

## بررسی ریزساختاری بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای حاوی نانوسیلیس

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

۱ - 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

\* M.biklaryan@iauc.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

### چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی به منظور بررسی آثار ناشی از مصرف سرباره کوره‌آهنگدازی و نانوسیلیس روی ریزساختار بتن ژئوپلیمری و مقایسه آن با ویژگی‌های بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند، ۱ طرح اختلاط از بتن کنترل و ۳ طرح اختلاط از بتن ژئوپلیمری حاوی ۹۶، ۹۲ و ۱۰۰ درصد سرباره کوره‌آهنگدازی به ترتیب به همراه ۰، ۴ و ۸ درصد نانوسیلیس ساخته شد. این طرح‌ها در سنین ۷ و ۹۰ روزه تحت آزمایش‌های تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) و طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) قرار گرفتند. در ادامه به منظور بررسی اثر تغییرات ریزساختار بر کلان‌ساختار بتن، آزمون‌های تعیین مقاومت فشاری و مقاومت کششی روی نمونه‌های بتنی در سن ۹۰ روز انجام پذیرفت. بررسی تصاویر اخذ شده از آزمون SEM، نشان از برتری ریزساختاری ماتریس سیمان ژئوپلیمری در تمامی طرح‌ها، نسبت به ریزساختار بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند است، همچنین در نمونه‌های بتنی قرار گرفته در معرض دمای اتاق و پس از اعمال حرارت بالا (۵۰۰ درجه سلسیوس)، آثار بهبود و انسجام در ریزساختار بتن ژئوپلیمری با توجه به حضور ذرات سیلیس مشهود است، در این راستا وجود ۸ درصد نانوسیلیس در مخلوط ۴ (بتن ژئوپلیمری)، موجب تسریع فرایند واکنش‌پذیری و افزایش حجم تولید ژل‌های هیدراته ناشی از ژئوپلیمریزاسیون، در مقایسه با سایر مخلوط‌های بتن ژئوپلیمری (حاوی ۰ و ۴ درصد نانوسیلیس) شد. در تصاویر نمونه‌های بتنی حرارت دیده شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، نشانه‌هایی از تضعیف در ریزساختار بتن نسبت به تصاویر اخذ شده از بتن در دمای اتاق دیده می‌شود. نتایج حاصل از آزمون XRF حاکی از حضور بیشترین مقدار از عناصر اکسیدسیلیس و اکسیدآلومینیوم (از عوامل اصلی در نقش بهبود تراکم در ریزساختار بتن)، به ترتیب در ترکیب طرح‌های ۴ و ۲ به میزان ۳۶ و ۸ درصد است. قله‌های بلند ایجاد شده در نمودار طیف‌های XRD، اغلب در نواحی با زوایای (۲θ) ۲۸ درجه رخ داده است و ارتفاع آنها به تناسب میزان حضور ذرات آلومینوسیلیکاتی در مخلوط‌های بتن، متغیر است. اعمال حرارت بالا در نمونه‌های بتنی موجب افت در نتایج حاصل از آزمون XRD شده است.

**واژگان کلیدی:** بتن ژئوپلیمری، سرباره کوره‌آهنگدازی، نانوسیلیس، ریزساختار بتن، میکروسکوپ الکترونی روبشی.

## ۱- مقدمه

تولید سیمان ضمن مصرف سوخت‌های فسیلی، خطر زیست محیطی فراوانی را به همراه دارد، در این راستا تولید بتن با مصالح جایگزین سیمان همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. به تازگی تولید بتن ژئوپلیمری با خواص زیست محیطی و مقاومتی بالا در دستور کار پژوهشگران قرار گرفته است. این نوع از بتن در ابتدا توسط پژوهشگر فرانسوی بنام ژوزف داویدویتس<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۲ میلادی مطرح شد [1]. میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است [2]. تولید بتن ژئوپلیمری توسط روش‌های متداول تکنولوژی بتن انجام می‌گیرد [3]. در این راستا مصالحی با خواص پوزولانی بالا مانند سربراه و نانوسیلیس می‌توانند به عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان معمولی در بتن استفاده شوند. نانوسیلیس دارای خلوص بالا، یکی از پرکاربردترین نانو ذرات در بتن یا ملات سیمان است، به منظور واکنش‌پذیری مصالح آلومینوسیلیکاتی و آغاز فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و تولید خمیر سیمان ژئوپلیمری، باید از مواد قلیا‌فعال مانند هیدراکسیدسدیم<sup>۲</sup> و سیلیکات سدیم<sup>۳</sup> با غلظت مولاریته مناسب استفاده نمود. در مخلوط‌های بتن ژئوپلیمری، آب نقشی در واکنش شیمیایی نداشته و فقط باعث افزایش کارایی در مخلوط بتن می‌شود، این پدیده برخلاف واکنش شیمیایی آب در فرآیند هیدراتاسیون سیمان پرتلند است [4]. با افزودن سربراه در ترکیب بتن ژئوپلیمری، ساختار منافذ در بتن بهینه‌سازی شده و توزیع اندازه منافذ بطور مناسب‌تر خواهد بود، ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ)<sup>۴</sup> متراکم‌تر و مقاومت فشاری و جنبه‌های دوام بتن به تدریج افزایش می‌یابد، به عبارتی توسعه مقاومت فشاری و دوام رابطه نزدیکی با تکامل ساختار حفره و ناحیه انتقال بین سطحی در بتن ژئوپلیمر سربراه‌ای دارد [5]. حضور مصالح حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی در ترکیب بتن ژئوپلیمری با توجه به خواص پوزولانی خود، ضمن مشارکت در واکنش‌پذیری موجب تسریع در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود، محصول فرآیند

ژئوپلیمریزاسیون، ژل‌های هیدراته است که به‌خوبی حفرات و منافذ موبینه بین لایه‌ای را در ریزساختار بتن پر می‌کند و اتصال بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) را تقویت می‌کنند، این فرآیند در بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند با توجه به تولید میزان کمتری از ژل هیدراته سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) به مقادیر ضعیف تری انجام می‌پذیرد. در سیمان پرتلند، ژل C-S-H از گروه‌های سیلیکونی و ژئوپلیمری از مواد با پلیمریزاسیون بالا و ساختار آلومینوسیلیکات تشکیل شده است [6]. اما واکنش پوزولانی با تبدیل CH به C-S-H [7] ریزساختارها را متراکم و همگن می‌کند، بنابر این ژل ژئوپلیمری بیشتر و ماتریس متراکم‌تر ایجاد می‌کند [8] با این حال، افزایش بیشتر محتوای نانوسیلیس باعث پراکندگی و تجمع ناکافی ذرات نانو سیلیس می‌شود. که اندکی چگالی ماتریس را کاهش می‌دهد [9].

ژئوپلیمر با مواد پلیمریزاسیون بالا با ساختار آلومینوسیلیکات مشخص می‌شود که بیشتر از سه بعد واحد متقاطع شامل (SiQ<sub>4</sub> (2Al) و SiQ<sub>4</sub> (3A) تشکیل شده است [7]. سربراه کوره آهنگدازی از جمله مواد زیست محیطی است، استفاده از این ماده به‌جای سیمان می‌تواند مقاومت بتن را بهبود بخشد و تقاضای فزاینده برای استفاده از آن در بتن را کاهش دهد [10,11]. از طرفی حضور ذرات سیلیس در بتن ژئوپلیمر علاوه بر تأثیر مثبت بر خواص مکانیکی، واکنش ژئوپلیمری را تسریع می‌بخشد و قلیائیت ترکیب را کاهش می‌دهد [12].

ساختار بتن ژئوپلیمر سربراه‌ای حاوی نانوسیلیس را می‌توان در ابعاد ریزساختار<sup>۵</sup> و کلان ساختار<sup>۶</sup> مورد ارزیابی قرار داد، بُعد کلان ساختار شامل اجزاء بزرگ قابل رویت با چشم غیر مسلح است که به دو فاز سنگدانه و خمیر سیمان ژئوپلیمری تقسیم می‌شود، اما در بُعد ریزساختار اغلب اجزاء باید با دستگاه‌های میکروسکوپ الکترونی مشاهده شوند. مشخصات پنج فاز اصلی در ریزساختار خمیر سیمان ژئوپلیمری را می‌توان به‌شرح ذیل خلاصه کرد:

4. Interfacial transition zone
5. Microstructure
6. Macrostructure

1. Joseph Davidovits
2. NaOH
3. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

## ۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

در این تحقیق به منظور ساخت بتن ژئوپلیمری از سرباره کوره آهنگدازی با وزن مخصوص ۲۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سطح مخصوص ۲۲۰۰ سانتی متر مربع بر گرم، چگالی ظاهری ۹۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته ۱/۲ پاسکال و اندازه ذرات ۲/۱ میکرومتر استفاده شد، سرباره کوره آهنگدازی محصولی مصنوعی و جانبی است که به هنگام جداسازی آهن از کوره های ذوب آهن از ناخالصی های موجود در سنگ آهن بوجود می آید. این محصول از کارخانه ذوب آهن اصفهان خریداری و مطابق استاندارد ASTM C989/C989M [14] مورد استفاده قرار گرفت، مشخصات شیمیایی سرباره مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است. برخی از مشخصات نانوسیلیس مصرفی در جدول (۲) به نمایش در آمده است. آب مصرفی در پژوهش پیش رو، آب شرب شهر لاهیجان است، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص ۱۰۰۰ kg/m<sup>3</sup> است. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II دیلمان است و دارای وزن مخصوص برابر با ۳۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سطح مخصوص ۲۲۰۰ سانتی متر مربع بر گرم است که تحت استاندارد EN 197-1 [15] تولید شده است. سنگدانه های مصرفی در این تحقیق به لحاظ دانه بندی در محدوده استاندارد ASTM C33 [16]. قرار دارند و از کارخانه های شن و ماسه شهرستان لاهیجان تهیه شده است، کمینه و بیشینه قطر ذرات ماسه ۷۵ میکرومتر و ۴/۷۵ میلی متر و برای شن ۴/۷۵ میلی متر و ۱۹ میلی متر است، وزن مخصوص ماسه ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و برای شن ۲۷۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب است، مدول نرمی شن و ماسه برابر با ۲/۸۵ میلی متر است و درصد جذب آب شن برابر ۲/۲ و برای ماسه برابر با ۲/۹ است. به منظور رفع ضعف بتن ژئوپلیمری در برابر کارایی، باید از یک روان ساز در ترکیب بتن استفاده نمود، بر این اساس در این تحقیق از ابرروان کننده نسل چهارم بر پایه پلی کربوکسیلات نرمال استفاده شد، این ماده به صورت مایع با رنگ قهوه ای روشن و وزن مخصوص ۱۱۰۰

۱- سیلیکات کلسیم هیدراته موسوم به ژل توبرموریت<sup>۱</sup>

۲- سیلیکات آلومینوم هیدراته موسوم به ژل توبرموریت<sup>۲</sup>

۳- سیلیکات آلومینوم کلسیم هیدراته موسوم به ژل اترینگایت<sup>۳</sup>

۴- سیلیکات آلومینوم سدیم هیدراته<sup>۴</sup>

۵- سایر ذرات و اجزاء شرکت نکرده در فرایند ژئوپلیمریزاسیون. اعمال حرارت بالا در بتن می تواند آثار 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 ویژگی های مکانیکی و دوام بتن می شود. حرارت می تواند موجب گسستگی در ساختار ژل های هیدراته موجود در ملات سیمان شود و نقش زیادی در تضعیف پیوندهای بین نواحی انتقال بین سطحی 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 شود، 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 [13]. در این تحقیق آزمایشگاهی، بهبود ریزساختار بتن ژئوپلیمری (در دمای اتاق و تحت حرارت بالا ۵۰۰ درجه سلسیوس) نسبت به بتن معمولی که منتج به خواص مکانیکی و دوام برتر در بتن ژئوپلیمری می شود از طرح های نوآورانه معرفی می شود. همچنین با توجه به تحقیقات سایرین [2]، کمک به کاهش انتشار گازهای سمی از قبیل دی اکسید کربن در جو، حفظ محیط زیست به واسطه مصرف سرباره کوره آهنگدازی انباشته شده در کارخانه های ذوب آهن به عنوان مواد مضر زیست محیطی، کاهش مصرف سوخت های فسیلی در فرایند تولید سیمان معمولی، کاهش مصرف منابع معدنی مصرفی در ساخت بتن معمولی از سایر اهداف این پژوهش است.

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

1. Tobermorite Gel (C-S-H)  
2. Tobermorite Gel (A-S-H)

## ۲-۲- طرح اختلاط

به منظور بررسی ریزساختاری بتن ژئوپلیمری و مقایسه آن با بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند، ۴ طرح (مخلوط) اختلاط تحت توصیه کمیته 89-211.1-ACI [17] با مشخصات جدول (۳) تهیه شد.

## ۲-۳- چگونگی ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

مصالح مصرفی در ابتدا براساس جدول (۴) طرح اختلاط توزین شدند و در ادامه، مصالح خشک از قبیل سنگدانه‌ها، سرباره (با سیمان) و نانوسیلیس (به فراخور نیاز هر طرح)، در چند مرحله به داخل دستگاه مخلوط کن در حال چرخش اضافه شدند و فرایند ترکیب مصالح خشک ۲/۵ دقیقه به طول انجامید، سپس آب، ابروان‌کننده و محلول قلیایی به ترکیب اضافه و ۲/۵ دقیقه دیگر فرایند میکس به طول انجامید. پس از اتمام مرحله ترکیب، ملات بتن در داخل قالب‌های روغن‌کاری شده از قبل، 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 الی ۲۵ درجه سلسیوس) نگهداری شدند، سپس قالب‌برداری انجام گرفت و نمونه‌های بتن کنترل در داخل آب با دمای اتاق تا زمان انجام آزمایش نگهداری و عمل‌آوری شدند، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری به منظور 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. نتایج بررسی‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که مقاومت بتن ژئوپلیمری با افزایش دمای عمل‌آوری افزایش می‌یابد [18].

کیلوگرم بر متر مکعب است که از شرکت دوروچم خاورمیانه خریداری شده است. محلول قلیایی مصرفی در ترکیب بتن ژئوپلیمری در این تحقیق ترکیبی از سیلیکات سدیم و هیدراکسیدسدیم با غلظت مولاریته ۱۲ است که با نسبت ۲/۵ (سیلیکات سدیم به هیدراکسیدسدیم) با هم ترکیب شده‌اند و دارای وزن مخصوص ترکیبی به میزان ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و pH این محلول در محدوده ۷ است. مولاریته محلول قلیایی با اثرگذاری بر فرایند واکنش شیمیایی بتن ژئوپلیمری، نقش مهمی در میزان بهبود ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن ایفا می‌کند.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سرباره‌کوره‌آهنگدازی

Chemical composition	%
CaO	36.72
SiO <sub>2</sub>	35.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.45
MgO	6.24
SO <sub>3</sub>	0.12
Na <sub>2</sub> O	1.21
K <sub>2</sub> O	0.92
TiO <sub>2</sub>	2.49
MnO	0.18
L.O.I	0.02

Table 1. Chemical characteristics of slag

جدول ۲. مشخصات نانوسیلیس

Specific gravity(kg/m <sup>3</sup> )	2400
Particle diameter(nm)	7 to 14
Particle size(nm)	20 to 60
Purity of particles	% 99.8
PH	3.7 to 4.7
color	White
state	Solid

Table 2. properties of nanosilica

جدول ۳. مشخصات طرح اختلاط بتن

Mixture NO	1	2	3	4
Mixture Name	NC	GCNS0	GCNS4	GCNS8
Type of concrete	Portland	Geopolymer	Geopolymer	Geopolymer
Cement	450	0	0	0
slag	0	450 (%100)	432 (%96)	414 (%92)
Nanosilica	0	0	18(%4)	36(%8)
kg/m <sup>3</sup> Water	202.5	0	0	0
Alkaline solution	0	202.5	202.5	202.5
Fine aggregate	761.13	816.1	767.42	718.75
Coarse aggregate	1000	1000	1000	1000
Superplasticizer	6/75	6/75	7/8	8/3
Curing	Water	Dry	Dry	Dry

Table 3. Concrete mixing plan specifications

## ۲-۴- روش‌های آزمایش و استانداردها

در این تحقیق، برای ارزیابی ریزساختار بتن ژئوپلیمرسرباره‌ای حاوی نانوسیلیس، از آزمون‌های SEM، XRF و XRD استفاده شد، به‌منظور بررسی آثار حرارت بر ریزساختار بتن، نمونه‌ها تحت ضوابط استاندارد ISO834 [19] حرارت داده شدند و آزمون‌های تعیین شده روی هر طرح انجام گرفت، در این راستا برای انجام آزمایش‌ها تحت حرارت بالا (در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس)، ابتدا نمونه‌های بتنی به‌مدت ۱ ساعت در کوره تحت حرارت تعیین شده قرار گرفتند، سپس نمونه‌ها به‌مدت ۱ ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا از بروز آثار مخرب ناشی از شک دمایی جلوگیری شود، در ادامه نمونه‌ها برای رسیدن به دمای اتاق، به مدت ۲۴ ساعت قبل از انجام آزمایش در دمای اتاق نگهداری شدند.

در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه، نمونه‌های بتنی خرد شده از هر طرح در دو حالت قبل و بعد از در معرض قرار گرفتن حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس در دستگاه میکروسکوپ الکترونی رویشی قرار گرفتند و با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ برابر در مقیاس ۴۰ میکرومتر تصاویر مورد نظر از نمونه‌ها گرفته شد. آنالیز و اندازه‌گیری کمی و کیفی عناصر شیمیایی تشکیل دهنده نمونه‌های بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری در سن عمل‌آوری ۷ روزه در دمای اتاق، با استفاده از آزمایش غیرمخرب طیف‌سنجی فلورسانس اشعه‌ایکس (XRF) انجام پذیرفت، و نتایج به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت.

در راستای انجام آزمون طیف‌سنجی پراش اشعه‌ایکس (XRD)، نمونه‌های بتنی در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و بعد از در معرض قرار گرفتن حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس، پس از خرد و آسیاب شدن در داخل دستگاه XRD قرار داده شدند و نمودار پراش کریستال‌های بتن تهیه شد، داده‌های حاصل از تفرق اشعه X به صورت شدت فوتون برحسب زاویه دتکتور  $2\theta$  است که به صورت لیستی از محل پیک و شدت آنها روی گراف‌ها آورده می‌شود، محل پیک  $2\theta$  به مشخصات دستگاه (طول موج) وابسته است. آزمون تعیین میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی تحت استاندارد BS 12390-3 روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی متر انجام پذیرفت و آزمون تعیین میزان مقاومت کششی بر روی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری، به روش دو نیم شدن استوانه تحت

استاندارد ASTM C496 روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی متر انجام گرفت، این دو آزمون در سن عمل‌آوری ۹۰ روز و تحت دمای اتاق و پس از در معرض قرار دادن نمونه‌ها در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، توسط دستگاه جک بتن‌شکن روی نمونه‌های بتنی انجام پذیرفت.

## ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

### ۳-۱- نتایج آزمون مقاومت فشاری و کششی

آزمون‌های تعیین مقاومت فشاری و کششی روی نمونه‌های بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری در ۹۰ روز عمل‌آوری در دمای اتاق و بعد از اعمال حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس به‌منظور بررسی آثار تغییرات ریزساختاری روی نمونه‌ها انجام پذیرفت که نتایج آن در شکل (۱ و ۲) به نمایش درآمده است.

در هر دو نمودار مشاهده می‌شود که در نمونه‌های بتن ژئوپلیمری، افزودن نانوسیلیس به مخلوط بتن، موجب بهبود میزان مقاومت کسب شده در نمونه (در معرض دمای اتاق و دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس) شده است، از طرفی اعمال حرارت بالا موجب افت میزان مقاومت نمونه‌های بتنی در تمامی مخلوط‌ها نسبت به نمونه‌های در معرض دمای اتاق شده است. نتایج به‌دست آمده در این دو نمودار تصدیقی بر نتایج حاصل از آزمون‌های ریزساختاری در این پژوهش آزمایشگاهی هستند.

شکل ۱. نمودار نتایج آزمون مقاومت فشاری بتن

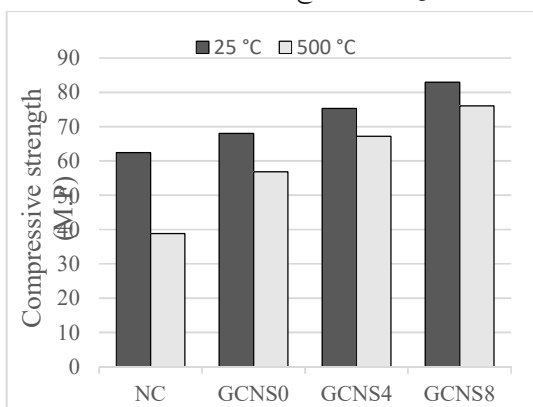


Fig. 1. Diagram of the results of concrete compressive strength test

سطوح ویژه بالاتر و واکنش پذیری بیشتر، شاهد کاهش میزان و حجم حفرات و افزایش تراکم در ریزساختار بتن طرح GCNS8 نسبت به سایر طرح‌های اختلاط حاوی نانوسیلیس کمتر هستیم. در تصویر طرح GCNS8 حاوی بتن ژئوپلیمری نشانه‌ای از ساختار درختی که حاکی از ناهمگنی ساختار بتن باشد دیده نمی‌شود و سطوح شکست در نمونه بسیار کم است. با وجود تشابه طیف‌های XRD در مخلوط‌های مختلف بتن ژئوپلیمری، مشاهده می‌شود که به دلیل تغییرات در میزان سرباره و نانوسیلیس مصرفی در مخلوط‌ها، ریزساختار نمونه‌های بتنی با هم تفاوت دارند. منبع اصلی مقاومت در توده جامد در خمیر سیمان هیدراته شده را می‌توان به وجود نیروهای وان دروالسی<sup>۴</sup> نسبت دهیم و میزان مقاومت نیز به چسبندگی، طبیعت و اندازه سطح ذرات تشکیل دهنده ژل‌های هیدراته بستگی دارد، وجود ریزترک‌ها در مجاورت نواحی انتقالی را می‌توان به حجم و مقادیر استفاده از نانوسیلیس و سرباره در ترکیب بتن نسبت داد که در سنین اولیه با خروج آب از فضاها مویینه بین لایه‌ای در ژل‌های خمیر ژئوپلیمر منجر به ایجاد پدیده انقباض ناشی از خشک شدن می‌گردد، همچنین نسبت آب به سیمان بالا و ایجاد حرارت می‌تواند موجب بروز و افزایش ترک در ریزساختار و کلان‌ساختار بتن شود. تصاویر در شکل (۲) حاکی از این موضوع است که حرارت بالا بر بتن موجب ایجاد تغییرات اساسی در ریزساختار بتن و ماتریس خمیر سیمان پرتلند و ژئوپلیمر شده است، این مطلب از عوامل اصلی کاهش میزان خواص مکانیکی و دوام در بتن تحت حرارت بالا به شمار می‌رود، حرارت موجب خروج آب موجود در فضاها مویینه بین ژل‌های هیدراته در نواحی انتقال بین سطحی در بتن می‌شود، خروج آب نیز موجب ایجاد منافذ و تضعیف ریزساختار بتن می‌شود. در تصاویر SEM ضعف ریزساختار بتن در معرض حرارت بالا با توجه به کاهش سطوح ژل‌های هیدراته (سطوح تیره) و افزایش حفرات و توده های ذرات واکنش نکرده (توده‌های سفید) مشهود است، منافذ و حفرات موجود در بتن نقش بسزایی در کاهش ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن ایفا می‌کنند، برای نمونه‌های پس از قرار

شکل ۲. نمودار نتایج آزمون مقاومت کششی بتن

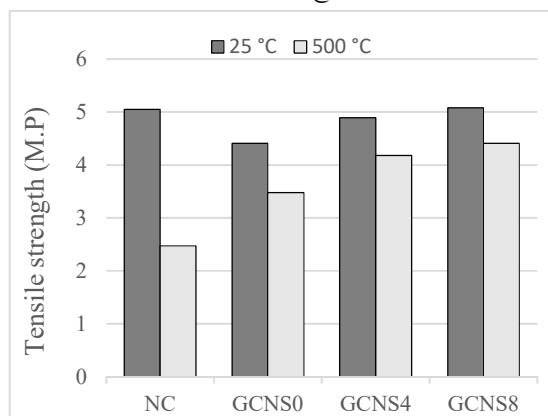


Fig. 2. Diagram of the results of concrete tensile strength test

### ۳-۲- نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این تحقیق، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در مقیاس ۴۰ میکرومتر در سن عمل‌آوری ۹۰ روز حاصل از طرح‌های اختلاط بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری برای حالات قبل و بعد از در معرض قرار گرفتن حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس در اشکال (۳ و ۴) به تصویر کشیده شده است. با توجه به این تصاویر می‌توان ریزساختار بتن در تمامی طرح‌های اختلاط را به سه فاز اساسی مجزا و متفاوت از هم تقسیم‌بندی نمود، در این راستا، فاز اول شامل محصولات هیدراسیون<sup>۱</sup> و ژئوپلیمرزاسیون<sup>۲</sup> حاوی ژل‌های هیدراته شده ناشی از فرایند واکنش پذیری است که در تصاویر بیشتر به صورت نواحی با رنگ تیره به نمایش درآمده اند، فاز دوم شامل بلورهای واکنش نکرده که در نتیجه ناخالصی‌های موجود در مواد اولیه و یا ذرات واکنش نکرده در فرایند واکنش پذیری هستند و در تصاویر بیشتر به رنگ سفید هستند و فاز سوم شامل چگونگی پیوندهای خمیر سیمان با سنگدانه در ناحیه انتقال بین سطحی<sup>۳</sup> تشکیل شده است. برای بتن ژئوپلیمری با افزایش میزان مصرف نانوسیلیس در طرح‌ها و با توجه به تسریع و مشارکت بیشتر این ذرات در فرایند ژئوپلیمرزاسیون، شاهد افزایش میزان تولید ژل‌های هیدراته شده در نمونه‌های بتن ژئوپلیمری هستیم. در این راستا در طرح با توجه به حضور مقادیر بیشتری از نانوسیلیس (۸ درصد) و ایفای نقش پوزولانی این ذرات در ملات ژئوپلیمری به دلیل دارا بودن

3. Interfacial transition zone(ITZ)

4. van der Waals

1. Hydrolysis

2. Polymerization

نانوسیلیس بیشتر، تغییرات در ریزساختار ماتریس ژئوپلیمری به نسبت میزان مواد مصرفی کمتر مشاهده می‌شود.

گیری در معرض حرارت، شاهد تخلخل ناشی از خروج آب تبخیر شده در ریزساختار بتن تحت تأثیر دمای بالا برای تمامی طرح‌ها هستیم، در نمونه‌های بتن ژئوپلیمری حاوی ذرات

شکل ۳. تصاویر SEM نمونه‌های بتنی در دمای اتاق

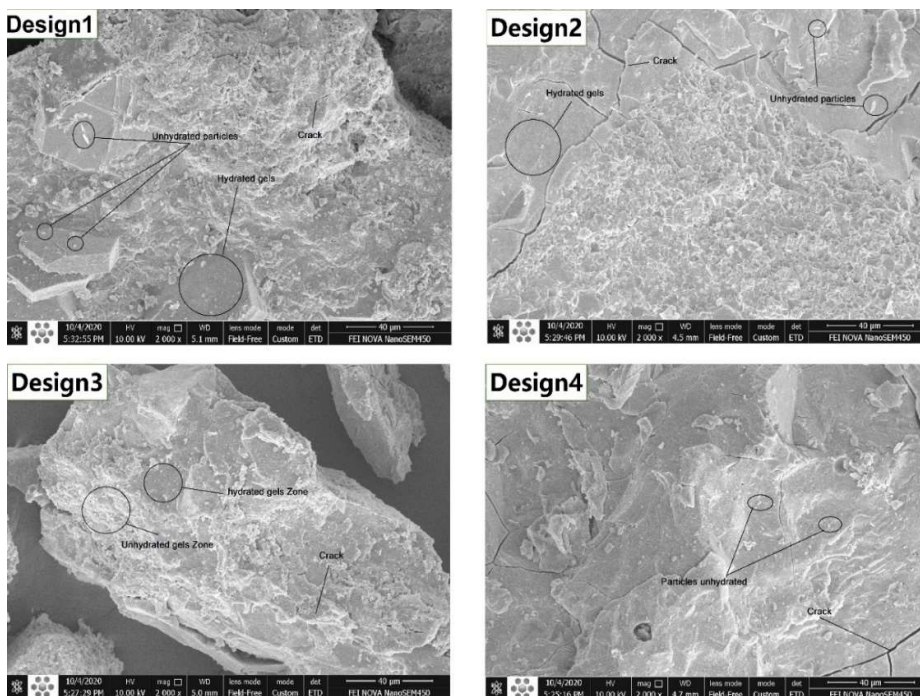


Fig. 3. SEM images of concrete samples at room temperature

شکل ۴. تصاویر SEM نمونه‌های بتنی بعد از اعمال حرارت بالا

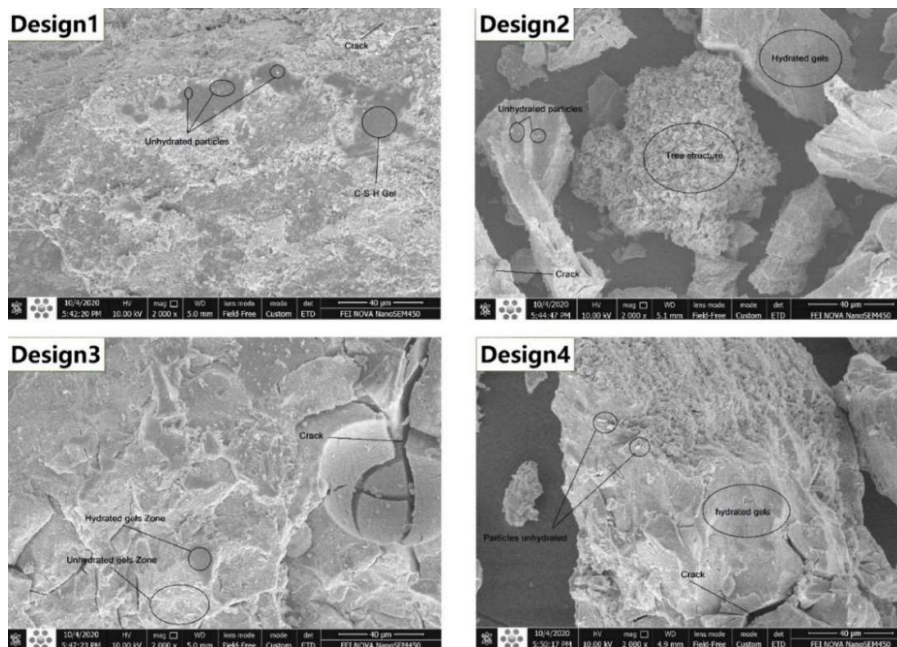


Fig. 4. SEM images of concrete samples after high heat application

جدول ۴. نتایج ۷ روزه آزمون XRF

chemical mixture	Material quantities per design (%)			
	Design1 NC	Design2 GCNS0	Design3 GCNS4	Design4 GCNS8
SiO <sub>2</sub>	27.122	19.574	32.026	36.331
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.6395	8.073	6.72	7.0131
CaO	37.169	26.815	23.609	15.257
Na <sub>2</sub> O	1.1	15.1	9.016	12.872
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.2098	5.64	3.94	3.94
MgO	2.114	5.051	4.014	3.0133
K <sub>2</sub> O	0.9144	1.013	1.015	1.0526
SO <sub>3</sub>	1.5913	1.164	1.875	2.822
TiO <sub>2</sub>	0.472	0.961	1.086	1.173
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.163	0.174	0.144	0.131
MnO	0.091	0.395	0.655	0.684
LOI	16.414	16.04	15.9	15.711

Table 4. Results of 7-day XRF test

۳-۴- نتایج آزمایش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس<sup>۴</sup>

طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس به منظور مطالعه و آنالیز ساختار بلورین مواد و بررسی اندازه دانه‌ها و ذرات در بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گرفت، نتایج حاصل از طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) روی نمونه‌های بتنی در این تحقیق در اشکال (۵ و ۶) به نمایش درآمده است، پیرو این نتایج مشاهده می‌شود که قله‌های ایجاد شده در بتن کنترل در زوایای ۱۵ تا ۵۰ درجه و در محدوده ۶۰ درجه متغیر بوده‌اند، این پراکندگی می‌تواند به دلیل آرایش و ساختار اتمی نمونه بتنی باشد، اما در بتن ژئوپلیمری اکثر قله‌ها در زوایای ۱۵ الی ۳۵ درجه اتفاق افتاده است و نشان از یکپارچگی بهتر در ساختار اتمی بتن این نمونه‌ها است. در بتن کنترل ترکیبات 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 ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس (طرح GCNS0)، ترکیبات سدیم آلومینیوم سیلیکات (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)، کوآرتز (SiO<sub>2</sub>) که علت آن وجود سرباره و واکنش‌های پوزولانی است دیده می‌شود و در مخلوط‌های بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای حاوی ۸ درصد نانوسیلیس، مشاهده می‌شود که ترکیبات BiPO<sub>4</sub>OOH و (Mg<sub>16</sub>Si<sub>16</sub>O<sub>48</sub>) پراکنده شده‌اند و درصد سیلیس کل افزایش یافته است.

۳-۳- نتایج آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس<sup>۱</sup>

نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس که به منظور تعیین میزان عناصر شیمیایی تشکیل دهنده در ساختار بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری انجام پذیرفت، براساس جدول (۴) ارائه شده است.

براساس این نتایج مشاهده می‌شود که نمونه بتنی طرح NC شامل بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند دارای بیشترین میزان اکسیدکلسیم (۳۷/۱۶۹٪) نسبت به سایر طرح‌ها است، درصد پایین میزان سیلیس (۱۹/۵۷۴٪) در نمونه بتنی طرح GCNS0 به علت عدم استفاده از نانوسیلیس در طرح اختلاط<sup>۲</sup> بتن ژئوپلیمری استدر حالیکه این مقدار در طرح‌های GCNS4 و GCNS8 با توجه به وجود نانوسیلیس در طرح اختلاط با روند افزایش نانوسیلیس از ۴٪ به ۸٪، افزایش یافته است. نتایج XRF حاکی از این مطلب است که سیلیس، اکسیدکلسیم و اکسیدآلومینیوم بیشترین عناصر موجود در هر طرح است، این عناصر از مواد اصلی تشکیل دهنده پیش ماده (سرباره و نانوسیلیس) در بتن ژئوپلیمری در این تحقیق شناخته می‌شوند. در این راستا با توجه به انتخاب بیشترین مقدار مصرف نانو ذرات سیلیس در طرح اختلاط<sup>۴</sup> (۸ درصد)، این طرح حاوی بالاترین میزان حضور ذرات سیلیس به مقدار ۳۶ درصد در خود است. درصد حضور ترکیب اکسیدآلومینیوم در طرح GCNS0 با توجه به اختصاص ۱۰۰ درصد سرباره کوره آهنگدازی در طرح اختلاط این بتن، به بالاترین رقم یعنی ۸ درصد رسیده است، در این طرح مقدار حضور ترکیب اکسیدکلسیم نیز دارای بیشترین فراوانی به مقدار ۲۶ درصد نسبت به سایر طرح‌ها هستند. حضور ترکیبات اکسید آهن و اکسیدمنیزیم در محدوده ۴ درصد الی ۷ درصد در نوسان هستند، وجود ترکیبات اکسیدهای پتاسیم و گوگرد در محدوده ۱ درصد الی ۲ درصد در تمامی ترکیب‌ها مشهود است و حضور ترکیبات اکسیدهای تیتانیم، فسفر و منگنز در اغلب مخلوط‌ها به زیر ۱ درصد رسیده است، میزان افت حرارتی (LOI)<sup>۳</sup> ناشی از خروج مواد تحت حرارت در تمامی طرح‌ها تقریباً در یک رده و در محدوده ۱۶ درصد مشاهده می‌شود.

3 Loss on ignition  
4 X-Ray Fluorescence (XRF)

1 X-Ray Diffraction (XRD)  
2 Concrete Mixing plan



شکل ۵. تصاویر XRD نمونه‌های بتنی در دمای اتاق

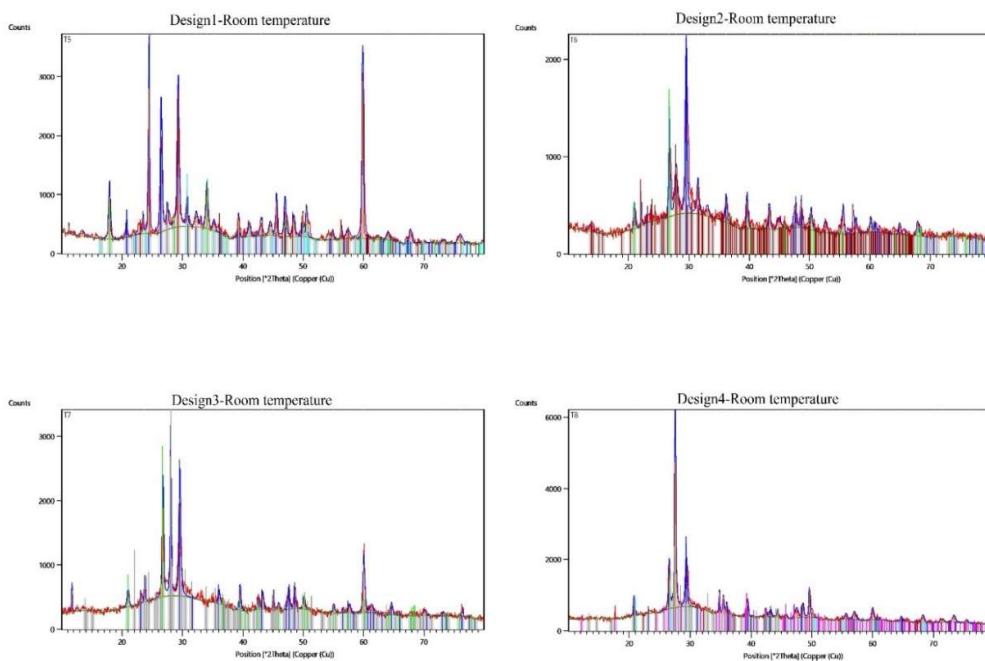


Fig. 5. XRD images of concrete samples at room temperature

شکل ۶. تصاویر XRD نمونه‌های بتنی پس از اعمال حرارت بالا

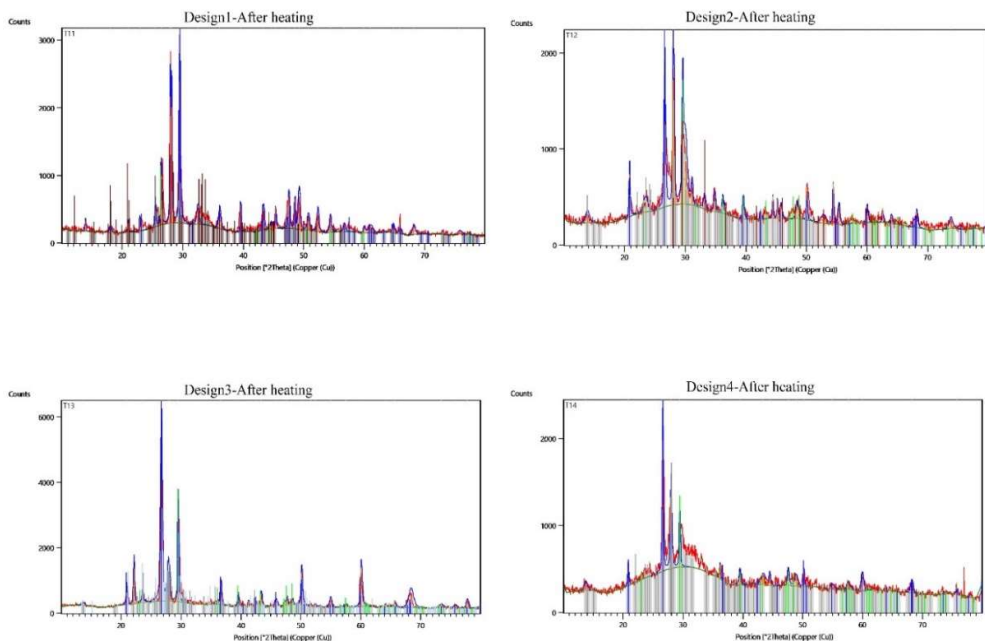


Fig. 6. XRD images of concrete samples after high heating

نمودارهای طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس بودند به تفکیک هر طرح در قبل و بعد از حرارت به نمایش درآمده است.

در جداول (۵ و ۶) لیست ترکیبات بدست آمده از عناصر مختلف در نتایج XRD در بتن که دارای بیشترین پراکندگی در

قلیا فعال ترکیبی حاصل از هیدراکسیدسیدیم و سیلیکات سدیم می‌توانند منجر به تغییرات اساسی در ترکیب فاز کانی‌شناسی بخش بلورینه مواد در بتن ژئوپلیمری شود.

جدول ۵. پراکندگی عناصر حاصل از آزمایش XRD در دمای اتاق

Design	Room temperature
NC	TiO <sub>2</sub>
	AlPO <sub>4</sub>
	Ca(OH) <sub>2</sub>
	Ca <sub>6</sub> C <sub>6</sub> O <sub>18</sub>
	Ca <sub>3.51</sub> Mg <sub>2.49</sub> C <sub>6</sub> O <sub>18</sub>
GCNS0	Ca <sub>7</sub> Mg <sub>5</sub> C <sub>12</sub> O <sub>36</sub>
	SiO <sub>2</sub>
	Na (AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) Si <sub>4</sub> O <sub>8</sub>
GCNS4	(Na,Ca)Al(Si,Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
	SiO <sub>2</sub>
	CaCO <sub>3</sub>
GCNS8	Bi <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> O(OH)
	CaCO <sub>3</sub>
	SiO <sub>2</sub>
	AlPO <sub>4</sub>
	Mg <sub>16</sub> Si <sub>16</sub> O <sub>48</sub>

Table 5. Dispersion of elements from XRD experiments at room temperature

جدول ۶. پراکندگی عناصر حاصل از آزمایش XRD بعد از حرارت بالا

Design	After high heating
NC	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> .4H <sub>2</sub> O
	(Mg <sub>0.03</sub> Ca <sub>0.97</sub> )(CO <sub>3</sub> )
	C
GCNS0	KMgAlSiO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O
	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
	2Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> CaCO <sub>3</sub>
	SiO <sub>2</sub>
GCNS4	(Mg <sub>0.064</sub> Ca <sub>0.936</sub> )(CO <sub>3</sub> )
	SiO <sub>2</sub>
	Ca <sub>6</sub> C <sub>6</sub> O <sub>18</sub>
GCNS8	(Ca,Na)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>
	SiO <sub>2</sub>
	(Na,Ca)Al(Si,Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
	Ca <sub>6</sub> C <sub>6</sub> O <sub>18</sub>

Table 6. Dispersion of elements from XRD test after high heating

تحقیقات پیشین نشان داده است که تغییرات کانی‌شناسی مواد در دماهای بالاتر و در زمان‌های طولانی‌تر منتج به کاهش خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری می‌شود، همچنین مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس حدود ۴۵ درصد نسبت به حالت بدون حرارت افزایش دارد و این روند رشد مقاومت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد، تجزیه و تحلیل نتایج طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) نشان می‌دهد که

براساس نتایج حاصله مشاهده می‌شود که در بتن کنترل در دمای اتاق، ترکیبات آلومینیوم فسفات (AlPO<sub>4</sub>) و بعد از آن ترکیب کلسیم کربنات (کلسیت) با فرمول مولکولی (CaC<sub>6</sub>O<sub>18</sub>) و ترکیب کلسیم منگنز کربنات (دولومیت) با فرمول شیمیایی (Ca<sub>7</sub>Mg<sub>5</sub>C<sub>12</sub>O<sub>36</sub>) بیشترین پراکندگی را دارند، برای این نوع از بتن پس از در معرض حرارت قرار گرفتن و خروج برخی از عناصر در فرایند کلسیناسیون در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در مدت یک ساعت، ترکیباتی مانند کربن، دولومیت، سیلیکات آلومینیوم منگنز آهن فسفات هیدراته و سیلیکات آلومینیوم کلسیم هیدراته دارای بیشترین پراکندگی هستند. وجود حالت‌های تپه و هاله در نمودارهای XRD بتن ژئوپلیمری نشان از تشکیل محصول آمورف و فازهای بلورین ناخالصی در این الگوها است. در بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس در دمای اتاق، ترکیبات سدیم آلومینیوم سیلیکات (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)، کوارتز (SiO<sub>2</sub>) که علت آن وجود سرباره و واکنش‌های پوزولانی است و در نمونه حاوی ۸ درصد نانوسیلیس، ترکیبات هیدراکسید فسفات اکسید بیسموت (BiPO<sub>4</sub>OOH) و ماده پیروکسن (Mg<sub>16</sub>Si<sub>16</sub>O<sub>48</sub>) پراکنده شده اند و درصد سیلیس کل در این نمونه‌ها افزایش یافته است. افزودن نانوسیلیس در مخلوط‌ها باعث افزایش فرایند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود، بنابراین مقدار بیشتری از ژل ژئوپلیمری آمورف در ماتریس‌ها ایجاد می‌شود، این موضوع به نوبه خود نشان می‌دهد که نانو ذرات باعث جلوگیری از کاهش مقاومت ژئوپلیمری می‌شوند.

برای نمونه‌های بتن ژئوپلیمری پس از در معرض قرار گرفتن حرارت و خروج برخی از عناصر ناشی از افت حرارتی، ترکیباتی از قبیل سیلیس (SiO<sub>2</sub>)، سیلیکات آلومینات کلسیم سدیم ((Ca,Mg)CO<sub>3</sub>) و کلسیت (Ca<sub>6</sub>C<sub>6</sub>O<sub>18</sub>) در اکثر طرح‌ها مشاهده می‌شود. وجود فازهای بلورینه متعلق به گروه پلاژیوکلاز با فرمول شیمیایی (Na,Ca)Al(Si,Al)<sub>3</sub>O<sub>8</sub> با تفاوت در مقادیر کاتیون و نسبت SiO<sub>2</sub> و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در ترکیبات بتن ژئوپلیمری ناشی از حضور مواد آلومینوسیلیکاتی در پوزولان‌های سرباره کوره آهن‌گدازی و نانوسیلیس است که با فعال‌سازی محلول‌های

فشاری و مقاومت کششی بتن مورد بررسی قرار گرفت، اهم نتایج به شرح ذیل ارائه می‌شود.

- حضور تا ۸ درصد ذرات نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمر سرباره ای، با توجه به خواص پوزولانی بالا این ماده از طریق مشارکت و تسریع در فرایند ژئوپلیمریزاسیون و تولید ژل‌های هیدراته بیشتر و پر شدن منافذ مویینه و حفرات در بتن توسط این ژل‌ها، موجب بهبود ریزساختار بتن می‌گردد.

- حرارت بالا در بتن از طریق خروج آب و آسیب رساندن به ساختار ژل‌های هیدراته موجب تضعیف ریزساختار بتن می‌شود که این امر باعث کاهش در خواص مکانیکی و دوام بتن خواهد شد.

- با توجه به بکارگیری از سرباره کوره آهنگدازی و نانوسیلیس با خواص آلومینوسیلیکاتی در مخلوط‌های بتن ژئوپلیمری، حضور ترکیبات اکسیدسیلیس و اکسیدآلومینیوم حاصل از آزمون XRF، در این مخلوط‌ها در بالاترین مقادیر خود نسبت به سایر ترکیبات قرار داشت.

- چنانچه فرایند پلیمریزاسیون و ژئوپلیمریزاسیون در بتن به شکل مطلوب انجام پذیرد و مشارکت مواد آلومینوسیلیکاتی در واکنش پذیری، بالا باشد، حضور ترکیب هیدراکسیدکلسیم به دلیل مشارکت بیشتر در فرایند واکنش پذیری در اوج قله‌های حاصل از گراف XRD به حداقل میزان خود می‌رسد.

- نتایج حاصل از آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، SEM، XRD و XRF در هماهنگی و هم پوشانی با هم بودند، در این راستا برتری در کیفیت ریزساختار بتن‌های ژئوپلیمری نسبت به بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند در دمای اتاق و پس از قرار گرفتن در معرض حرارت بالا مشهود بود.

## منابع

- [1] J.Davidovits, "Geopolymer Chemistry and Application", Institut Geopolymere, France, 2008.
- [2] Kamal Neupane, Des Chalmers, Paul Kidd. High-Strength Geopolymer Concrete-Properties, Advantages and Challenges.

ساختار بلوری بتن ژئوپلیمری با افزایش دما و زمان تحت تأثیر قرار می‌گیرد [20]. در طیف‌های گراف حاصل از آزمون طیف سنجی پراش اشعه ایکس در تحقیق آزمایشگاهی پیش رو، وجود ترکیب هیدراکسیدکلسیم<sup>۱</sup> در اوج قله ناشی از پراش اشعه ایکس در ترکیب بتن کنترل مشاهده می‌شود و عدم حضور این ماده در نقاط پیک نمودارهای حاصل از پراش اشعه ایکس در بتن ژئوپلیمری نشانه فعالیت پوزولانی مناسب نانو ذرات سیلیس و سرباره کوره آهنگدازی در ترکیب شیمیایی ساختار خمیر ژئوپلیمری می‌باشد. این مطلب به دلیل وجود سطوح ویژه بالا در ذرات نانوسیلیس و واکنش پذیری زیاد این ماده در مجاورت با هیدراکسیدکلسیم است که به همراه ذرات سرباره منجر به تولید ژل‌های هیدراته از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H)، سیلیکات آلومینیوم هیدراته (A-S-H)، سیلیکات آلومینیوم کلسیم هیدراته (C-A-S-H) و سیلیکات آلومینیوم سدیم هیدراته (N-A-S-H) می‌گردد، در این واکنش پوزولانی اندازه و مقدار کریستال‌های هیدراکسیدکلسیم به دلیل واکنش شیمیایی با مواد آلومینوسیلیکاتی موجود در سرباره و نانوسیلیس کاهش پیدا می‌کند و ژل‌های حاصله با پر کردن فضاهای انتقال بین سطحی، موجب افزایش چگالی و استحکام در بتن ژئوپلیمری می‌گردد و از این طریق موجب افزایش ویژگی‌های مکانیکی و دوام در بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند می‌شود.

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش بررسی ریزساختاری از طریق انجام آزمایش‌های SEM، XRD و XRF روی نمونه‌های بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند و بتن ژئوپلیمری حاوی مقادیر متفاوت سرباره کوره آهنگدازی و نانوسیلیس در سنین عمل‌آوری ۷ و ۹۰ روزه در دمای اتاق و پس از در معرض قرار گرفتن نمونه‌های بتنی تحت حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس و نتایج حاصله مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت، در پایان آثار تغییرات در ریزساختار بتن بر روی کلان ساختار بتن با توجه به نتایج آزمون‌های تعیین مقاومت

- reinforced geopolymer composites. *Materials*, 2019. 12(9): p. 1459.
- [13] Rafat Siddique, Deepinder Kaur. (2012). Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*, 3, 45–51.
- [14] ASTM C989 / C989M-18a. (2018). Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, DOI: 10.1520/C0989\_C0989M-18A.
- [15] EN 197-1, Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, 2000.
- [16] ASTM C33 / C33M-18. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, DOI: 10.1520/C0033\_C0033M-18.
- [17] ACI211.1-89. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91).
- [18] R. Prasanna Venkatesan, K. C. Pazhani. (2015). Strength and Durability Properties of Geopolymer Concrete made with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Black Rice Husk Ash, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 00(0):1-8, DOI 10.1007/s12205-015-0564-0, pISSN 1226-7988, eISSN 1976-3808.
- [19] ISO 834. (1999). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes I.
- [20] Mallikarjuna Rao G, Gunneswara Rao TD, Siva Nagi Reddy M, Rama Seshu D, "A Study on the Strength and Performance of Geopolymer Concrete Subjected to Elevated Temperatures," In: Rao A., Ramanjaneyulu K. (eds) *Recent Advances in Structural Engineering, Volume 1. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2019, vol 11. Springer, Singapore.
- Advances in Materials. Vol. 7, No. 2, 2018, pp. 15-25. doi: 10.11648/j.am.20180702.11
- [3] Prakash R. Vora, Urmil V. Dave, Parametric Studies on Compressive Strength of Geopolymer Concrete, Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International conference on Engineering (NUiCONE-2012), *Procedia Engineering* 51 (2013) 210 – 219
- [4] M. Jafari Nadoushan, A. A. Ramezani-pour, Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Pastes and Determination of Optimum Values of Effective Factors, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1043-1052. DOI: 10.22060/ceej.2017.11113.4977
- [5] Ping Duan, Zhonghe Shui, Wei Chen, Chunhua Shen, Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials, *J. MATER. RES. TECHNOL.* 2013;2(1):52-59
- [6] Supit, S.W.M. and F.U.A. Shaikh, Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica. *Materials and structures*, 2015. 48(8): p. 2431-2445.
- [7] Du, H., S. Du, and X. Liu, Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*, 2014. 73: p. 705-712.
- [8] Phoo-ngernkham, T., et al., 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 & Design*, 2014. 55: p. 58-65.
- [9] Rendell, F., R. Jauberthie, and M. Grantham, Deteriorated concrete: Inspection and physicochemical analysis. 2002: Thomas Telford.
- [10] Siddique, R. and D. Kaur, Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*, 2012. 3(1): p. 45-51.
- [11] Yüksel, İ., R. Siddique, and Ö. Özkan, Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and building materials*, 2011. 25(2): p. 967-972.
- [12] Assaedi, H., et al., Influence of nano silica particles on durability of flax fabric

# Microstructural study of slag geopolymer concrete containing nanosilica

Mohammadhossein Mansourghanaei<sup>1</sup>, Morteza Biklaryan<sup>2\*</sup>, Alireza Mardookhpour<sup>3</sup>

1- 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

\* M.biklaryan@iauc.ac.ir

## Abstract

Today, in order to reduce the harmful effects of the environment and increase the mechanical properties and durability of concrete, particles with high pozzolanic properties are used as a suitable alternative to ordinary cement in concrete. And filler, as an alternative to cement, has attracted the attention of researchers. In this laboratory study to investigate the effects of slag and nanosilica slag consumption on the microstructure of geopolymer concrete and compare it with the characteristics of control concrete containing Portland cement, 1 mixing design of control concrete and 3 mixing designs of geopolymer concrete containing 92, 96 and 100% composite kiln slag was fabricated with 0, 4 and 8% nanosilica, respectively. X-ray fluorescence (XRF) was performed. In order to investigate the effect of microstructural changes on the macro structure of concrete, compressive strength and tensile strength tests were performed on concrete samples at 90 days of age. Examination of the images obtained from the SEM test shows the superiority of the microstructure of the geopolymer cement matrix in all designs, compared to the microstructure of the control concrete containing Portland cement. the effects of improvement and cohesion in the microstructure of geopolymer concrete are evident due to the presence of silica nanoparticles, in this regard, the presence of 8% nanosilica in mixture 4 (geopolymer concrete), accelerates the reactivity process and increases the volume of hydrated gels. Geopolymerization was compared to other geopolymer concrete mixtures (containing 0 and 4% nanosilica). Images of concrete samples heated to 500 °C show signs of weakening of the concrete microstructure compared to images taken of concrete at room temperature. The results of XRF test indicate the presence of the highest amount of oxidilica and aluminum oxide (the main factors in improving the density in the microstructure of concrete), in the combination of designs 4 and 2 by 36 and 8%, respectively. The high peaks created in the XRD spectrum diagram often occur in areas with angles ( $\theta$ ) of 28 °, and their height varies according to the presence of aluminosilicate particles in the concrete mix. The application of high heat to the concrete specimens caused a decrease in the results of the XRD test. Evaluations performed on the results of the test to determine the compressive strength and tensile strength in concrete, showed coordination and overlap with the results of microstructural tests in this study.

**Keywords:** Geopolymer Concrete, Blast Furnace Slag, Nanosilica, Concrete Microstructure, Scanning Electron Microscope.