

## Evaluate Effect Of Temperature On mechanical properties of Geopolymer Concretes blast furnace slag by using nanosilica and polyolefin fiber

Mohammadhossein mansourghanaei<sup>1</sup>, Morteza Biklaryan<sup>2\*</sup>, Alireza mardokhpour<sup>3</sup>

1- Ph.D Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

2- Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

3- Department of Civil Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

### ABSTRACT

Cement production has always been associated with environmental challenges due to carbon dioxide emissions. On the other hand, cement production is an energy-intensive process and leads to the consumption of abundant fossil fuels. In order to solve this problem, the production of geopolymer concrete is on the agenda. The researchers decided to reduce the negative effects of cement production and have superior properties than ordinary concrete. Geopolymer cement matrix, due to the production of abundant hydrated gels, has a higher density and cohesion than the Portland cement matrix, and this is the main reason for increasing the resistance of this type of concrete to high heat compared to ordinary concrete. In this study, the effect of heat on the mechanical properties of slag geopolymer concrete containing 0 to 8% nanosilica and 1 to 2% polyolefin fibers at 90 days of processing age was investigated and XRF, XRD and SEM experiments were used to study the microstructure. In the optimal design of slag geopolymer concrete (containing 8% nanosilica and free of fibers), we saw a decrease of 8 and 44% in the values after and before heating in compressive strength tests and determination of ultrasonic pulse speed of concrete, while in control concrete, the results decreased Reached 38 and 37 percent. In slag geopolymer concrete containing 8% nanosilica and 2% fibers, tensile strength and modulus of elasticity equal to 14 and 34% showed results after and before heating, for control concrete these figures decreased by 51 and 59% in the results. Received, the results of the falling hammer impact test also had a reduction in the resistance of heat-exposed concrete to hammer blows. In the end, the microstructural studies were in overlap and in coordination with the results of the tests of this study.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 22 March 2021

**Revise Date:** 26 June 2021

**Accept Date:** 04 July 2021

### Keywords:

Geopolymer Concrete

Blast furnace slag

Nanosilica

Polyolefin fibers

Mechanical properties

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.277150.2382>

\*Corresponding author: Morteza Biklaryan

Email address: M.biklaryan@iauc.ac.ir

## بررسی تاثیر حرارت بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمر سرباره ای حاوی نانوسیلیس و

### الیاف پلی الفین

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

۱- دانشجوی دکتری عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

۳- گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

### چکیده

تولید سیمان همواره با چالش های زیست محیطی ناشی از انتشار گاز دی اکسید کربن همراه بوده است، از طرفی تولید سیمان فرایندی انرژی بر است و منجر به مصرف سوخت های فسیلی فراوان می گردد، در راستای حل این مشکل، تولید بتن ژئوپلیمر در دستور کار محققین قرار گرفت تا ضمن کاهش اثرات منفی ناشی از تولید سیمان، دارای خواصی برتر نسبت به بتن معمولی باشد. ماتریس سیمان ژئوپلیمری به دلیل تولید ژل های هیدراته فراوان، دارای تراکم و انسجام بیشتری نسبت به ماتریس سیمان پرتلند می باشد و این امر دلیل اصلی افزایش مقاومت این نوع از بتن در مواجهه با حرارت بالا نسبت به بتن معمولی است. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تاثیر حرارت بر خصوصیات مکانیکی بتن ژئوپلیمر سرباره ای حاوی ۰ تا ۸ درصد نانوسیلیس و ۱ تا ۲ درصد الیاف پلی الفین در سن عمل آوری ۹۰ روزه پرداخته شد و بمنظور بررسی ریزساختاری از آزمایش های XRF، XRD و SEM استفاده گردید. در طرح بهینه بتن ژئوپلیمر سرباره ای (حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و فاقد الیاف)، شاهد کاهش ۸ و ۴۴ درصدی مقادیر نتایج بعد و قبل از حرارت در آزمون های مقاومت فشاری و تعیین سرعت پالس التراسونیک بتن بودیم در حالیکه در بتن کنترل، کاهش نتایج به میزان ۳۸ و ۳۷ درصد رسید. در بتن ژئوپلیمر سرباره ای حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته برابر ۱۴ و ۳۴ درصد کاهش نتایج بعد و قبل از حرارت را نشان داد، برای بتن کنترل این ارقام به میزان ۵۱ و ۵۹ درصد کاهش در نتایج حاصله رسید، نتایج آزمون ضربه چکش افتان نیز کاهش مقاومت بتن در معرض حرارت در برابر ضربات چکش را دارا بود. در پایان، بررسی های ریزساختاری در همپوشانی و هماهنگی با نتایج حاصله از آزمون های این پژوهش بودند.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، سرباره کوره آهنگدازی، نانوسیلیس، الیاف پلی الفین، خواص مکانیکی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.277150.2382	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.277150.2382	۱۴۰۰/۱۰/۳۰	۱۴۰۰/۰۴/۱۳	۱۴۰۰/۰۴/۱۳	۱۴۰۰/۰۴/۰۵	۱۴۰۰/۱۰/۰۲
				*نویسنده مسئول:		مرتضی بیک لریان
				پست الکترونیکی:		M.biklaryan@iauc.ac.ir

## ۱- مقدمه

تولید سیمان همواره با دغدغه های زیست محیطی ناشی از آلودگی هوا همراه بوده است، تحقیقات نشان می دهد که کارخانجات تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی اکسیدکربن وارد شده به جو کره زمین می باشند [۱]. بتن ژئوپلیمر در راستای کاهش مضرات ناشی از بتن معمولی در ابتدا توسط محقق فرانسوی بنام ژوزف داویدوویتس<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۲ میلادی مطرح شد [۲]. میزان دی اکسید کربن تولید شده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است [۳]. تولید بتن ژئوپلیمری توسط روش های متداول تکنولوژی بتن انجام می گیرد [۴]. در تولید این نوع از بتن از سیمان استفاده نمی گردد و بجای آن از دو ماده که اولی بر پایه مواد سیلیسی و آلومیناتی بوده و نقش چسبندگی و پرکنندگی را در بتن ایفا می کند و بعنوان پیش ماده در تولید بتن ژئوپلیمر شناخته می شود، دومین ماده شامل محصولات قلیافعال می باشند که نقش فعال سازی را در تولید بتن ژئوپلیمر ایفا می کنند. از مواد سیلیسی و یا سیلیسی آلومیناتی می توان پوزولان هایی مانند سرباره کوره آهنگدازی، خاکستر بادی و نانوسیلیس را نام برد و از مواد قلیایی می توان به محلول هیدراکسیدسدیم و سیلیکات سدیم اشاره کرد، این مصالح در ترکیب با هم موجب تسریع در فرایند ژئوپلیمریزاسیون در بتن ژئوپلیمر می گردند و تراکم و انسجام را در ملات ایجاد می کنند. تحقیقات نشان داده است که محصولات حاصل از فرایند ژئوپلیمریزاسیون مزایای ویژه ای از قبیل خواص مکانیکی عالی، مقاومت مناسب در برابر دمای بالا و حملات شیمیایی، جمع شدگی کم و دیگر موارد دارند [۵].

در سال های اخیر کاربرد نانو ذرات سیلیس برای بهبود خواص بتن، چشم انداز گسترده ای در برابر علم تکنولوژی بتن ایجاد کرده است [۶]. نانو ذرات به علت اندازه ذرات بسیار کوچک و سطح ویژه بالای آنها، خصوصیات ویژه ای را در طرح اختلاط بتن از خود نشان داده اند [۷]. بهبود مقاومت فشاری [۸] و مدول الاستیسیته و سرعت امواج آلتراسونیک با استفاده از نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمر دیده شده است [۹]. وجود ذرات نانوسیلیس و سرباره کوره آهنگدازی در بتن ژئوپلیمر موجب تسریع در فرایند واکنش پذیری و ژئوپلیمریزاسیون می گردد، این فرایند منتج به تولید ژل های هیدراته از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته<sup>۲</sup>، سیلیکات آلومینیم کلسیم هیدراته<sup>۳</sup> و سیلیکات آلومینیم سدیم هیدراته<sup>۴</sup> می شود که نقش بسزایی در افزایش چگالی، تراکم و چسبندگی در ماتریس سیمان ژئوپلیمری ایفا می کند. نانوسیلیس به دلیل اندازه کوچک ذرات خود می تواند با پرکردن خلل و فرج های باقی مانده در بتن، باعث بهبود مقاومت آن شود و بعنوان یک مکمل در ساخت بتن بکار رود [۱۰]. از طرفی مطالعات گذشته نشان داده است که ضعف بتن بیشتر در کشش است و بمنظور رفع این نقیصه می توان ضمن مسلح کردن بتن با آرماتور فولادی از الیاف در فرایند تولید بتن نیز استفاده نمود، وجود الیاف در بتن نقش پل زدگی را در مواجهه با ترک ها در بتن ایجاد می کند و فرایند کسترش ترک را در برابر بارهای وارده به تاخیر می اندازد و از این طریق باعث افزایش ظرفیت باربری اعضا بتنی در برابر نیروی کششی می گردد، همچنین تحقیقات نشان داده است که اضافه نمودن الیاف پلی الفین به تیر بتنی با افزایش مدول الاستیسیته کمک شایانی به بهبود مقاومت بعد از ترک خوردن می کند [۱۱]. حضور سرباره کوره آهنگدازی، نانوسیلیس و الیاف پلی الفین موجب بهبود خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمر می گردد، خواص بالای این مصالح باعث می گردد تا مصرف آن در بتن ژئوپلیمر موجب افزایش مقاومت حرارتی بتن گردد.

هنگامیکه بتن در برابر آتش یا حرارت زیاد قرار می گیرد، ممکن است به دلیل کاهش مقاومت و سختی، ظرفیت باربری پس از آتش سوزی در بتن کاهش قابل توجهی یابد [۱۲]. میزان خسارت ناشی از آتش ارتباط مستقیم با مدت و دمای ایجاد شده دارد [۱۳]. در سال های اخیر ژئوپلیمرها به دلیل پایداری شیمیایی، مقاومت زیاد در برابر حرارت و انقباض کم نسبت به سیمان پرتلند مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند [۱۴]. حرارت بالا در بتن می تواند اثرات مخربی بر ریزساختار و کلان ساختار بتن داشته باشد، حرارت اغلب از طریق خروج آب از حفرات و فضاهای مویینه در ریزساختار بتن موجب تضعیف در خصوصیات مکانیکی و دوام بتن می گردد. حرارت بالا می تواند موجب گسستگی در ساختار ژل های هیدراته موجود در ملات سیمان گردد و نقش بسزایی در تضعیف پیوندهای بین نواحی

<sup>1</sup> Joseph Davidovits

<sup>2</sup> Tobermorite Gel (C-S-H)

<sup>3</sup> Ettringite Gel (C-A-S-H)

<sup>4</sup> Gel N-A-S-H

انتقال بین سطحی (ITZ) داشته باشد. تحقیقات نشان داده است که با توجه به فشار زیاد بین حفره ای، خروج آب از فضای پیوند شیمیایی در سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) منجر به خرابی بتن در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس می شود، تغییرات قابل توجهی از خواص مکانیکی بتن تحت دمای بین ۲۷ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس مشاهده نمی گردد اما کاهش تا ۴۰ درصد در مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن و مدول الاستیسیته، بعد از اعمال دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در مراحل اولیه اتفاق می افتد [۱۵]. در سایر تحقیقات نشان داده شده است که حرارت بین ۵۰۰ الی ۹۰۰ درجه سلسیوس می تواند موجب تغییرات کریستالی، تخریب ریزساختار ژل های هیدراته و تشکیل کانی های کربناتی در ماتریس بتن می گردد [۱۷-۱۶، ۱۴].

## ۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

سرپاره کوره آهنگدازی در این تحقیق از شرکت ذوب آهن اصفهان تهیه شده است، این ماده تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت، مشخصات شیمیایی سرپاره کوره آهنگدازی مصرفی در جدول ۱ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۲ نشان داده شده است. تحقیقات نشان دهنده این موضوع می باشد که سرپاره کوره آهنگدازی متشکل از سیلیکات کلسیم و آلومینات (تقریباً ۹۰ درصد) الزامات مربوط به مواد پوزولانی را برآورده می سازد [۱۸]. مشخصات شیمیایی نانوسیلیس مصرفی در این تحقیق مطابق جدول ۳ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۴ ارائه گردیده است. در تهیه بتن حاوی نانوسیلیس ضروری است تا مصرف نانوسیلیس در محدوده مشخصی انجام گیرد. تحقیقات نشان داده است که با ریزتر شدن اندازه نانوذرات در مخلوط بتن، بجای اینکه آنها 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 [۱۹]. نانوسیلیس به همراه سرپاره بعنوان مواد پایه تشکیل دهنده بتن ژئوپلیمر در این تحقیق شناخته می شوند و نقش چسبندگی و پرکنندگی را در ساختار بتن ایفا می کنند. الیاف مصرفی در این تحقیق از نوع پلی الفین تحت استاندارد ASTM D7508/D7508M مورد استفاده در ساخت بتن ژئوپلیمر قرار گرفت، برخی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی این الیاف در جدول ۵ نشان داده شده است. تحقیقات نشان می دهد 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 پلی الفین بیشترین کاربرد را دارند [۲۰].

مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II دیلمان مصرفی جهت ساخت بتن کنترل در جدول ۶ ارائه شده است، این سیمان تحت استاندارد En 197-1 تولید گردیده است و برخی از مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی آن در جدول ۷ ارائه گردیده است. آب مصرف شده بمنظور ساخت طرح های اختلاط تحقیق پیش رو از آب شرب شهر لاهیجان می باشد، این آب دارای PH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص  $1000 \text{ kg/m}^3$  است. منحنی دانه بندی سنگدانه های مصرفی در محدوده استاندارد ASTM C33 می باشد، سنگدانه های تأمین شده از کارخانجات شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده و به لحاظ حذف ناخالصی های آلی، پاک شده است، برخی از خصوصیات ریزدانه و درشت دانه مصرفی در این تحقیق بر اساس جدول ۸ تعیین گردیده است.

ابر روان کننده مصرفی در این تحقیق از نسل چهارم بر پایه پلی کربوکسیلات نرمال بوده و از شرکت دوروچم خاورمیانه خریداری شده است، این ماده جهت جبران ضعف کارایی و حفظ روانی ترکیب ملات در بتن استفاده می گردد. برخی از مشخصات ابرروان کننده پلی کربوکسیلات نرمال به شرح جدول ۹ ارائه گردیده است. تحقیقات نشان داده است که بتن ژئوپلیمر تازه به علت لزجت بالا موجود در محلول قلیایی 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 [۲۱].

محلول قلیایی مصرفی در این تحقیق ترکیبی از محلول سیلیکات سدیم و هیدراکسید سدیم با نسبت وزنی ۲/۵ می باشد که با وزن مخصوص ترکیبی برابر  $1483 \text{ kg/m}^3$  مورد استفاده قرار گرفته است، برخی از مشخصات محلول قلیا فعال مصرفی در این پژوهش در جدول ۱۰ نشان داده شده است. تحقیقات انجام شده نشان می دهد که استفاده ترکیبی از هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به علت شکل گیری مقادیر بیشتری از سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) در هنگام استفاده از سیلیکات کلسیم، منجر به مقاومت فشاری بالاتری نسبت به حالت تنها استفاده از هیدروکسید کلسیم می شود [۲۱].

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی

نام مصالح	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	L.O.I
سرباره	۲۶/۲۲	۳۵/۵	۹/۱۷	۷/۴۵	۶/۲۴	۰/۱۲	۱/۲۱	۰/۹۲	۲/۴۹	۰/۱۸	۰/۰۲

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و مکانیکی سرباره کوره آهنگدازی

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

جدول ۳: مشخصات شیمیایی نانوسیلیس

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

جدول ۴: مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانوسیلیس

رنگ	حالت	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	سطح مخصوص (Cm <sup>2</sup> /gr)	قطر ذرات (nm)	اندازه ذرات (nm)	خلوص
سفید	جامد	۷۰۰	۲۰۰	۷ الی ۱۴	۲۰ الی ۶۰	٪ ۹۹/۸

جدول ۵: مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی الفین

وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت کششی (N/mm <sup>2</sup> )	طول (mm)	قطر (mm)	شکل سطحی	نسبت منظر
۹۲۰	۵۰۰	۳۰	۰/۸	مواج	۳۷/۵

جدول ۶: مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II

L.O.I	C <sub>3</sub> A	I.R	Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cl
MAX 1/5	۵/۵ - ۷/۵	MAX 0/7	MAX 0.6	۲ - ۲/۳	۱/۴۵ Max	-	۳/۵ - ۳/۸	۴/۵ - ۴/۸	۲۲ - ۲۱	Max 0/003

جدول ۷: مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی سیمان پرتلند تیپ II

وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	سطح مخصوص (Cm <sup>2</sup> /gr)	گیرش اولیه (min)	گیرش ثانویه (min)
۲۳۵۰	۳۲۰۰ - ۳۰۰۰	۱۱۵ < ۱۳۰	۱۹۰ < ۲۰۵

جدول ۸: مشخصات سنگدانه ها

مصالح دانه ای بتن	حداقل قطر (mm)	حداکثر قطر (mm)	مدول نرمی (mm)	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	درصد جذب آب
شن	۴/۷۵ (mm)	۱۹	۲/۸۵	۲۷۵۰	۲/۲
ماسه	۷۵ (μm)	۴/۷۵	۲/۸۵	۲۶۵۰	۲/۹

جدول ۹: مشخصات ابر روان کننده پلی کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت فیزیکی	رنگ	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	استاندارد صرف	PH	میزان یون کلر	نقطه اشتعال
پلی کربوکسیلات نرمال	مایع	قهوه	۱۱۰۰	ASTM C494	حدود ۷	ندارد	ندارد

جدول ۱۰: مشخصات محلول قلیا فعال

نوع محلول	فرمول مولکولی	رنگ	مولاریته (mol/m <sup>3</sup> )	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (p)	دمای ذوب (C)	جرم مولی (gr/mol)	نسبت وزنی (مولار)	نسبت وزنی (مولار)
هیدرآکسید سدیم	NaOH	سفید	۱۲	۲۱۳۰	۳/۳	۳۱۸	۳۹/۹۹	-	سیلیکات به آب
سیلیکات سدیم	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	سفید	۱۲	۲۴۰۰	-	۱۰۸۸	۱۲۲/۰۶	۲/۴	۴۷

## ۲-۲- طرح اختلاط

استاندارد مجزایی برای طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری موجود نمی باشد، لذا به تبعیت از برخی پژوهش های آزمایشگاهی [۲۲] در این تحقیق از طرح اختلاط تحت استاندارد ACI 211.1-89 استفاده گردیده است، در این راستا بمنظور تعیین میزان خواص مکانیکی بتن تحت حرارت، ۶ طرح اختلاط با نسبت های مختلف مصالح مطابق با جدول ۱۱ تهیه گردید، در این جدول طرح ۱ شامل بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند بوده و طرح های ۲ الی ۴ شامل بتن ژئوپلیمری به ترتیب حاوی ۱۰٪، ۹۶٪ و ۹۲٪ سرباره کوره آهنگدازی و ۰٪، ۴٪ و ۸٪ نانوسیلیس می باشند، طرح ۴ از بین طرح های ۲، ۳ و ۴ بعنوان طرح بهینه پس از بررسی نتایج اولیه آزمون ها 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 خواص مکانیکی بتن تحت حرارت مورد ارزیابی قرار گیرد.

در طرح های اختلاط این پژوهش، درصدهای تعیین شده برای مصالح مصرفی با توجه به استانداردها (طرح اختلاط 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 قلیایی به سرباره در بتن ژئوپلیمر بطور ثابت ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است و مقادیر سیمان و یا سرباره (با درصد جایگزین نانوسیلیس)، آب و یا محلول قلیایی، شن و ابروان کننده ثابت در نظر گرفته شده اند و با تعیین وزن الیاف (با توجه به درصد وزن مخصوص خودش)، مقدار ماسه بعنوان متغیر محاسبه و تعیین گردید.

جدول ۱۱: مشخصات طرح اختلاط بتن (براساس وزن مصرفی در هر متر مکعب)

شماره طرح	نوع بتن	kg/m <sup>3</sup>						آب	سیمان	پرتلند
		سرباره	نانوسیلیس	الیاف	شن	ماسه	ابروان کننده			
۱	پرتلند	۰	۰	۰	۱۰۰۰	۷۶۱/۱۳	۹	۴۵۰	۲۰۲/۵	
۲	ژئوپلیمر	۴۵۰	۰	۰	۱۰۰۰	۸۱۶/۱۰	۹	۰	۲۰۲/۵	
۳	ژئوپلیمر	۴۳۲	۱۸	۰	۱۰۰۰	۷۶۷/۴۲	۹	۰	۲۰۲/۵	
۴	ژئوپلیمر	۴۱۴	۳۶	۰	۱۰۰۰	۷۱۸/۷۵	۹	۰	۲۰۲/۵	
۵	ژئوپلیمر	۴۳۲	۳۶	۹/۲	۱۰۰۰	۶۷۲/۷۸	۹	۰	۲۰۲/۵	
۶	ژئوپلیمر	۴۳۲	۳۶	۱۸/۴	۱۰۰۰	۶۴۶/۲۸	۹	۰	۲۰۲/۵	

## ۲-۳- نحوه ساخت و عمل آوری نمونه ها

در پژوهش حاضر، تعداد ۱۹۸ نمونه بتنی تهیه گردید که در دوره عمل آوری ۹۰ روزه در دو حالت قبل و بعد از حرارت مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفتند، بمنظور انجام آزمایش های XRF، XRD و SEM از نمونه های شکسته شده استفاده گردید. مصالح مصرفی در ابتدا براساس جدول طرح اختلاط ۱۱ توزین گردیدند و در ادامه، مصالح خشک طی چند مرحله به داخل میکسر در حال چرخش اضافه شدند و فرایند ترکیب مصالح خشک ۳ دقیقه به طول انجامید، سپس آب، ابر روان کننده و محلول قلیایی به ترکیب اضافه و ۳ دقیقه دیگر فرایند میکس به طول انجامید.

پس از اتمام مرحله ترکیب، ملات بتن در داخل قالب های روغن کاری شده از قبل، در دو مرحله ریخته شدند و در هر مرحله عمل تراکم به وسیله ۲۵ ضربه میله انجام گرفت، پس از اتمام بتن ریزی در قالب، نمونه های بتنی به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس) نگهداری شدند، سپس قالب برداری انجام گرفت و نمونه های بتن کنترل در داخل آب با دمای اتاق تا زمان انجام

آزمایش نگهداری و عمل آوری شدند، نمونه های بتن ژئوپلیمر بمنظور افزایش استحکام، به مدت ۴۸ ساعت تحت حرارت ۶۰ درجه سلسیوس داخل گرمکن قرار داده شدند، سپس تا زمان انجام آزمایش در دمای اتاق نگهداری شدند. بررسی ها نشان داده است که مخلوط های بتن ژئوپلیمر تحت عمل آوری حرارت ۶۰ درجه در ۲۴ ساعت اولیه، توانسته پس از ۳ روز بیش از ۷۵٪ از مقاومت ۲۸ روزه بین ۶۰ الی ۸۵ مگاپاسکال را کسب نمایند [۲۳]. همچنین گزارش شده است که مقاومت بتن ژئوپلیمر با افزایش دمای عمل آوری افزایش می یابد [۲۴].

#### ۴-۲- روش های آزمایش و استانداردها

آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، تعیین سرعت عبور پالس التراسونیک و آزمون ضربه ای چکش افتان بتن در دمای اتاق به ترتیب براساس استانداردهای BS12390-3، ASTM496، ASTM469، ASTM597، و ACI544-2R انجام گرفتند.

بمنظور انجام آزمون های ذکر شده تحت حرارت، از روش استاندارد ISO834 بر پایه مقاومت حرارتی استفاده گردید، در این استاندارد دمای اعمال شده به نمونه های بتنی تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس و مدت زمان اعمال حرارت یک ساعت توصیه شده است. از طرفی مطالعات انجام شده بر روی سایر تحقیقات نشان داده است که با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس در بتن ژئوپلیمر شاهد کاهش مقاومت (۵ الی ۳۰ درصد) در نمونه های بتنی هستیم، این امر می تواند به دلیل افزایش فشار بخار در ساختار ژئوپلیمر پیوسته باشد، این فرایند در کوتاه مدت به دلیل عدم تکامل ساختار ژئوپلیمر آب می تواند به راحتی تبخیر شود، اما با افزایش سن (در محدوده ۹۰ روزه) در حالی که ساختار ژئوپلیمر با افزایش سن عمل آوری متراکم تر می شود و نفوذپذیری آن نیز کاهش می یابد، فشار بخار آب به مقدار حداکثر خود می رسد و ساختار متراکم ژئوپلیمر قادر به محدود کردن تنش حرارتی زیاد نیست، این محققین اعلام داشتند که با افزایش حرارت تا ۶۰۰ درجه سلسیوس بخش اعظمی از مقاومت (۷۰ الی ۹۰ درصد) بتن کاهش می یابد، همچنین اعمال حرارت فراتر از ۶۰۰ درجه سلسیوس با توجه به ایجاد ساختاری به شدت متخلخل، موجب از دست رفتن مقاومت باقیمانده در بتن ژئوپلیمر خواهد شد [۱۵-۱۴، ۲۸-۲۵]. بر اساس این مطالعات، در این مقاله بمنظور بررسی مقاومت حرارتی بتن ژئوپلیمری تحت آزمون های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، تعیین سرعت موج التراسونیک و تست ضربه، از دمای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس بهره گرفته شد.

در ادامه انجام این پژوهش، قبل از انجام هر یک از آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و تعیین سرعت عبور پالس التراسونیک در سن عمل آوری ۹۰ روزه، نمونه های بتنی به مدت ۱ ساعت در کوره تحت دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند، سپس نمونه ها به مدت ۱ ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا تحت تاثیر شُک دمایی قرار نگیرند، پس از خروج نمونه ها از کوره، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند تا به تعادل دمایی برسند. آزمایش مقاومت در برابر ضربه های چکش افتان در نمونه های بتنی در سه رده حرارتی ۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در دوره عمل آوری ۹۰ روزه انجام گرفت، روش اعمال حرارت ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس بر روی نمونه های بتنی در این آزمون، مشابه اعمال حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس انجام پذیرفت.

میزان مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن نمونه های بتنی قبل و بعد از حرارت توسط دستگاه چک بتن شکن با سرعت بارگذاری در محدوده تعیین شده استانداردها و آزمایش تعیین سرعت موج التراسونیک با دستگاه از نوع داندیت<sup>۵</sup> با فرکانس لرزشی ۵۵ khz و دقت زمان فاصله حرکت پالس ۰/۱٪ و  $\pm 0.2$ ، اندازه گیری شدند. آزمایش تست ضربه چکش افتان مطابق استاندارد ذکر شده با انداختن مکرر چکش با قطر گوی ۶۳/۵ میلیمتر به وزن ۴/۵۴ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵۷ میلیمتر بر روی نمونه ها انجام پذیرفت،

بمنظور تعیین نوع و مقادیر عناصر تشکیل دهنده بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر از آزمایش غیرمخرب طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) در سن عمل آوری ۷ روزه در دمای اتاق استفاده گردید، بررسی خصوصیات کمی و کیفی و ساختار کریستالین بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر توسط آزمون غیرمخرب طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) در سن عمل آوری ۹۰ روزه قبل و بعد از حرارت انجام گرفت، بمنظور مشاهده اثرات عناصر تشکیل دهنده در بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر بر ریزساختار این بتن ها از تصاویر میکروسکوپ الکترونیک

<sup>5</sup> DUNDIT MODEL PC1012

رویشی (SEM) در سن عمل آوری ۹۰ روز قبل و بعد از حرارت استفاده گردید. در آزمون های SEM، XRD و XRF تحت حرارت، از روش اعمال حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس بهره گرفته شد.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

#### ۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن قبل و بعد از حرارت

نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی ۳۶ عدد نمونه بتنی با ابعاد مکعب ۱۰\*۱۰\*۱۰ سانتی متر در دوره عمل آوری ۹۰ روزه تهیه شده از بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر در دمای اتاق و پس از حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس برای تمام طرح های اختلاط، در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است، در شکل ۲ نیز نمونه در حال آزمایش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بتن به نمایش در آمده است.

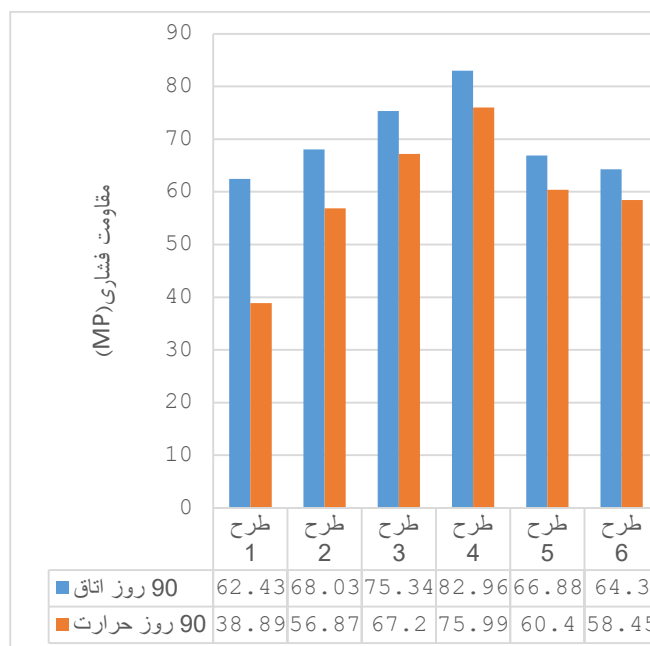
براساس نتایج حاصله، برای تمامی طرح های اختلاط بتن شاهد کاهش میزان مقاومت فشاری نمونه های حرارت دیده نسبت به نمونه ها در دمای اتاق هستیم، بیشترین میزان افت مقاومت، در بتن طرح ۱ (بتن کنترل) با ۳۷ درصد کاهش مقاومت تحت حرارت نسبت دمای اتاق مشاهده می گردد، از طرفی بیشترین مقدار مقاومت فشاری کسب شده نمونه های بتنی پس از حرارت متعلق به طرح ۴ به میزان ۷۵/۹۹ مگاپاسکال است.

افزایش نانوسیلیس تا ۸ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه های بتن ژئوپلیمر در دمای اتاق و پس از حرارت گردیده است، این امر به دلیل سطح ویژه بالای ذرات نانوسیلیس و خواص چسبندگی و پرکنندگی بالای این ماده می باشد که موجب مشارکت بیشتر ذرات و تسریع در فرایند شیمیایی و تشکیل حجم بالایی از ژل های هیدراته می گردد و افزایش استحکام در نمونه های بتنی را به دنبال دارد.

افزودن الیاف پلی الفین به بتن ژئوپلیمری در طرح ۵ و ۶ سبب کاهش مقاومت در این طرح ها نسبت به طرح ۴ با درصد سرباره و نانوسیلیس یکسان شده است. این امر می تواند به دلیل ورود نقص های داخلی کوچک در ماتریس ژئوپلیمر ناشی از اضافه الیاف باشد [۲۹]. در تمام طرح های اختلاط بتن ژئوپلیمر تحت حرارت، شاهد افزایش میزان مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن کنترل هستیم.



شکل ۲: نمونه تحت بار فشاری توسط دستگاه جک بتن شکن



شکل ۱: نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن در برابر حرارت



## ۲-۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن قبل و بعد از حرارت

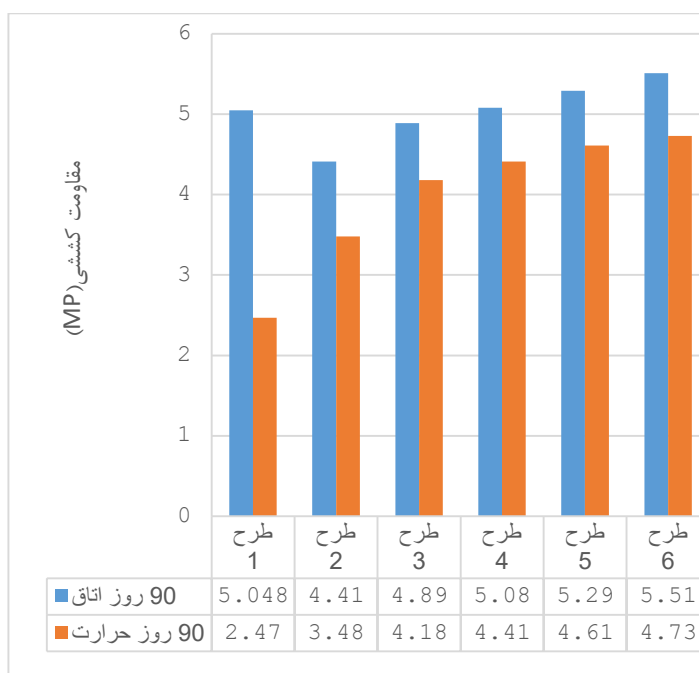
نتایج آزمایش مقاومت کششی بر روی ۳۶ عدد نمونه استوانه ای بتنی با ابعاد ۳۰\*۱۵ سانتی متر حاصل از بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر در دمای اتاق و پس از حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس در سن ۹۰ روز برای تمام طرح های اختلاط، در شکل ۳ نشان داده شده است، در شکل ۴ نمونه بتنی در حال آزمایش مقاومت کششی مشاهده می گردد.

براساس نتایج حاصله، در تمامی طرح های اختلاط بتن شاهد کاهش میزان مقاومت کششی نمونه های بتنی در معرض حرارت نسبت به نمونه های بتنی در معرض دمای اتاق هستیم، در این راستا بیشترین میزان افت مقاومت نمونه های در معرض حرارت نسبت به دمای اتاق، متعلق به بتن طرح ۱ با ۵۱ درصد کاهش و کمترین این مقدار متعلق به بتن طرح ۵ با ۱۲ درصد افت مقاومت کششی مشاهده می گردد.

افزودن نانوسیلیس تا ۸ درصد به دلیل خواص پوزولانی بالا موجب افزایش میزان مقاومت کششی در بتن ژئوپلیمر گردیده است، افزودن الیاف پلی الفین به بتن ژئوپلیمر با توجه به نقش پل زدگی بین اجزا و صفحات ترک، موجب افزایش میزان مقاومت کششی نمونه بتنی طرح ۵ نسبت به طرح ۴ با درصد های مشابه نانوسیلیس و سرباره گردیده است، در تمام طرح های اختلاط بتن ژئوپلیمر حرارت دیده، شاهد افزایش میزان مقاومت کششی بتن، نسبت به نمونه بتن کنترل در طرح ۱ هستیم.



شکل ۴: نمونه بتنی تحت بارگذاری کششی



شکل ۳: نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن در برابر حرارت

## ۳-۳- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بتن قبل و بعد از حرارت

نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بر روی ۳۶ عدد نمونه استوانه ای از بتن با ابعاد ۳۰\*۱۵ سانتی متر حاصل از بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر در دمای اتاق و پس از حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس در سن ۹۰ روز عمل آوری، برای تمام طرح های اختلاط، در شکل ۵ نشان داده شده است، در شکل ۶ نیز نمونه بتنی در حال انجام آزمایش مدول الاستیسیته مشاهده می گردد.

براساس نتایج حاصله، در تمامی طرح های اختلاط بتن، شاهد کاهش میزان مدول الاستیسیته نمونه های بتنی حرارت دیده نسبت به نمونه های بتنی در معرض دمای اتاق هستیم. بیشترین میزان مدول الاستیسیته کسب شده در بتن بعد از حرارت از بین تمامی

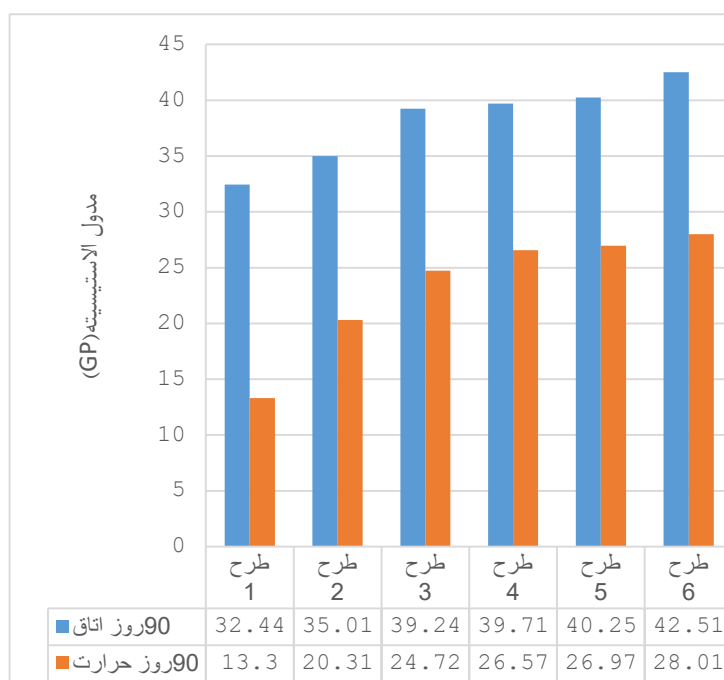
طرح ها، متعلق به طرح ۶ به میزان ۲۸/۰۱ گیگاپاسکال است. بیشترین میزان افت مدول الاستیسیته در بتن بعد از حرارت نسبت به قبل از حرارت، متعلق به طرح ۱ با ۵۹ درصد کاهش مشاهده می گردد. در تمام طرح های اختلاط بتن ژئوپلیمر تحت حرارت، شاهد افزایش میزان مدول الاستیسیته بتن ژئوپلیمر نسبت به بتن کنترل هستیم.

افزودن نانوسیلیس تا ۸ درصد به بتن ژئوپلیمر با توجه به نقش چسبندگی، پرکنندگی و هسته زایی بالای ذرات نانوسیلیس در ترکیب خمیر و ملات سیمان ژئوپلیمری موجب افزایش میزان مدول الاستیسیته بتن گردیده است. حضور نانوسیلیس موجب افزایش حجم تولید ژل های هیدراته در بتن ژئوپلیمر می گردد، این ژل ها از طریق پر کردن منافذ و فضاهای مویینه بین لایه ای همچنین بهبود پیوند در نواحی فصل مشترک بین سنگدانه ها با ملات سیمان، موجب افزایش تراکم و سختی در بتن می گردند.

افزودن الیاف پلی الفین به بتن ژئوپلیمر در طرح ۵ و ۶، موجب افزایش میزان مدول الاستیسیته کسب شده در بتن این دو طرح نسبت به طرح ۴ با درصد مشابه نانوسیلیس و سرباره گردیده است. الیاف ها با پل زدن بین صفحات ترک خورده سبب به تاخیر انداختن گسترش ترک ها و حفظ موضعی نمودن ترک ها در بتن می گردند. نوع، جنس و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف های مصرفی در بتن نقش بسزایی در میزان کسب مدول الاستیسیته بتن ایفا می کنند.



شکل ۶: نمونه تحت آزمایش مدول الاستیسیته



شکل ۵: نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بتن در برابر حرارت

### ۳-۴- نتایج آزمایش تعیین سرعت پالس تراسونیک بتن قبل و بعد از حرارت

نتایج آزمایش تعیین سرعت عبور پالس تراسونیک بر روی ۳۶ عدد نمونه بتن با ابعاد دیسکی ۱۵\*۶/۳۶ سانتی متری حاصل از بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری در دمای اتاق و پس از حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس در دوره عمل آوری ۹۰ روزه، برای تمام طرح های اختلاط، در شکل ۷ نشان داده شده است.

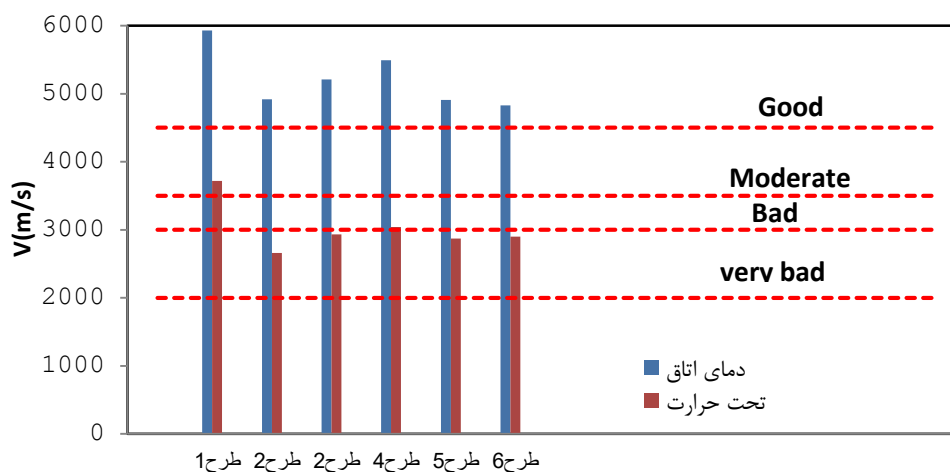
براساس نتایج حاصله، در تمامی طرح های اختلاط بتن، شاهد کاهش میزان سرعت عبور پالس تراسونیک نمونه های در معرض حرارت نسبت به نمونه های قرار گرفته در دمای اتاق هستیم، بیشترین میزان افت سرعت عبور پالس تراسونیک در بتن بعد از حرارت نسبت به بتن قبل از حرارت، متعلق به طرح ۲ با ۴۵ درصد کاهش سرعت مشاهده می گردد که در محدوده کنترلی خیلی بد (Very bad)

نمودار قرار گرفته است، بیشترین میزان سرعت عبور پالس التراسونیک در بتن تحت حرارت متعلق به طرح ۱ حاوی بتن کنترل به میزان ۳۷۲۰ متر بر ثانیه است که در محدوده متوسط (Moderate) نمودار قرار گرفته است، در تمام طرح های اختلاط بتن ژئوپلیمر در دمای اتاق و بعد از حرارت، شاهد کاهش میزان سرعت عبور پالس التراسونیک بتن نسبت به میزان سرعت عبور پالس در بتن طرح ۱ (بتن کنترل) هستیم، سرعت عبور پالس التراسونیک در بتن در دمای اتاق برای تمامی طرح ها در محدوده کنترلی خوب (Good) نمودار قرار دارد. تحقیقات پیشین نشان داده است تا زمانی که مقدار سرعت پالس التراسونیک در دسته خوب قرار بگیرد به این معنی است که بتن مورد نظر دارای ترک ها و یا حفره های بزرگی که بر تمامیت ساختار نمونه تاثیرگذار باشد نیست [۳۰].

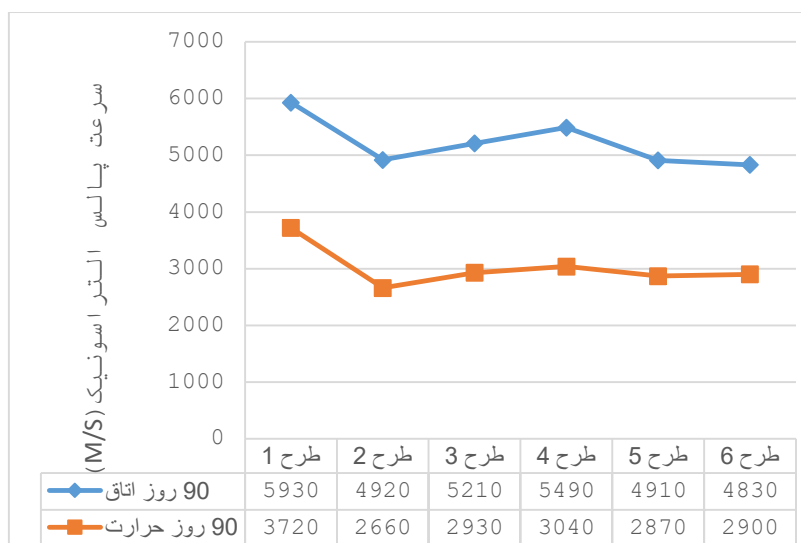
در نمودار شکل ۸، اثرات افزودن نانوسیلیس و الیاف پلی الفین بر سرعت عبور پالس التراسونیک در بتن ژئوپلیمر در دوره عمل آوری ۹۰ روز مشاهده می گردد. افزایش نانوسیلیس تا ۸ درصد به بتن ژئوپلیمری موجب افزایش سرعت عبور پالس التراسونیک در بتن قبل و بعد از حرارت گردیده است، این امر ناشی از مشارکت بالای ذرات نانوسیلیس در فرایند ژئوپلیمریزاسیون و تولید ژل های هیدراته می باشد که از طریق پر کردن منافذ و حفرات در ساختار بتن علی الخصوص نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) حد فاصل بین سنگدانه ها (یا الیاف) با ملات ژئوپلیمری، منتج به افزایش تراکم و استحکام در بتن می گردد.

افزودن الیاف پلی الفین در طرح ۵ و ۶ موجب کاهش میزان سرعت عبور پالس التراسونیک در بتن نسبت به طرح ۴ با درصد مشابه نانوسیلیس و سرباره در هر دو حالت قبل و بعد از حرارت گردیده است، این موضوع را می توان ناشی از جنس پلاستیکی الیاف و ضعف در عبور دادن پالس های التراسونیک در بتن دانست، همچنین می توان ادعا کرد که پیوند نامناسب بین الیاف و سایر اجزا بتن در ناحیه انتقال بین سطحی موجب افزایش این ضعف شده است.

در بتن ژئوپلیمری به دلیل عمل آوری در محیط خشک، یک سری ترک ها و خلل و فرج ریزی در بتن تشکیل می شود که باعث می گردد بتن از یکپارچگی کامل که باعث انتقال امواج اولتراسونیک با سرعت بالاتر می باشد خارج شود، این امر موجب می گردد تا سرعت های به دست آمده اندکی از مقادیر قابل پیش بینی کمتر باشد، البته حضور برخی از پوزولان ها به دلیل ویژگی پرکنندگی خوب منافذ موجب می گردد تا مقدار افت سرعت کمتری در آزمون عبور پالس التراسونیک دیده می شود، وجود این ترک ها در ابعاد بسیار ریز بوده و تنها بر سرعت امواج التراسونیک تاثیر می گذارد و تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری نمونه ها ندارد [۳۱].



شکل ۷: نتایج آزمایش تعیین سرعت پالس التراسونیک بتن قبل و بعد از اعمال حرارت در نمونه بتنی



شکل ۸: اثرات افزودن نانوسیلیس و ایفای پلی الفین بر سرعت عبور پالس التراسونیک بتن ژئوپلیمری

### ۵-۳- نتایج آزمایش مقاومت ضربه ای چکش افتان در بتن

نتایج حاصل از آزمایش تعیین میزان مقاومت ضربه ای بتن توسط چکش افتان بر روی ۵۴ عدد نمونه بتنی با ابعاد دیسکی ۱۵\*۶/۳۶ سانتی متری از بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری در سه رده دمایی ۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در سن ۹۰ روز عمل آوری، برای تمام طرح های اختلاط، در جدول ۱۲ نشان داده شده است. در شکل ۹ نیز نمودار تعداد ضربات مورد نیاز برای شکست نمونه بتنی در آزمون ضربه ای چکش افتان مشاهده می گردد. شکل ۱۰ نمونه بتنی شکسته شده در اثر ضربات متعدد چکش افتان را نشان می دهد.

براساس نتایج حاصله، بمنظور بروز ترک اولیه در نمونه بتنی، کمترین تعداد ضربات متعلق به طرح ۱ حاوی بتن کنترل در معرض دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به تعداد ۱ ضربه و بیشترین تعداد ضربات متعلق به بتن طرح ۶ در دمای ۲۰ درجه سلسیوس به تعداد ۳۰ ضربه می باشد، برای بروز شکست در نمونه بتنی، کمترین تعداد ضربات متعلق به طرح ۱ در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به تعداد ۳ ضربه و بیشترین تعداد ضربات مورد نیاز متعلق به طرح ۶ در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به تعداد ۲۳۱ ضربه می باشد.

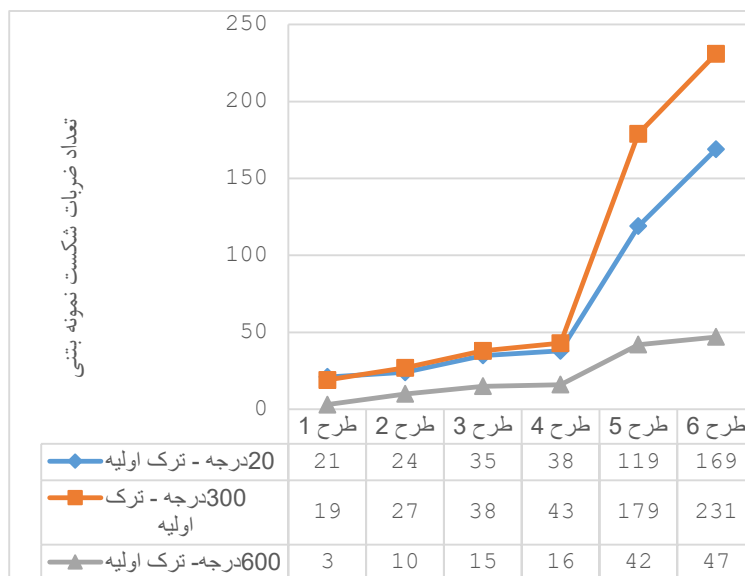
در دمای ۲۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس بیشترین و کمترین تعداد ضربات لازم برای بروز ترک اولیه و شکست در نمونه بتنی به ترتیب متعلق به طرح ۶ و ۱ می باشد، در رده دمایی ۶۰۰ درجه سلسیوس بیشترین و کمترین تعداد ضربات لازم برای بروز ترک اولیه متعلق به طرح شماره ۵ و ۱ است و در همین رده دمایی بیشترین و کمترین تعداد ضربات لازم برای بروز شکست در نمونه به ترتیب متعلق به طرح شماره ۶ و ۱ می باشد، در نتیجه با افزایش حرارت میزان مقاومت نمونه های بتنی در برابر ضربه های چکش افتان کاهش می یابد.

جدول ۱۲: نتایج آزمایش ضربه چکش افتان

تعداد ضربات حاصل از ترک اولیه و شکست نمونه						
مرحله	طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳	طرح ۴	طرح ۵	طرح ۶
۲۰ درجه- ترک اولیه	۹	۱۳	۲۱	۲۳	۲۶	۳۰
۳۰۰ درجه- ترک اولیه	۸	۱۵	۱۹	۲۲	۲۸	۲۹
۶۰۰ درجه- ترک اولیه	۱	۷	۹	۹	۱۳	۹
۲۰ درجه- شکست	۲۱	۲۴	۳۵	۳۸	۱۱۹	۱۶۹
۳۰۰ درجه- شکست	۱۹	۲۷	۳۸	۴۳	۱۷۹	۲۳۱
۶۰۰ درجه- شکست	۳	۱۰	۱۵	۱۶	۴۲	۴۷



شکل ۱۰: نمونه شکسته شده در اثر ضربه چکش افتان



شکل ۹: تعداد ضربات لازم برای بروز شکست در نمونه بتنی

افزایش نانوسیلیس تا ۸ درصد در ترکیب بتن ژئوپلیمری موجب افزایش مقاومت نمونه های بتنی در برابر ضربات چکش افتان در تمامی رده های دمایی شده است، این امر به دلیل نقش چسبندگی، پرکنندگی و هسته زایی نانو ذرات سیلیس در ملات سیمان ژئوپلیمری و محصولات نهایی حاصل از ژئوپلیمریزاسیون که ژل های هیدراته شده هستند می باشد. این ژل ها ضمن چسبندگی اجزا تشکیل دهنده بتن، با پر کردن خلل و فرج در ساختار ماتریس بتن ژئوپلیمر موجب افزایش استحکام و بهبود مقاومت در بتن می گردند، نقش دیگر این ژل ها چسبندگی و پر کردن نواحی انتقال بین سطحی در حد فاصل بین خمیر و سنگدانه ها (الیاف) می باشد. افزودن الیاف پلی الفین تا میزان ۲ درصد به بتن ژئوپلیمری، با توجه به ماهیت این الیاف و نقش پل زدگی بین صفحات ترک خورده، موجب افزایش مقاومت بتن در برابر ضربات چکش افتان گردیده است، براساس نمودار شکل ۹ مشاهده می گردد که در بتن ژئوپلیمری، حداکثر ضربات لازم برای شکست نمونه بتنی در محدوده دمایی ۳۰۰ درجه سلسیوس اتفاق افتاده است، این امر به دلیل بهبود، تسریع و تکمیل فرایند ژئوپلیمریزاسیون بتن ژئوپلیمری تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس می باشد که تقویت ریزساختار بتن را به دنبال داشته است. فراتر از دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، بتن ژئوپلیمری تحت تاثیر منفی ناشی از خروج آب و گسستگی در بخش ریزساختار ژل های هیدراته قرار گرفته است که موجب تضعیف بتن در برابر بارهای ضربه ای وارده شده است. تحقیقات نشان داده است که ضربه های خیلی کوچک انرژی شکست نمونه را بصورت غیر واقعی و به مقدار زیاد افزایش می دهد، این امر را می توان به دلیل آسیب دیدن نمونه هنگام آزمایش و عدم انتقال تمام انرژی از گوی به نمونه دانست [۳۲].

### ۳-۶- نتایج آزمایش XRF، SEM و XRD

نتایج حاصل از انجام آزمایش طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) بتن در جدول ۱۳ نشان داده شده است، براساس این نتایج مشاهده می گردد که سیلیس، اکسید آلومینیوم، اکسید کلسیم و اکسید سدیم بعنوان چهار عنصر اصلی با بیشترین میزان مشارکت در ترکیبات بتن ژئوپلیمر حضور دارند، ذرات سیلیس و آلومینیوم در ساختار نانوسیلیس و سرباره کوره آهنگدازی بعنوان عناصر اصلی پیش ماده در ترکیب بتن ژئوپلیمری شناخته می شوند، کلسیم و سدیم نیز از عناصر اصلی تشکیل دهنده محلول فعال ساز قلیایی مصرفی در بتن ژئوپلیمر سرباره ای در این تحقیق شناخته می شوند. روند افزایش مصرف نانو ذرات سیلیس در طرح های بتن ژئوپلیمر در نتایج جدول مشهود است، بر این اساس حداکثر میزان نانو ذرات سیلیس در طرح های ۴، ۵ و ۶ دیده می شود و حداقل آن در ترکیب بتن طرح ۲ مشاهده می گردد، حداکثر و حداقل میزان اکسید آلومینیوم موجود در ترکیب به ترتیب متعلق به طرح ۲ و ۱ است. حضور اکسید آهن و اکسید منیزیم در محدوده ۲ درصد الی ۷ درصد در نوسان هستند، وجود اکسیدهای پتاسیم و گوگرد در محدوده ۱ درصد الی ۲ درصد در

تمامی ترکیب ها مشهود است و حضور اکسیدهای تیتانیوم، فسفر و منگنز در اغلب طرح ها به زیر ۱ درصد رسیده است. میزان افت حرارتی<sup>۶</sup> ناشی از خروج مواد تحت حرارت در تمامی طرح ها تقریباً در یک رنج و در محدوده ۱۶ درصد مشاهده می گردد.

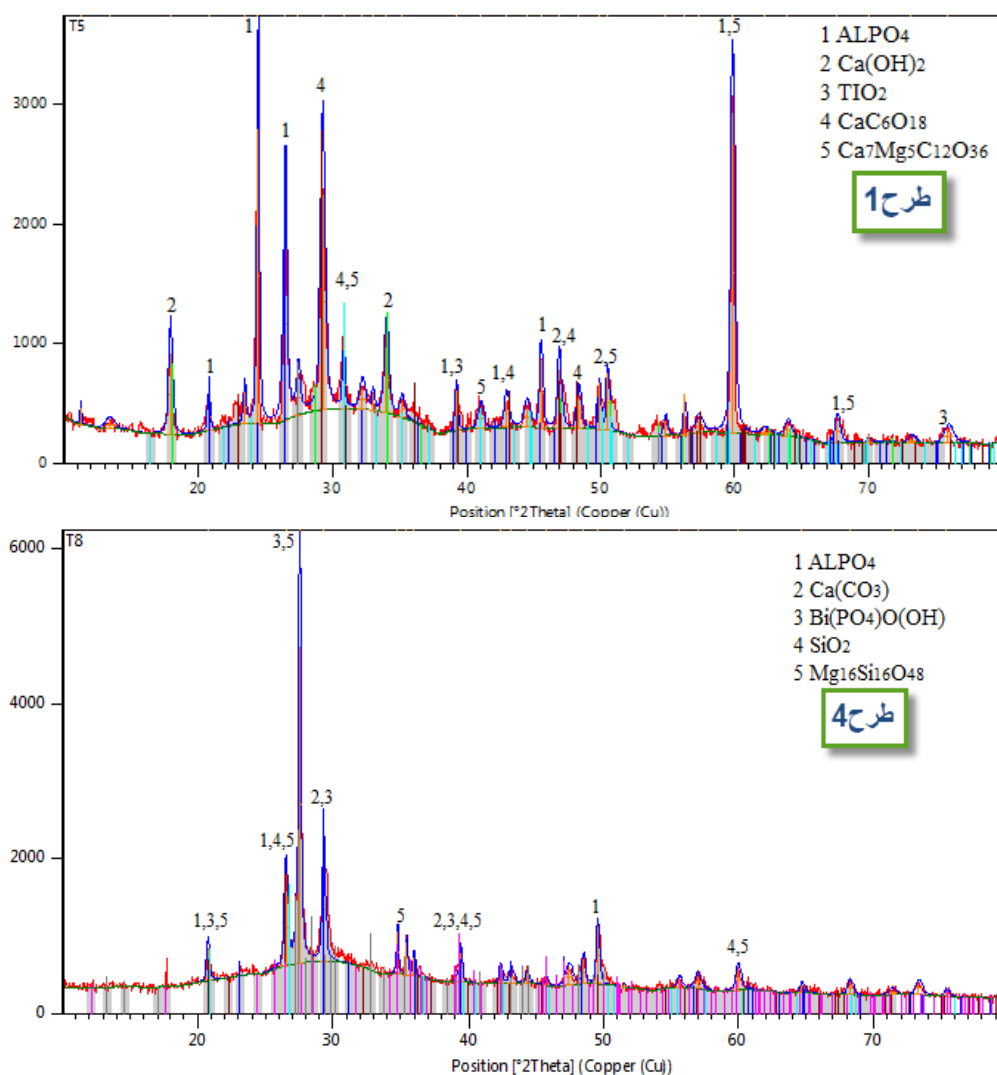
جدول ۱۳: نتایج ۷ روزه آزمایش XRF (درصد)

نام ماده	ترکیب شیمیایی	مقادیر ماده در هر طرح					
		طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳	طرح ۴	طرح ۵	طرح ۶
سیلیس	SiO <sub>2</sub>	۲۷/۱۲۲	۱۹/۵۷۴	۳۲/۰۲۶	۳۶/۳۳۱	۳۷/۰۷۶	۳۶/۸۳۴
اکسید آلومینیوم	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۶۳۹۵	۸/۰۷۳	۶/۷۲	۷/۰۱۳۱	۷/۱۲۹	۶/۹۱
اکسید کلسیم	CaO	۳۷/۱۶۹	۲۶/۸۱۵	۲۳/۶۰۹	۱۵/۲۵۷	۱۵/۳۱۲	۱۵/۱۸۶
اکسید سدیم	Na <sub>2</sub> O	۱/۱	۱۵/۱	۹/۰۱۶	۱۲/۸۷۲	۱۲/۶۴۹	۳/۰۱۹
اکسید آهن	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۷/۲۰۹۸	۵/۶۴	۳/۹۴	۳/۹۴	۳/۷۹	۴/۰۱۲
اکسید منیزیم	MgO	۲/۱۱۴	۵/۰۵۱	۴/۰۱۴	۳/۰۱۳۳	۳/۱۵۲	۲/۸۹۳
اکسید پتاسیم	K <sub>2</sub> O	۰/۹۱۴۴	۱/۰۱۳	۱/۰۱۵	۱/۰۵۲۶	۱/۱۲۹	۱/۱۴۷
اکسید گوگرد	SO <sub>3</sub>	۱/۵۹۱۳	۱/۱۶۴	۱/۸۷۵	۲/۸۲۲	۱/۹۰۲	۱/۹۸۷
اکسید تیتانیوم	TiO <sub>2</sub>	۰/۴۷۲	۰/۹۶۱	۱/۰۸۶	۱/۱۷۳	۰/۰۳۹	۱/۲۰۱
اکسید فسفر	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۱۶۳	۰/۱۷۴	۰/۱۴۴	۰/۱۳۱	۰/۱۳۹	۰/۱۵۳
اکسید منگنز	MnO	۰/۰۹۱	۰/۳۹۵	۰/۶۵۵	۰/۶۸۴	۰/۶۴۹	۰/۷۱۹
افت حرارتی	LOI	۱۶/۴۱۴	۱۶/۰۴	۱۵/۹	۱۵/۷۱۱	۱۶/۰۳۴	۱۵/۹۳۹

نتایج آزمایش طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) با شدت تابش (  $\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$  -Cu) بر روی نمونه های پودری برگرفته از مرکز نمونه بتنی در شکل ۱۱ نشان داده شده است، براساس این نتایج مشاهده می گردد که اکثریت قله ها در بتن ژئوپلیمر در زوایای ۱۵ تا ۳۵ درجه اتفاق افتاده است اما برای بتن کنترل ناحیه قله ها بزرگتر بوده و از ۱۵ تا ۵۰ و همچنین ۶۰ درجه شاهد قله می باشیم که این موضوع به دلیل آرایش و ساختار اتمی نمونه ها می باشد.

با بررسی زاویه شکل گیری قله ها و شدت نسبی آن ها می توان نوع مواد و فازهای قله ای در XRD را شناسایی کرد، در بتن کنترل آلومینیوم فسفات (AlPO<sub>4</sub>) و بعد از آن کلسیم کربنات (CaC<sub>6</sub>O<sub>18</sub>) و کلسیم منگنز کربنات (Ca<sub>7</sub>Mg<sub>5</sub>C<sub>12</sub>O<sub>36</sub>) بیشترین پراکندگی را دارند. در بتن ژئوپلیمر فاقد نانوسیلیس، سدیم آلومینیوم سیلیکات (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)، کوارتز (SiO<sub>2</sub>) که علت آن وجود سرباره و واکنش های پوزولانی می باشد و در نمونه حاوی ۸ درصد نانوسیلیس (BiPO<sub>4</sub>OOH) و (Mg<sub>16</sub>Si<sub>16</sub>O<sub>48</sub>) پراکنده شده اند و درصد سیلیس کل افزایش یافته است. افزودن نانوسیلیس باعث افزایش واکنش ژئوپلیمریزاسیون می شود، بنابر این مقدار بیشتری از ژل ژئوپلیمر آمورف در ماتریس ها ایجاد می شود. این امر به نوبه خود نشان می دهد که نانو ذرات باعث جلوگیری از کاهش مقاومت ژئوپلیمر می شوند [۳۳].

<sup>۶</sup> Loss on ignition (LOI)

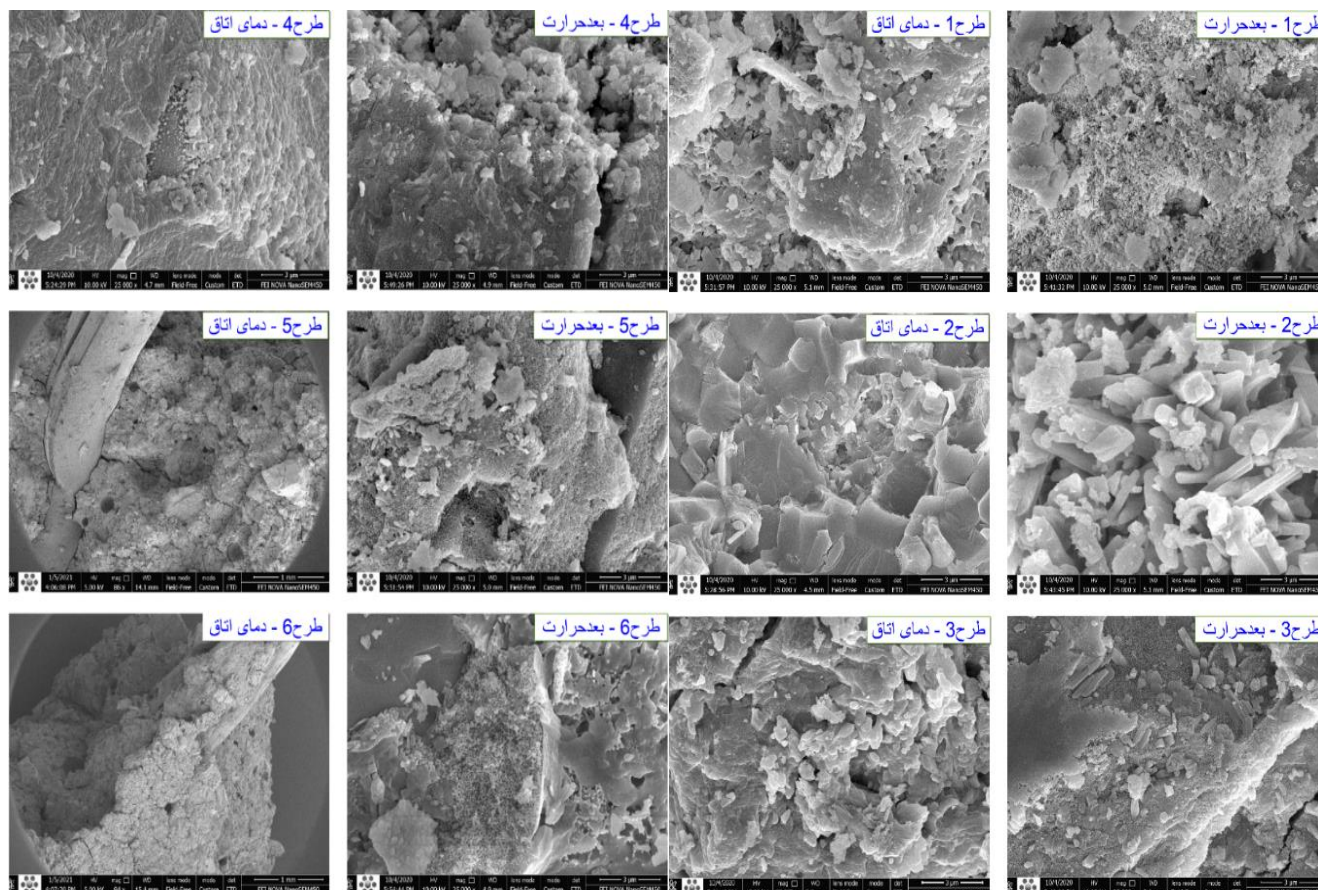


شکل ۱۱: تصاویر XRD نمونه های بتنی

نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونیک روبشی (SEM) بر روی ریزساختار نمونه بتنی در سن ۹۰ روز عمل آوری در دمای اتاق و بعد از حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس در شکل ۱۲ نشان داده شده است. تصاویر حاکی از این مطلب است که حرارت موجب تغییرات اساسی در ریزساختار بتن و ماتریس خمیر سیمان پرتلند و ژئوپلیمری گردیده است. کاهش میزان خصوصیات مکانیکی بتن با افزایش حرارت محیط پیرامون بتن ارتباط مستقیم دارد، حرارت موجب خروج آب موجود در فضاهای مویینه بین ژل های هیدراته در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) در ریزساختار بتن شده است، این امر موجب ایجاد منافذ و تضعیف ریزساختار بتن گردیده است.

پکیدگی ناشی از خروج آب تبخیر شده، کاهش سطوح ژل های هیدراته (سطوح تیره) و افزایش حفرات و توده های ذرات واکنش نکرده (توده های سفید) در تصاویر نمونه های حرارت دیده مشهود می باشد، در نمونه های بتن ژئوپلیمری حاوی ذرات نانوسیلیس بیشتر، تغییرات در ریزساختار ماتریس ژئوپلیمری به نسبت میزان مواد مصرفی کمتر مشاهده می گردد. تأثیر دمای بالا بر بتن را می توان به هیدراته نشدن خمیر سیمان، افزایش تخلخل، کاهش رطوبت موجود، انبساط حرارتی، تغییر فشار منافذ، کاهش مقاومت، ترک حرارتی ناشی از ناسازگاری، خزش و جداسدگی حرارتی نسبت داد.

حرارت ممکن است باعث بروز انقباض حرارتی و تشکیل ترک های متعدد در کلان ساختار و ریزساختار بتن گردد. تصاویر میکروسکوپ الکترونیک روبشی از بتن حاکی از وجود ساختار درختی، منافذ و حفرات در نمونه های بتنی برای تمامی طرح ها پس از در معرض قرار گرفتن در برابر حرارت است، این شرایط موجب تضعیف در نتایج حاصل از خواص مکانیکی و دوام بتن خواهد شد. تجزیه و تحلیل SEM نشان می دهد که ذرات نانوسیلیس فضاهای خالی را پر می کند و منجر به ایجاد یکنواختی، خلا کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده می شود [۳۳]. همچنین واکنش پوزولانی با تبدیل CH به C-S-H ریزساختارها را در بتن متراکم کرده و موجب همگنی بتن می گردد [۳۴].



شکل ۱۲: تصاویر میکروسکوپی نمونه های بتنی قبل و بعد از حرارت

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از آزمایش های مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، تعیین سرعت پالس التراسونیک و مقادیر بدست آمده از مقاومت در برابر ضربه های چکش افتان بر روی نمونه های بتن ژئوپلیمر سرباره ای، همچنین نتایج آزمایش XRD، SEM و XRF در دمای اتاق و پس از در معرض قرار گرفتن نمونه در برابر حرارت، حاکی از عملکرد مطلوب بتن ژئوپلیمری در مقایسه با نتایج حاصل از بتن کنترل (طرح ۱) می باشد، افزودن نانوسیلیس و الیاف پلی الفین به مقادیر مشخص، کمک شایانی در بهبود عملکرد بتن ژئوپلیمرسرباره ای نموده است، اعمال حرارت موجب تضعیف ریزساختار بتن و ماتریس خمیر سیمان پرتلند و ژئوپلیمری گردیده و نقش مهمی در کاهش خصوصیات مکانیکی در آزمون های مورد اشاره ایفا نموده است. اهم نتایج حاصل از پژوهش انجام پذیرفته در این مقاله به شرح ذیل می باشد.



- حداکثر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری در سن عمل آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق متعلق به طرح ۴ به میزان ۸۲/۹۶ مگاپاسکال رسیده است، این موضوع به دلیل حضور ۸ درصد از ذرات نانوسیلیس با ایفای نقش چسبندگی و پرکنندگی در این طرح می باشد. ملکاوار و همکاران در تحقیق انجام پذیرفته خود، حداکثر مقاومت فشاری در بتن ژئوپلیمری را به میزان ۸۴/۳ مگاپاسکال گزارش نموده اند [۲۶].
- نمونه بتن ژئوپلیمری دارای حداکثر مقاومت فشاری (طرح ۴ دارای ۸۲/۹۶ مگاپاسکال) در سن ۹۰ روزه پس از قرارگیری در معرض حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس به میزان تقریبی ۸ درصد افت مقاومت که حداقل افت مقاومت را نسبت به سایر طرح ها دارا بود را از خود نشان داد، در این راستا حداکثر افت مقاومت متعلق به بتن کنترل به میزان ۳۷ درصد بود. میزان افت مقاومت در تحقیق انجام شده توسط حسن و همکاران بر روی بتن ژئوپلیمری در شرایط مشابه، ۱۸ درصد گزارش شده است [۲۵].
- مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر در سن ۹۰ روزه در دمای اتاق با افزودن ۱ درصد الیاف پلی الفین به میزان ۲۰ درصد افت را نشان می دهد. در تحقیق انجام پذیرفته توسط نوشینی و همکارانش بر روی بتن در شرایط مشابه، بین ۱۲ الی ۱۵ افت مقاومت را دارا می باشد [۳۵-۳۶].
- بهترین عملکرد در آزمون تعیین سرعت عبور موج التراسونیک برای نمونه های در معرض دمای اتاق (معادل ۵۹۳۰ متر بر ثانیه) و پس از حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس (معادل ۳۷۲۰ متر بر ثانیه) متعلق به بتن کنترل بود، این امر را می توان به دلیل چگالی بالا بتن کنترل ناشی از عیار بالای سیمان مصرفی (۴۵۰ کیلوگرم در متر مکعب) در ترکیب بتن دانست. در تحقیق نیک بین و همکاران سرعت موج التراسونیک در نمونه های بتن معمولی در معرض حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس فراتر از ۳۰۰۰ متر بر ثانیه گزارش شده است [۲۸].
- اعمال حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس موجب تغییرات اساسی در ریزساختار بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری گردیده است، این تغییرات به دلیل تبخیر آب از فضاهای پیوند شیمیایی در ژل های هیدراته است که موجب تضعیف در خواص مکانیکی بتن شده است. در تحقیقات سیدیک و همکاران بر روی بتن ژئوپلیمری در معرض دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس، تضعیف در نتایج آزمون مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن و مدول الاستیسیته گزارش شده است [۱۵، ۲۵، ۳۷]. همچنین در تحقیق کدور و همکاران، اعلام داشتند که افزایش فشار ناشی از تبخیر آب در ساختار بتن در اثر افزایش دما حدود ۸ مگاپاسکال می تواند بر مقاومت کششی بتن تاثیر منفی داشته باشد [۳۸].
- حضور ۸ درصد نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمری، موجب افزایش ۳۳ درصدی مقاومت فشاری نمونه های بتنی نسبت به بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند گردیده است، این امر به دلیل دارا بودن سطوح ویژه بالا و خواص چسبندگی و پرکنندگی زیاد ذرات نانوسیلیس است. در تحقیق شیرگیر بهبود ۴۸ درصدی در مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد متعلق به نقطه بهینه (۵ درصد افزودنی نانوسیلیس) گزارش گردید [۳۹]. همچنین نتایج سایر تحقیقات نشان دهنده نقش مصرف نانوسیلیس در بهبود چگالی و استحکام در بخش ریزساختار بتن می باشد [۶-۹].
- استفاده بهینه (۲ درصد) از الیاف پلی الفین در بتن ژئوپلیمری موجب افزایش مقاومت کششی ۹۰ روزه بتن به میزان ۱۰ درصد گردیده است. در حالیکه در تحقیقات مرادی خو و همکاران بر روی بتن ژئوپلیمری اعلام داشتند که با افزودن درصد بهینه الیاف، میزان افزایش مقاومت کششی ۳۷ درصد می باشد [۴۰]. استفاده این میزان از الیاف در بتن ژئوپلیمری (۲ درصد) موجب بهبود نتایج حاصل از مدول الاستیسیته بتن و کاهش در میزان نتایج حاصل از آزمون های مقاومت فشاری و سرعت عبور موج التراسونیک گردیده است، کاهش نتایج را می توان به جنس الیاف، نحوه پیوند در نواحی انتقال بین سطحی و توزیع غیر یکنواخت الیاف در خمیر سیمان ژئوپلیمری نسبت داد. تحقیقات نشان داده است که استفاده از الیاف در بتن سبب افزایش مقاومت سایشی، خمشی و کششی می گردد و حضور توأم الیاف و نانوسیلیس (تا ۴ درصد) موجب بهبودی خصوصیات مکانیکی بتن می گردد [۴۱]. در تحقیقاتی دیگر نشان داده شد که مصرف مازاد الیاف (بیش از ۲ درصد) در ترکیب بتن ممکن است موجب توزیع غیر یکنواخت الیاف و به دنبال آن تضعیف ساختار بتن در برابر نیروهای وارده گردد [۴۲].
- حداقل و حداکثر افت مقاومت کششی کسب شده در این تحقیق متعلق به طرح ۵ و طرح ۱ به ترتیب به میزان ۱۳ درصد و ۵۱ درصد بدست آمد، در نتایج مدول الاستیسیته در این زمینه حداقل و حداکثر افت مدول الاستیسیته نمونه ها قبل و بعد از حرارت متعلق به طرح ۵ و طرح ۱ به ترتیب به میزان ۳۳ درصد و ۵۹ درصد بدست آمد. همچنین میزان سرعت عبور پالس التراسونیک در بتن طرح ۱ با ۳۷ درصد

افت بعنوان بهترین طرح و طرح ۲ با ۴۶ درصد افت سرعت عبور پالس التراسونیک بعنوان ضعیف ترین طرح مطرح می باشد. دباغ و همکاران معتقدند که افزایش تراکم و سختی در بتن منجر به افزایش مدول الاستیسیته بتن می گردد [۴۳].

- در تمامی طرح های اختلاط بتن، کاهش مقادیر نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و سرعت عبور پالس التراسونیک در بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر در نمونه های حرارت دیده نسبت به نتایج حاصل از آزمایش بر روی نمونه های بتن در معرض دمای اتاق مشهود است. این امر اغلب به دلیل اثرات تخریب ریزساختار ژل های هیدراته و تشکیل کانی های کربنی در ماتریس سیمان پرتلند و ماتریس سیمان ژئوپلیمری در مواجهه با حرارت بالا می باشد [۱۷-۱۶، ۱۴].

- در آزمون مقاومت بتن در برابر ضربه های چکش افتان، با افزایش حرارت در نمونه های بتنی شاهد کاهش تعداد ضربات در شکست نمونه بودیم، بطوریکه در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به ۲۰ درجه سلسیوس، بتن طرح ۶ کاهش تعداد ضربات نهایی به میزان ۷۲ درصد را تجربه کرد، این رقم برای طرح ۱ حاوی بتن کنترل به میزان ۹۰ درصد بود. از طرفی میزان ضربات شکست در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در نمونه بتن ژئوپلیمرسرباره ای حاوی ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی الفین (طرح ۶) به میزان ۹۴ درصد بهبود را نسبت به بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند (طرح ۱) به همراه داشت. در تحقیق انجام پذیرفته رشد قابل توجهی در انرژی شکست پس از شروع ترک خوردگی در نمونه های بتن حاوی الیاف پلی الفین به دلیل انرژی دریافت شده توسط تغییر شکل فیبر گزارش گردید [۴۴].

- نتایج آزمون های SEM، XRD و XRF در هماهنگی و همپوشانی با نتایج حاصل از تمامی آزمایش های انجام پذیرفته در این پژوهش قرار گرفتند.

## مراجع

- [1] Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M., Marto, A., & Khorami, M. (2018). Portland cement structure and its major oxides and fineness. *Smart structures and systems*, 22(2), 425-432.
- [2] Davidovits, J. (2008). Geopolymer chemistry and application 2nd ed. *Institut Géopolymère, France*.
- [3] Neupane, N., Chalmers, D., & Kidd, P. (2018). High-strength geopolymer concrete—properties. *advantages and challenges. Advances in Materials*, 7(2), 15-25.
- [4] Vora, P., & Urmil V, D. (2013). Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete. *Procedia Engineering*, 51, 210-219.
- [5] Yunsheng, Z., Sun, W., & Li, Z. (2010). Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*, 47(3-4), 271-275.
- [6] Scrivener, K., & R. James, K. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and concrete research*, 38(2), 128-136.
- [7] Li, H., Xiao, H., Yuan, J., & OU, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185-189.
- [8] Adak, D., Sarkar, M., & Mandal, S. (2017). Structural performance of nano-silica modified fly-ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 430-439.
- [9] Ekinci, E., Türkmen, İ., Kantarci, F., & Burhan Karakoç, M. (2019). The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction and Building Materials*, 201, 257-267.
- [10] Delavari, S., Jahanger, H., & Daneshvar, M. (2018). Comparison the Effect of Particle Tires and Powder of Worn Tires on Compressive Strength of Concrete (In Persian). *4th International Conference on Structural Engineering*. Iran, Tehran.
- [11] Chellapandian, M., Mani, A., & Suriya Prakash, S. (2020). Effect of macro-synthetic structural fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with different ratios of GFRP bars. *Composite Structures*, 254, 112790.
- [12] Caetano, H., Ferreira, G., Rodrigues, J., & Pimenta, P. (2019). Effect of the high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concretes. *Construction and Building Materials*, 199, 717-736.
- [13] Bakhtiyari, S., Allahverdi, A., Rais-Ghasemi, M., Zarrabi, B., & Parhizkar, T. (2011). Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures—Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste. *Thermochimica acta*, 514(1-2), 74-81.
- [14] Amiri, M., & Aryanpour, M. (2019). The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (C-S-H). *Concrete Research*, 12(4), 69-80.
- [15] Siddique, R., & Kaur, D. (2012). Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 45-51.

- [16] Brindley, G. (1975). Thermal transformations of clays and layer silicates, in: Proceedings of International Clay Conference Applied Publishing Ltd. *Wilmette, Illinois, USA*.
- [17] Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (2009). Introduction to geopolymers. In *Geopolymers* (pp. 1-11). Woodhead Publishing.
- [18] F. Huseien, G., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S., & Azreen Mohd Ariffin, M. (2018). Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1557-1566.
- [19] Tajodeni, M. (2016). , In vitro evaluation of the effect of adding nanosilica with different specific surfaces on physical and mechanical parameters of soil-cement aggregates. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 24-2(1/1), 13-22.
- [20] Alberti, M., Enfedaque, A., & Gálvez, J. (2015). Improving the reinforcement of polyolefin fiber reinforced concrete for infrastructure applications. *Fibers*, 3(4), 504-522.
- [21] Pilehvar, S., DuyCao, V., M.Szczotok, A., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., . . . LenaKjønksen, A. (2018). Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*, 173, 28-39.
- [22] Deb, P., Nath, P., & Sarker, P. (2015). Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, 125, 594-600.
- [23] Prasanna Venkatesan, R., & Pazhani, K. (2016). Strength and durability properties of geopolymer concrete made with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Black Rice Husk Ash. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), 2384-2391.
- [24] Ehsani, A., Nili, M., & Shaabani, K. (2017). Effect of nanosilica on the compressive strength development and water absorption properties of cement paste and concrete containing Fly Ash. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), 1854-1865.
- [25] Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2020). Mechanical Behaviour and Microstructural Investigation of Geopolymer Concrete After Exposure to Elevated Temperatures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 3843-3861.
- [26] Malkawi, A. B., Nuruddin, M. F., Fauzi, A., Almattarneh, H., & Mohammed, B. S. (2016). Effects of alkaline solution on properties of the HCFA geopolymer mortars. *Procedia engineering*, 148, 710-717.
- [27] Mehdipour, S., M. Nikbin, I., Dezhampanah, S., Mohebbi, R., Moghadam, H., Charkhtab, S., & Moradi, A. (2020). Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 254.
- [28] M. Nikbin, I., Mehdipour, S., Dezhampanah, S., Mohammadi, R., Mohebbi, R., Habibi, H., & Sadrmomtazi, A. (2020). Effect of high temperature on mechanical and gamma ray shielding properties of. *Radiation Physics and Chemistry*, 174.
- [29] Wang, K., Shah, S., & Phuaksuk, P. (2002). Plastic shrinkage cracking in concrete materials-Influence of fly ash and fibers. *ACI Materials Journal*, 99(5), 512-513.
- [30] Kwan, W., Ramli, M., Kam, K., & Zailan Sulieman, M. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565-573.
- [31] Ren, W., Xu, J., & Bai, E. (2016). Strength and ultrasonic characteristics of alkali-activated fly ash-slag geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015124.
- [32] Sahranavard, S., Hajekazemi, H., & Jahangir, H. (2013). Relationship for Absorbed Impact Energy in Concrete Matrix (In Persian). *7th National Congress on Civil Engineering*. Iran, Zanhan.
- [33] Assaedi, H., Alomayri, T., & Shaikh, F. (2019). Influence of Nano Silica Particles on Durability of Flax Fabric Reinforced Geopolymer Composites. *Materials*, 12(9), 1459.
- [34] Hongjian, D., Suhuan, D., & Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*, 73, 705-712.
- [35] Noushini, A., Castel, A., & Gilbert, R. I. (2019). Creep and shrinkage of synthetic fibre-reinforced geopolymer concrete. *Magazine of Concrete Research*, 71(20), 1070-1082.
- [36] Noushini, A., Hastings, M., Castel, A., & Aslani, F. (2018). Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 454-475.
- [37] Rivera, O. G., Long, W. R., Weiss Jr, C. A., Moser, R. D., Williams, B. A., Torres-Cancel, K., ... & Allison, P. G. (2016). Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to portland cement-based binders. *Cement and Concrete Research*, 90, 43-51.
- [38] Kodur, V. K., & McGrath, R. (2006). Effect of silica fume and lateral confinement on fire endurance of high strength concrete columns. *Canadian journal of civil engineering*, 33(1), 93-102.
- [39] Shirgir, B., Alizadeh Goudarzi, H., & Shirgir, V. (2016). An Experimental Study on the Abrasion Resistance of Pervious Concrete Containing Nano SiO<sub>2</sub> in pavement. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 8(2), 291-302.

- [40] Moradikhou , A., Hosseini , M., Mousavi Kashi, A., Emami , F., & Esparham , A. (2020). Effect of Simple and Hybrid Polymer Fibers on Mechanical Strengths and High-temperature Resistance of Metakaolin-based Geopolymer Concrete. *Modares Civil Engineering journal*, 20(2), 147-164.
- [41] Sadr Momtazi, A., Kohani Khoshkbijari, R., & Lotfi Omran, O. (2015). Mechanical and Durability Properties of Self Compacting Concrete containing Nano Silica Particles considering Optimum Percentages of Fibers. *Concrete Research*, 8(2), 19-34.
- [42] Fallah Hosseini, S., & Hajikarimi, P. (2019). Investigation on the Effect of Volume, Length and Shape of Polyolefin Fibers on Mechanical Characteristics and Fracture Properties of High-Strength Concrete. *Concrete Research*, 12(1), 59-70.
- [43] Dabbagh, H., & Akbarpour, S. (2017). Behavior of Structural Lightweight Concrete Containing Nano Silica and Steel Fibers under Compressive Monotonic Loading. *Concrete Research*, 10(1), 35-46.
- [44] Picazo, Á., Alberti, M., Galvez, J., Enfedaque, A., & Vega, A. (2019). The Size Effect on Flexural Fracture of Polyolefin Fibre-Reinforced Concrete. *Applied Sciences*, 9(9).