

## ارزیابی مقاومت ضربه‌های بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای حاوی نانوسیلیس و الیاف پلی‌الفین تحت حرارت

محمدحسین منصورقناعتی<sup>۱</sup>، مرتضی بیکلریان<sup>۲\*</sup>، علیرضا مردوخ‌پور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دکتری تخصصی عمران- سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس

<sup>۲</sup> گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس

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

دریافت: ۱۴۰۲/۲/۲۱، بازنگری: ۱۴۰۰/۵/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۲۷، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۶/۲۷

### چکیده

امروزه به‌منظور کاهش اثرات منفی محیط زیستی ناشی از به‌کارگیری سیمان در بتن، استفاده از نانو ذراتی که حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی (Aluminosilicate) باشند به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان دارای اهمیت فراوان می‌باشد. در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی مقاومت بتن ژئوپلیمری (Geopolymer Concrete) سرباره‌ای در برابر ضربه‌های چکش افتان در دمای اتاق و پس از در معرض قرار گرفتن حرارت ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در دوره عمل‌آوری ۹۰ روزه پرداخته شده است، در این راستا سه طرح مخلوط از بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای حاوی ۰ تا ۸ درصد نانوسیلیس (Nanosilica) ساخته شد و پس از انجام آزمایش مقاومت ضربه‌ای و انتخاب طرح بهینه به‌لحاظ مقاومت، به‌منظور افزایش خواص مقاومتی در طرح بهینه، دو طرح حاوی ۱ و ۲ درصد از الیاف پلی‌الفین (Polyolefin Fibers) ساخته شد و مجدد نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند، نتایج حاصل از پنج طرح مخلوط با یک طرح مخلوط از بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در ادامه جهت مقایسه و بررسی ریزساختاری بتن ژئوپلیمری و بتن کنترل از آنالیز SEM و XRD استفاده گردید. نتایج حاصله حاکی از مقاومت بالای نمونه‌های بتن ژئوپلیمر حاوی الیاف پلی‌الفین در برابر ضربات چکش افتان بود و بررسی‌های ریزساختاری در هم‌پوشانی با نتایج حاصل از ارزیابی مقاومت ضربه‌ای چکش افتان در بتن قرار داشت.

**کلیدواژه‌ها:** بتن ژئوپلیمری، سرباره کوره آهن‌گدازی، نانوسیلیس، الیاف پلی‌الفین، چکش افتان.

### ۱- مقدمه

در مجاورت با سایر اجزاء تشکیل‌دهنده بتن باشند.

تولید و بهره‌گیری از بتن ژئوپلیمری در صنعت سازه‌ای روشی مناسب برای جایگزینی با بتن معمولی حاوی سیمان است که توجه محققین را به خود جلب نموده است. اصطلاح ژئوپلیمری اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسط پروفیسور Glukhovsky در اتحاد جماهیر شوروی سابق عنوان شد و در ادامه توسط Joseph Davidovits در سال ۱۹۷۹ مورد تحقیق قرار گرفت (Diegles و همکاران، ۲۰۱۸).

در ساخت بتن ژئوپلیمری بخشی و یا تمام سیمان مصرفی حذف می‌گردد و به‌جای آن از دو ماده دیگر که یکی نقش پیش ماده را دارد و حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی با خصوصیات چسباننده است و ماده دیگر با خواص قلیافعال، نقش واکنش‌پذیری برای مواد اولیه را ایفاء می‌کند، استفاده می‌گردد. از مواد سیلیسی و یا

در دهه‌های اخیر، استفاده از مصالح نوین ساختمانی به‌منظور کاهش خطرات ناشی از عوارض زیست‌محیطی از اهمیت زیادی برخوردار بوده است. بتن یکی از رایج‌ترین مصالح پرکاربرد در صنعت ساختمان است که به‌علت وجود سیمان در خود به‌عنوان بخش اصلی، مصالحی زیان‌بار برای محیط‌زیست محسوب می‌شود (Jahangir و همکاران، ۲۰۱۸).

سیمان به‌لحاظ تولید گاز سمی دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>) و مصرف سوخت‌های فسیلی در حین تولید، همواره نگرانی‌هایی را برای متخصصین علم عمران و دوست‌داران محیط‌زیست به‌همراه داشته است، ازاین‌رو تلاش‌های فراوانی در جهت کاهش مصرف سیمان و بهره‌گیری از مصالح جایگزین به‌منظور رفع دغدغه‌های زیست‌محیطی انجام پذیرفته است. درعین حال مصالح جایگزین سیمان باید دارای ویژگی‌هایی از قبیل چسبندگی و واکنش‌پذیری

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۱۱۵۲۲۱۱۶۰۱

## ۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

در این تحقیق سرباره کوره آهنگدازی به عنوان ماده اولیه و اصلی تشکیل دهنده پیش ماده در ساخت بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای، از شرکت ذوب آهن اصفهان خریداری شده است، این ماده تحت استاندارد ASTM C989/C989M (ASTM، ۲۰۱۸) مورد مصرف در ساخت بتن ژئوپلیمری قرار گرفته است، مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی مصرفی در جدول (۱) و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول (۲) به نمایش درآمده است. تحقیقات نشان داده است که سرباره کوره آهنگدازی متشکل از سیلیکات کلسیم و آلومینات الزامات مربوط به مواد پوزولانی را برآورده می‌سازد (Ghasan و همکاران، ۲۰۱۸).

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی

ماده موجود	درصد
CaO	۳۶/۷۲
SiO <sub>2</sub>	۳۵/۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۹/۱۷
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۷/۴۵
MgO	۶/۲۴
SO <sub>3</sub>	۰/۱۲
Na <sub>2</sub> O	۱/۲۱
K <sub>2</sub> O	۰/۹۲
TiO <sub>2</sub>	۲/۴۹
MnO	۰/۱۸
L.O.I	۰/۰۲

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سرباره کوره

آهنگدازی	
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۲۴۵۰
سطح مخصوص (Cm <sup>2</sup> /gr)	۲۲۰۰
مدول الاستیسیته (Pa)	۱/۲
چگالی ظاهری (kg/m <sup>3</sup> )	۹۶۰
اندازه ذرات (μm)	۲/۱
رنگ	کرم

نانوسیلیس مصرفی در این تحقیق از نوع کلونیدی بوده که از استاندارد ASTM C1240 (ASTM C1240، ۲۰۲۰) پیروی می‌نماید، نانوسیلیس به همراه سرباره به عنوان ماده پایه تشکیل دهنده بتن ژئوپلیمری در این تحقیق شناخته می‌شوند و اثرات پوزولانی، پرکنندگی و هسته‌زایی را در ترکیب با سایر مصالح در ساختار ماتریس بتن ژئوپلیمری ایفاء می‌کنند. نانوسیلیس به دلیل اندازه کوچک می‌تواند با پر کردن خلل و فرج‌های باقی مانده در بتن،

سیلیسی آلومینوسیلیکاتی<sup>۱</sup> می‌تواند پوزولان‌هایی مانند سرباره کوره آهنگدازی، خاکستر بادی و نانوسیلیس را نام برد و از مواد قلیایی می‌تواند به محلول هیدراکسید سدیم و سیلیکات سدیم اشاره کرد.

بررسی‌های گذشته نشان داده است که بتن ژئوپلیمری دارای خصوصیات مکانیکی فراوان در قیاس با بتن معمولی می‌باشد، به نظر می‌رسد بهره‌گیری از ذرات سرباره کوره آهنگدازی و نانوسیلیس که حاوی مواد فراوان آلومینوسیلیکاتی هستند می‌تواند با توجه به ماهیت چسبندگی، پرکنندگی و هسته‌زایی خود، موجب افزایش خصوصیات مکانیکی بتن گردند، از طرفی استفاده از انواع مختلف الیاف با توجه به نقش پل‌زدگی بین اجزاء تشکیل‌دهنده بتن می‌تواند موجب جلوگیری از گسترش ترک و حفظ موضعی محدوده ترک‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای وارده گردد. مصالح حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی موجب تسریع فرایند ژئوپلیمریزاسیون<sup>۲</sup> در بتن ژئوپلیمری می‌گردند و محصول ژل‌های هیدراته از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته<sup>۳</sup>، سیلیکات آلومینیم کلسیم هیدراته<sup>۴</sup> و سیلیکات آلومینیم سدیم هیدراته<sup>۵</sup> را تولید می‌کند، این ژل‌ها نقش بسزایی در افزایش چگالی، تراکم و چسبندگی در ماتریس خمیر سیمان ژئوپلیمری ایفاء می‌کنند. آزمایش مقاومت ضربه‌ای بتن در برابر ضربه‌های وزنه افتان از جمله آزمایش‌های ضربه‌ای با سرعت کم می‌باشد، مقدار خرابی ناشی از بارهای ضربه‌ای از نوع پرتابه به عواملی از قبیل سرعت ضربه، جرم، شکل و نوع مصالح پرتابه، مشخصات مصالح و مسلح‌شدگی سازه‌های بتنی هدف بستگی دارد. حضور الیاف در بتن می‌تواند به بهبود مقاومت ضربه‌ای بتن کمک شایانی نماید. استفاده از الیاف گوناگون در بتن جهت بهبود عملکرد مکانیکی آن در برابر بارهای دینامیکی از قبیل وزنه افتان، پرتابه‌های کوچک با سرعت بالا و نیز انفجار به دهه‌ها قبل برمی‌گردد (Ghasemi Naghibdeh و همکاران، ۲۰۱۴).

نتایج آزمایش ضربه‌ای وزنه افتان نشان‌دهنده تأثیر بسیار زیاد الیاف فولادی بر روی مقاومت ضربه‌ای و جذب انرژی نمونه‌های بتنی بود، در صورتی که الیاف پلاستیکی تأثیر ناچیزی بر روی مقاومت ضربه‌ای دارد (Sahraeimoghdam و همکاران، ۲۰۱۹). وجود الیاف در بتن موجب افزایش میزان جذب انرژی در بتن می‌گردد و توسعه ترک‌ها را نیز به تأخیر می‌اندازد. همچنین نتایج تحقیقات نشان می‌دهد حتی استفاده به میزان کم از الیاف، مقاومت ضربه‌ای و اختلاف بین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی را نسبت به بتن معمولی افزایش می‌دهد (Sahraeimoghdam و همکاران، ۲۰۱۹).

4. Ettringite Gel (C-A-S-H)  
5. Gel N-A-S-H

1. Aluminosilicate  
2. Geopolmerization  
3. Tobermorite Gel (C-S-H)

دانشمندان قرار گرفته است، صنایع مرتبط با بتن با الیاف مبتنی بر پلی الفین بیشترین کاربرد را دارند (Marcos و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۱- الیاف پلی الفین

#### جدول ۵- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی الفین

۹۲۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۵۰۰	مقاومت کششی ( $\text{N/mm}^2$ )
۳۰	طول (mm)
۰/۸	قطر (mm)
مواج	شکل سطحی
۳۷/۵	نسبت منظر

منحنی دانه بندی سنگدانه های مصرفی در محدوده استاندارد ASTM C33 (ASTM C33، ۲۰۱۸) می باشد. سنگدانه ها، تأمین شده از کارخانه های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده و به لحاظ حذف ناخالصی های آلی، پاک شده اند، برخی از خصوصیات ریزدانه و درشت دانه مصرفی در این تحقیق براساس جدول (۶) تعیین گردیده است. سیمان مصرفی برای تهیه بتن کنترل در این تحقیق از نوع پرتلند تیپ دو که تحت استاندارد (ISIRI) ISIRI 389، 389 (۱۳۷۸) تولید و از کارخانه دیلمان تهیه گردیده است، مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند مصرفی در جدول (۷) و برخی از مشخصات مکانیکی آن در جدول (۸) به نمایش درآمده است.

#### جدول ۶- مشخصات سنگدانه مصرفی

ماسه	شن	مصالح دانه ای بتن
۷۵ (nm)	۴/ ۷۵ (mm)	حداقل قطر
۴/۷۵	۱۹	حداکثر قطر (mm)
۲/۸۵	۲/۸۵	مدول نرمی (mm)
۲۶۵۰	۲۷۵۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۲/۹	۲/۲	درصد جذب آب

باعث بهبود مقاومت آن شود و به عنوان یک مکمل در ساخت بتن به کار رود (Delavari و همکاران، ۲۰۱۸).

مشخصات شیمیایی نانوسیلیس مصرفی مطابق جدول (۳) و مشخصات فیزیکی این ماده در جدول (۴) ارائه گردیده است، در این راستا اندازه ذرات نانوسیلیس می تواند قسمت طولی نانو ذرات را شامل گردد در حالی که این ذرات می توانند دارای قطری کم تر از وجه نازک تر خود برخوردار باشند. در تهیه بتن حاوی نانوسیلیس ضروری است تا مصرف نانوسیلیس در محدوده مشخصی انجام گیرد، زیرا استفاده بیش از حد آن در ترکیب بتن، با توجه به ریزی ذرات می تواند چسبندگی بیش از حد این ذرات با یکدیگر و در نتیجه پدیده کلوخه شدن را به همراه داشته باشد که این موضوع با توجه به عدم مشارکت ذرات نانوسیلیس در فرایند ژئوپلیمریزاسیون می تواند موجب افت خواص مکانیکی در بتن گردد. با ریزتر شدن اندازه نانو ذرات در مخلوط بتن، به جای این که آن ها با آب و سایر مصالح واکنش دهند به همدیگر می چسبند و تشکیل کلوخه های نانومتری می دهند در نتیجه در مخلوط نمی توانند پراکنده شوند و در مرحله واکنش پذیری مشارکت نمایند (Tajodeni، ۲۰۱۶).

#### جدول ۳- مشخصات شیمیایی نانوسیلیس

نام مصالح	میزان مصالح
SiO <sub>2</sub>	>/۹۹
Fe	ppm < ۲۰
Na	ppm < ۵۰
Ti	ppm < ۱۲۰

#### جدول ۴- مشخصات فیزیکی نانوسیلیس

رنگ	سفید
حالت	جامد
وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	۲۴۰۰
قطر ذرات (nm)	۷ تا ۱۴
اندازه ذرات (nm)	۲۰ تا ۶۰
خلوص	٪ ۹۹/۸

در این تحقیق به منظور بالا بردن میزان مقاومت ضربه ای بتن ژئوپلیمر سرباره ای، از الیاف پلی الفین تحت استاندارد ASTM D7508/D7508M (ASTM D7508/D7508M-20، ۲۰۲۰) استفاده گردید، نمونه ای از این نوع الیاف در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است، برخی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی این نوع از الیاف در جدول (۵) نشان داده شده است. مطالعات نشان داده است که استفاده از الیاف ماکروپلاستیک<sup>۶</sup> برای تقویت بتن به جای استفاده از مش فلزی و الیاف فلزی مورد توجه

محلول قلیا فعال مصرفی در این تحقیق تهیه شده از شرکت مرک<sup>۸</sup> آلمان می باشد و ترکیبی از محلول سیلیکات سدیم و هیدراکسید سدیم با نسبت وزنی ۲/۵ می باشد که دارای چگالی ترکیبی برابر  $1483 \text{ kg/m}^3$  است، برخی از مشخصات محلول قلیا فعال در جدول (۱۰) نشان داده شده است.

جدول ۱۰- مشخصات محلول قلیا فعال

سیلیکات سدیم	هیدراکسید سدیم	نوع محلول
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	$\text{NaOH}$	فرمول مولکولی
سفید	سفید	رنگ
۱۲	۱۲	مولاریته <sup>۹</sup> ( $\text{mol/m}^3$ )
۲۴۰۰	۲۱۳۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
-	۳/۳	مدول الاستیسیته (p)
۱۰۸۸	۳۱۸	دمای ذوب (C)
۱۲۲/۰۶	۳۹/۹۹	جرم مولی ( $\text{gr/mol}$ )

## ۲-۲- طرح مخلوط

استاندارد مجزایی برای تنظیم طرح مخلوط بتن ژئوپلیمری وجود ندارد، لذا پیرو مطالعات انجام پذیرفته بر روی سایر تحقیقات با موضوع تولید بتن ژئوپلیمری، در تحقیق پیش رو به منظور بررسی مقاومت فشاری و مقاومت ضربه ای بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر سرباره ای در دمای اتاق و تحت حرارت بالا از ۶ طرح مخلوط با نسبت های مختلف مصالح مطابق با جدول (۱۱) ساخته شده بر اساس توصیه کمیته ACI 211.1-91 (ACI 211.1-91, 2002) استفاده گردید.

در راستای طرح مخلوط تهیه شده، تعداد ۵۴ عدد آزمون بتنی برای انجام آزمایش ضربه (هر آزمون میانگین نتایج ۳ نمونه بتنی) و تعداد ۲۴ آزمون بتنی برای آزمایش مقاومت فشاری (هر آزمون میانگین نتایج ۴ نمونه بتنی) ساخته شد که در سن عمل آوری ۹۰ روزه مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفتند. لازم به ذکر می باشد که برای انجام آنالیز SEM و XRD نیز از آزمون های خرد شده استفاده گردید.

در جدول (۱۱)، طرح ۱ شامل بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند بوده و طرح های ۲ تا ۴ شامل بتن ژئوپلیمری به ترتیب حاوی ۱۰۰٪، ۹۶٪ و ۹۲٪ سرباره کوره آهنگدازی و ۰٪، ۴٪ و ۸٪ نانو سیلیس می باشند، طرح ۴ از بین طرح های ۲، ۳ و ۴ به عنوان طرح بهینه پس از بررسی نتایج اولیه آزمون مقاومت فشاری و آزمون ضربه انتخاب گردید و در ادامه با افزودن ۱ درصد و ۲ درصد الیاف پلی الفین به این طرح، طرح های ۵ و ۶ تهیه گردیدند تا نقش الیاف بر میزان مقاومت ضربه ای نمونه های بتنی مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ۷- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند

ماده موجود	درصد
Cl	Max 0/003
$\text{SiO}_2$	۲۱-۲۲
$\text{Al}_2\text{O}_3$	۴/۸-۴/۵
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	۳/۸-۳/۵
Cao	-
MgO	Max ۱/۴۵
$\text{SO}_3$	۲-۲/۳
$\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$	MAX 0.6
LR	MAX ۰/۷
$\text{C}_3\text{A}$	۵/۵-۷/۵
L.O.I	MAX ۱/۵

جدول ۸- مشخصات فیزیکی سیمان

چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۲۳۵۰
سطح مخصوص ( $\text{Cm}^2/\text{gr}$ )	۳۲۰۰-۳۰۰۰
گیرش اولیه (min)	$115 <$
گیرش ثانویه (min)	$190 <$

آب مصرفی برای تولید بتن کنترل و تهیه محلول قلیا فعال مصرفی در بتن ژئوپلیمری، از آب شرب شهر لاهیجان می باشد، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ تا ۷/۵ و دارای چگالی برابر با  $1000 \text{ kg/m}^3$  است. به منظور جبران ضعف کارایی و حفظ روانی ملات بتن ژئوپلیمر سرباره ای از ابر روان کننده نسل چهارم بر پایه پلی کربوکسیلات<sup>۷</sup> نرمال استفاده گردیده است، برخی از مشخصات ابر روان کننده پلی کربوکسیلات نرمال به شرح جدول (۹) ارائه شده است. مطالعات انجام شده بر روی تحقیقات نشان داده است که بتن ژئوپلیمری تازه به علت لزجت بالا موجود در محلول قلیا فعال، در مقایسه با بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی تازه، کارایی ضعیف تری دارد، جهت حل این مشکل یک فوق روان کننده مبتنی بر پلی کربوکسیلات اغلب به علت پیوندهای قوی مابین کلسیم با بار مثبت و پلی کربوکسیلات با بار منفی، بهترین گزینه است (Pilehvar و همکاران، ۲۰۱۸).

جدول ۹- مشخصات ابر روان کننده

فرمول شیمیایی	پلی کربوکسیلات نرمال
حالت فیزیکی	مایع
رنگ	قهوه ای روشن
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۱۱۰۰
استاندارد مصرف	ASTM C494
pH	حدود ۷
میزان یون کلر	ندارد
نقطه اشتعال	ندارد

9. Molarity

7. Polycarboxylate  
8. Merck

ادامه قالب برداری انجام گرفت و نمونه‌های بتن کنترل در داخل آب با دمای اتاق تا زمان انجام آزمایش نگهداری و عمل‌آوری گردید، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری به منظور افزایش استحکام و خواص مکانیکی، به مدت ۴۸ ساعت تحت حرارت ۶۰ درجه سلسیوس داخل گرم‌کن قرار داده شد، سپس این نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش در دمای اتاق نگهداری شدند. در ادامه ساخت نمونه‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده به منظور انجام آزمایش‌های مقاومت ضربه‌ای وزنه افتان دیسکی به اندازه‌های ۱۵×۶/۳۶ سانتی‌متری برش داده شدند.

مطالعات انجام پذیرفته بر روی سایر تحقیقات نشان داده است که مخلوط‌های بتن ژئوپلیمری عمل‌آوری شده تحت حرارت ۶۰ درجه سلسیوس، توانسته‌اند پس از سه روز بیش از ۷۵٪ از مقاومت ۲۸ روزه بین معادل ۶۰ الی ۸۵ مگاپاسکال را کسب نمایند (Ahmad و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین Pazhani و Prasanna (۲۰۱۵) در یک تحقیق آزمایشگاهی بر روی خواص مقاومتی و دوام بتن ژئوپلیمری دریافتند که مقاومت بتن ژئوپلیمری با افزایش دمای عمل‌آوری افزایش می‌یابد.

در این پژوهش برای انجام آزمایش‌ها در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، از روش استاندارد ISO834 بر پایه مقاومت حرارتی استفاده گردید، در این استاندارد میزان دمای اعمال شده به نمونه‌های بتنی تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس و مدت زمان اعمال حرارت یک ساعت توصیه شده است. در این راستا قبل از انجام آزمایش حرارتی، ابتدا نمونه‌های بتنی مطابق با استاندارد ذکر شده به مدت یک ساعت در کوره تحت حرارت تعیین شده قرار گرفتند، سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا از بروز آثار مخرب ناشی از شک دمایی جلوگیری گردد، در ادامه نمونه‌ها جهت رسیدن به دمای اتاق، به مدت ۲۴ ساعت قبل از انجام آزمایش در دمای اتاق نگهداری شدند.

در طرح‌های مخلوط این پژوهش، درصد‌های تعیین شده برای مصالح مصرفی با توجه به استانداردها (طرح مخلوط و مصالح مصرفی) و مطالعه و بررسی تحقیقات آزمایشگاهی سایر محققین پیرامون موضوع این مقاله انتخاب گردیده است. در این راستا نسبت آب به سیمان در بتن کنترل و محلول قلیا فعال به سرباره در بتن ژئوپلیمری به طور ثابت ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است و مقادیر سیمان و یا سرباره (با درصد جایگزین نانوسیلیس)، آب و یا محلول قلیا فعال، شن و ابر روان کننده ثابت در نظر گرفته شده‌اند و با تعیین وزن الیاف (با توجه به درصد چگالی خود الیاف)، مقدار ماسه به عنوان متغیر محاسبه و تعیین گردید.

### ۲-۳- ساخت مخلوط، تهیه و عمل‌آوری نمونه‌ها

مصالح مصرفی در ابتدا براساس مقادیر تعیین شده در جدول طرح مخلوط (۱۱) توزین گردیدند و در ادامه، برای ساخت هر یک از طرح‌های مخلوط مصالح خشک طی چند مرحله به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال چرخش اضافه شدند و فرایند ترکیب مصالح خشک به مدت دو دقیقه به طول انجامید، سپس آب، ابر روان کننده و محلول قلیا فعال (به فراخور نیاز هر طرح) به ترکیب اضافه شدند و دو دقیقه دیگر فرایند اختلاط به طول انجامید، در حین ترکیب مصالح می‌بایست دقت داشت تا مصالح به قسمت‌های خشک داخل دیگ دستگاه مخلوط‌کن نچسبند و در صورت مشاهده، مشکل به نحوی برطرف گردد.

پس از اتمام مرحله ترکیب، ملات بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری در داخل قالب‌های روغن کاری شده از قبل با ابعاد مکعب ۱۰×۱۰×۱۰ و استوانه ۱۵×۳۰ سانتی‌متر، در سه مرحله ریخته شد و در هر مرحله عمل تراکم به وسیله ۲۵ ضربه میله انجام گرفت، پس از اتمام بتن‌ریزی در قالب، نمونه‌های بتنی به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق (۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس) نگهداری شدند، در

جدول ۱۱- مشخصات طرح مخلوط بتن (براساس وزن)

شماره طرح	نام طرح	نوع بتن	kg/m <sup>3</sup>						
			سیمان	آب	محلول قلیا فعال	سرباره	نانوسیلیس	الیاف	
۱	OPC	پرتلند	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰
۲	GPN0P0	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۵۰	۰	۰	۰
۳	GPN4P0	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۱۸	۰	۰
۴	GPN8P0	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۱۴	۳۶	۰	۰
۵	GPN8P1	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۳۶	۹/۲	۰
۶	GPN8P2	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۳۶	۱۸/۴	۰

دمای اتاق و سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام پذیرفت، در این راستا قبل از انجام آزمایش، آزمونه‌های بتنی کاملاً خشک شدند و در دستگاه جک بتن شکن به نحوی قرار گرفتند که دو سطح مقابلی

### ۲-۴- روش‌های آزمایش و استانداردها

آزمون تعیین مقاومت فشاری بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری تحت استاندارد BS12390-3 (BS، ۲۰۰۹) بر روی آزمونه‌ها در

گردید، در ادامه انرژی شکست برای بروز اولین ترک ( $E_1$ ) و شکست ( $E_2$ ) نمونه‌های بتنی برحسب ژول از طریق رابطه (۱) محاسبه گردید (ACI, ۱۹۹۹). در این رابطه،  $N$  تعداد ضربات برای ایجاد ترک اولیه،  $W$  وزن وزنه و  $H$  ارتفاع سقوط وزنه را نشان می‌دهد.

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

در ادامه تحقیق آزمایشگاهی پیش‌رو، در راستای بررسی‌های ریزساختاری، آنالیز XRD و SEM بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت، در این مرحله به منظور بررسی خصوصیات کمی و کیفی و ساختار کریستالین بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری از آنالیز طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD)، همچنین به منظور مشاهده اثرات عناصر تشکیل‌دهنده در بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری بر ریزساختار این بتن‌ها از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن عمل‌آوری ۹۰ روز قبل و بعد از حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس استفاده گردید.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

#### ۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتنی حاصل از طرح‌های مخلوط تهیه‌شده، در دمای اتاق در سن ۹۰ روزه در نمودار شکل (۳) به نمایش درآمده است. براساس این نتایج مشاهده می‌گردد که افزودن نانوسیلیس تا ۸ درصد در طرح ۴ (GPN8P0) بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری را به میزان ۸۲/۹۶ مگاپاسکال کسب نموده است، اما افزودن الیاف به بتن ژئوپلیمری روند بهبود مقاومت فشاری را متوقف و حتی سیر نزولی را سپری نموده است. مطالعه تحقیقات نشان داده است که افزودن الیاف فولادی و پلاستیکی نمی‌تواند تأثیر زیادی بر روی مقاومت فشاری بتن داشته باشد (Sahraeimoghdam و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین در تحقیق دیگر گزارش شده است که افزایش مقاومت فشاری بتن با افزایش الیاف قابل‌ملاحظه نمی‌باشد (Rakhshani Mehr و همکاران، ۲۰۱۵).

حضور ذرات نانوسیلیس موجب تسریع در فرایند شیمیایی ژئوپلیمریزاسیون می‌گردد و محصول حاصله که حجم بالایی از ژل‌های هیدراته هستند با پر کردن خلل و فرج موجود در ساختار بتن سبب افزایش استحکام در بتن ژئوپلیمری می‌گردند، از طرفی ضعف مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری با حضور الیاف پلی‌الفین را می‌توان اغلب به خواص فیزیکی و ظاهری الیاف و نحوه پیوند آن‌ها در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) با سنگدانه‌ها و خمیر سیمان ژئوپلیمری دانست. تحقیقات نشان داده است که استفاده از نانو

که در موقع بتن‌ریزی مجاور قالب بودند، در تماس با رکا‌ب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه جک بتن‌شکن باشند در ادامه، اعمال نیرو در محدوده استاندارد تعیین شده تا لحظه شکست نمونه اعمال گردید و میزان مقاومت نمونه‌ها در لحظه شکست قرائت و ثبت شد. آزمایش مقاومت در برابر ضربه‌های وزنه افتان در بتن در سه رده حرارتی ۲۰ (دمای اتاق)، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس تحت سفارش کمیته ACI 544-2R-89 (ACI, ۱۹۹۹) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه بر روی تمامی طرح‌های مخلوط ساخته‌شده انجام پذیرفت. این آزمایش با انداختن مکرر وزنه با قطر گوی ۶۳/۵ میلی‌متر به وزن ۴/۵۴ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت، در شکل (۲) تصویر دستگاه ضربه‌ای وزنه افتان مشاهده می‌گردد. تعداد ضربات و انرژی لازم برای بروز ترک اولیه و شکست در نمونه بتنی، معیار ارزیابی میزان مقاومت نمونه در برابر ضربات وزنه می‌باشد.



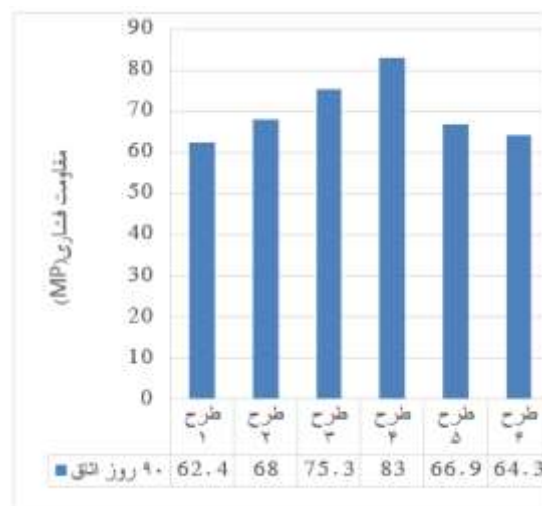
شکل ۲- دستگاه ضربه‌ای وزنه افتان

برای انجام آزمایش، نمونه‌های دیسکی پس از طی سن عمل‌آوری و فرایند حرارتی تعیین شده، در داخل دستگاه ضربه درست در زیر وزنه افتان به نحوی قرار گرفتند که گوی فلزی دقیقاً در مرکز نمونه قرار گیرد، سپس تعداد ضرباتی که به صورت هماهنگ برای بروز اولین ترک ( $N_1$ ) و گسیختگی نهایی ( $N_2$ ) توسط شمارنده‌ای که در قسمت فوقانی دستگاه تعبیه شده است ثبت

موجود در خمیر سیمان پرتلند و خمیر سیمان ژئوپلیمری می-گردد، همچنین با خروج آب از فضاهای مویینه موجود در ساختار ژل‌های هیدراته حاصل از فرایند هیدراتاسیون<sup>۱۱</sup> و ژئوپلیمریزاسیون در مجاورت نواحی انتقال بین سطحی (ITZ)، شاهد ضعف در کارایی ژل‌های هیدراته که دارای نقش چسبندگی و پرکنندگی در ترکیب بتن می‌باشند، هستیم، این امر سبب تضعیف پیوندهای مابین سنگدانه‌ها (و الیاف) با خمیر سیمان می-شود. با افزایش حرارت در بتن خسارت‌های وارده به ریزساختار بتن افزایش می‌یابد، این عامل و وجود ریزترک‌های موجود در خمیر سیمان از علل اصلی کاهش مقاومت بتن در برابر بارهای وارده ضربه‌ای می‌باشند که منجر به کاهش انرژی مصرفی در بروز ترک اولیه و شکست نمونه بتنی در دمای بالا می‌گردد. مطالعه سایر تحقیقات نشان داده است که خروج آب از فضای پیوند شیمیایی در سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) منجر به خرابی ساختار بتن در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس می‌شود (Siddique و Kaur، ۲۰۱۲). از طرفی با اعمال بار در نمونه بتنی مشاهده می‌گردد که ریزترک‌ها جلوتر از نوک ترک گسترش یافته و ناحیه فرایند شکست را که از کرنش موضعی منشأ می‌گیرد به-وجود می‌آورند (Mehta و Monteiro، ۱۹۹۹).

نتایج حاصله در این بخش از مقاله حاکی از این مطلب می-باشد که افزایش مصرف نانوسیلیس و الیاف پلی‌الفین در بتن ژئوپلیمری موجب بهبود نتایج حاصل از آزمون ضربه‌ای وزنه افتان گردیده است، این امر به دلیل نقش چسبندگی، پرکنندگی و هسته‌زایی نانو ذرات سیلیس در ملات سیمان ژئوپلیمری و محصولات نهایی حاصل از ژئوپلیمریزاسیون می‌باشد. از طرفی مصرف الیاف پلی‌الفین با توجه به ماهیت پل‌زدگی بین صفحات ترک خورده، موجب افزایش مقاومت بتن در برابر ضربات وزنه افتان گردیده است، حضور الیاف موجب می‌گردد تا ظرفیت باربری نمونه بتنی بالا رود. براساس نتایج حاصله در این بخش، مشاهده می-گردد که با افزایش درصد الیاف پلی‌الفین به مقدار ۱ و ۲ درصد در ترکیب بتن ژئوپلیمری، تعداد ضربات هم در بروز ترک اولیه و هم در شکستگی نهایی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و این بدین معنا است که ظرفیت جذب انرژی در بتن ژئوپلیمری با افزودن الیاف بهبود می‌یابد. الیاف پلی‌الفین به‌طور مؤثری در برابر شروع و گسترش ترک در طی شکست ساختار بتن مقاومت می‌کنند و باعث تخفیف تمرکز تنش در نوک ترک‌ها می‌شوند و پروسه آسیب‌دیدگی آن را تحت بارهای ضربه‌ای به تأخیر می‌اندازد. مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های بتنی در برابر وزنه افتان با حضور الیاف بسیار فراتر از وجود نانوسیلیس در نمونه بتنی است، البته با توجه به پراکندگی نتایج حاصل از آزمایش ضربه‌ای وزنه افتان در بتن‌های الیافی، از این

ذرات باعث جلوگیری از کاهش مقاومت در بتن ژئوپلیمری می-گردد (Assaedi و همکاران، ۲۰۱۹). حضور ۸ درصد نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمری (در طرح GPN8P0) موجب بهبود ۳۳ درصدی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر نسبت به بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند گردیده است. از طرفی حضور دو درصد الیاف پلی‌الفین در طرح GPN8P2 موجب بهبود سه درصدی میزان مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن کنترل گردیده است.

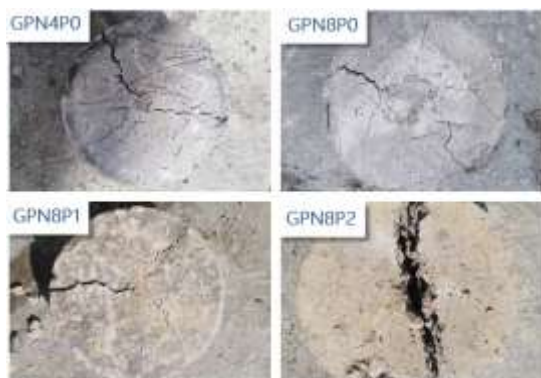


شکل ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

### ۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای وزنه افتان

نتایج حاصل از آزمون مقاومت ضربه‌ای وزنه افتان بر روی نمونه‌های بتنی در جدول (۱۲) به نمایش درآمده است. براساس این جدول، نتایج به شرح ذیل ارائه می‌گردد. در بتن کنترل، با افزایش دما در نمونه‌های بتنی، مقاومت نمونه‌ها در برابر ضربه‌های وزنه افتان کاهش یافته و انرژی لازم برای بروز ترک اولیه و شکست در نمونه‌های بتنی نیز کاهش می‌یابد. در بتن ژئوپلیمری، اعمال حرارت ۳۰۰ درجه نسبت به ۲۰ درجه سلسیوس موجب کاهش تعداد ضربات در بروز ترک اولیه برای طرح‌های GPN4P0، GPN8P0 و GPN8P2 گردیده اما در طرح‌های GPN0P0 و GPN8P2 این روند افزایشی بوده است. در رده حرارتی ۶۰۰ درجه سلسیوس برای تمام طرح‌ها شاهد کاهش میزان ضربات برای بروز ترک اولیه هستیم. در مرحله شکست نمونه بتن ژئوپلیمری تحت حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس شاهد افزایش تعداد ضربات در تمام طرح‌ها نسبت به دمای اتاق می‌باشیم و تعداد این ضربات در نمونه‌ها، پس از اعمال حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس روند کاهشی را دنبال می‌کند. اعمال حرارت موجب خروج آب از حفرات و منافذ

منحرف می‌گردد، این شرایط مانع از گسترش بیشتر ترک می‌شود. این اثر، پل زدن یا ظرفیت در محدود کردن ترک در بتن مسلح شده با الیاف را توصیف می‌کند. طی مطالعه انجام پذیرفته در سایر تحقیقات، نتایج حاصل از آزمایش مقاومت ضربه‌ای بتن نشان می‌دهد که حضور الیاف پلی‌الفین موجب بهبود چشمگیر استحکام ضربه‌ای در محصول نهایی می‌گردد (Ashenai Ghasemi و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۴- تصاویر نمونه‌های پس از ضربات وزنه افتان

آزمایش به‌عنوان پارامتر طراحی استفاده نمی‌گردد، برخی از علل پراکندگی این نتایج را می‌توان به تک‌نقطه‌ای بودن ضربه، عدم وجود معیار برای آماده‌سازی نمونه‌ها، مشکل بودن تعیین گسیختگی نهایی و عدم وجود معیار برای تائید و یا رد حالت گسیختگی اشاره کرد. با مقایسه طراح GPN8P2 با طرح GPN8P1 در آزمون ضربه در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، مشاهده می‌گردد که اغلب مشخصات از قبیل انرژی شکست نمونه، انرژی جذب شده و شاخص انعطاف‌پذیری در طرح حاوی دو درصد الیاف نسبت به طرح حاوی یک درصد الیاف بهبود یافته است. اما انرژی ترک اولیه در طرح شامل الیاف، بیشتر افت نموده است و این امر را می‌تواند اغلب به دلیل توزیع غیریکنواخت الیاف، تجمع الیاف و یا پیوند نامناسب الیاف در ناحیه انتقال نسبت داد. شکل (۴) نمونه‌های بتنی پس از حضور در آزمون ضربه‌ای وزنه افتان در این تحقیق را نشان می‌دهد. توسعه و پیشرفت ترک همواره با افزایش بارگذاری در نمونه‌های بتنی ایجاد می‌شود، در این راستا پیشرفت ترک تا نزدیکی الیاف ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که جدایی در سطح الیاف و ماتریس نمایان می‌شود، به دلیل تنش کششی که در مسیر پیش‌بینی شده ترک رخ می‌دهد، پس از رسیدن ترک به سطح الیاف مقدار تمرکز تنش در نوک آن کاهش می‌یابد و مسیر آن

جدول ۱۲- نتایج آزمون ضربه‌ای وزنه افتان

شماره طرح	نام طرح	دمای (°C)	تعداد ضربات		تفاضل تعداد ضربات	انرژی ضربه ترک اولیه (j)	انرژی ضربه شکست نمونه (j)	انرژی جذب شده (j)	شاخص انعطاف‌پذیری (i)
			ترک اولیه	ترک					
۱	OPC	۲۰	۹	۲۱	۱۲	۱۸۳/۱۸	۴۲۷/۴۳	۲۴۴/۲۴	۲/۳۳
		۳۰۰	۸	۱۹	۱۱	۱۶۲/۸۳	۳۸۶/۷۲	۲۲۳/۸۹	۲/۳۸
		۶۰۰	۱	۳	۲	۲۰/۳۵	۶۱/۰۶	۴۰/۷۱	۳/۰۰
۲	GPN0P0	۲۰	۱۳	۲۴	۱۱	۲۶۴/۶	۴۸۸/۴۹	۲۲۳/۸۹	۱/۵۸
		۳۰۰	۱۵	۲۷	۱۲	۳۰۵/۳	۵۴۹/۵۵	۲۴۴/۲۴	۱/۸
		۶۰۰	۷	۱۰	۳	۱۴۲/۴۸	۲۰۳/۵۴	۶۱/۰۶	۱/۴۳
۳	GPN4P0	۲۰	۲۱	۳۵	۱۴	۴۲۷/۴۳	۷۱۲/۳۸	۲۸۴/۹۵	۱/۶۷
		۳۰۰	۱۹	۳۸	۱۹	۳۸۶/۷۲	۷۷۳/۴۴	۳۸۶/۷۲	۲/۰۰
		۶۰۰	۹	۱۵	۶	۱۸۳/۱۸	۳۰۵/۳۰	۱۲۲/۱۲	۱/۶۷
۴	GPN8P0	۲۰	۲۳	۳۸	۱۵	۴۶۸/۱۳	۷۷۳/۴۴	۳۰۵/۳۰	۱/۶۵
		۳۰۰	۲۲	۴۳	۲۱	۴۴۷/۷۸	۸۷۵/۲۰	۴۲۷/۴۳	۱/۹۵
		۶۰۰	۹	۱۶	۷	۱۸۳/۱۸	۳۲۵/۶۶	۱۴۲/۴۸	۱/۷۸
۵	GPN8P1	۲۰	۲۶	۱۱۹	۹۳	۵۲۹/۱۹	۲۴۲۲/۰۸	۱۸۹۲/۸۸	۴/۵۸
		۳۰۰	۲۸	۱۷۹	۱۵۱	۵۶۹/۹۰	۳۶۴۳/۲۹	۳۰۷۳/۳۹	۶/۳۹
		۶۰۰	۱۳	۴۲	۲۹	۲۶۴/۶۰	۸۵۴/۸۵	۵۹۰/۲۵	۳/۲۳
۶	GPN8P2	۲۰	۳۰	۱۶۹	۱۳۹	۶۱۰/۶۱	۳۴۳۹/۷۶	۲۸۲۹/۱۵	۵/۶۳
		۳۰۰	۲۹	۲۳۱	۲۰۲	۵۹۰/۲۵	۴۷۰۱/۶۸	۴۱۱۱/۴۳	۷/۹۷
		۶۰۰	۹	۴۷	۳۸	۱۸۳/۱۸	۹۵۶/۶۲	۷۷۳/۴۴	۵/۲۲



در بتن ژئوپلیمری مصرف آب صرفاً برای کارایی ملات به کار می‌رود و با توجه به نبود سیمان در این نوع از بتن، آب به‌منظور کریستالیزه شدن نیاز نیست. مطالعه سایر تحقیقات نشان داده است که افزایش دما تا محدوده مشخصی می‌تواند موجب بهبود استحکام و مقاومت در بتن‌های ژئوپلیمری گردد (Deb و همکاران، ۲۰۱۵؛ Venkatesan و همکاران، ۲۰۱۶). از این رو به نظر می‌رسد اعمال حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس در بتن ژئوپلیمری طرح‌های GPN0P0، GPN4P0 و GPN8P0 نسبت به دمای اتاق، توانسته موجب بهبود برخی از شاخص‌ها در آزمون ضربه‌ای وزنه افتان گردد، این بهبود را تا حدودی می‌توان به توسعه فرایند ژئوپلیمریزاسیون و تقویت ریزساختار بتن ژئوپلیمری در مجاورت با حرارت نسبت داد، از طرفی حضور نانوسیلیس در این طرح‌ها موجب استحکام بالای بتن در سن ۹۰ روز عمل‌آوری گردیده است و این موضوع موجب شده تا وجود حرارت در محدوده ۳۰۰ درجه سلسیوس باعث اعمال کم‌ترین خسارت به ساختار بتن ژئوپلیمری در برخی از طرح‌ها گردد. با افزایش دما به بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت بتن چه از نوع بتن کنترل و چه از نوع بتن ژئوپلیمری به دلیل گسستگی و ضعف ریزساختار مواد متشکله، پائین می‌آید.

در طرح GPN8P1 و GPN8P2 با توجه به افزودن الیاف پلی-الفین به نمونه‌های بتن ژئوپلیمری و با توجه به خواص ویژه این الیاف در افزایش مقاومت بتن، شاهد افزایش چشمگیر در تعداد ضربات اولیه و شکست، همچنین انرژی کسب‌شده اولیه و شکست در نمونه‌های بتنی در دماهای متفاوت هستیم، به‌طوری‌که افزایش انرژی جذب‌شده در بروز شکست نمونه برای بتن ژئوپلیمری در طرح GPN8P2 حاوی ۲ درصد الیاف نسبت به بتن ژئوپلیمری طرح GPN0P0 بدون الیاف در دوره دمایی ۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب حدود ۱/۴۹، ۱/۳۴ و ۱/۳۱ برابر گردیده است. همچنین در این طرح (GPN8P2) انرژی جذب‌شده در دماهای ذکرشده، به ترتیب حدود ۰/۴۹، ۰/۳۴ و ۰/۳۱ برتری را نسبت به طرح GPN8P1 حاصل گردید.

در بتن ژئوپلیمری، شاهد کاهش تعداد ضربات و انرژی کسب‌شده برای بروز ترک اولیه در طرح‌های GPN8P0، GPN4P0 و GPN8P2 همچنین شاهد افزایش تعداد ضربات و انرژی کسب‌شده برای طرح GPN0P0 و GPN8P1 در حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس می‌باشیم، تعداد ضربات ترک اولیه برای دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در تمام طرح‌ها کاهش بود.

در شکل (۴) مشاهده می‌گردد که توسعه ترک‌خوردگی در آزمون‌های حاوی الیاف به حداقل خود رسیده است. در مقایسه نمونه بتنی حاوی الیاف و فاقد الیاف، مقادیر کمی از ترک‌های ریز در هنگام شکست نمونه‌ها دیده می‌شود که این موضوع نشان از افزایش مقاومت در برابر ضربه می‌باشد، تأثیرگذاری الیاف در مواجهه با بارهای ضربه‌ای بسیار بیشتر از وجود نانوسیلیس در نمونه‌های بتنی می‌باشد، همچنین با افزودن الیاف پلی‌الفین به بتن ژئوپلیمری، گسیختگی آن انعطاف‌پذیرتر گردیده است، این رفتار توسط انواع الیاف در تحقیقات سایر محققین نیز مشاهده گردیده است (Olivito و همکاران، ۲۰۱۰؛ Islam و همکاران، ۲۰۱۷).

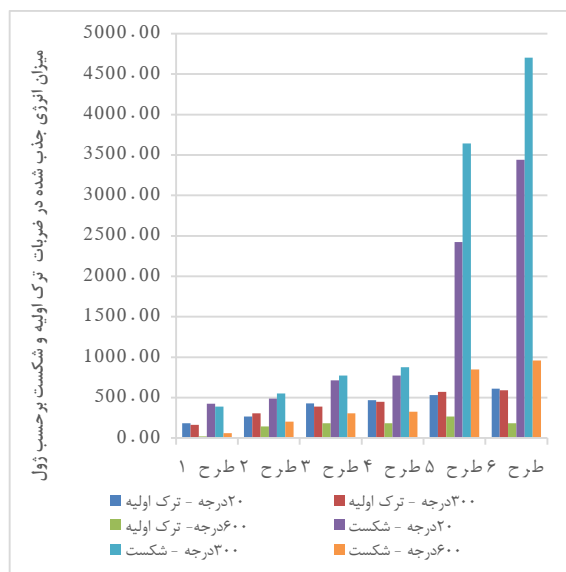
نتایج حاصل از مقاومت ضربه‌ای وزنه افتان در بتن براساس میزان انرژی ضربه در بروز ترک اولیه (E1) و میزان انرژی ضربه در بروز شکست (E2) در نمونه بتنی مطابق با شکل (۵) به نمایش در آمده است. در این راستا مشاهده می‌گردد که حداقل انرژی لازم برای شکست نمونه‌های بتنی در دمای اتاق (۲۰ درجه سلسیوس) متعلق به طرح OPC<sup>۱۲</sup> حاوی بتن کنترل به‌میزان ۴۲۷/۴۳ ژول و حداکثر این مقدار برای طرح GPN8P2 به‌میزان ۳۴۳۹/۴۷ ژول می‌باشد که افزایش حدود هفت برابری را نشان می‌دهد.

حداقل انرژی لازم برای شکست نمونه‌های بتنی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، متعلق به طرح OPC حاوی بتن کنترل به‌میزان ۳۸۶/۷۲ ژول و حداکثر این مقدار برای طرح GPN8P2 به‌میزان ۴۷۰۱/۶۸ ژول می‌باشد که افزایش حدود ۱۱ برابری را نشان می‌دهد. حداقل انرژی لازم برای شکست نمونه‌های بتنی در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، متعلق به طرح OPC حاوی بتن کنترل به-میزان ۶۱/۰۶ ژول و حداکثر این مقدار برای طرح GPN8P2 به-میزان ۹۵۶/۶۲ ژول می‌باشد که افزایش حدود ۱۵ برابر را نشان می‌دهد.

نکته حائز اهمیت این‌که به‌جز طرح OPC حاوی بتن کنترل، در سایر طرح‌ها، تعداد ضربات و انرژی لازم برای بروز ترک در رده دمایی ۳۰۰ درجه سلسیوس نسبت به رده دمایی ۲۰ درجه، افزایش پیدا نموده و این افزایش در طرح GPN8P1 و GPN8P2 چشمگیرتر می‌باشد. علت این افت برای طرح OPC، به‌دلیل معمولی بودن نوع بتن و وجود آب فراوان در این نوع بتن است که در مواجهه با حرارت بالا خسارت‌های بیشتری با خروج آب به ریزساختار بتن وارد نموده است. اما در طرح ۲ تا ۶ به لحاظ این‌که بتن از نوع ژئوپلیمر می‌باشد، بنا به خصوصیات بتن ژئوپلیمری افزایش دما تا حدودی موجب افزایش در مقاومت این نوع بتن گردیده است.

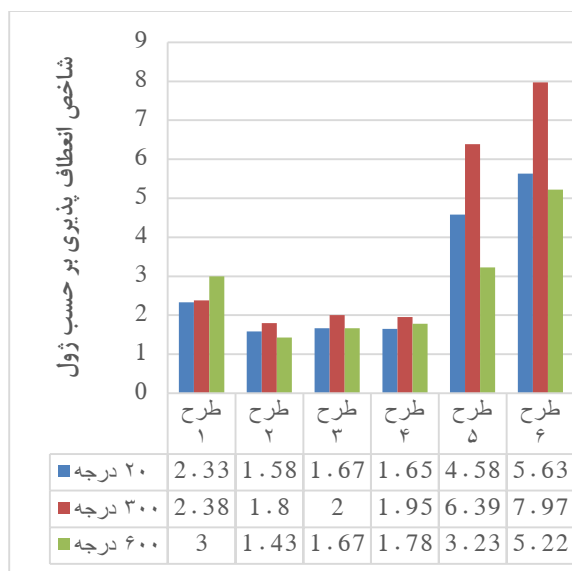
نمودار شکل (۶) حاکی از این مطلب می‌باشد که در هر طرح از بتن ژئوپلیمری بیش‌ترین مقدار انرژی جذب‌شده متعلق به رده دمایی ۳۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد. با افزودن الیاف پلی‌الفین به طرح‌های GPN8P1 و GPN8P2 در بتن ژئوپلیمری میزان انرژی جذب‌شده در تمام دوره‌های دمایی افزایش چشمگیری نسبت به نمونه‌های بتن ژئوپلیمری فاقد الیاف داشته است، به طوری که بالاترین میزان انرژی جذب‌شده در نمونه‌ها، متعلق به طرح GPN8P2 و در رده دمایی ۳۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد.

نتایج حاصل از مقاومت ضربه‌ای وزنه افتان در بتن براساس شاخص انعطاف‌پذیری ( $E_2/E_1$ ) در نمونه‌های بتنی مطابق نمودار شکل (۷) به‌نمایش درآمده است. در این نمودار مشاهده می‌گردد که برای طرح OPC حاوی بتن کنترل در دوره دمایی ۶۰۰ درجه سلسیوس، شاخص انعطاف‌پذیری در بالاترین سطح نسبت به دوره‌های دمایی ۲۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس قرار دارد. برای تمام طرح‌های بتن ژئوپلیمری در دوره دمایی ۳۰۰ درجه سلسیوس بیش‌ترین میزان شاخص انعطاف‌پذیری را شاهد هستیم، با افزودن الیاف پلی‌الفین به طرح‌های GPN8P1 و GPN8P2 در بتن ژئوپلیمری شاهد افزایش چشمگیر میزان شاخص انعطاف‌پذیری در نمونه‌های بتنی می‌باشیم به طوری که در طرح GPN8P2 حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی‌الفین مقدار شاخص انعطاف‌پذیری به بیش‌ترین میزان خود در هر سه رده دمایی در مقایسه با سایر طرح‌های مخلوط رسیده است.

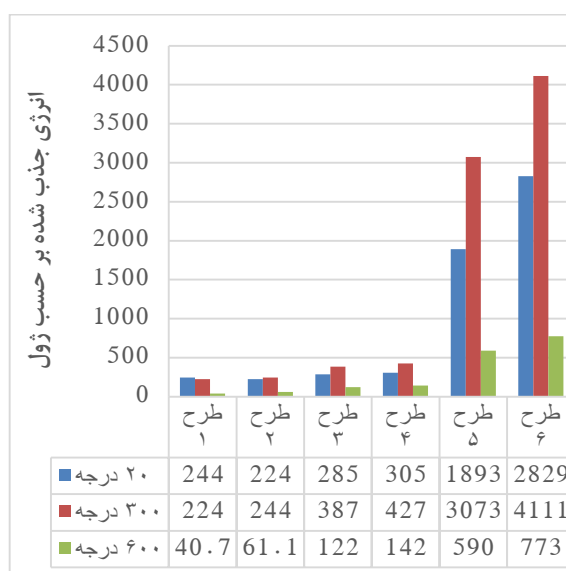


شکل ۵- نمودار میزان انرژی جذب‌شده در نتایج آزمایش ضربه‌ای وزنه افتان

نتایج حاصل از مقاومت ضربه‌ای وزنه افتان در بتن براساس انرژی جذب‌شده ( $E_2-E_1$ ) در نمونه‌های بتنی در شکل (۶) به نمایش درآمده است. خاصیت جذب انرژی<sup>۱۳</sup> بتن می‌تواند به‌نحو مطلوبی خطر شکست سازه‌های بتنی به‌خصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزه‌ای قرار می‌گیرند را کاهش دهد (Sadr Montazi و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۷- نمودار شاخص انعطاف‌پذیری نمونه‌ها در آزمایش ضربه‌ای وزنه افتان



شکل ۶- میزان انرژی جذب‌شده نمونه‌ها در آزمایش ضربه‌ای وزنه افتان

## ۳-۳- نتایج آنالیز XRD

آنالیز غیرمخرب طیفسنجی پراش اشعه ایکس (XRD) به منظور بررسی ریزساختاری و تعیین مشخصات ساختاری مواد تشکیل دهنده بتن از قبیل ترکیب فازها، در این پژوهش انجام پذیرفت.

این آنالیز بر روی بتن ژئوپلیمری طرح GPN8P0 حاوی ۸ درصد نانوسیلیس، به عنوان بهترین طرح از نمونه‌های فاقد الیاف به لحاظ عملکرد در آزمون مقاومت ضربه‌ای، قبل و بعد از حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس مورد استفاده قرار گرفت.

با روش آنالیز XRD می‌توان هم‌پوشانی نتایج حاصله از سایر آزمون‌های این پژوهش را بر روی طرح GPN8P0 به لحاظ ریزساختاری توجیه نمود، همچنین این آزمون به منظور تأثیر حرارت بر ریزساختار بتن ژئوپلیمر سربراه‌ای حاوی نانوسیلیس و الیاف پلی‌الفین در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام پذیرفت.

نتایج حاصل از آزمایش طیفسنجی پراش اشعه ایکس (XRD) با شدت تابش  $(\lambda = 1.54060 \text{ \AA} - \text{Cu})$  بر روی بتن آسیاب شده برگرفته از مرکز نمونه‌ها، در شکل (۸) در دمای اتاق و شکل (۹) پس از در معرض قرارگیری حرارت، نشان داده شده است.

بر اساس شکل‌های حاصل از طیفسنجی پراش اشعه ایکس، مشاهده می‌گردد که اکثر قله‌های ایجاد شده در بتن قبل و بعد از حرارت در محدوده زوایای ۲۵ الی ۳۵ درجه اتفاق افتاده است.

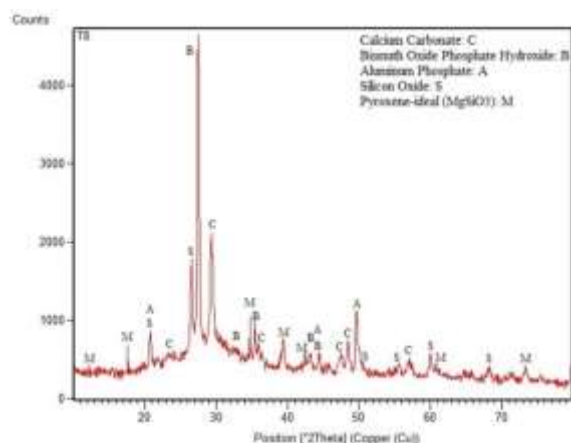
در طیف متعلق به نمونه بتنی طرح GPN8P0 در دمای اتاق (شکل (۸))، ملاحظه می‌گردد که عنصر Bismuth Oxide Phosphate Hydroxide دارای قوی‌ترین قله به مقدار تقریبی  $4800 \text{ CM}^{-1}$  است و در ادامه، عناصر Calcium Carbonate، Silicon Oxide، Aluminum، و  $\text{MgSiO}_3$  بیشترین حضور را در طیف مورد نظر دارند. در این راستا پنج پیک بیشینه ذکر شده با مقادیر اوج قله‌های به میزان ۱۰۰٪، ۳۱/۷۱٪، ۲۳/۵۷٪، ۱۸/۰۷٪ و ۱۳/۵۹٪ در زوایای ۲۵ به ترتیب در محدوده زوایای ۲۷، ۲۹، ۲۶، ۴۹ و ۳۴ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است.

در نمونه بتنی طرح GPN8P0 پس از حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس (شکل (۹))، عنصر Silicon Oxide دارای قوی‌ترین قله به مقدار تقریبی  $2100 \text{ CM}^{-1}$  است و در ادامه عناصر Calcite و Sodium Calcium Aluminum Silicate دارای بیشترین فراوانی هستند. در این راستا سه پیک بیشینه ذکر شده با مقادیر اوج قله‌های ۱۰۰٪، ۵۳/۰۹٪ و ۳۴/۷۶٪ در زوایای ۲۵ به ترتیب در محدوده‌های ۲۶، ۲۷ و ۲۹ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است.

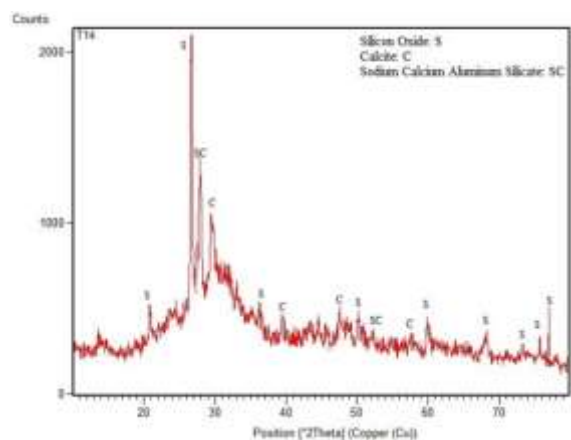
اکسیدسیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) در گراف هر دو طیف مشاهده می‌گردد، این موضوع نشان از حضور ذرات سیلیس در سربراه کوره

آهنگدازی و نانوسیلیس موجود در ترکیب این دو نوع از بتن می‌باشد، اما شدت آن در نمونه بتنی پس از در معرض قرار گرفتن حرارت کم‌تر می‌باشد، سایر عناصر موجود در قله‌های طیف نمونه بتنی پس از حرارت نیز از شدت کم‌تری برخوردارند، این موضوع را می‌توان به اعمال حرارت در بتن نسبت داد که موجب تضعیف ساختار بتن و خروج برخی از عناصر از ترکیب گردیده است. تجزیه و تحلیل نتایج طیفسنجی پراش اشعه ایکس (XRD) نشان می‌دهد که ساختار بلوری بتن ژئوپلیمری با افزایش دما و زمان تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Rao و همکاران، ۲۰۱۹).

حضور تعدد قله‌های اضافی در طیف‌ها، نشان‌دهنده تشکیل مراحل جدیدی از کوارتز، کلسیم کربنات، آلومینیوم فسفات می‌باشد که وجود فاز کریستالی در بتن ژئوپلیمری را تأیید می‌کند. به طور کلی، افزودن نانوسیلیس به خمیرهای ژئوپلیمری منجر به تغییرات جزئی در ساختار کریستالی و تشکیل محصولی آمورف<sup>۱۴</sup> شده است، با افزودن نانوسیلیس محتوای آمورف عمدتاً افزایش می‌یابد که باعث کاهش محتوای فاز بلوری می‌شود.

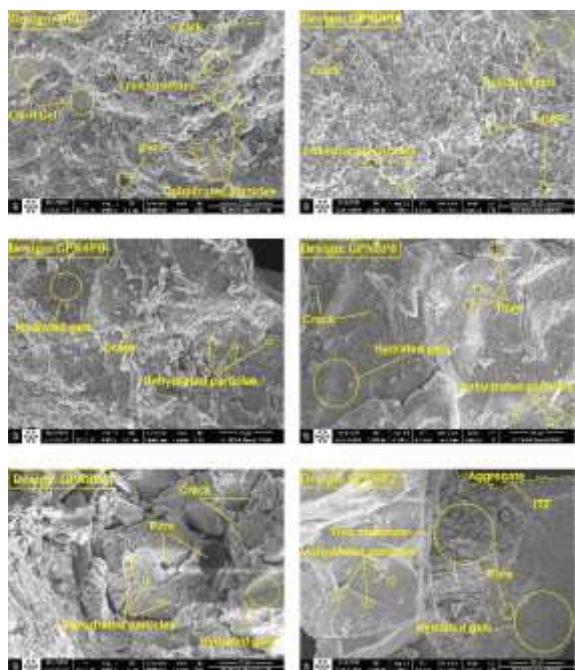


شکل ۸- تصویر XRD از نمونه بتنی در دمای اتاق

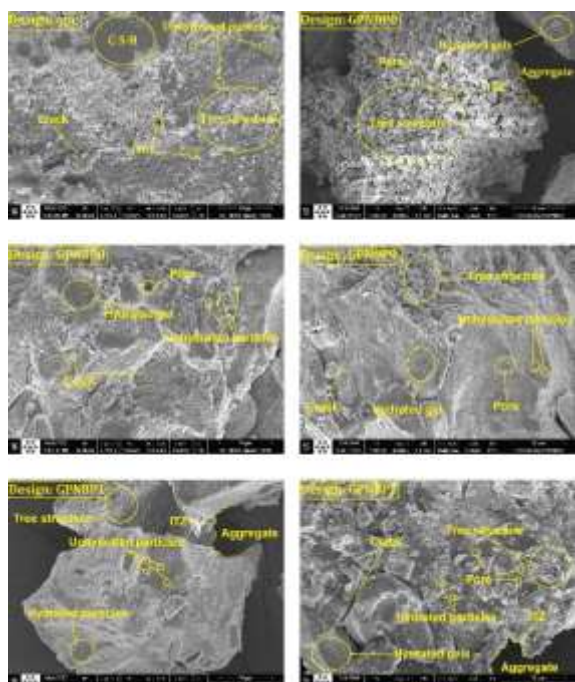


شکل ۹- تصویر XRD از نمونه بتنی بعد از حرارت

حرارت توسعه پیدا می‌کند و منتج به تضعیف بیشتر ریزساختار در بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری می‌گردد، از طرفی حرارت ممکن است باعث بروز انقباض حرارتی و تشکیل ترک‌های متعدد در ریزساختار و کلان ساختار بتن گردد که به ضعف بتن در برابر بارهای ضربه‌ای حاصل از وزنه افتان می‌افزاید.



شکل ۱۰- تصاویر SEM نمونه‌های بتنی در دمای اتاق



شکل ۱۱- تصاویر SEM نمونه‌های بتنی پس از حرارت

از آنجا که نانوسیلیس آمورف است، افزایش مواد آمورف در نمونه‌های حاوی ترکیبات نانو، معمولاً نانوسیلیس اضافی افزوده شده در خمیرها، در نقش یک پرکنندگی نانوسیلیس عمل می‌کند (Phoo و همکاران، ۲۰۱۴؛ Nazari و همکاران، ۲۰۱۵).

### ۳-۴- نتایج آنالیز SEM

تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگ‌نمایی ۴۰۰۰ برابر و اندازه ۲۰ میکرومتر در دمای اتاق و پس از اعمال حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس بر روی نمونه‌های بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای در دوره عمل‌آوری ۹۰ روزه در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به‌نمایش درآمده است. این آزمون به‌منظور بررسی ریزساختاری نمونه‌های بتنی و هم‌پوشانی نتایج حاصل از آنالیز XRD، آزمایش مقاومت فشاری و آزمون مقاومت ضربه‌ای وزنه افتان در بتن، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

تصویر حاصل از نمونه بتن کنترل (OPC) در دمای اتاق حاکی از وجود منافذ، حفرات و دانه‌های کلینکری هیدراته نشده (نواحی عمدتاً با رنگ سفید) بیشتری نسبت به نمونه‌های بتن ژئوپلیمری می‌باشد. حضور و مشارکت بیشتر ذرات سرباره کوره آهنگدازی و نانوذرات سیلیس حاوی مواد فراوان آلومینوسیلیکاتی در فرایند ژئوپلیمریزاسیون و تولید حجم بالای ژل‌های هیدراته (نواحی عمدتاً با رنگ تیره) از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته، سیلیکات آلومینیم کلسیم هیدراته و سیلیکات آلومینیم سدیم هیدراته، به‌خوبی توانسته منافذ و نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) حد فاصل بین سنگدانه‌ها (و الیاف پلی‌الفین) و خمیر سیمان ژئوپلیمری را پر نمایند، این موضوع یکی از علل اصلی ایجاد تراکم و پیوستگی در ریزساختار بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای می‌باشد که سبب ایجاد مقاومت بالای این نوع از بتن در برابر بار ضربه‌ای نسبت به نمونه‌های بتن کنترل گردیده است.

با اعمال حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس در نمونه‌های بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری قبل از انجام آنالیز SEM، آب موجود در منافذ و فضاهای مویینه بین لایه‌ای خارج شده و این امر موجب تضعیف ریزساختار بتن می‌گردد، اما با توجه به تراکم بالای بتن ژئوپلیمری و وجود منافذ و حفرات کم‌تر در ریزساختار این نوع از بتن نسبت به بتن کنترل، حرارت موجب آسیب کم‌تری به ریزساختار بتن ژئوپلیمری گردیده است، وجود منافذ کم‌تر در تصاویر میکروسکوپی اخذ شده بعد از حرارت حاکی از این موضوع می‌باشد.

وجود ساختارهای درختی شکل در برخی از تصاویر نشان از حضور کریستال‌های کوچک هیدراته نشده و غیرهمگن در محصولات هیدراسیون و ژئوپلیمریزاسیون می‌باشد و این ساختار در طرح بتن کنترل بیشتر مشهود است، این فرایند با اعمال

#### ۴- مقایسه اقتصادی طرح‌ها

ساخت بتن ژئوپلیمری به دلیل کاهش مضرات زیست‌محیطی آن نسبت به بتن معمولی، همواره مورد توجه دانشمندان در دهه‌های اخیر قرار گرفته است، از طرفی مطالعه تحقیقات سایر پژوهشگران نشان داده است که این نوع از بتن به لحاظ خواص مکانیکی و دوام نسبت به بتن معمولی دارای برتری‌های فراوان می‌باشد. دست‌یابی به بتنی با مقاومت بالا در برابر بارهای ضربه‌ای و تولید بتنی حافظ محیط‌زیست از نوآوری‌های تحقیق پیش‌رو در این مقاله می‌باشد، اما با توجه به این‌که ساخت بتن ژئوپلیمری مدت زمان طولانی در دستور کار محققین حوزه سازه قرار ندارد و به تولید انبوه از طریق تأسیس کارخانجات نرسیده است، هزینه ساخت آن بسیار بالا می‌باشد.

مصالح اولیه برای ساخت این نوع از بتن به صورت گسترده در بازار ایران در دسترس نیست، از طرفی به دلیل تحریم‌های خارجی فراوان که کشور عزیزمان ایران در این مقطع با آن مواجه است، کمبود مصالح اولیه و قیمت‌های بالای مصالح همواره از مشکلات مسیر راه ساخت بتن‌های ژئوپلیمری در ایران محسوب می‌گردد. امید است در آینده‌ای نزدیک با فراوانی و کاهش قیمت مصالح اولیه ساخت بتن ژئوپلیمری، شاهد کاهش در هزینه‌های تولیدی این نوع از بتن باشیم. در جدول (۱۳) محاسبه هزینه‌های برآوری شده مالی برای ساخت یک مترمکعب از بتن برای هر یک از طرح‌های مخلوط این پژوهش به تاریخ مرداد ماه ۱۴۰۰ هجری شمسی، به‌نمایش درآمده است. این محاسبه براساس اوزان مصالح مصرفی در یک مترمکعب از بتن تولیدشده در جدول (۱۱) انجام پذیرفته است. پیرو نتایج حاصله در جدول (۱۳)، مشاهده می‌گردد که هزینه‌های مالی تولید بتن ژئوپلیمری بسیار بالاتر از تولید بتن معمولی می‌باشد، در این راستا هزینه تولید طرح‌های ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ از بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن کنترل به ترتیب به میزان ۵۸، ۸۹، ۸۹/۸ و ۹۰/۵ برابر بیشتر می‌باشد.

جدول ۱۳- برآورد هزینه ساخت یک مترمکعب بتن طرح‌ها

طرح	۱	۲	۳	۴	۵	۶
سنگدانه	۳۸۷	۴۰۰	۳۸۹	۳۷۸	۳۶۸	۳۶۲
سیمان	۵۴۰	-	-	-	-	-
سرباره	-	۴۵۰۰	۴۳۲۰	۴۱۴۰	۴۳۲۰	۴۳۲۰
نانوسیلیس	-	-	۵۰۴۰۰	۱۰۰۸۰۰	۱۰۰۸۰۰	۱۰۰۸۰۰
الیاف	-	-	-	-	۱۱۹۶	۲۳۹۲
محلول قلیاف‌آل	-	۴۰۵۰۰	۴۰۵۰۰	۴۰۵۰۰	۴۰۵۰۰	۴۰۵۰۰
روان‌کننده	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰
مبلغ نهایی (م.ت)	۱۶۴۷	۴۶۱۲۰	۹۶۳۲۹	۱۴۶۵۳۸	۱۴۷۹۰۴	۱۴۹۰۹۴

\* مبلغ نهایی با حذف شش صفر و سایر مبلغ با حذف سه صفر به واحد تومان می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصله در این بخش، به نظر می‌رسد مادامی‌که قیمت‌های اولیه مصالح مصرفی بتن ژئوپلیمری کاهش نیابد، تولید بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی و نانوسیلیس حاوی الیاف پلی‌الفین به لحاظ اقتصادی مرقوم به صرفه نخواهد بود، اما مزایای فراوان این نوع بتن در خصوصیات استحکامی و مسائل زیست‌محیطی همواره قابل تأمل می‌باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت ضربه‌ای وزنه افتان، آنالیز XRD و SEM بر روی نمونه‌های بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و پس از در معرض حرارت قرار گرفتن نمونه‌ها، حاکی از عملکرد مطلوب نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن کنترل دارد، افزودن نانوسیلیس و الیاف پلی‌الفین به بتن ژئوپلیمری باعث بهبود نتایج حاصله گردید. در راستای اجرای آزمون‌های ذکر شده، اعمال حرارت به نمونه‌های بتنی، موجب تضعیف ریزساختار بتن گردید و نتایج حاصل از آزمون‌های مورد اشاره را با تأثیر منفی مواجه کرد. چکیده حاصل از نتایج آزمایشگاهی در این تحقیق به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

۱) طرح GPN8P2 با توجه به عملکرد بهتر در میزان جذب انرژی و شاخص انعطاف‌پذیری، نسبت به سایر طرح‌ها، به-عنوان طرح بهینه در عملکرد مقاومت ضربه‌ای وزنه افتان در تمامی رده‌های حرارتی شناخته شد.

۲) طرح GPN8P2 به‌عنوان طرح بهینه، رشد انرژی شکست به میزان ۱۴/۷ و ۳/۷ برابری و رشد انرژی جذب‌شده به-میزان ۱۸ و ۱۲ برابری، همچنین رشد شاخص انعطاف-پذیری به میزان ۰/۷۴ و ۲/۷ برابری به ترتیب نسبت به بتن کنترل (OPC) و بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای فاقد نانوسیلیس و الیاف پلی‌الفین (GPN0P0) در حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس را تجربه کرد.

۳) اضافه نمودن نانوسیلیس به بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای طرح-های GPN4P0 و GPN8P0 در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، در مقایسه با نمونه بتن ژئوپلیمری طرح GPN0P0 (فاقد نانوسیلیس)، موجب افزایش انرژی جذب‌شده به ترتیب به-میزان ۱۰۰ درصد و ۱/۳۳ برابر گردیده است. حداکثر میزان افزایش انرژی جذب‌شده برای بتن ژئوپلیمری حاوی نانوسیلیس نسبت به بتن کنترل (OPC) در دمای ۶۰۰ درجه، متعلق به طرح GPN8P0 به مقدار ۲/۵ برابر می‌باشد.

۴) در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، اضافه کردن الیاف پلی‌الفین به بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای حاوی نانوسیلیس نسبت به بتن ژئوپلیمری طرح GPN8P0 (فاقد الیاف)، موجب بهبود

- ASTM D7508/D7508M-20, "Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete, ASTM International", 2020, West Conshohocken, PA, www.astm.org, DOI: 10.1520/D7508\_D7508M-20.
- ASTM C989/C989M-18a, "Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars", 2018, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/C0989\_C0989M-18A.
- ASTM C1240-20, "Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures", 2020, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/C1240-20.
- ASTM C33 / C33M-18, "Standard Specification for Concrete Aggregates", 2018, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/C0033\_C0033M-18.
- BS EN 12390-3, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens, British Standards, 2009.
- Deb PS, Nath P, Sarker PK, "Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature", *Procedia Engineering*, 2015, 125, 594-600.
- Delavari SMJ, Jahangir H, Daneshvar MH, "Comparison the Effect of Particle Tires and Powder of Worn Tires on Compressive Strength of Concrete (In Persian)", 4<sup>th</sup> International Conference on Structural Engineering, February, 2018, Tehran, Iran.
- Diegles S, Felipe J, Ana BRP, "Comparative analysis between properties and microstructures of geopolymeric concrete and portland concrete", *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, 7 (4), 606-611.
- Huseien GF, Mirza J, Ismail M, Ghoshal SK, Ariffin MAM, "Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar", *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, 9, 1557-1566.
- Ghasemi Naghibdeh M, Naghipour M, Rabiee M, "Experimental study of layered fiber reinforced concrete slabs with variable percentage of fibers in layers against drop weight impact load", *Concrete Research*, 2014, 7 (1), 23-34.
- ISIRI 389, "standards and the specification for the Portland Cement", Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 2020.
- Islam A, Alengaram UJ, Jumaat MZ, Ghazali NB, Yusoff S, Bashar II, "Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, 2017, 152, 964-977.
- Jahangir H, Bagheri M, Delavari SMJ, "Estimation of concrete compressive strength by substitution of pinyon pine ash for cement", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2018, 5 (Special Issue 2), 5-19.
- Malkawi AB, Nuruddin MF, Fauzi A, Almattarneh H, Mohammed BS, "Effects of alkaline solution on properties of the HCFA geopolymer mortars", *Procedia Engineering*, 2016, 148, 710-717.
- Mallikarjuna Rao G, Gunneswara Rao TD, Siva Nagi Reddy M, Rama Seshu D, "A study on the strength انرژی جذب شده در بروز ترک نهایی نمونه‌های بتنی به-میزان ۱/۶۲ برابر در طرح GPN8P1 و ۱/۹۴ برابر در طرح GPN8P2 گردیده است و حداکثر میزان افزایش انرژی جذب شده در بروز ترک نهایی در بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف در همین دما نسبت به بتن کنترل (OPC)، متعلق به طرح GPN8P2 به مقدار ۱۴/۶۷ برابر به دست آمد.
- ۵) آنالیز XRD و SEM بر روی بتن بعد از حرارت، حاکی از افزایش منافذ و حفرات موجود در ریزساختار ماتریس خمیر سخت شده بتن نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای اتاق می‌باشد، این امر ناشی از خروج آب تحت حرارت در ساختار بتن است، این دلیل و گسستگی پیوند در ناحیه انتقال بین سطحی بتن در معرض حرارت و وجود ساختار درختی ناشی از عدم مشارکت ذرات در فرایند هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون، از علل اصلی ضعف بتن در برابر بارهای ضربه‌ای است.
- ۶) حضور دو درصد الیاف پلی‌الفین در ترکیب بتن ژئوپلیمری (در طرح GPN8P2)، موجب افت مقاومت فشاری بتن به-میزان ۲۲ درصد نسبت به طرح فاقد الیاف (طرح GPN2P0) گردیده است.
- ۷) نتایج حاصل از آزمون ضربه‌ای وزنه افتان، آنالیز XRD و تفسیر نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه‌های بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری سرباره‌ای در هماهنگی و هم‌پوشانی با هم قرار داشتند.
- ۸) در مقطع زمانی تنظیم این مقاله، به دلیل بالا بودن قیمت-های مصالح اولیه در ایران، تولید بتن ژئوپلیمری به لحاظ اقتصادی مرقوم به صرفه نمی‌باشد.

## ۶- مراجع

- رضانیانپور ع، قدسی پ، گنجیان ا، "ریزساختار، خواص و اجزای بتن"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۹۴.
- ACI-American Concrete Institute, 544 Committee Report on Fiber Reinforced Concrete, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", 1988, Reviewed 1999.
- ACI 211.1-8, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)", 2002.
- Ashenai Ghasemi F, Ghasemi I, Basiri M, "Experimental analysis of mechanical properties of polypropylene in presence of graphene nano plates and polyolfine elastomer in Different manufacturing times", *Modares Mechanical Engineering*, 2015, 15 (11), 225-232, (In Persian).
- Assaedi H, Alomayri T, Shaikh F, Low IM, "Influence of nano silica particles on durability of flax fabric reinforced geopolymer composites", *Materials*, 2019, 12 (9), 1459.

- Research, 2012, 3, 45-51.
- Tajodeni M, "In vitro evaluation of the effect of adding nanosilica with different specific surfaces on physical and mechanical parameters of soil-cement aggregates", Sharif Engineering Journal, 2016, 34-2 (1.1), 13-22. DOI: 10.24200/J30.2018.1326.
- Venkatesan RP, Pazhani KC, "Strength and durability properties of geopolymer concrete made with ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash", KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20 (6), 2384-2391.
- and performance of geopolymer concrete subjected to elevated temperatures", Recent Advances in Structural Engineering, Singapore, 2019, 1, 869-889.
- Marcos GAlberti, Alejandro Enfedaque, Jaime CGálvez, "Improving the Reinforcement of Polyolefin Fiber Reinforced Concrete for Infrastructure Applications", 2015, 3, 504-522. DOI: 10.3390/fib3040504, ISSN 2079-6439.
- Mehta PK, Monteiro PJ, "Concrete: microstructure, properties, and materials", McGraw-Hill Education.
- Nazari A, Sanjayan JG, "Hybrid effects of alumina and silica nanoparticles on water absorption of geopolymers: Application of Taguchi approach", Measurement, 2015, 60, 240-246.
- Olivito RS, Zuccarello FA, "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete", Composites Part B: Engineering, 2010, 41 (3), 246-255.
- Phoo-ngernkham T, Chindaprasirt P, Sata V, Hanjitsuwan S, Hatanaka S, "The effect of adding nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature", Materials and Design, 2014, 55, 58-65.
- Pilehvar Sh, Vinh DC, Anna MS, Manuel C, Luca V, Marcos L, Ramón P, Anna LK, "Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials", Construction and Building Materials, 2018, 173, 28-39.
- Prasanna R, Pazhani KC, "Strength and Durability Properties of Geopolymer Concrete made with Ground Granulated Blast furnace Slag and Black Rice Husk Ash", KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 20 (6), 2384-2391. DOI: 10.1007/s12205-015-0564-0, pISSN 1226-7988, eISSN 1976-3808.
- Rakhshani Mehr M, Bakhshi H, "Effect of Steel Fibers and Concrete Strength on Mechanical specifications of Steel Fiber Reinforced Concrete", Concrete Research, 2015, 8 (1), 101-112.
- Rattanasak U, Chindaprasirt P, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, Miner", Engineering, 2009, 22, 1073-1078.
- Sadr Momtazi A, Kohani Khoshkbijari R, Lotfi Omran O, "Mechanical and Durability Properties of Self Compacting Concrete containing Nano Silica Particles considering Optimum Percentages of Fibers", Guilan Journal of Civil Engineering, 2015, 2, 8.
- Sahraeimoghadam AH, Omidinasab F, Dalvand A, "Impact resistance of multi-layer slabs made with (HPSCC) reinforced by hybrid fibers under drop weight impact", Concrete Research, 2019, 12 (3), 73-87.
- Siddique R, Kaur D, "Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures", Journal of Advanced

## EXTENDED ABSTRACT

# Evaluation of Impact Strength of Heated Slag Geopolymer Concrete

Mohammadhossein Mansourghanaei<sup>a</sup>, Morteza Biklaryan<sup>a,\*</sup>, Alireza Mardookhpour<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

<sup>b</sup> Department of Civil Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

**Received:** 11 May 2021; **Review:** 04 August 2021; **Accepted:** 18 September 2021

---

### Keywords:

Geopolymer concrete, Blast furnace slag, Nanosilica, Polyolefin fibers, Drop weight hammer.

---

## 1. Introduction

In this study, 6 mixing designs including 1 design of control concrete containing Portland cement, 3 designs of geopolymer concrete containing 0 to 8% nanosilica and 2 designs of slag geopolymer concrete containing nanosilica and 1 and 2% of polyolefin fibers were made (Mansourghanaei et. al., 2022; Mansourghanaei et. al., 2022; Mansourghanaei et al., 2022). In line with the prepared mixing plan, 54 concrete specimens were made for impact test (each test averaged the results of 3 concrete specimens) and 24 concrete specimens were made for compressive strength test (each test averaged the results of 4 concrete specimens) which at the age of 90 Days were tested and evaluated. It should be noted that for SEM and XRD tests, shredded tests were used. Concrete compressive strength test was performed at room temperature and impact weight test at room temperature and temperature of 300 and 600°C In the drop weight test, parameters such as impact energy due to initial cracking and failure, adsorbed energy and flexibility index of concrete samples were calculated and evaluated. In order to study the microstructure and verification of the results of hammer impact test, XRD and SEM tests were used on concrete samples.

## 2. Methodology

Replacement and use of materials containing aluminosilicate particles instead of cement in concrete, leads to the production of geopolymer concrete, which reduces the consumption of fossil fuels, while preserving the environment by reducing the toxic gases of carbon dioxide. The term geopolymer was first coined in 1950 by Professor Glukhovsky in the former Soviet Union and was subsequently explored by Jozsef Davidovitz in 1979 (Diegles et al., 2018). Materials containing aluminosilicate particles are known as precursors in the production of geopolymer concrete, which in the presence of alkaline materials lead to a chemical reaction and produce hydrated gels, which fill the pores in the concrete and bond between other components. They increase the mechanical properties of geopolymer concrete.

## 3. Results and discussion

The results of the impact hammer test are shown in the diagram of Fig. 1. Finding and reducing the energy required for initial cracking and failure in concrete samples. In geopolymer concrete, the application of heat of 300 degrees compared to 20 degrees Celsius has reduced the number of strokes in the occurrence of initial cracks for designs 3, 4 and 6, but the number of strokes of designs 2 and 5 in this temperature range increased compared to 20 degrees Celsius. Gives, at a temperature of 600 degrees Celsius for all designs, we see a reduction in the amount of shocks for the initial cracking. With the occurrence of failure in the sample of geopolymer concrete under the temperature of 300 degrees Celsius, we see an increase in the number of blows

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: mhm.ghanaei@iauc.ac.ir (Mohammadhossein Mansourghanaei), m.biklaryan@iauc.ac.ir (Morteza Biklaryan), alireza.mardookhpour@iauc.ac.ir (Alireza Mardookhpour).



in all geopolymer concrete designs and the number of these blows after applying the temperature of 600 degrees Celsius has followed a decreasing trend.

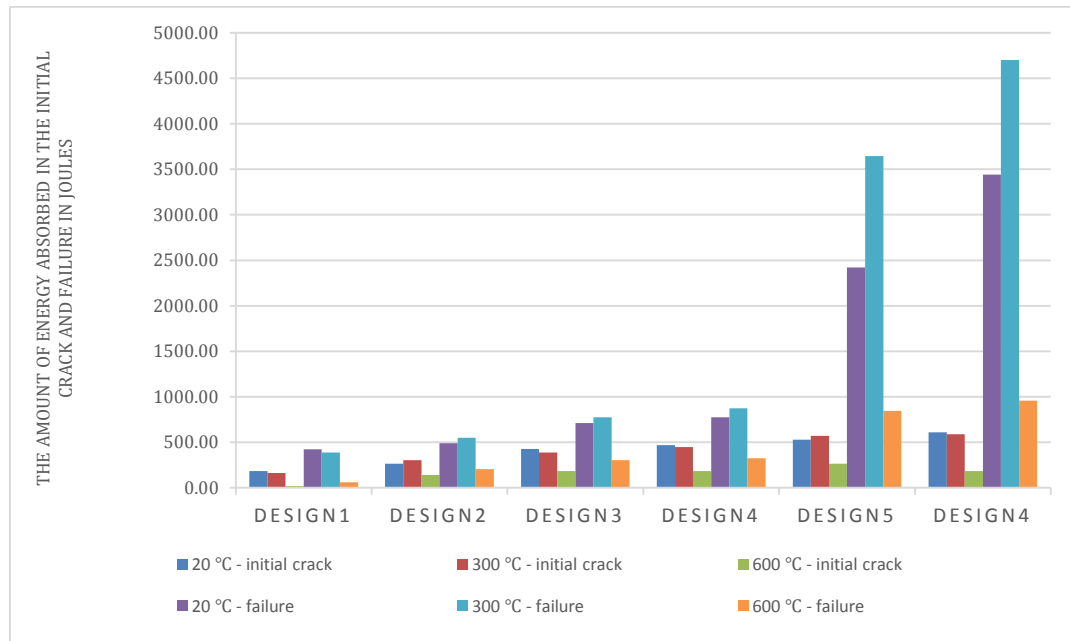


Fig .1. Graph of the amount of energy absorbed in the results of the hammer drop test

Increasing the consumption of nanosilica and polyolefin fibers in geopolymer concrete has improved the results of hammer impact test, this is due to the role of adhesion, filler and nucleation of silica nanoparticles in geopolymer cement mortar and the final products of geopolymerization. The fibers reduce the stress concentration at the tip of the crack, thereby delaying the development of cracks in the concrete specimen and increasing the bearing capacity of the concrete specimen. The impact resistance of concrete specimens against falling hammers in the presence of fibers far exceeds the existence of Nanosilica is in the concrete sample. Fig. 2 shows images of concrete specimens after a hammer drop test.



Fig. 2. Images of concrete specimens after hammer impact test

In XRD studies, two elements of silica (SiO<sub>2</sub>) and calcium manganese carbonate ((Mg<sub>0.64</sub>Ca<sub>0.936</sub>) (CO<sub>3</sub>)) are seen in each of the pre- and post-heating spectra in concrete samples, the third element in the previous spectrum. From heat, it is sodium aluminum silicate (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), but in the post-heating sample, calcium aluminate (Na, Ca) is sodium (Na, Ca) Al (Si, Al) 3O<sub>8</sub>, in both spectra there are elements containing aluminum and silica particles that strengthen The microstructure and strength of the concreted concrete are evident. SEM

images show that by applying heat, water in the pores and capillary spaces between the layers is removed and weakens the microstructure of concrete, but due to the high density of geopolymer concrete, heat causes less damage to the microstructure of geopolymer concrete.

#### 4. Conclusions

Design 6, including slag geopolymer concrete containing 8% nanosilica and 2% polyolefin fibers, was recognized as the optimal design in the performance of hammer impact resistance in all thermal classes.

Plan 6 as the optimal plan, the growth of failure energy by 14.7 and 3.7 times and the growth of absorbed energy by 18 and 12 times, also the growth of flexibility index by 0.74 and 2.7 times, respectively. To control concrete (Fig. 1) and slag geopolymer concrete without nanosilica and polyolefin fibers (Fig. 2) in heat Has experienced 600 degrees Celsius.

The results of hammer impact test, XRD test and interpretation of the results of scanning electron microscope images on samples of control concrete and slag geopolymer concrete were in coordination and overlap.

#### 5. References

- Diegles S, Felipe J, Ana BRP, "Comparative analysis between properties and microstructures of geopolymeric concrete and portland concrete", *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, 7, 4.
- Mansourghanaei M, Biklaryan M, Mardookhpour A, "Experimental study of the effects of adding silica nanoparticles on the durability of geopolymer concrete", *Australian Journal of Civil Engineering*, 2022, 1-13.
- Mansourghanaei M, Biklaryan M, "Experimental evaluation of compressive, tensile strength and impact test in blast furnace slag based geopolymer concrete, under high temperature", *Journal of Civil Engineering Researchers*, 2022, 4 (2), 12-21.
- Mansourghanaei M, Biklaryan M, Mardookhpour A, "Experimental Study of Modulus of Elasticity, Capillary absorption of water and UPV in Nature-Friendly Concrete Based on Geopolymer Materials", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2022, 12 (2), 607-615.