

بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری براساس آزمون XRF و SEM

محمدحسین منصورقناعی

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

مرتضی بیک لریان*

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

علیرضا مردوخ پور

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

M.biklaryan@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

چکیده

در این مقاله، ۳ طرح اختلاط از بتن ژئوپلیمری حاوی ۹۲، ۹۶ و ۱۰۰ درصد سرباره کوره آهنگدازی، به ترتیب شامل ۸، ۴ و ۰ درصد نانو سیلیس ساخته شد. پس از انجام آزمون مقاومت فشاری و انتخاب یک طرح از این سه طرح، بعنوان طرح بهینه به لحاظ برتری خواص مکانیکی، با افزودن ۱ و ۲ درصد الیاف پلی الفین به طرح بهینه، دو طرح دیگر از بتن ژئوپلیمری ساخته شد. نمونه‌های بتنی تحت آزمون‌های مقاومت فشاری در ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری، در ۷ روز عمل آوری و SEM در ۹۰ روز عمل آوری، قرار گرفتند. نتایج حاصله ضمن ارزیابی با یکدیگر، با نتایج حاصل از یک طرح اختلاط ساخته شده از بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند، مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون‌های این پژوهش نشان از برتری در خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی در تمام سنین عمل آوری داشت. در سن عمل آوری ۹۰ روزه بعنوان بهترین سن به لحاظ عملکرد، کمترین ۶۲/۴ مگاپاسکال و بیشترین ۸۲/۹ مگاپاسکال مقدار مقاومت فشاری به ترتیب در طرح ۱ و ۴ بدست آمد. در این سن، افزودن تا ۸ درصد نانو سیلیس در بتن ژئوپلیمری موجب بهبود مقاومت فشاری تا میزان ۲۱/۹ درصد و افزودن تا ۲ درصد الیاف موجب افت مقاومت فشاری تا میزان ۲۲/۵ درصد در این نوع از بتن گردید. نتایج حاصل از آزمون‌های XRF و SEM ضمن همپوشانی با یکدیگر، در هماهنگی با نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری قرار داشتند.

کلید واژگان: بتن ژئوپلیمری، خواص مکانیکی بتن، آزمون مقاومت فشاری، میکروسکوپ الکترونیک روبشی (SEM)، طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF).

۱- مقدمه

ساختار بتن ژئوپلیمری در ابتدا توسط دیویدویتز مطرح شد [۱]. سیمان های ژئوپلیمری گروهی از مواد قلیا فعال هستند، موادی که خواص مهندسی برتر را در مقایسه با سیمان پرتلند، از خود نشان می دهند [۲]. از طرفی، میزان دی اکسید کربن تولید شده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان معمولی است [۳]. این ویژگی ها باعث افزایش ساخت و تولید بتن ژئوپلیمری در چند دهه اخیر گردید. مک نالتی با مقایسه بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی با بتن ژئوپلیمری اظهار داشت که بتن های ژئوپلیمری دارای مقاومت فشاری بالاتری هستند [۴]. در ترکیب بتن ژئوپلیمری از پوزولان هایی نظیر سربراره کوره آهنگدازی و نانوسیلیس استفاده می گردد. این پوزولان ها حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی با خواص پرکنندگی و چسبانندگی بالایی هستند. سربراره کوره بلند دانه بندی شده از جمله مواد زیست محیطی است، استفاده از این ماده به جای سیمان می تواند مقاومت بتن را بهبود ببخشد و تقاضای فزاینده برای استفاده از آن در بتن را کاهش دهد [۵، ۶]. بهبود مقاومت فشاری با استفاده از نانو سیلیس در بتن ژئوپلیمری نیز گزارش شده است [۷]. همچنین مقاومت فشاری بهینه با افزودن ۶ درصد نانو سیلیس گزارش شده است [۸]. در تحقیقی دیگر گزارش شده است که افزودن نانو سیلیس به بتن ژئوپلیمری، مقاومت فشاری آن را افزایش می دهد تا زمانی که نسبت سیلیس به آلومینیوم (Si/Al) در مخلوط به ۲ درصد برسد و افزودن سیلیس بیشتر، مقاومت فشاری را به دلیل تجمع و توزیع غیریکنواخت کاهش می دهد [۹]. در راستای بهبود مقاومت فشاری با افزودن نانوسیلیس به ترکیب بتن، نانو ذرات منافذ ماتریس ها را پر می کنند، در این حالت تخلخل نانو کامپوزیت های ژئوپلیمری کاهش می یابد و در نتیجه، یکنواختی منافذ کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده تری ایجاد می کند [۱۰]. همچنین نانو سیلیس به عنوان پرکننده عمل می کند تا فضاهای داخل اسکلت ریزساختار سخت شده خمیر ژئوپلیمری را پر کرده و تراکم آن را افزایش دهد [۹، ۱۱]. تأثیر نانو سیلیس در بهبود مقاومت را می توان به مکانیسم چند مرحله ای زیر نسبت داد که ریزساختار بتن را بهبود می بخشد و در نتیجه خواص مکانیکی را افزایش می دهد.

۱. افزایش واکنش پوزولانی [۱۰]. وجود نانو سیلیس در بتن ژئوپلیمری واکنش پوزولانی را تسریع می بخشد.
۲. اثر پرکنندگی ذرات نانو سیلیس [۱۲، ۱۳]. ابتدا، توزیع ذرات نانو سیلیس در کنار سایر ذرات بتن منجر به ماتریس متراکم تر می شود.

سپس، واکنش نانو سیلیس در روش ژئوپلیمریزاسیون، مقدار بیشتری ژل آلومینوسیلیکات را همراه با محصولات واکنش مواد اصلی تولید می کند. محصول جانبی واکنش احتمالاً در ساختار منافذ موجود رسوب می کند. افزایش نانوسیلیس چگالی ماتریس را افزایش می دهد [۱۴]. در این حالت، اثر پرکنندگی نانو سیلیس اثر کرده و ماتریس متراکم تری تولید می کند که تخلخل را کاهش می دهد و استحکام را افزایش می دهد.

۳. به عنوان یک هسته عمل می کند [۱۵، ۱۶]. در ساختار ژل C-S-H، نانو ذرات می توانند به عنوان یک هسته عمل کنند و پیوندهای قوی با ذرات C-S ژل ایجاد کنند. بنابراین، در طول هیدراتاسیون، پایداری محصولات افزایش می یابد و انتظار می رود دوام و محصولات مکانیکی بهبود یابد. نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی بوسیله تولید بتن (ژئوپلیمری)، به چند مورد زیر خلاصه می گردد:

- ۱- خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن معمولی بهبود می یابد.
- ۲- کمک به کاهش حجم انتشار گاز سمی CO₂ در مقایسه با تولید بتن معمولی، با توجه به گزارش ارایه شده توسط سایر محققین در این راستا.
- ۳- کمک به حفظ سلامت محیط زیست بوسیله مصرف (در ترکیب بتن ژئوپلیمری) سربراره های انباشته شده در کارخانجات ذوب آهن، شناخته شده بعنوان مواد مضر محیط زیستی.
- ۴- حفظ و کاهش مصرف منابع معدنی مصرفی که بعنوان مصالح اصلی در طی فرآیند ساخت سیمان معمولی استفاده می گردد.
- ۵- حفظ و کاهش مصرف سوخت های فسیلی که بعنوان سوخت مصرفی در کارخانجات تولید سیمان معمولی استفاده می گردد.

۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح مصرفی

در این تحقیق آزمایشگاهی، سربراره کوره آهنگدازی محصول شرکت ذوب آهن اصفهان با وزن مخصوص ۲۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب با مدول الاستیسیته ۱/۲ پاسکال، تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت. از نانوسیلیس تولید شرکت ایونیک اینداستریز^۳ آلمان با خلوص ۹۹/۸ درصد، وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و قطر ذرات ۱۷ الی ۱۴ نانو متر استفاده گردید. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II، محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان)، تولید

عمل آوری حرارتی بتن ژئوپلیمری، نمونه‌های بتن تا هنگام انجام آزمون، در دمای اتاق در محیط خشک نگهداری و عمل آوری شدند. در شکل ۱ برخی از مراحل ساخت بتن به نمایش در آمده است.

۲-۳- روش‌های آزمایش و استانداردها

آزمون مقاومت فشاری بتن تحت استاندارد BS 12390-3 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری در سن عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه جک بتن شکن انجام گرفت. در این راستا، نمونه‌ها به نحوی در دستگاه جک بتن شکن قرار داده شدند که دو سطح مقابلی که در موقع بتن ریزی مجاور قالب بودند، در تماس با رکاب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه باشند و پس از محکم شدن نمونه‌ها، بارگذاری نیرو در محدوده استاندارد با سرعت 0.9 مگاپاسکال بر ثانیه (54 مگاپاسکال بر دقیقه) بصورت ثابت، یکنواخت، بدون تغییرات ناگهانی و عمود بر جهت بتن ریزی تا لحظه شکست نمونه انجام گرفت. در این راستا، میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده است.

آنالیز و اندازه گیری کمی و کیفی عناصر شیمیایی تشکیل دهنده نمونه‌های بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری در سن عمل آوری ۷ روزه برای تمام طرح‌های اختلاط، با استفاده از آزمایش غیرمخرب طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) انجام گرفت. در این آزمون اشعه با شدت تابش ($K\alpha \lambda = 1.54060 \text{ A-Cu}$) بر روی پودر حاصل از آسیاب بتن سخت شده که از مرکز نمونه بتنی تهیه شده است تابانده شد تا نوع فاز و ساختار بلورین مواد تشکیل دهنده و میزان فعالیت پوزولانی نانوسیلیس و سرباره در طرح‌های اختلاط بتن تعیین گردد. در این راستا نمونه‌ها داخل دستگاه XRF با مدل Philips PW1730 قرار داده شدند، در ادامه ترکیب شیمیایی بتن به همراه درصد مصرف آن برای هر نمونه تعیین گردید. آزمون SEM در سن عمل آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونیک روبشی با مدل FEI Quanta200 انجام گرفت، در این راستا نمونه بتنی خرد شده در دستگاه قرار داده شدند و تصاویر با بزرگ نمایی مورد نظر ضبط و در ادامه مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفت.

شده تحت استاندارد ISIRI 389 استفاده شد. سنگدانه‌های مصرفی محصول کارخانجات شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده که به لحاظ کمی و کیفی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار داشتند. محلول قلیایی مصرفی در ساخت بتن ژئوپلیمری، ترکیبی از هیدرواکسیدسدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) با نسبت سیلیکات به هیدرواکسید $2/5$ و غلظت مولاریته ۱۲، وزن مخصوص ترکیبی ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب، است. ابر روان کننده مصرفی از نوع پلی کربوکسیلات نرمال، محصول شرکت دوروچم خاورمیانه با نام تجاری Flowcem R700 و وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تحت استاندارد ASTM C494 مورد استفاده قرار گرفت. آب مصرف شده بمنظور ساخت طرح‌های اختلاط تحقیق پیش رو (در بتن کنترل و ساخت محلول قلیایی)، از آب شرب شهر لاهیجان استفاده گردید، این آب دارای PH در محدوده $6/5$ الی $7/5$ و وزن مخصوص 1000 kg/m^3 است.

۲-۲- طرح اختلاط، ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

استاندارد مجزا برای طرح اختلاط بتن قلیافعال موجود نمی‌باشد، لذا به پیروی از سایر تحقیقات در حوزه بتن ژئوپلیمری [۱۷]، از استاندارد طرح اختلاط بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89، برای ساخت بتن ژئوپلیمری در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده گردید. در این راستا طرح اختلاط نمونه‌های بتنی در این پژوهش براساس جدول ۱ تهیه و تنظیم شد. بمنظور ساخت نمونه‌های بتنی، در ابتدا مصالح خشک (سنگدانه، سرباره یا سیمان)، نانوسیلیس و الیاف، به داخل دستگاه مخلوط کن در حال گردش ریخته شدند و فرایند ترکیب به مدت ۲ دقیقه به طول انجامید، سپس آب و محلول قلیایی به فراخور نیاز هر طرح به مخلوط اضافه گردید و ترکیب مصالح ۳ دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد. در پایان، مخلوط بتن تهیه شده در قالب‌های از پیش روغن کاری شده در دو مرحله ریخته شد و در هر مرحله، بتن با 25 ضربه میله متراکم گردید. پس از سپری شدن ۲۴ ساعت اولیه از زمان بتن ریزی در محیط خشک و دمای اتاق (20 الی 25 درجه سلسیوس)، نمونه‌ها از قالب جداسازی شدند. نمونه‌های بتن کنترل (حاوی سیمان پرتلند) تا زمان انجام آزمون در داخل آب شرب در دمای اتاق نگهداری گردید، اما نمونه‌های بتن ژئوپلیمری پس از جداسازی از قالب، بمنظور بهبود خواص استحکامی به مدت ۴۸ ساعت درون کوره الکتریکی تحت دمای 60 درجه سلسیوس قرار گرفتند. در این راستا گزارش شده است که مقاومت بتن ژئوپلیمری با افزایش دمای عمل آوری افزایش می‌یابد [۱۸]. در پایان زمان



شکل ۱- ساخت بتن



جدول ۱- مشخصات طرح اختلاط بتن

طرح و نوع بتن	سیمان	آب	محلول قلیایی	سربراره	نانو سیلیس	الیاف	شن	ماسه	ابر روان کننده	مصالح مصرفی (kg/m ³)	
۱ OC-NS0PO0	پر تلند	۲۰۲/۵	۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰	۷۶۱/۱۳	۶/۷		
۲ GC-NS0PO0	ژئوپلیمری	۰	۲۰۲/۵	۴۵۰	۰	۰	۱۰۰۰	۸۱۶/۱۰	۶/۷		
۳ GC-NS4PO0	ژئوپلیمری	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۱۸	۰	۱۰۰۰	۷۶۷/۴۲	۷/۸		
۴ GC-NS8PO0	ژئوپلیمری	۰	۲۰۲/۵	۴۱۴	۳۶	۰	۱۰۰۰	۷۱۸/۷۵	۸/۳		
۵ GC-NS8PO1	ژئوپلیمری	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۳۶	۹/۲	۱۰۰۰	۶۷۲/۷۸	۸/۶		
۶ GC-NS8PO2	ژئوپلیمری	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۳۶	۱۸/۴	۱۰۰۰	۶۴۶/۲۸	۹		

فشاری به ترتیب متعلق به طرح ۱ (شامل بتن کنترل) و ۴ (شامل بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانو سیلیس) بدست آمد. در همین سن، افزودن تا ۸ درصد نانو سیلیس در بتن ژئوپلیمری موجب بهبود مقاومت فشاری تا میزان ۲۱/۹ درصد گردید و افزودن تا ۲ درصد الیاف پلی الفین به طرح بتن ژئوپلیمری، موجب افت مقاومت فشاری به میزان ۲۲/۵ درصد در این نوع از بتن گردید. کمترین میزان مقاومت فشاری کسب شده متعلق به سن عمل آوری ۷ روزه شامل بتن کنترل به میزان ۴۱/۹ مگاپاسکال است و بیشترین میزان مقاومت فشاری متعلق به سن عمل آوری ۹۰ روزه برای طرح ۴ شامل بتن ژئوپلیمری حاوی ۹۲ درصد سربراره کوره آهنگدازی^۳ و ۸ درصد نانو سیلیس^۴ به میزان ۸۲/۹

۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱- نتایج آزمون مقاومت فشاری

در این پژوهش، نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری در نمودار شکل ۲ به نمایش درآمده است. شکل ۳ نمونه بتنی در حال انجام آزمون مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.

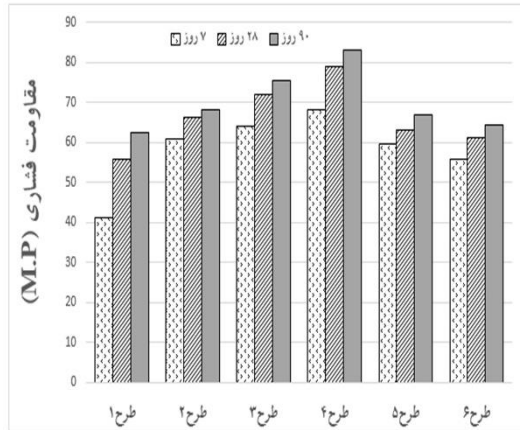
بر اساس نتایج مشاهده می‌گردد که افزایش سن عمل آوری موجب بهبود مقاومت فشاری به میزان ۴۸/۹ درصد در بتن معمولی و تا میزان ۲۱/۷ درصد در بتن ژئوپلیمری گردیده است. در سن عمل آوری ۹۰ روز (بعنوان بهترین عملکرد)، کمترین (۶۲/۴ مگاپاسکال) و بیشترین (۸۲/۹ مگاپاسکال) مقدار مقاومت

4 Nanosilica

0

3 Blast furnace slag

9



شکل ۲- نمودار نتایج آزمون مقاومت فشاری



شکل ۳- نمونه بتنی در حال انجام آزمون مقاومت فشاری

۳-۲- نتایج آزمون XRF

نتایج حاصل از آزمون طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) بر روی نمونه‌های بتنی حاصل از طرح اختلاط پژوهش پیش رو در سن عمل آوری ۷ روزه، بر اساس جدول ۲ به نمایش در آمده است. پیرو نتایج این جدول مشاهده می‌گردد که با تبدیل بتن معمولی به بتن ژئوپلیمری میزان CaO و SiO_2 به اندازه ۳۸ درصد کاهش یافته است و میزان MgO و Na_2O به اندازه چشم‌گیری افزایش یافته است. با اضافه شدن ۸ درصد نانو سیلیس به طرح بتن ژئوپلیمری، مقدار SiO_2 به میزان ۸۵ درصد افزایش یافته است. عناصر سیلیس، اکسید آلومینیوم، اکسید کلسیم و اکسید سدیم بعنوان چهار عنصر اصلی با بیشترین میزان مشارکت در ترکیبات بتن ژئوپلیمری حضور دارند، ذرات سیلیس و آلومینیوم در ساختار نانو سیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی بعنوان دو عنصر اصلی پیش ماده در ترکیب بتن ژئوپلیمری شناخته می‌شوند، کلسیم

مگاپاسکال است، این رقم در مقایسه با مقاومت ۹۰ روزه بتن کنترل ۳۳ درصد برتری را دارا می‌باشد. افت میزان مقاومت در نمونه های بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف پلی‌الفین نسبت به نمونه های فاقد الیاف در تمام سنین عمل آوری م‌شهود است، ضعف مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری با حضور الیاف پلی‌الفین را می‌توان اغلب به خواص فیزیکی و ظاهری الیاف و نحوه پیوند آنها در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) با سنگدانه ها (و الیاف) و خمیر سیمان ژئوپلیمری، پدیده گلوله شده الیاف، کاهش تراکم ماتریس سیمان و افزایش حجم حفرات در ناحیه انتقال بین سطحی دانست، از طرفی با افزایش میزان الیاف در ترکیب بتن ژئوپلیمری، احتمال بروز پدیده توزیع غیریکنواخت الیاف در بتن وجود دارد که این امر منتج به پیوند نامناسب الیاف با ماتریس سیمان ژئوپلیمری می‌گردد. افت مقاومت فشاری در نمونه های حاوی ۲ درصد الیاف بیشتر از نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف است، بطوریکه در ۹۰ روز عمل آوری میزان مقاومت فشاری طرح ۵ به ۶۴/۳ مگاپاسکال رسیده که نسبت به سن عمل آوری ۹۰ روزه در طرح ۴ حدود ۲۲ درصد کاهش مقاومت فشاری اما نسبت به ۹۰ روزه عمل آوری بتن کنترل حدود ۳ درصد افزایش مقاومت را شاهد هستیم.

در نمودار شکل ۱ میزان تاثیر خواص مواد پایه تشکیل دهنده بتن ژئوپلیمری از قبیل نانو سیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی همچنین تاثیر خواص الیاف پلی‌الفین بر مقاومت فشاری طرح‌های حاوی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری، به صراحت مشهود است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد برای هر طرح، افزایش مقاومت فشاری بتن با افزایش سن عمل آوری در رابطه مستقیم است. در این پژوهش، نتایج حاصل از آزمون‌های XRF و SEM ضمن همپوشانی با یکدیگر، در هماهنگی با نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری قرار داشتند.

۳- فاز سوم شامل نحوه پیوندهای خمیر سیمان با سنگدانه و الیاف در ناحیه انتقال بین سطحی^{۴۵} تشکیل شده است. تجزیه و تحلیل SEM نشان می‌دهد که ذرات نانو فضای خالی را پر می‌کند، که منجر به ایجاد یکنواختی، حفرات کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده می‌شود [۱۰]. در طرح‌های بتن ژئوپلیمری، افزودن نانوسیلیس به این طرح‌ها موجب بهبود تراکم و انسجام در بخش ریزساختار بتن گردیده است. از طرفی حجم ژل‌های هیدراته شده زیاد گردیده و حفرات و منافذ در بتن کاهش یافته است. این مزایا به دلیل عملکرد مطلوب نانوسیلیس در ترکیب با سایر اجزا تشکیل دهنده بتن می‌باشد که به خوبی توانسته نقش خود را که چسبندگی و پر کنندگی می‌باشد، در ماتریس بتن ژئوپلیمری ایفا نماید. در این راستا گزارش شده است که ابتدا، نانو ذرات منافذ ماتریس‌ها را پر می‌کنند، این عمل تخلخل نانو کامپوزیت‌های ژئوپلیمری را کاهش می‌دهد و در نتیجه، یکنواختی منافذ کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده‌تری ایجاد می‌کند [۱۰]. در طرح‌های ۳ الی ۶ حاوی بتن ژئوپلیمری، با توجه به حضور ذرات نانوسیلیس و خواص پوزولانی بالاتر این ماده نسبت به سرباره کوره آهنگدازی، نتایج بهتری را در تصاویر نسبت به طرح ۲ شاهد می‌باشیم، در این راستا ذرات نانوسیلیس با سطوح ویژه بالای خود با هیدرواکسیدسیدیم و سیلیکات سدیم موجود در محلول فعال ساز قلیایی واکنش داده، سپس کمپلکس‌های Si و Al ایجاد می‌شوند که در فرایند جوانه زنی تولید ژل‌های آلومینوسیلیکات کلسیم هیدراته (C-A-S-H)، آلومینوسیلیکات سدیم هیدراته (N-A-S-H) و سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) حاصل از فرایند شیمیایی ژئوپلیمریزاسیون مشارکت می‌کنند. این ژل‌ها ضمن چسبندگی بالا با پر کردن فضاهای خالی، موجب افزایش چگالی ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) می‌شوند. لذا کاهش حفرات و سطوح شکست در نمونه طرح ۳ نسبت به طرح ۲ مشهود است.

و سدیم نیز از عناصر اصلی تشکیل دهنده محلول فعال ساز قلیایی مصرفی در بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای در این تحقیق شناخته می‌شوند. روند افزایش مصرف نانو ذرات سیلیس در طرح‌های بتن ژئوپلیمری در نتایج جدول مشهود است، بر این اساس حداکثر میزان نانو ذرات سیلیس در طرح‌های ۴، ۵ و ۶ دیده می‌شود و حداقل آن در ترکیب بتن طرح ۲ مشاهده می‌گردد. حداکثر و حداقل میزان اکسید آلومینوم موجود در ترکیب به ترتیب متعلق به طرح ۲ و ۱ است. حضور اکسید آهن و اکسید منیزیم در محدوده ۲ الی ۷ درصد در نوسان است. وجود اکسیدهای پتاسیم و گوگرد در محدوده ۱ الی ۲ درصد در تمامی ترکیب‌ها مشهود است و حضور اکسیدهای تیتانیم، فسفر و منگنز در اغلب طرح‌ها به زیر ۱ درصد رسیده است. میزان افت حرارتی^{۴۲} ناشی از خروج مواد تحت حرارت (حاصل از دمای واکنش شیمیایی در فرایند بسپارش و ژئوسپارش و دمای عمل آوری حرارتی^{۴۰} در بتن ژئوپلیمری) در تمامی طرح‌ها تقریباً در یک رنج و در محدوده ۱۶ درصد مشاهده می‌گردد.

۳-۳- نتایج آزمون SEM

نتایج حاصل از آزمون تصویر برداری توسط میکروسکوپ الکترونیک روبشی (SEM) بر روی نمونه‌های بتنی حاصل از طرح اختلاط تحقیق پیش رو در سن عمل آوری ۹۰ روزه، با بزرگ نمایی ۱۰۰/۰۰۰ برابر و در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، بر اساس شکل ۴ به نمایش در آمده است. با توجه به تصاویر اخذ شده از SEM مشاهده می‌گردد که ریزساختار بتن در تمامی طرح‌های اختلاط از سه فاز اساسی مجزا و متفاوت به شرح ذیل تشکیل شده است:

- ۱- فاز اول شامل محصولات هیدراسیون^{۴۳} و ژئوپلیمریزاسیون^{۴۴} شامل ژل‌های هیدراته که در تصاویر SEM عمدتاً به رنگ تیره هستند، می‌باشد.
- ۲- فاز دوم شامل بلورهای واکنش نکرده که در نتیجه ناخالصی‌های موجود در مواد اولیه و یا ذرات واکنش نکرده در فرایند هیدراسیون و ژئوپلیمریزاسیون هستند و در تصاویر SEM عمدتاً به رنگ سفید هستند.

^{۴۵} Interfacial transition zone (ITZ)

^۴ Loss on ignition (LOI)

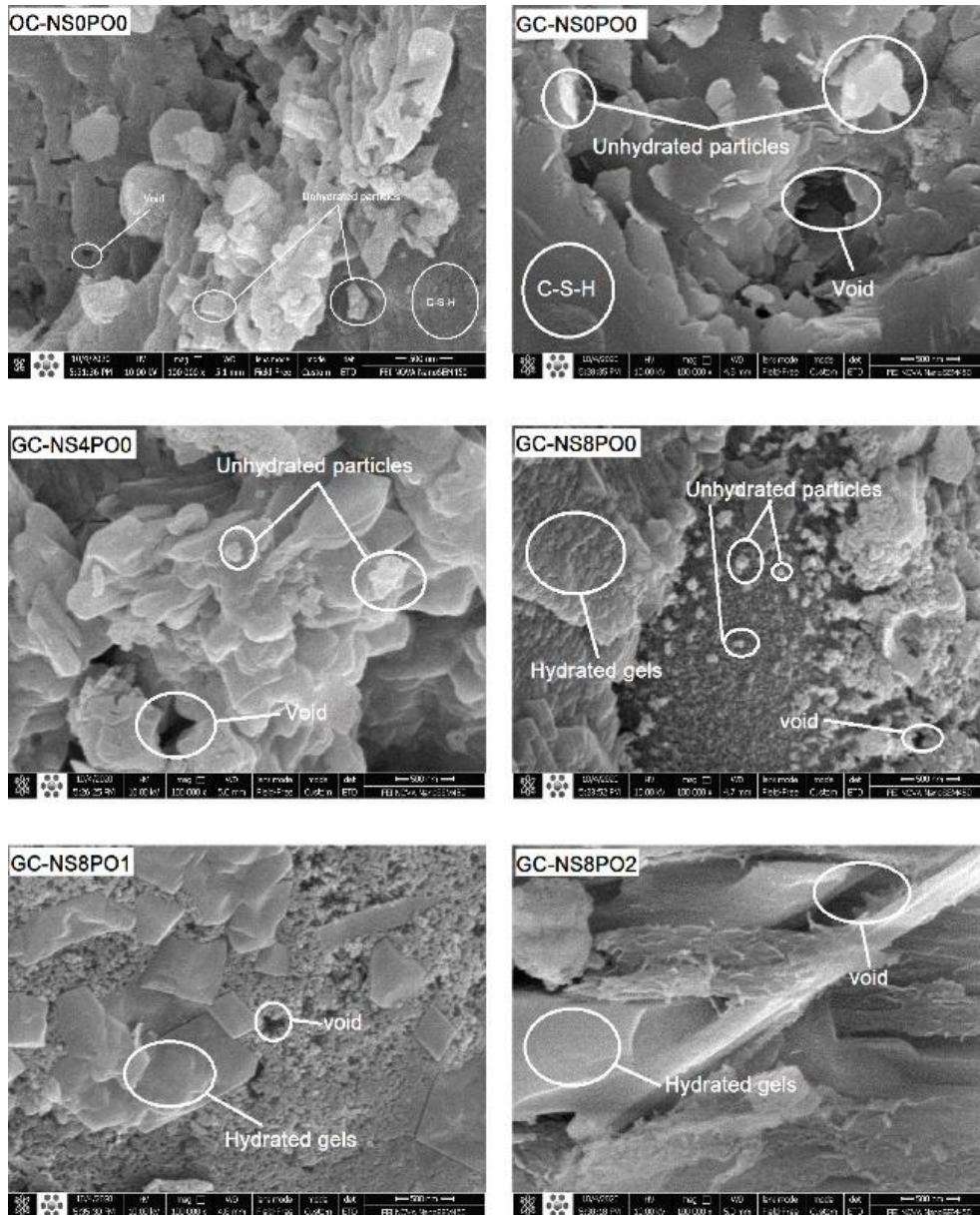
^۴ Hydrolysis

^۴ Polymerization

2

3

4



شکل ۴- تصاویر آزمون SEM

جدول ۲- نتایج آزمون XRF

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

۴- نتایج حاصل از آزمون‌های XRF و SEM، ضمن همپوشانی با یکدیگر، در هماهنگی با نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری در این تحقیق، قرار داشتند.

منابع

- [1] Davidovits J. Soft mineralogy and geopolymers. Proc. 1st Int. Conf. on geopolymers. 1988; 19-21.
- [2] Allahverdi, A. L. I., Ebrahim Najafi Kani, and Mahshad Yazdanipour. Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikáty*. 2011; 55(1): 68-78.
- [3] Phair, J. W., & Van Deventer, J. S. J. Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers. *International Journal of Mineral Processing*. 2002; 66(1-4): 121-143.
- [4] McNulty, E., Geopolymers: an environmental alternative to carbon dioxide producing ordinary Portland cement. Department of Chemistry, The Catholic University of America, 2009.
- [5] Siddique, R. and D. Kaur, Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی، به بررسی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای بر اساس انجام آزمون‌های طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و تصاویر میکروسکوپ الکترونیک رومشی (SEM) پرداخته شد. اهم نتایج حاصل از آزمون‌های این پژوهش به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

۱- افزایش سن عمل آوری موجب بهبود مقاومت فشاری به میزان ۴۸/۹ درصد در بتن معمولی و تا ۲۱/۷ درصدی در بتن ژئوپلیمری گردیده است.

۲- در آزمون مقاومت فشاری در سن عمل آوری ۹۰ روز (بعنوان بهترین عملکرد)، کمترین (۶۲/۴ مگاپاسکال) و بیشترین (۸۲/۹ مگاپاسکال) مقدار مقاومت فشاری به ترتیب متعلق به طرح ۱ (شامل بتن کنترل) و ۴ (شامل بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانوسیلیس) بدست آمد.

۳- در آزمون مقاومت فشاری در سن عمل آوری ۹۰ روز (بعنوان بهترین عملکرد)، افزودن تا ۸ درصد نانوسیلیس به ترکیب بتن ژئوپلیمری، موجب بهبود مقاومت فشاری تا میزان ۲۱/۹ درصد گردید.

۴- افزودن تا ۲ درصد الیاف پلی الفین به طرح بتن ژئوپلیمری در سن عمل آوری ۹۰ روزه، موجب افت مقاومت فشاری به میزان ۲۲/۵ درصد در این نوع از بتن گردید.

- properties). *Journal of Civil Engineering and Management*. 2012; 18(3): 416-425.
- [16] Bosiljkov, V.B., SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*. 2003; 33(9): 1279-1286.
- [17] Deb, P., Nath, P., & Sarker, P. Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*. 2015; 125: 594-600.
- [18] Ehsani, A., Nili, M., & Shaabani, K. 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*. 2017; 21(5): 1854-1865.
- Journal of Advanced Research*. 2012; 3(1): 45-51.
- [6] 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): 967-972.
- [7] Adak, D., M. Sarker, and S. Mandal, Structural performance of nano-silica modified fly-ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2017; 135: 430-439.
- [8] Adak, D., M. Sarker, and S. Mandal, Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*. 2014; 70: 453-459.
- [9] Deb, P.S., P.K. Sarker, and S. Barbhuiya, Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature. *Construction and building materials*. 2015; 101: 675-683.
- [10] Assaedi, H., et al., Influence of nano silica particles on durability of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Materials*. 2019; 12(9): 1459.
- [11] Shih, J.-Y., T.-P. Chang, and T.-C. Hsiao, Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. *Materials Science and Engineering*. 2006; 424(1-2): 266-274.
- [12] Beigi, M.H., et al., An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete. *Materials & Design*. 2013; 50: 1019-1029.
- [13] Deb, P.S., P.K. Sarker, and S. Barbhuiya, Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites*. 2016; 72: 235-245.
- [14] Law, D.W., et al., Long term durability properties of class F fly ash geopolymer concrete. *Materials and Structures*. 2015; 48(3): 721-731.
- [15] Bahadori, H. and P. Hosseini, Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles (investigation on concrete

Experimental Study of Compressive Strength of Geopolymer Concrete Based on XRF and SEM Analysis

Mohammadhossein Mansourghanaei

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

Morteza Biklaryan*

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

Alireza Mardookhpour

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

*M.biklaryan@iauc.ac.ir

Abstract

In this research, three mixing designs were made of geopolymer concrete containing 92, 96 and 100% composite blast-furnace slag including 8, 4 and 0% nanosilica, respectively. After performing the compressive strength test and selecting one of these three designs as the optimal design in terms of superior mechanical properties, by adding 1 and 2% of polyolefin fibers to the optimal design, two more designs were made of geopolymer concrete. Concrete specimens were subjected to compressive strength tests (at 7, 28 and 90 days of curing), XRF (at 7 days of curing), and SEM (at 90 days of curing). The results were evaluated and compared with the results of a mixing design made of ordinary concrete containing Portland cement. The results of the analyses in this research exhibited the superiority in mechanical and microstructural properties of the geopolymer concrete in comparison with the ordinary concrete at all ages. At the 90-day curing age, as the best age in terms of performance, the minimum (62.43 MPa) and maximum (82.96 MPa) compressive strength values were obtained in designs 1 and 4, respectively. At this age, adding up to 8% nanosilica in geopolymer concrete enhanced the compressive strength up to 21.94% and adding up to 2% of fibers reduced the compressive strength up to 22.49% in this type of concrete. The results of XRF and SEM analyses overlapped with each other and were in accordance with the results of the compressive strength test.

Keywords: Geopolymer concrete, mechanical properties of concrete, Compressive strength test, scanning electron microscope (SEM), X-ray fluorescence (XRF).



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license: (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).