در ادامه تا سن انجام آزمایش در جای خشک تحت دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. قبل از انجام آزمون-های تحت حرارت بالا در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه، بر اساس استاندارد ISO834 نمونه‌های بتنی به مدت ۱ ساعت در کوره تحت دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند، سپس نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا تحت تأثیر شک دمایی قرار نگیرند، پس از خروج نمونه‌ها از کوره، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند تا به تعادل دمایی برسند.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

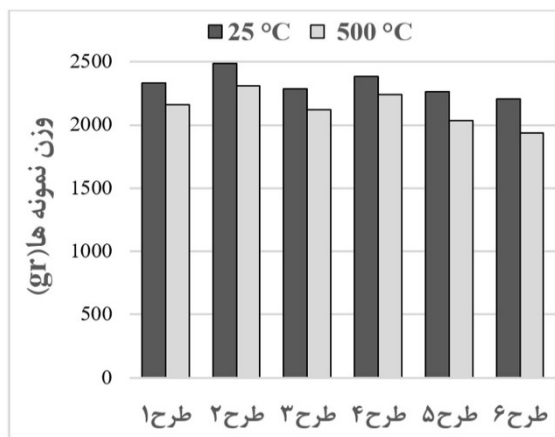
#### ۳-۱- آزمایش کاهش وزن نمونه‌های بتنی

به منظور ارزیابی کمی و کیفی خواص مکانیکی دوام در بتن، اثرات حرارت بر کاهش وزن نمونه‌های بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون کاهش وزن نمونه‌های بتنی می‌تواند کمک شایانی در راستای تولید بتن مصرفی در سازه‌ها به منظور ایجاد بستر برای پدافند غیرعامل نماید. در این راستا در تمامی طرح‌های اختلاط در این پژوهش آزمایشگاهی، نمونه‌های بتنی با ابعاد مکعب ۱۰ سانتی‌متر در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه، ابتدا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس وزن گردیدند سپس نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت درون کوره در معرض دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار

گروه دوم حاوی ۸ درصد نانوسیلیس می‌باشند و الیاف پلی‌اولفین در این طرح‌ها به صورت ۱ و ۲ درصد مورد مصرف قرار گرفته است. نمونه‌های بتنی تهیه شد در دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. برای انجام آنالیز SEM، XRD و XRF از نمونه‌های شکسته شده استفاده گردید. پس از بررسی نتایج اولیه آزمون‌ها، طرح ۴ از بین طرح‌های ۲، ۳ و ۴ به عنوان طرح بهینه انتخاب گردید و با افزودن ۱ و ۲ درصد از الیاف پلی‌اولفین به این طرح، طرح‌های ۵ و ۶ ساخته شدند تا نقش الیاف پلی‌اولفین بر خواص ریزساختاری، مقاومت ضربه‌ای و کاهش وزن نمونه‌های بتنی مورد ارزیابی قرار گیرد. در ساخت طرح‌های ۵ و ۶، حاوی بتن ژئوپلیمری دارای الیاف پلی‌اولفین، ۹-۹-۳ مبحث نهم آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان ایران مربوط به بتن الیافی [۲۸] رعایت شده است. نسبت آب به سیمان در بتن معمولی و محلول قلیافعال به سرباره کوره‌آهنگدازی در بتن ژئوپلیمری به طور ثابت ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است و مقادیر سیمان و یا سرباره کوره‌آهنگدازی (با درصد جایگزین نانوسیلیس)، آب و یا محلول قلیافعال، شن و ابروان کننده ثابت در نظر گرفته شده‌اند و با تعیین وزن الیاف (با توجه به درصد چگالی خودش)، مقدار ماسه به عنوان متغییر محاسبه و تعیین گردید.

#### ۳-۲- نحوه ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

در این پژوهش، ساخت نمونه‌ها در محیط آزمایشگاهی انجام گرفت. در این راستا، ابتدا مصالح بر اساس جدول (۱) توزین شدند، در ادامه مصالح خشک (به جز الیاف پلی‌اولفین) داخل مخلوط‌کن برقی طی چند مرحله ریخته شد و در مجموع مصالح خشک حدود ۲ دقیقه با هم ترکیب شدند، سپس ابروان‌ساز، آب و محلول قلیافعال به فراخور نیاز هر طرح، به مخلوط‌ها اضافه گردید و به مدت ۳ دقیقه دیگر فرآیند مخلوط شدن به طول انجامید. در ترکیب بتن ژئوپلیمری الیافی، الیاف در پایان ترکیب و به آرامی به مخلوط در حال چرخش اضافه گردید تا زمانی که توزیع الیاف در مخلوط بتن به صورت یکنواخت مشاهده گردد.



شکل (۱): نمودار نتایج کاهش وزن نمونه‌های بتنی

### ۳-۲- آزمایش مقاومت ضربه‌ای وزنه‌افتان

آزمون مقاومت ضربه‌ای از نوع وزنه‌افتان تحت استاندارد ACI 544-2R [۳۳] انجام شد. این آزمون در رده آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی بتن قرار دارد و نتایج آن می‌تواند کمک شایانی در جهت تشخیص کیفیت بتن به لحاظ ریزساختاری باشد. در این راستا، نتایج حاصل از آزمایش تعیین میزان مقاومت ضربه‌ای بتن توسط وزنه‌افتان، بر روی نمونه‌های بتنی با ابعاد دیسکی ۱۵×۶/۳۶ سانتی‌متر حاصل از بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری تحت حرارت ۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس در سن ۹۰ روز عمل‌آوری، در جدول (۲) نشان داده شده است. در شکل (۲)، نمودار انرژی لازم جهت شکست نمونه بتنی و شکل (۳) نشان دهنده میزان انرژی جذب‌شده در هر نمونه بتنی در آزمون ضربه-ای وزنه‌افتان در دماهای ۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد. محاسبه میزان انرژی ضربه بر اساس رابطه (۱) انجام شده است که در آن N تعداد ضربات برای بروز ترک اولیه، W وزن چکش، H ارتفاع سقوط است.

$$\text{Impact Energy (En)} = N \times W \times H \quad (1)$$

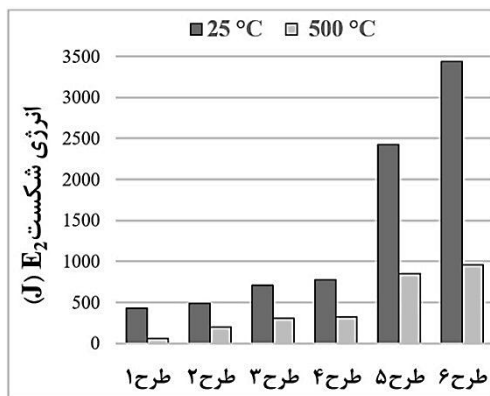
در این مطالعه آزمایشگاهی، بر اساس نتایج حاصله در آزمون مقاومت ضربه‌ای وزنه‌افتان مشخص گردید که بتن‌های در مجاورت حرارت، دارای مقاومت کمتری در برابر بار ضربه‌ای در مقایسه با بتن‌های قرار گرفته در معرض دمای محیط (۲۵ °C) هستند، به طوری که میزان افت مقاومت در جذب انرژی شکست نمونه‌ها از طرح ۱ الی طرح ۶ به ترتیب به میزان ۵۸، ۵۷، ۵۸، ۶۵ و ۷۲ درصد در نمونه‌های تحت حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۲۵ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. در این راستا بیشترین میزان افت مقاومت متعلق به بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند می‌باشد و در میان بتن‌های ژئوپلیمری،

گرفتند، این عمل موجب تبخیر آب از فضاهای مویینه و حفرات احتمالی موجود در بتن می‌گردد، در پایان زمان حرارت و پس از رسیدن دمای نمونه‌ها به ۲۵ درجه سلسیوس، نمونه‌ها مجدد وزن شدند. نمودار میزان کاهش وزن نمونه‌ها بر اساس شکل (۱) قابل مشاهده است. بر اساس نتایج حاصله در این آزمون مشاهده می‌گردد که بیشترین و کمترین درصد کاهش وزن نمونه‌ها بعد از حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۲۵ درجه سلسیوس، متعلق به طرح ۶ و طرح ۴ به ترتیب به میزان ۰/۱۲ درصد و ۰/۰۶۱ درصد است، میزان کاهش وزن در این دو طرح به ترتیب به مقادیر ۲۶۸ و ۱۴۵ گرم در هر نمونه می‌رسد. کاهش وزن نمونه بتنی در طرح ۴ شامل بتن ژئوپلیمرسرباره‌ای حاوی ۸ درصد نانوسیلیس، به میزان ۱۶ درصد بهبود را نسبت به طرح ۱ حاوی بتن معمولی از خود نشان داده است، این امر به دلیل حضور و مشارکت ذرات نانوسیلیس در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و نقش پرکنندگی و چسبندگی مناسب این ذرات می‌باشد که موجب تقویت پیوندها و پرشدن حفرات و ترک‌های موجود در ماتریس بتن ژئوپلیمری شده است. وجود الیاف پلی‌اولفین در ترکیب طرح ۶، موجب تضعیف در نتایج حاصل از کاهش وزن نمونه‌ها گردیده است. این امر را می‌توان به ضعف پیوند در ناحیه انتقال بین سطحی در حد فاصل بین خمیر ژئوپلیمری و الیاف پلی‌اولفین و توزیع غیریکنواخت الیاف در ساختار ملات ژئوپلیمری در این نمونه‌ها نسبت داد. البته جنس و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی الیاف مصرفی نقش به‌سزایی را در این راستا ایفاء می‌کند. عوامل متعدد دیگری در راستا کاهش وزن نمونه‌های بتنی تحت حرارت نقش دارند، به طوری که گزارش شده است افزایش سرعت انتقال حرارت، کاهش جرم نمونه بتنی را تشدید می‌کند، این امر به دلیل تبخیر آب آزاد و آب موجود در ناحیه انتقال بین سطحی می‌باشد [۲۹]. مطالعات نشان داده است که دلیل اصلی کاهش وزن نمونه‌های بتنی با افزایش حرارت را می‌توان ناشی از خروج آب از بین سنگدانه و خمیر سیمان دانست [۳۰]. در تحقیق انجام پذیرفته مهدی‌پور و همکاران، افزایش حرارت تا ۶۰۰ درجه سلسیوس موجب تشدید نرخ کاهش وزن نمونه‌های بتن پوزولانی تا ۱۲/۳۳ درصد شده است [۳۱]. در پژوهشی دیگر نشان داده شده است زمانی که دما در بتن به ۳۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد، آب بین لایه‌ای در ژل C-S-H موسوم به ژل توپ‌موریت و نیز مقداری آبی که به صورت شیمیایی تشکیل یافته و حاصل C-S-H و هیدرات‌های سولفوآلومینات است، از بین می‌رود، آگیری بعدی خمیر سیمان به علت تجزیه هیدرواکسیدکلسیم، در محدوده دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس آغاز می‌گردد اما برای تجزیه کامل C-S-H به دمایی در حدود ۹۰۰ درجه سلسیوس احتیاج است [۳۲].

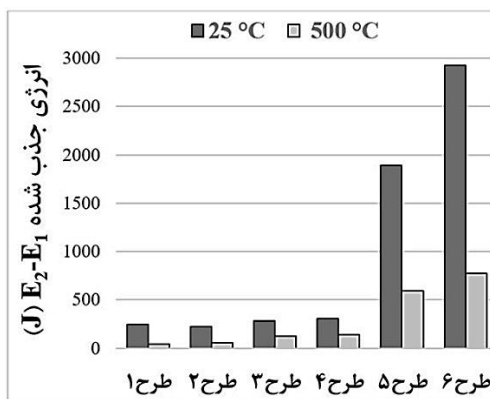
در معرض حرارت بالا، در برابر بار ضربه‌ای وزنه‌افتان در نمونه‌های بتنی به شمار می‌رود.

جدول (۲): نتایج آزمایش ضربه وزنه‌افتان

تعداد ضربات در ترک اولیه ( $N_1$ ) و شکست نمونه ( $N_2$ )				
مرحله	$N_1$ (۲۵°C)	$N_1$ (۵۰°C)	$N_2$ (۲۵°C)	$N_2$ (۵۰°C)
طرح ۱	۹	۱	۲۱	۳
طرح ۲	۱۳	۷	۲۴	۱۰
طرح ۳	۲۱	۹	۳۵	۱۵
طرح ۴	۲۳	۹	۳۸	۱۶
طرح ۵	۲۶	۱۳	۱۱۹	۴۲
طرح ۶	۳۰	۹	۱۶۹	۴۷



شکل (۲): نمودار انرژی ضربه در لحظه گسیختگی نمونه



شکل (۳): نمودار انرژی جذب شده ضربه نمونه بتنی

### ۳-۳- آنالیز SEM

آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به منظور بررسی ریزساختار بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری، بر روی نمونه‌های بتنی در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر و مقیاس ۵۰ میکرومتر انجام گرفت، در این راستا تصاویر

بیشترین میزان افت مقاومت مربوط به بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین می‌باشد، این نتیجه برای بتن طرح ۶ به دلیل حضور بیشتر الیاف در ترکیب بتن (۲ درصد) و ذوب شدن الیاف پلی‌اولفین در فرآیند حرارتی می‌باشد که منتج به بروز حفرات و منافذ در ترکیب بتن ژئوپلیمری و ضعف در برابر بارهای ضربه‌ای وارده گردیده است. این فرآیند در نتایج حاصل از انرژی جذب شده توسط نمونه‌های بتنی در مواجهه با بار ضربه‌ای وزنه‌افتان نیز مشهود است. حرارت بالا موجب تخریب بخش ریزساختار بتن می‌گردد و آسیب جدی به پیوندها در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) و ساختار مویینه بین لایه‌ای در ترکیب ژل‌های هیدراته شده وارد می‌کند و از این طریق موجب افت مقاومت در برابر بارهای ضربه‌ای وارده می‌گردد.

حضور الیاف پلی‌اولفین در نمونه‌های بتن ژئوپلیمری افزایش چشمگیری را در مقاومت در برابر بار ضربه‌ای وزنه‌افتان در هر دو دما (۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس) داشته است، به طوری که میزان انرژی جذب شده در نمونه بتنی حاوی ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین نسبت به نمونه بتنی طرح ۴ (بتن ژئوپلیمری ۸ درصد نانوسیلیس فاقد الیاف) در معرض بار ضربه‌ای وزنه‌افتان در دمای ۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب به میزان ۸/۵۹ و ۴/۴۳ برابر، بهبود را نشان می‌دهد، این رقم در مقایسه با نتایج حاصل از بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند به ترتیب به میزان ۱۰/۹۸ و ۱۷/۹۹ برابر جذب انرژی را نشان می‌دهد.

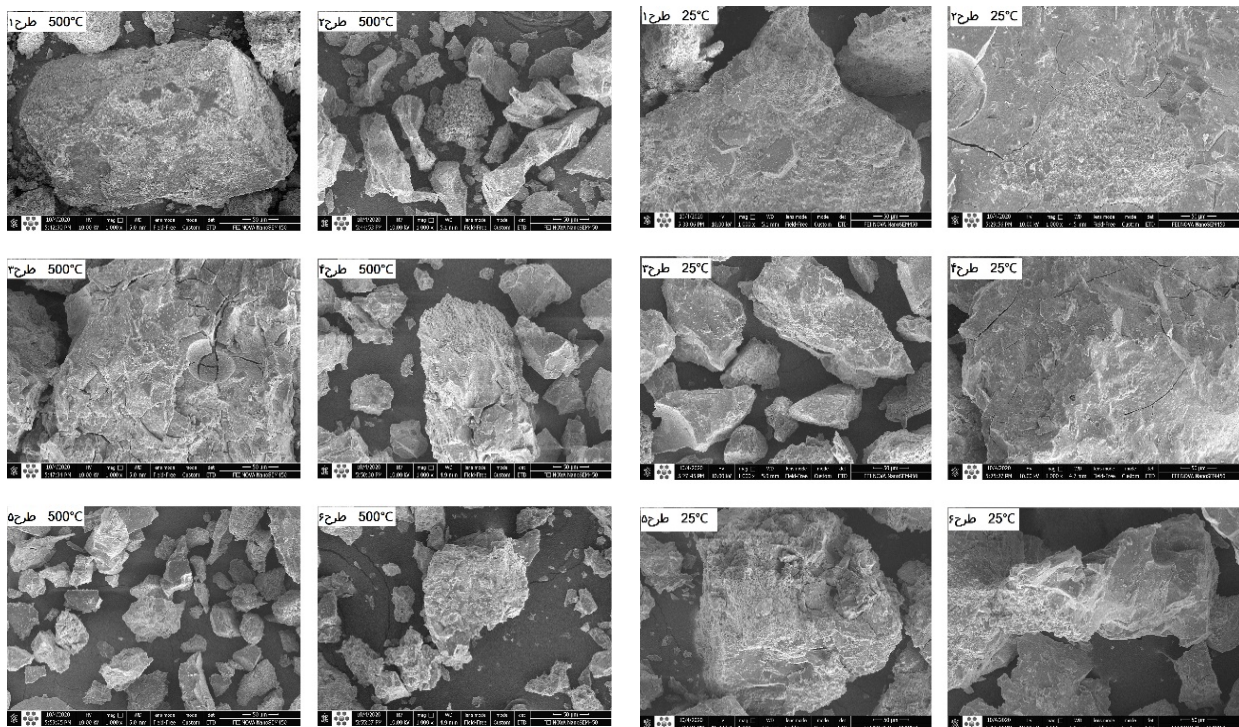
در این راستا تحقیقات ژانگ و همکاران نشان می‌دهد که الیافها با پراکنده شدن در داخل بتن می‌توانند باعث اصلاح ساختار بتن گردند [۳۴]. با توجه به نتایج آزمون مقاومت ضربه‌ای وزنه‌افتان در این پژوهش، مشاهده می‌گردد که میزان انرژی جذب شده در فرآیند شکست نمونه‌های بتنی، بتن طرح ۶ (شامل بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین) بهترین عملکرد را در دمای ۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس به خود اختصاص داده است. نتایج آنالیز XRD و SEM (در بخش‌های بعدی این مقاله) بر روی بتن حاصل از طرح‌های اختلاط در این پژوهش، پس از قرارگیری در معرض حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس، حاکی از افزایش منافذ و حفرات موجود در ریزساختار ماتریس خمیر سخت شده بتن نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای ۲۵ درجه سلسیوس می‌باشد، این امر ناشی از خروج آب تحت حرارت در ساختار بتن است، این علت و گسستگی پیوند در ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) بتن در معرض حرارت و تشکیل ساختار درختی ناشی از تضعیف ساختار ژل‌های هیدراته و عدم مشارکت ذرات در فرآیند هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون، به لحاظ ریزساختاری از علل اصلی ضعف بتن

شدن گاز دی‌اکسیدکربن، خود منجر به ترک خوردگی نمونه‌ها می‌شود. انبساط زیاد و ترک‌های گسترده باعث تغییر اندازه و شکل نمونه بتنی می‌شود. تحقیقات نشان داده است که در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس OH گروه‌های هیدروکسیل<sup>۱</sup> تبخیر می‌شود، OH در سطح و لبه‌های هر مسیلی (منظور توده‌های کروی هستند که قسمت درونی آن‌ها هیدروکربنی است) از ژئوپلیمری است. در این مرحله OH گروه هیدروکسیل به دی‌هیدروکسیل و دی‌هیدروکسیلاسیون<sup>۲</sup> تبدیل می‌شود [۳۹]. با شروع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون ساختار آلومینوسیلیکات در حال تغییر به کربنات کلسیم است، همچنین این ساختار به حالت ساختارهای بلورین یا نیم کریستالی ظاهر می‌شود. با افزایش ساختارهای بلورین، میکروترک‌ها و حفرات گسترش پیدا می‌کنند. افزایش بیشتر حرارت باعث تخریب و تشکیل کانی‌های جدید کربناتی می‌شود. همچنین با کاهش ساختار بلوری، افزایش حفره‌ها و ترک‌ها بر روی ساختار ژئوپلیمری دیده می‌شود. در مجموع دی‌هیدراسیون بین دمای ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس و دی‌هیدروکسیلاسیون در حدود دمای ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. از طرفی حرارت باعث نابودی ریزساختار ژل‌های C-S-H و C-A-S-H در ساختار بتن ژئوپلیمری می‌گردد، اعمال حرارت زیاد، ساختار آلومینوسیلیکاتی آمورف ژئوپلیمری را به ساختار سرامیک مانند تبدیل کرده است. در دمای فراتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس به علت خروج آب از ساختارهای ژئوپلیمری و شروع فرآیند هیدراتاسیون، بر اثر خشک شدن، نمونه دچار انقباض شده و ترک ایجاد می‌شود. در این راستا بر اساس مطالعه سایر محققین، هنگامی که فشار بخار به حداکثر خود می‌رسد، ساختار متراکم ژئوپلیمری با نفوذپذیری کم، قادر به کنترل تنش‌های حرارتی نبوده و این امر موجب بروز ترک‌های حرارتی بر روی سطح نمونه به‌علت انقباض می‌شود، در ژئوپلیمری به این موضوع پدیده "اثر بخار" می‌گویند [۴۰]. همچنین تبخیر آب از ساختار ژئوپلیمری همراه با افت وزن است که می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های حرارتی به‌علت انقباض باشد. در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، الیاف به‌طور کامل می‌سوزد و جای خالی آن تبدیل به حفره و منافذ می‌گردد که این امر از سمتی باعث کاهش خصوصیات مکانیکی بتن می‌گردد، ولی از سمت دیگر وجود این منافذ و حفره‌ها مسیر راه خروجی برای گازها و بخار آب که در دمای بالا درون بتن شکل می‌گیرند را میسر می‌سازد و از ترکیدن و متلاشی شدن بتن در دمای بالا جلوگیری می‌کند.

نمونه‌های بتنی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در شکل (۴) و تصاویر نمونه‌های بتنی در معرض حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۵) ارائه گردیده است. بر اساس تصاویر SEM مشاهده می‌گردد که بیشترین حجم حفرات، منافذ و ساختار غیرهمگن متعلق به بتن طرح ۱ شامل بتن معمولی (حاوی سیمان پرتلند) می‌باشد، همچنین ساختار درختی و کریستال‌های کوچک هیدراته نشده (اغلب نواحی با رنگ سفید) در این طرح بیشتر از سایر طرح‌ها به چشم می‌خورد که نشان از مشارکت پایین ذرات سیمانی در فرآیند شیمیایی هیدراتاسیون می‌باشد. در بتن ژئوپلیمری، با افزایش مصرف نانوسیلیس در طرح‌ها، شاهد تراکم و انسجام بیشتر در ترکیب ملات ژئوپلیمری و کاهش در میزان حجم حفرات و منافذ می‌باشیم، این امر به‌دلیل توسعه فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و تشکیل ژل‌های هیدراته بیشتر (شامل نواحی تیره رنگ)، از قبیل آلومینوسولفات کلسیم هیدراته، آلومینوسولفات سدیم هیدراته و سیلیکات کلسیم هیدراته در ترکیب ملات ژئوپلیمری است که موجب همگنی، اتصال سطوح شکست و تقویت نواحی انتقال بین‌سطحی و بین‌لایه‌ای در ماتریس سیمان ژئوپلیمری شده است. تجزیه و تحلیل SEM نشان می‌دهد که ذرات نانو فضاهای خالی را در ساختار بتن پر می‌کند و منجر به ایجاد یکنواختی، خلأ کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده می‌شود [۳۵]. همچنین در واکنش پوزولانی با تبدیل CH به C-S-H، ریزساختارها را در بتن متراکم کرده و ساختار بتن را همگن می‌کند [۳۶]. در نمونه‌های بتنی حاوی نانوسیلیس، ریزترک‌های بسیار کمتری مشاهده می‌گردد که نانوسیلیس در این حالت به‌عنوان ماده‌ای پرکننده عمل می‌کند تا فضاهای داخل اسکلت ریزساختار سخت‌شده خمیر ژئوپلیمری را پر کند و باعث افزایش فشردگی آن شود [۳۷ و ۳۸].

حضور برخی از ریز ترک‌های موجود در بتن ژئوپلیمری را می‌توان به انقباض حاصل از خشک شدن ساختار، ناشی از خروج آب از منافذ موئینه بین لایه‌ای در ژل‌های هیدراته نسبت داد، البته در این راستا ترک‌های به‌وجود آمده به‌هنگام ضربات وارده به‌منظور شکستن در نمونه‌برداری بتن نباید نادیده گرفته شود. حضور الیاف اگر چه مسیر ترک‌ها را تغییر می‌دهد و یا جلوی خیلی از ترک‌ها را می‌گیرد، ولی عدم ترکیب شیمیایی آن با مواد موجود در بتن ژئوپلیمری سبب کاهش مقاومت می‌گردد. در تصاویر مشاهده می‌گردد که در شرایط دمایی ۵۰۰ درجه سلسیوس، ریزساختار ژئوپلیمرها دچار تغییر و تخریب شده‌اند که نتیجه این امر ایجاد ساختار کریستالی است. همچنین در دمای زیاد ساختار ژئوپلیمری دچار ترک‌های سطحی و داخلی وسیعی شده‌اند، علت آن به تجزیه کلسیت و آزاد شدن دی‌اکسیدکربن است که آزاد

<sup>1</sup> Dihydration<sup>2</sup> Dehydroxylation



شکل (۴): تصاویر SEM بتن در ۲۵ درجه سلسیوس

شکل (۵): تصاویر SEM بتن در ۵۰۰ درجه سلسیوس

### ۴-۳- آنالیز XRD

در این پژوهش، آنالیز طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) به منظور مطالعه و آنالیز ساختار کریستالی و اندازه‌گیری ذرات و دانه‌های تشکیل دهنده در ریزساختار بتن مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا نمونه‌های بتنی برگرفته از طرح ۱ (بتن معمولی)، طرح ۲ (بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس) و طرح ۴ (بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانوسیلیس) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه و در دو رده دمایی ۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس، پس از خرد و آسیاب‌شدن در داخل دستگاه XRD با مدل Philips PW1730 و با شدت تابش ( $K\alpha \lambda = 1.54060 \text{ \AA} - \text{Cu}$ ) قرار داده شدند و نمودار پراش کریستال‌های بتن پیرو شکل (۶) تهیه گردید. تجزیه و تحلیل XRD بر روی نمونه‌های بتنی در این پژوهش نشان می‌دهد که اکثریت قله‌های با ارتفاع بالای ۱۰۰۰ موجود در گراف بتن ژئوپلیمری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در ناحیه با زوایای ۲۰ بین ۲۶ الی ۳۰ درجه اتفاق افتاده است اما برای بتن معمولی ناحیه قله‌ها بزرگ‌تر بوده و در زوایای ۲۰ بین ۱۵ الی ۳۵ درجه و همچنین ۶۰ درجه شاهد ظهور قله‌ها می‌باشیم که این موضوع می‌تواند به دلیل نحوه آرایش و تفاوت در ساختار اتمی نمونه‌های بتنی باشد، بنابراین با بررسی زاویه شکل‌گیری قله‌ها و شدت نسبی آن‌ها می‌توان نوع مواد و فازهای قله‌ای در XRD را شناسایی کرد. تحقیقات نشان داده است که قله قوی در ناحیه ۱۸۰۰ تا  $1900 \text{ cm}^{-1}$  به عنوان قله مشخص و

اثرانگشت ژئوپلیمرها<sup>۱</sup> (بر پایه سرباره کوره‌آهنگدازی) شناخته می‌شود که به‌طور عمده در زاویه ۲۶ تا ۲۹ درجه اتفاق می‌افتد [۴۱] و قله با ارتفاع ۴۵۰۰ در بتن ژئوپلیمری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به دلیل اضافه نمودن نانوسیلیس در طرح این نوع از بتن بوده است که در موقعیت زاویه ۲۸ درجه اتفاق افتاده است. با قرارگیری در معرض حرارت، مقدار قله‌ها به ۲۱۰۰، ۱۳۵۰ و ۱۰۵۰ می‌رسد.

با قرارگیری نمونه‌ها در معرض حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس، مشاهده می‌گردد که از حجم و ارتفاع قله‌ها به شدت کاسته شده است، این موضوع نشان از تضعیف ساختار بتن در مواجهه با حرارت بالا می‌باشد. محدوده قله‌های بتن ژئوپلیمری در زوایای ۲۷، ۲۸ و ۲۹ می‌باشد و مقدار بزرگ‌ترین قله برای بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس، مقادیر ۱۳۰۰ و ۱۹۵۰ می‌باشد که با قرارگیری در معرض حرارت بالا به ۱۵۰۰، ۱۷۰۰ و ۱۳۰۰ می‌رسد. براساس طیف‌های موجود در شکل‌های XRD، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، فازهای کریستالی و شبه کریستالی (Calcium Hydroxide: C-H)، (Aluminum Phosphate: A)، (Titanium Oxide: T)، (Calcite: C) و (Dolomite: D) دیده می‌شوند و زمانی که نمونه در معرض دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت، عناصر (Carbon: C)، (Potassium Iron magnesium Aluminum Silicate: C-A-) و (Calcium Aluminium Silicate Hydrate: C-A-)

<sup>۱</sup> Major Fingerprint for the Geopolymer Matrix



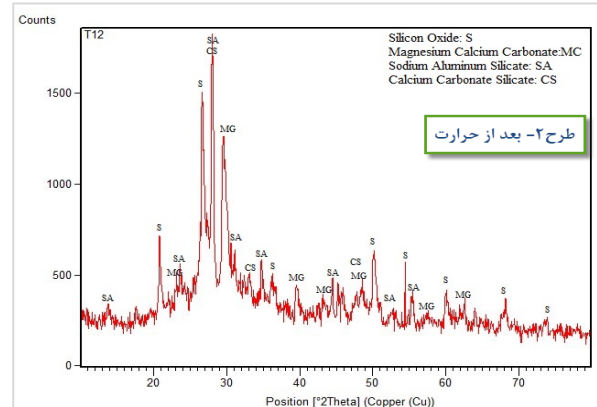
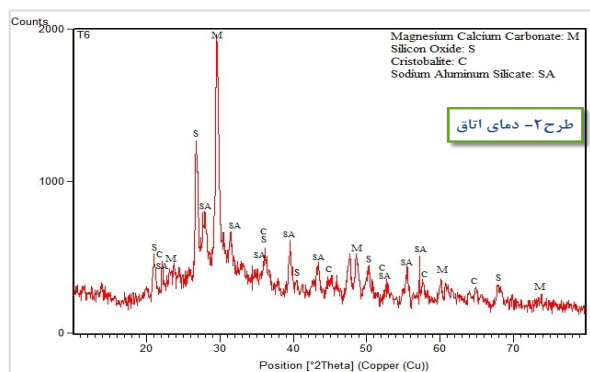
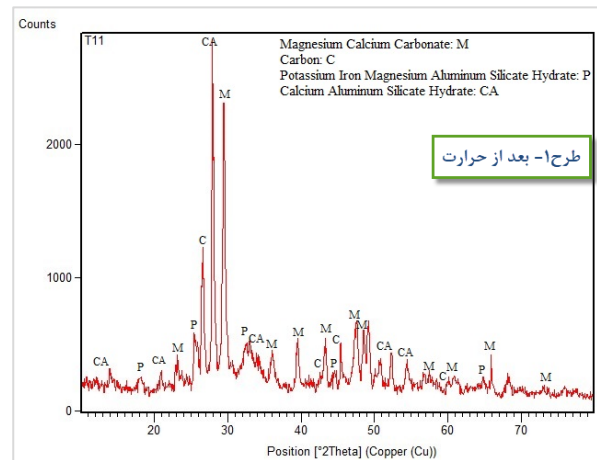
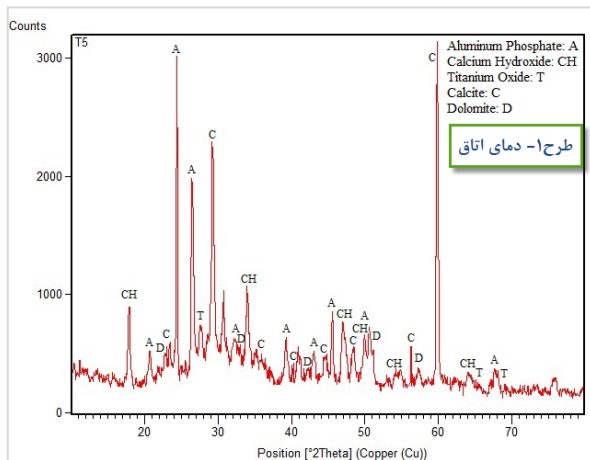
با نتایج دیگر محققان با ساخت بتن مشابه نیز مطابقت دارد [۴۲] و [۴۳].

در نمودار XRD طرح ۴، متعلق به بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانوسیلیس در دمای ۲۵ درجه، فازهای کریستالی و شبه کریستالی (Calcium Carbonate: C)، (Bismuth Oxide: B) (Phosphate Hydroxide: P)، (Silicon Oxide: S)، (Pyroxene: M) و (Aluminum Phosphate: A) دیده می‌شود و زمانی که این نمونه در معرض دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد عناصری مانند (Calcite: C)، (Silicon Oxide: S) و (Sodium Oxide: S) Calcium Aluminium Carbonate Silicate: SC) دیده می‌شود [۴۵-۴۷].

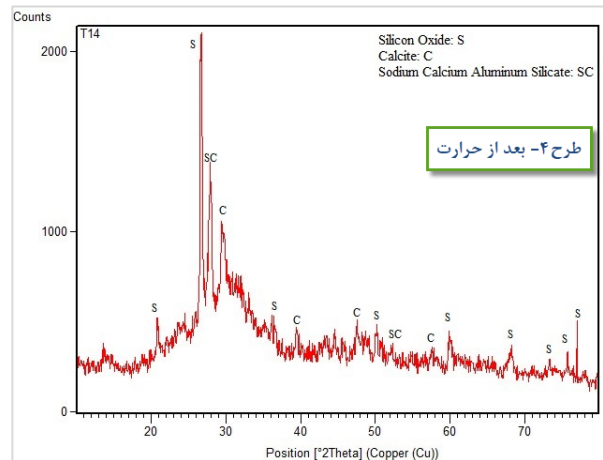
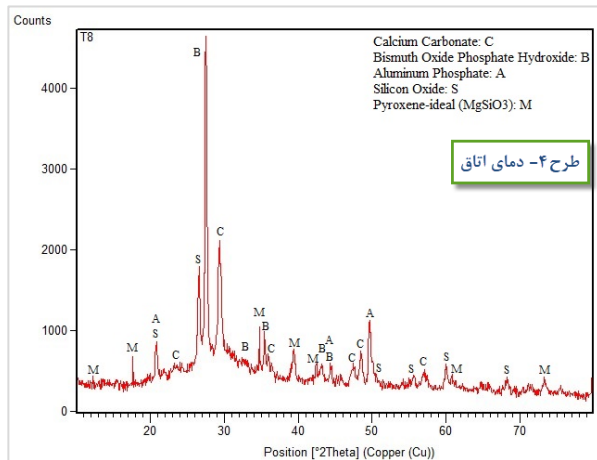
تأثیر حرارت بالا در نتایج حاصل از طیف‌های XRD مشهود است، کاهش تعداد و ارتفاع قله‌های حاصل از حضور عناصر در طیف‌های بتن در معرض حرارت نسبت به طیف‌های بتن قبل از اعمال حرارت مبین این موضوع است. از طرفی افزودن ذرات نانوسیلیس به ترکیب بتن ژئوپلیمری نتایج خوبی را در راستای تحلیل XRD بتن در دمای اتاق و در معرض حرارت بالا از خود نشان داده است.

(S-H) دیده می‌شوند. در دمای بالا، ژل CH دیگر تبدیل به کلسیم کربنات‌های مانند Calcite نمی‌شود و همان‌طور که از نمودار مشخص است در دمای بالا CH ناپدید شده و در واقع به Carbon و C-A تبدیل شده است که این موضوع علت اصلی ضعف بتن در دمای بالا می‌باشد [۴۲ و ۴۳].

قله‌های موجود در محدوده زوایای  $(\Theta)$  برابر ۲۵، ۲۷، ۲۹ و ۶۰ درجه، قله‌هایی با ارتفاع ۳۰۰۰، ۲۰۰۰، ۲۲۰۰ و  $3000 \text{ cm}^{-1}$  ساخته‌اند و بعد از قرار گرفتن در معرض حرارت بالا، قله‌ها در زاویه ۲۷، ۲۸ و ۲۹ و ارتفاع ۱۲۵۰، ۲۸۰۰ و  $2300 \text{ cm}^{-1}$  به وجود آمده‌اند. در نمودار XRD طرح ۲ حاوی بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، فازهای کریستالی و شبه کریستالی (Magnesium Calcium Carbonate: M)، (Silicon Oxide: S)، (Cristobalite: C) و (Sodium Aluminium Silicate: SA) دیده می‌شود و زمانی که این نمونه بتنی در معرض دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد، عناصری شامل (Magnesium Calcium Carbonate: MC)، (Silicon Oxide: S)، (Sodium Aluminium Silicate: SA) و (Calcium Carbonate Silicate: CS) در ترکیب دیده می‌شوند. این مطالب



شکل (۶): طیف XRD بتن در ۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس



ادامه شکل (۶): طیف XRD بتن در ۲۵ و ۵۰۰ درجه سلسیوس

### ۳-۵- آنالیز XRF

نتایج حاصل از انجام طیفسنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) به منظور تعیین نوع و میزان عناصر موجود در ترکیب بتن، در سن ۷ روز عمل‌آوری و دمای ۲۵ درجه سلسیوس در جدول (۳) نشان داده شده است.

نتایج این بخش حاکی از این موضوع است که عناصر سیلیس، اکسید آلومینیوم، اکسید کلسیم و اکسید سدیم به عنوان چهار عنصر اصلی با بیشترین میزان مشارکت در ترکیبات بتن ژئوپلیمری حضور دارند. در بتن ژئوپلیمری طرح ۲ نسبت به بتن معمولی، میزان  $CaO$  و  $SiO_2$  هر دو به اندازه ۳۸ درصد کاهش یافته است و میزان  $MgO$  و  $Na_2O$  به اندازه چشمگیری افزایش یافته است. با اضافه شدن ۸ درصد نانوسیلیس در ترکیب بتن ژئوپلیمری، مقدار  $SiO_2$  به مقدار ۸۵ درصد افزایش یافته است. روند افزایش مصرف نانوذرات سیلیس در طرح‌های بتن ژئوپلیمری در نتایج حاصل از آنالیز XRF در جدول (۳) مشهود است.

جدول (۳): نتایج آنالیز XRF

ترکیب شیمیایی	مقادیر ماده در هر طرح (%)					
	طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳	طرح ۴	طرح ۵	طرح ۶
$SiO_2$	۲۷/۱۲۲	۱۹/۵۷۴	۲۲/۰۲۶	۲۶/۳۳۱	۳۷/۰۷۶	۳۶/۸۳۴
$Al_2O_3$	۵/۶۳۹۵	۸/۰۷۳	۶/۷۲	۷/۰۱۳۱	۷/۱۲۹	۶/۹۱
$CaO$	۳۷/۱۶۹	۲۶/۸۱۵	۲۳/۶۰۹	۱۵/۲۵۷	۱۵/۳۱۲	۱۵/۱۸۶
$Na_2O$	۱/۱	۱۵/۱	۹/۰۱۶	۱۲/۸۷۲	۱۲/۶۴۹	۳/۰۱۹
$Fe_2O_3$	۷/۲۰۹۸	۵/۶۴	۳/۹۴	۳/۹۴	۳/۷۹	۴/۰۱۲
$MgO$	۲/۱۱۴	۵/۰۵۱	۴/۰۱۴	۳/۰۱۲۳	۳/۱۵۲	۲/۸۹۳
$K_2O$	۰/۹۱۴۴	۱/۰۱۳	۱/۰۱۵	۱/۰۵۲۶	۱/۱۲۹	۱/۱۴۷
$SO_3$	۱/۵۹۱۳	۱/۱۶۴	۱/۸۷۵	۲/۸۲۲	۱/۹۰۲	۱/۹۸۷
$TiO_2$	۰/۴۷۲	۰/۶۶۱	۱/۰۸۶	۱/۱۷۳	۰/۰۳۹	۱/۲۰۱
$P_2O_5$	۰/۱۶۳	۰/۱۷۴	۰/۱۴۴	۰/۱۳۱	۰/۱۳۹	۰/۱۵۳
$MnO$	۰/۰۹۱	۰/۲۹۵	۰/۶۵۵	۰/۶۸۴	۰/۶۴۹	۰/۷۱۹
LOI	۱۶/۴۱۴	۱۶/۰۴	۱۵/۹	۱۵/۷۱۱	۱۶/۰۳۴	۱۵/۹۳۹

در این راستا حداکثر میزان نانوذرات سیلیس در طرح‌های

اختلاط ۴، ۵ و ۶ دیده می‌شود و حداقل آن در بتن طرح ۲ مشاهده می‌گردد. حداکثر و حداقل میزان اکسید آلومینیوم موجود در ترکیب متعلق به طرح ۲ و ۱ است. حضور اکسیدهای آهن و منیزیم در محدوده ۲ الی ۷ درصد در نوسان هستند، وجود اکسیدهای پتاسیم و گوگرد در محدوده ۱ الی ۲ درصد در تمامی ترکیبات مشهود است و حضور اکسیدهای تیتانیوم، فسفر و منگنز در اغلب طرح‌ها به زیر ۱ درصد رسیده است. میزان افت حرارتی (LOI) ناشی از خروج مواد تحت حرارت، در تمامی طرح‌ها تقریباً در یک رنج و در محدوده ۱۶ درصد مشاهده می‌گردد. بر اساس نتایج XRF در جدول (۳) مشاهده می‌گردد که نمونه بتنی طرح ۱ شامل بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند دارای بیشترین میزان اکسید کلسیم (۳۷/۱۶۹٪) نسبت به سایر طرح‌های می‌باشد، درصد پایین میزان سیلیس (۱۹/۵۷۴٪) در نمونه بتنی طرح ۲ به علت عدم استفاده از نانوسیلیس در طرح مخلوط بتن ژئوپلیمر می‌باشد در حالی که این مقدار در طرح‌های ۳ و ۴ با توجه به وجود ذرات نانوسیلیس در طرح مخلوط با روند افزایش نانوسیلیس از ۴ درصد به ۸ درصد، افزایش یافته است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی، ضمن ساخت ۵ طرح مخلوط از بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی حاوی درصدهای متفاوت از نانوسیلیس و الیاف پلی‌اولفین، به ارزیابی ریزساختاری، کاهش وزن و مقاومت در برابر ضربات وزنه‌افشان در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس پرداخته شد، نتایج حاصله با نتایج حاصل از ساخت ۱ طرح مخلوط از بتن معمولی (حاوی سیمان پرتلند) مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت، اهم نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌گردد:

۱- از مهم‌ترین نیازهای طراحی ساختمان، تأمین ایمنی و پایداری ساختمان در برابر حوادث آتش سوزی است [۴۹]. در

سلسیوس در نمونه‌های بتنی تمامی طرح‌های اختلاط گردیده است، در این راستا بیشترین و کمترین میزان افت در انرژی جذب شده نمونه‌ها متعلق به طرح ۱ و طرح ۴ به ترتیب به میزان ۸۳/۳۳ و ۵۳/۳۳ درصد بوده است. در بین طرح‌های بتن ژئوپلیمری، ضعیف‌ترین طرح با ۷۳/۵۸ درصد افت انرژی جذب شده متعلق به بتن طرح ۶ (حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف) است.

۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) حاصل از نمونه‌های بتنی، نشان از بهبود و انسجام ماتریس سیمان ژئوپلیمری هم‌زمان با افزودن ذرات نانوسیلیس به ترکیب بتن را دارد، این امر به دلیل تشکیل حجم بیشتری از ژل‌های هیدراته شده در راستای افزودن ذرات نانوسیلیس و نقش چسبندگی و پرکنندگی این ذرات در ساختار بتن ژئوپلیمرسرباره‌ای است.

۷- نتایج حاصل از آنالیز SEM، XRD و XRF ضمن هماهنگی با هم، در هم‌پوشانی با نتایج حاصل از سایر آزمون‌های این پژوهش آزمایشگاهی قرار دارند.

## ۵- منابع

- [1] A. Nosrati, et al. "Portland Cement Structure and its Major Oxides and Fineness," *Smart Struct. and Syst.* vol. 22, no. 4, pp. 425-432, 2018.
- [2] de T. Pereira, D. Simoes, et al. "Comparative Analysis between Properties and Microstructures of Geopolymeric Concrete and Portland Concrete," *J. of Materials Research and Tech.* vol. 7, no. 4, pp. 606-611, 2018.
- [3] K., Neupane, D. Chalmers, and P. Kidd, "High-strength Geopolymer Concrete—Properties, Advantages and Challenges," *Advances in Materials*, vol. 7, no. 2, pp. 15-25, 2018.
- [4] P. R. Vora, and U. V. Dave, "Parametric Studies on Compressive Strength of Geopolymer Concrete," *Procedia Eng.* vol. 51, pp. 210-219, 2013.
- [5] Gh. F. Huseien, et al. "Effect of Metakaolin Replaced Granulated Blast Furnace Slag on Fresh and Early Strength Properties of Geopolymer Mortar," *Ain Shams Eng. J.* vol. 9, no. 4, pp. 1557-1566, 2018.
- [6] P. Duan, et al. "Enhancing Microstructure and Durability of Concrete from Ground Granulated Blast Furnace Slag and Metakaolin as Cement Replacement Materials," *J. of Materials Research and Tech.* vol. 2, no. 1, pp. 52-59, 2013.
- [7] K. L. Scrivener and R. J. Kirkpatrick, "Innovation in Use and Research on Cementitious

این راستا اعمال حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس به نمونه‌های بتنی در این پژوهش، موجب تضعیف ریزساختار بتن و افت عملکرد در نتایج حاصله در تمامی آزمون‌های این پژوهش، نسبت به نمونه‌های بتنی در معرض دمای ۲۵ درجه سلسیوس گردید. همچنین عملکرد بتن‌های ژئوپلیمری در این آزمون‌ها به مراتب برتر از عملکرد بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند بود.

۲- طرح ۴ حاوی بتن ژئوپلیمری (دارای ۸ درصد نانوسیلیس) بهترین عملکرد و طرح ۶ حاوی بتن ژئوپلیمری (دارای ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین)، ضعیف‌ترین عملکرد را در میزان کاهش وزن نمونه بتنی به ترتیب به میزان ۰/۶۱ و ۰/۱۲ درصد کاهش وزن، تحت دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس نسبت به ۲۵ درجه سلسیوس را داشتند. ضعف عملکرد در طرح ۶ را می‌توان به جنس و نوع الیاف مصرفی و نحوه پیوند این نوع از الیاف در ترکیب ماتریس ژئوپلیمری به خصوص در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) در ساختار بتن نسبت داد، حرارت در بتن این طرح ضمن ذوب الیاف و ایجاد فضای خالی، موجب تبخیر و خروج حجم بیشتری از آب و عناصر تبخیر شونده موجود در ترکیب بتن گردیده است.

۳- در میزان کاهش وزن نمونه‌های بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی (طرح ۱ حاوی سیمان پرتلند)، بهترین عملکرد متعلق به بتن طرح ۴ حاوی بتن ژئوپلیمری دارای ۸ درصد نانوسیلیس بود که به میزان ۱۶ درصد بهبود (کاهش وزن کمتر) در نتایج نسبت به بتن معمولی را به همراه داشت، زیرا حضور نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمری موجب تسریع در فرآیند واکنش شیمیایی (ژئوپلیمریزاسیون) و تولید حجم بیشتری از ژل‌های هیدراته شده می‌گردد، این ژل‌ها ضمن بهبود پیوندها، به خوبی حفرات و منافذ موجود در بتن را پر کرده و موجب می‌گردند تا بتن در معرض حرارت، تبخیر آب و عناصر کمتری را به همراه داشته باشد.

۴- حضور الیاف پلی‌اولفین در ترکیب بتن ژئوپلیمری نقش به‌سزایی در بهبود عملکرد مقاومت بتن در برابر بار ضربه‌ای و زنه‌افتان داشته است، به طوری که بتن طرح ۶ (بتن ژئوپلیمری حاوی ۲ درصد الیاف)، بهترین عملکرد را در جذب انرژی در برابر بار ضربه‌ای و زنه‌افتان نسبت به سایر طرح‌های بتنی داشته است، در این راستا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، بتن طرح ۶ نسبت به طرح ۴ (بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و فاقد الیاف) و طرح ۱ (بتن معمولی) به میزان ۸/۵۹ و ۱۱/۹۸ برابر بیشتر جذب انرژی داشته است و در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس این ارقام به ترتیب به میزان ۴/۴۳ و ۱۷/۹۹ برابر بیشتر جذب انرژی داشته‌اند.

۵- اعمال حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس موجب تضعیف در نتایج حاصل از آزمون ضربه‌ای و زنه‌افتان نسبت به دمای ۲۵ درجه

- [19] E. McNulty, "Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement," Department of Chemistry, The Catholic University of America, 2009.
- [20] T. Bakharev, "Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 6, pp. 1134-1147, 2006.
- [21] S. Mane and H. Jadhav, "Investigation of Geopolymer Mortar and Concrete under High Temperature," *Magnesium*, vol. 1, no. 5, pp. ?, 2012.
- [22] D. C. Comrie and W. M. Kriven, *Composite Cold Ceramic Geopolymer in a Refractory Application*, In *Advances in Ceramic Matrix Composites IX*, Proc. 2004.
- [23] Gh. F. Huseien, et al. "Effect of Metakaolin Replaced Granulated Blast Furnace Slag on Fresh and Early Strength Properties of Geopolymer Mortar," *Ain Shams Eng. J.* vol. 9, no. 4, pp. 1557-1566 2018.
- [24] M. Tajodeni, "In Vitro Evaluation of the Effect of Adding Nanosilica with Different Specific Surfaces on Physical and Mechanical Parameters of Soil-cement Aggregates," *Sharif J. of Civil Eng.* vol. 24-2, no. 1/1, pp. 13-22, 2016.
- [25] M. G.] Alberti, A. Enfedaque, and J. C. Gálvez, "Improving the Reinforcement of Polyolefin Fiber Reinforced Concrete for Infrastructure Applications," *Fibers*, vol. 3, no. 4, pp. 504-522, 2015.
- [26] Sh. Pilehvar, et al. "Physical and Mechanical Properties of Fly Ash and Slag Geopolymer Concrete Containing Different Types of Micro-encapsulated Phase Change Materials," *Construction and Building Materials*, vol. 173, pp. 28-39, 2018.
- [27] P. S. Deb, P. Nath, and P. K. Sarker, "Drying Shrinkage of Slag Blended Fly Ash Geopolymer Concrete Cured at Room Temperature," *Procedia Eng.* Vol. 125, pp. 594-600, 2015.
- [28] Ministry of Roads and Urban Development, *Theme 9 of the National Building Regulations Design and Execution of Reinforced Concrete Buildings (4 Edition)*, Tehran, Iran: Iran Development Publishing, 2013.
- [29] M. Kanéma, et al. "Spalling, Thermal, and Hydrous Behavior of Ordinary and High-strength Concrete Subjected to Elevated Temperature," *J. of Materials in Civil Eng.* Vol. 23, no. 7, pp. 921-930, 2011.
- [30] A. M. Rashad, "Metakaolin as Cementitious Material: History, Scours, Production Material," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 2, pp. 128-136, 2008.
- [8] H. Li, et al. "Microstructure of Cement Mortar with Nano-particles," *Composites Part B: Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 185-189, 2004.
- [9] S. Delavari, H. Jahanger, and M. Daneshvar, (). "Comparison the Effect of Particle Tires and Powder of Worn Tires on Compressive Strength of Concrete," 4th Int. Conf. on Struct. Eng. Tehran, Iran, 2018 (In Persian).
- [10] M. I. Ghasemi Naghibdeh, M. Naghipour, and M. Rabiee, "Experimental Study of Layered Fiber Reinforced Concrete Slabs with Variable Percentage of Fibers in Layers against Drop Weight Impact Load," *Concrete Research*, vol. 7, No. 1, pp. 23-34, 2014.
- [11] A. Sahraeimoghadam, F. Omidinasab, and A. Dalvand, "Impact Resistance of Multi-Layer Slabs Made with (HPSCC) Reinforced by Hybrid Fibers under Drop Weight Impact," *Concrete Research*, vol. 12, no. 3, pp. 73-87, 2019.
- [12] Z. Yunsheng, S. Wei, and L. Zongjin, "Composition Design and Microstructural Characterization of Calcined Kaolin-based Geopolymer Cement," *Applied Clay Sci.* vol. 47, No. 3-4, pp. 271-275, 2010.
- [13] H. Caetano, et al. "Effect of the High Temperatures on the Microstructure and Compressive Strength of High Strength Fibre Concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp. 717-736, 2019.
- [14] S. Bakhtiyari, et al. "Self-compacting Concrete Containing Different Powders at Elevated Temperatures—Mechanical Properties and Changes in the Phase Composition of the Paste," *Thermochimica acta*, vol. 514, no. 1-2, pp. 74-81, 2011.
- [15] M. Amiri and M. Aryanpoor, "The Effects of High Temperatures on Concrete Performance Based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (CSH)," *Concrete Research*, vol. 12, no. 4, pp. 69-80, 2019.
- [16] R. Siddique and D. Kaur, "Properties of Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) at Elevated Temperatures," *J. of Advanced Research*, vol. 3, no. 1, pp. 45-51, 2012.
- [17] G. W. Brindley, "Thermal Transformations of Clays and Layer Silicates," *Proc. of the Int. clay conf.* Applied Publishers Wilmette, IL, 1975.
- [18] John L., Provis, and J. SJ. Van Deventer, "Introduction to Geopolymers," *Geopolymers*. Woodhead Publishing, pp. 1-11, 2009.

- [40] S.-g. Hu, et al., "Preparation and Properties of Geopolymer-lightweight Aggregate Refractory Concrete," *J. of Central South Univ. of Tech.* vol. 16, no. 6, pp. 914-918, 2009.
- [41] J. Phair and J. Van Deventer, "Effect of the Silicate Activator pH on the Microstructural Characteristics of Waste-based Geopolymers," *Int. J. of Mineral Proc.* vol. 66, no. 1-4, pp. 121-143, 2002.
- [42] A.M. Rashad and S.R. Zeedan, "A Preliminary Study of Blended Pastes of Cement and Quartz Powder under the Effect of Elevated Temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 672-681, 2012.
- [43] M., Morsy, et al., "Behavior of Blended Cement Mortars Containing Nano-Metakaolin at Elevated Temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 900-905, 2012.
- [44] M. Morsy, et al., "Behavior of Blended Cement Mortars Containing Nano-Metakaolin at Elevated Temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 900-905, 2012.
- [45] F. Fan, et al., "Mechanical and Thermal Properties of Fly Ash Based Geopolymers," *Construction and Building Materials*, vol. 160, pp. 66-81, 2018.
- [46] D. Adak, M. Sarkar, and S. Mandal, "Structural Performance of Nano-silica Modified Fly-ash Based Geopolymer Concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 135, pp. 430-439, 2017.
- [47] D. Adak, M. Sarkar, and S. Mandal, "Effect of Nano-silica on Strength and Durability of Fly Ash based geopolymer mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 453-459, 2014.
- [48] S. M. Mustakim, et al., "Improvement in Fresh, Mechanical and Microstructural Properties of Fly Ash-blast Furnace Slag Based Geopolymer Concrete by Addition of Nano and Micro Silica," *Silicon*, vol. 14, pp. 1-14, 2020.
- [49] V. Bahrami, "Investigation of Variables Affecting on Stability of Buildings against Fire," *Passive Defense Quarterly*, vol. 12, no. 2, pp. 99-111, 2021.
- [31] S. Mehdipour, et al. "Mechanical Properties, Durability and Environmental Evaluation of Rubberized Concrete Incorporating Steel Fiber and Metakaolin at Elevated Temperatures," *J. of Cleaner Production*, vol. 254, pp. 120-126, 2020.
- [32] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, "Concrete: microstructure, properties, and materials," McGraw-Hill Education, 2014.
- [33] ACI 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete," 544 Committee Report on Fiber Reinforced Concrete, 1999.
- [34] Zhang, Zu-hua, et al. "Preparation and Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Calcined Kaolin-fly Ash Based Geopolymer," *J. of Central South University of Technology*, vol. 16, no.1, pp. 49-52, 2009.
- [35] H. Assaedi, et al. "Influence of Nano Silica Particles on Durability of Flax Fabric Reinforced Geopolymer Composites," *Materials*, vol. 12, no. 9, pp. 1459, 2019.
- [36] H. Du, S. Du, and X. Liu, "Durability Performances of Concrete with Nano-silica," *Construction and building materials*, vol. 73, pp. 705-712, 2014.
- [37] P. S. Deb, P. K. Sarker, and S. Barbhuiya, "Effects of Nano-silica on the Strength Development of Geopolymer Cured at Room Temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 675-683, 2015.
- [38] J.-Y. Shih, T.-P. Chang, and T.-C. Hsiao, "Effect of Nanosilica on Characterization of Portland Cement Composite," *Materials Sci. and Eng. A.*, vol. 424, no. 1-2, pp. 266-274, 2006.
- [39] O. A. Abdulkareem, et al., "Effects of Elevated Temperatures on the Thermal Behavior and Mechanical Performance of Fly Ash Geopolymer Paste, Mortar and Lightweight Concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 50, pp. 377-387, 2014.

# Investigation of the Impact Resistance, Microstructure and Weight Loss in Fibrous Pozzolanic Concrete Containing Fibers, Under High Temperatures

M. Mansourghanaei, M. Biklaryan\*, A. Mardookhpour

## Abstract

Today, the construction of highly critical structures (such as military and nuclear structures, hospitals and infrastructures), with high resistance to impact loads and high temperatures, is of particular importance in the field of passive defense. In this regard, the production of high-strength and nature-friendly concrete as the main material used in these types of structures plays a significant role. In this paper, the laboratory properties of the slag geopolymer concrete containing 0 to 8% nanosilica and 1 to 2% polyalphin fibers have been investigated. The concrete samples made at 90 days of curing age at 25 and 500 °C Celsius underwent weightlifting, weight loss, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) spectroscopy, and X-ray fluorescence (XRF) at 25 °C. At the age of seven days, the processing was performed on the concrete samples. The results indicate the weakening of the microstructure of concrete exposed to high temperatures. Also, the improvement of test results in the geopolymer concrete compared to ordinary concrete is evident. The best and worst performance in the weight loss test of the samples belonged to the geopolymer concrete containing 8% nanosilica and the geopolymer concrete containing 8% nanosilica and 2% fibers, by 0.061% and 0.12% weight loss of the sample, respectively. The best performance in the energy absorption of falling weight at 25 and 500 degrees Celsius belongs to the geopolymer concrete (containing 8% nanosilica and 2% fiber) at 2928.25 and 773.44 joules, respectively. The highest and lowest energy loss of concrete samples at 500 °C compared to 25 °C belong to the ordinary concrete and the geopolymer concrete (containing 8% nanosilica) by 83.33% and 53.33%, respectively.

**Key Words:** *Geopolymer Concrete, Blast Furnace Slag, Nano Silica, Polyolefin Fibers, Weight Loss*

---

\*Assistant professor, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran  
(m.biklaryan@iauc.ac.ir) -Writer-in-Charge