

تولید بتن پاک حاوی مصالح ژئوپلیمری مصرفی در روسازی راه با بررسی آزمایشگاهی توسط XRF

مقاله علمی - پژوهشی

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

مرتضی بیکلریان*، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

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

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: M.Biklaryan@iauc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۱۷۸-۱۷۱

چکیده

روسازی بتنی راه‌ها با توجه به توسعه روزافزون صنعت حمل و نقل همواره مورد توجه قرار دارد. از طرفی به کارگیری از مصالح ژئوپلیمری در بتن به دلیل کاهش تولید گاز سمی دی‌اکسیدکربن (CO_2) در جو و خواص بالای مکانیکی و دوام بتن حاصله، مورد توجه محققین بوده است. در فرایند تولید بتن ژئوپلیمری، مواد آلومینوسیلیکاتی (حاصل از فرآوری مصالح معدنی) و محلول قلیا فعال جایگزین سیمان می‌گردد، محصول نهایی این ترکیب شیمیایی، تولید حجم زیادی از ژل‌های هیدراته با ویژگی چسبندگی و پرکنندگی بالا در ماتریس سیمان ژئوپلیمری است. در این پژوهش آزمایشگاهی، به ساخت یک طرح اختلاط از بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند پرداخته شد. سپس بتن ژئوپلیمری سرباره‌ای در سه طرح اختلاط حاوی ۰، ۴ و ۸ درصد نانوسیلیس ساخته شد. در ادامه آنالیز طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و آزمون مقاومت کششی در سن عمل‌آوری ۷ روزه در دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس) بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. نتایج حاصله حاکی از این مطلب بود که در طیف‌های ناشی از آنالیز XRF حضور ذرات سیلیس در ترکیب بتن ژئوپلیمری در طرح ۴ (حاوی ۸ درصد نانوسیلیس) به بالاترین میزان، به مقدار ۳۶/۳۳ درصد رسیده است. این موضوع باعث بهبود ۱۶/۳۶ درصدی در نتایج آزمون مقاومت کششی بتن گردید. از طرفی تولید عنصر اکسید آلومینیوم و اکسید کلسیم در بتن ژئوپلیمری (طرح فاقد نانوسیلیس) به بالاترین میزان خود به ترتیب به مقدار ۸/۰۷ و ۳۷/۱۷ درصد رسید. در پایان بررسی‌ها در این پژوهش آزمایشگاهی، نتایج حاصل از آزمون‌ها در همپوشانی با یکدیگر قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، سرباره کوره آهنگدازی، نانوسیلیس، الباف پلی‌الفین، طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس

۱- مقدمه

ژئوپلیمری حاوی مصالح معدنی فراوری شده، در راستای کاهش انتشار گاز دی اکسیدکربن در جو و دارا بودن خواص مکانیکی و دوام بالا نسبت به بتن معمولی مورد توجه محققان قرار گرفته است. هر ساله مصرف بتن در روسازی راه‌ها به دلیل خواص بالای مکانیکی

در دهه‌های اخیر، تولید بتن با کمترین عوارض محیط‌زیستی در دستور کار دانشمندان علم مهندسی عمران قرار گرفته است، از طرفی استفاده از مصالح نوین حاصل از فرآوری منابع معدنی، در ساخت بتن چشم‌انداز گسترده‌ای پیدا کرده است. در این راستا بتن

بتنی حاوی نانوسیلیس، ریزترک‌های بسیار کمتری مشاهده می‌گردد که نانوسیلیس در این حالت به‌عنوان ماده‌ای پرکننده عمل می‌کند تا فضاهای داخل اسکلت ریزساختار سخت شده خمیر ژئوپلیمری را پر کند و باعث افزایش فشردگی آن شود (Deb and et al., 2015; Shih and et al., 2006). افزودن نانوسیلیس باعث افزایش واکنش ژئوپلیمریزاسیون می‌شود، بنابراین مقدار بیشتری از ژل ژئوپلیمری آمورف در ماتریس‌ها ایجاد می‌شود. این امر به نوبه خود نشان می‌دهد که نانوذرات باعث جلوگیری از کاهش مقاومت ژئوپلیمری می‌شوند (Assaedi and et al., 2019). همچنین واکنش پوزولانی با تبدیل CH به ژل C-S-H، ریزساختارها را در بتن متراکم کرده و موجب همگنی بتن می‌گردد (Hongjian and et al., 2014). پس از ترکیب مصالح مصرفی در تهیه و ساخت بتن، فرایند واکنش شیمیایی بین مواد سیمانی (مواد آلومینوسیلیکاتی) و آب (یا محلول قلیافعال در بتن ژئوپلیمری) آغاز می‌گردد، سرعت و میزان تشکیل ژل‌های هیدراته که محصول نهایی حاصل از ترکیب شیمیایی است عمدتاً به خصوصیات و نسبت‌های مواد آلومینوسیلیکاتی و آب (یا محلول قلیافعال) بستگی دارد. آنالیز و اندازه‌گیری کمی و کیفی عناصر شیمیایی تشکیل دهنده با استفاده از آنالیز غیرمخرب طیف‌سنجی فلورسانس اشعه‌ایکس قابل اندازه‌گیری است. در این مقاله، ساخت و معرفی بتن ژئوپلیمری حاوی مصالح معدنی فراوری شده، به‌عنوان جایگزین مناسب برای بتن سیمانی که دارای خواص مکانیکی و دوام برتر بوده و مضرات محیط زیستی کمتری به واسطه کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن دارد، به‌عنوان طرحی نوآورانه معرفی شده است.

۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در این تحقیق آزمایشگاهی، سرباره کوره آهنگدازی محصول شرکت ذوب‌آهن اصفهان با وزن مخصوص ۲۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب با مدول الاستیسیته ۱/۲ پاسکال، تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت. از نانوسیلیس تولید شرکت ایونیک اینداستریز آلمان با خلوص ۹۹/۸ درصد، وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و قطر ذرات ۷ الی ۱۴ نانومتر استفاده گردید. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II، محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان)، تولید شده تحت استاندارد ISIRI 389 استفاده شد.

سنگدانه‌های مصرفی محصول کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده که به‌لحاظ کمی و کیفی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار داشتند. محلول قلیافعال مصرفی در ساخت بتن

و دوام و تحمل ترافیک سنگین، حجم بالایی را به‌خود اختصاص می‌دهد. از طرفی با توجه به حجم مناسب منابع معدنی در کشور عزیزمان ایران، فراوری برخی از این منابع که دارای مواد فراوان آلومینوسیلیکاتی در خود هستند، می‌تواند در تولید بتن با خواص ویژه کمک شایانی نماید. به‌کارگیری مواد قلیایی مانند سرباره کوره آهنگدازی و نانوسیلیس در بتن، که این مصالح حاصل فراوری منابع معدنی در کارخانه‌های است، می‌تواند در بهبود خصوصیات بتن و کاهش آلودگی محیط‌زیست کارآمد باشد. در سال‌های اخیر کاربرد نانوذرات سیلیس برای بهبود خواص بتن، چشم‌انداز گسترده‌ای در برابر علم تکنولوژی بتن ایجاد کرده است (Scrivener and James, 2008). نانوذرات به‌علت اندازه ذرات بسیار کوچک و سطح ویژه بالای خود، خصوصیات ویژه‌ای را در طرح اختلاط بتن از خود نشان داده‌اند (Li and et al., 2004). نانوذرات سیلیسی با خواص چسبندگی و پرکنندگی فراوان در ترکیب شیمیایی، می‌تواند الزامات مواد پوزولانی را در بتن مهیا نماید. نانوسیلیس به‌دلیل اندازه کوچک ذرات خود می‌تواند با پرکردن خلل و فرج‌های باقی مانده در بتن، باعث بهبود مقاومت آن شود و به‌عنوان یک مکمل در ساخت بتن به‌کار رود (Delavari and et al., 2018).

تولید گاز سمی دی‌اکسیدکربن و مصرف سوخت‌های فسیلی در کارخانه‌های تولید کننده سیمان، از عوارض محیط‌زیستی تولید سیمان به‌شمار می‌رود. تحقیقات نشان داده است که کارخانه‌های تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی‌اکسیدکربن وارد شده به جو کره زمین می‌باشند (Nosrati and et al., 2018). از طرفی ضعف بتن سیمانی در مواجهه با مواد شیمیایی و خوردنده‌ها، همچنین نیاز به بتن مستحکم در برخی از سازه‌های با اهمیت زیاد، محققان را با فکر یافتن ماده‌ای جایگزین با سیمان در بتن روبرو کرده است. آنها خاکستر بادی، متاکائولین، سرباره کوره بلند و سایر پوزولان‌ها را به‌عنوان جایگزین‌های مناسب سیمان معرفی کرده‌اند (Nuaklong and et al., 2016; Singh and et al., 2016; Zhuang and et al., 2015; al., 2015). جایگزینی سیمان با این پوزولان‌ها آلودگی محیط‌زیستی را کاهش داده و خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود می‌بخشد و نیاز قابل توجهی به سیمان را کاهش می‌دهد (Ryu and et al., 2013; Mehdipour and et al., 2020). در این راستا بتن ژئوپلیمری با توجه به دارا بودن خواص مکانیکی و دوام بالا می‌تواند دغدغه‌های محققان را برطرف نماید. بتن ژئوپلیمری در ابتدا توسط محقق فرانسوی بنام ژوزف داویدویتس در سال ۱۹۷۲ میلادی مطرح شد (Davidovits, 2008). میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است (Neupane and et al., 2018). در نمونه‌های

در داخل آب آهک در دمای اتاق نگهداری گردید، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری پس از جداسازی از قالب، به‌منظور بهبود خواص استحکامی به‌مدت ۴۸ ساعت درون کوره الکتریکی تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند.

در این راستا گزارش شده است که مقاومت بتن قلیافعال با افزایش دمای عمل‌آوری افزایش می‌یابد (Ehsani and et al., 2017). همچنین بررسی‌ها نشان داده است که مخلوط‌های بتن قلیافعال تحت عمل‌آوری حرارتی ۶۰ درجه سلسیوس در ۲۴ ساعت اولیه، توانسته پس از ۳ روز بیش از ۷۵ درصد از مقاومت ۲۸ روزه بین ۶۰ الی ۸۵ مگاپاسکال را کسب نمایند (Prasanna Venkatesan and Pazhani, 2016). سپس در پایان فرایند عمل‌آوری حرارتی، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری تا هنگام آزمون در دمای اتاق در محیط خشک نگهداری شدند.

۳-۲- روش‌های آزمون و استانداردها

در تحقیقات مقاله حاضر، آنالیز و اندازه‌گیری کمی و کیفی عناصر شیمیایی تشکیل دهنده نمونه‌های بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری در سن عمل‌آوری ۷ روزه برای کلیه طرح‌های اختلاط با استفاده از آنالیز غیرمخرب طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) انجام پذیرفت. در این آزمون، اشعه با شدت تابش $Ka \lambda=1.54060$ (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 برای طرح‌های اختلاط بتن در سن عمل‌آوری هدف 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.

ژئوپلیمری، ترکیبی از هیدرواکسیدسدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) با نسبت سیلیکات به هیدرواکسید ۲/۵ و غلظت مولاریته ۱۲، وزن‌مخصوص ترکیبی ۱۴۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب، است. ابرروان‌کننده مصرفی از نوع پلی‌کربوکسیلات نرمال، محصول شرکت دوروچم خاورمیانه با نام تجاری Flowcem R700 و وزن‌مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تحت استاندارد ASTM C494 مورد استفاده قرار گرفت. آب مصرف شده به‌منظور تهیه آب‌آهک و ساخت طرح‌های اختلاط تحقیق آزمایشگاهی پیش‌رو (در بتن کنترل و ساخت محلول قلیافعال)، از آب شرب شهر لاهیجان استفاده گردید، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن‌مخصوص 1000 kg/m^3 است.

۲-۲- طرح اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

استاندارد مجزا برای طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری موجود نمی‌باشد، لذا به‌پیروی از سایر تحقیقات در حوزه ساخت بتن ژئوپلیمری (Deb and et al., 2015)، از استاندارد طرح اختلاط بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89، برای ساخت بتن قلیافعال در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده گردید. در این راستا طرح اختلاط نمونه‌های بتنی براساس جدول ۱ تهیه و تنظیم شد.

به‌منظور ساخت نمونه‌های بتنی، در ابتدا مصالح خشک به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب به مدت ۲ دقیقه به‌طول انجامید، سپس آب و محلول قلیافعال به فراخور نیاز هر طرح به مخلوط اضافه گردید و ترکیب مصالح به مدت ۳ دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد. در پایان، مخلوط بتن تهیه شده در قالب‌های از پیش روغن‌کاری شده در دو مرحله ریخته شد و در هر مرحله با ۲۵ ضربه میله متراکم گردید. پس از سپری شدن ۲۴ ساعت اولیه از زمان بتن‌ریزی و نگهداری نمونه‌ها در محیط خشک و دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس)، نمونه‌ها از قالب جداسازی شدند و نمونه‌های بتن کنترل (حاوی سیمان پرتلند) تا زمان انجام آزمون

جدول ۱. مشخصات طرح اختلاط بتن

طرح	نوع بتن	kg/m^3					
		سیمان	آب	محلول قلیافعال	سرباره	نانو سیلیس	شن
۱	پرتلند	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰	۰	۰	۱۰۰۰
۲	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۵۰	۰	۱۰۰۰
۳	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۱۸	۱۰۰۰
۴	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۱۴	۳۶	۱۰۰۰

آزمون مقاومت کششی بتن با روش برزلی، تحت استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر در سن عمل‌آوری ۷ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه جک بتن‌شکن انجام پذیرفت. در این راستا نمونه‌ها از وجه طولی در زیر دستگاه جک بتن‌شکن قرار داده شدند و نیرو مطابق استاندارد تا لحظه شکست نمونه بتنی اعمال گردید. میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده است.

۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱- آنالیز نتایج آزمایشگاهی XRF

نتایج حاصل از آنالیز طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس بر روی نمونه‌های بتنی حاصل از این پژوهش تحقیقاتی در سن عمل‌آوری ۷ روزه در جدول ۲ به‌نمایش درآمده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌گردد که نمونه بتنی طرح ۱ شامل بتن کنترل محتوی سیمان پرتلند، دارای بیشترین میزان اکسیدکلسیم (۳۷/۱۶۹ درصد) نسبت به سایر طرح‌های است، درصد پایین میزان سیلیس (۱۹/۵۷۴ درصد) در نمونه بتنی طرح ۲ به‌علت عدم استفاده از نانوسیلیس در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری است، در حالیکه این مقدار در طرح‌های ۳ و ۴ با توجه به وجود نانوسیلیس در طرح اختلاط، با روند افزایش نانوسیلیس از ۴ درصد به ۸ درصد، افزایش یافته است. روند تغییرات در میزان SiO_2 و Al_2O_3 به‌عنوان اجزا اصلی بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری در طرح‌ها مشهود است، با افزایش میزان

نانوسیلیس در طرح‌های بتن ژئوپلیمری، بر میزان این دو ماده در ترکیب بتن افزوده شده است. میزان خروج عناصری از قبیل آب و مواد کربنی که در اثر گرمای احتراق (LOI) از ترکیب بتن خارج می‌شود در نمونه طرح ۴ به‌میزان ۴/۲۸ درصد کمتر از طرح ۱ بدست آمد. سیلیس (SiO_2)، اکسیدآلومینیم (Al_2O_3)، اکسیدکلسیم (CaO) و اکسیدسدیم (Na_2O) به‌عنوان چهار عنصر اصلی با بیشترین میزان مشارکت در ترکیبات بتن ژئوپلیمری حضور دارند، سیلیس و آلومینیم به‌عنوان عناصر اصلی پیش‌ماده در ساختار نانوسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی شناخته می‌شوند، کلسیم و سدیم نیز از عناصر اصلی تشکیل دهنده محلول قلیافعال مصرفی در بتن ژئوپلیمری سرباره‌ای شناخته می‌شوند. روند افزایش مصرف نانوذرات سیلیس در طرح‌های بتن ژئوپلیمری در نتایج جدول ۱ مشهود است، بر این اساس حداکثر میزان نانوذرات سیلیس در طرح ۴ دیده می‌شود و حداقل آن در ترکیب بتن طرح ۲ مشاهده می‌گردد، حداکثر و حداقل میزان اکسیدآلومینیم موجود در ترکیب متعلق به طرح ۲ و ۱ است. حضور اکسیدهای آهن و 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 ترکیب‌ها مشهود است و حضور اکسیدهای تیتانیم، فسفر و منگنز در اغلب طرح‌ها به زیر ۱ درصد رسیده است. میزان افت حرارتی ناشی از خروج مواد تحت حرارت در تمامی طرح‌ها تقریباً در یک رنج و در محدوده ۱۶ درصد مشاهده می‌گردد.

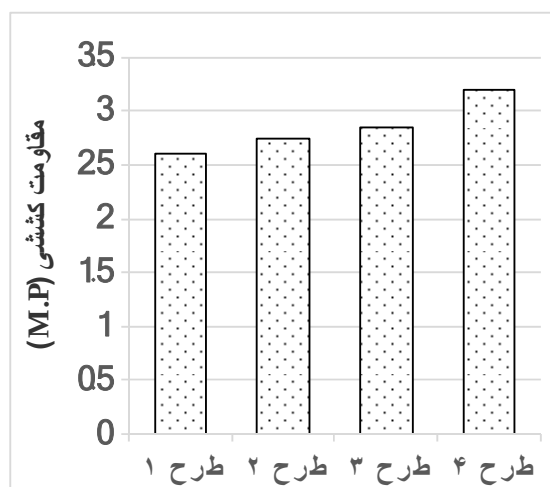
جدول ۲. نتایج آنالیز XRF

نام ماده	ترکیب شیمیایی	مقادیر ماده در هر طرح (درصد)			
		طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳	طرح ۴
سیلیس	SiO_2	۲۷/۱۲۲	۱۹/۵۷۴	۳۲/۰۲۶	۳۶/۳۳۱
اکسیدآلومینیم	Al_2O_3	۵/۶۳۹۵	۸/۰۷۳	۶/۷۲	۷/۰۱۳۱
اکسیدکلسیم	CaO	۳۷/۱۶۹	۲۶/۸۱۵	۲۳/۶۰۹	۱۵/۲۵۷
اکسیدسدیم	Na_2O	۱/۱	۱۵/۱	۹/۰۱۶	۱۲/۸۷۲
اکسیدآهن	Fe_2O_3	۷/۲۰۹۸	۵/۶۴	۳/۹۴	۳/۹۴
اکسیدمنیزیم	MgO	۲/۱۱۴	۵/۰۵۱	۴/۰۱۴	۳/۰۱۳۳
اکسیدپتاسیم	K_2O	۰/۹۱۴۴	۱/۰۱۳	۱/۰۱۵	۱/۰۵۲۶
اکسیدگوگرد	SO_3	۱/۵۹۱۳	۱/۱۶۴	۱/۸۷۵	۲/۸۲۲
اکسیدتیتانیم	TiO_2	۰/۴۷۲	۰/۹۶۱	۱/۰۸۶	۱/۱۷۳
اکسیدفسفر	P_2O_5	۰/۱۶۳	۰/۱۷۴	۰/۱۴۴	۰/۱۳۱
اکسیدمنگنز	MnO	۰/۰۹۱	۰/۳۹۵	۰/۶۵۵	۰/۶۸۴
افت حرارتی	LOI	۱۶/۴۱۴	۱۶/۰۴	۱۵/۹	۱۵/۷۱۱

۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی

نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی نمونه‌های بتنی در این پژوهش آزمایشگاهی در سن عمل‌آوری ۷ روزه در شکل ۱ به‌نمایش درآمده است. در شکل ۲ و ۳، نمونه‌های بتنی پس از آزمون مقاومت کششی به‌نمایش درآمده است. این آزمون به‌منظور ارزیابی و همپوشانی با نتایج حاصل از آنالیز XRF در نظر گرفته شده است. پیرو نتایج حاصله در آزمون مقاومت کششی، مشاهده می‌گردد که حداقل (۲/۶۱ مگاپاسکال) و حداکثر (۳/۲ مگاپاسکال) میزان نتایج کسب شده، به‌ترتیب متعلق به طرح ۱ شامل بتن کنترل (حاوی سیمان پرتلند) و طرح ۴ شامل بتن ژئوپلیمری (حاوی ۸ درصد نانوسیلیس)، است. افزودن ۸ درصد نانوسیلیس به بتن ژئوپلیمری در طرح ۴ موجب بهبود مقاومت کششی به میزان ۱۶/۳۶ درصد نسبت به طرح ۲ (بتن ژئوپلیمری فاقد الیاف) گردیده است. برتری میزان مقاومت کششی کسب شده در بتن ژئوپلیمری طرح ۴ (حاوی ۸ درصد نانوسیلیس) نسبت به بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند، ۲۲/۶ درصد است. افزودن نانوسیلیس به طرح‌های بتن

ژئوپلیمری ضمن تسریع بخشیدن در فرایند ژئوپلیمریزاسیون، موجب تولید حجم بالایی از ژل‌های هیدراته شده می‌گردد. این ژل‌ها ضمن بهبود پیوندها در ساختار بتن ژئوپلیمری، با پر کردن حفرات و منافذ در ساختار بتن، موجب بالا رفتن انسجام و استحکام در نمونه‌های بتنی می‌گردند. در این راستا، نتایج حضور حداکثری (۳۶/۳۳ درصد) ذرات سیلیس در ترکیب شیمیایی طرح ۴ (در آنالیز XRF)، در میزان حداکثری کسب مقاومت کششی نمود پیدا کرده است. اگر چه حضور ذرات سیلیس در ترکیب شیمیایی بتن طرح ۱ (۲۷/۱۲ درصد) بیش از طرح ۲ (۱۹/۵۷ درصد) است، و انتظار می‌رود تا میزان مقاومت کششی در طرح ۱ بیش از طرح ۲ باشد، اما با توجه به حضور اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) بیشتر در طرح ۲ (۸/۰۷ درصد) نسبت به طرح ۱ (۵/۶۳ درصد)، و نقش مهم این عنصر در ارتقا چسبندگی و پرکنندگی ژل‌های هیدراته، موجب رفع ضعف در مقاومت کششی بتن ژئوپلیمری (در طرح ۲) شده است.



شکل ۱. نمودار نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن



شکل ۲. نمونه بتنی فاقد نانوسیلیس در آزمون مقاومت کششی



شکل ۳. نمونه‌های بتنی حاوی نانوسیلیس در آزمون مقاومت کششی

۴- نتیجه‌گیری

عمل‌آوری ۹۰ روزه تحت دمای اتاق پرداخته شده است. اهم نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ادامه می‌باشد.
-افزودن ۸ درصد نانوسیلیس به ترکیب بتن ژئوپلیمری، موجب بهبود نتایج در آزمون مقاومت کششی، به میزان ۱۶/۳۶ درصد نسبت

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهنگدازی با استفاده از انجام آنالیز نتایج طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و آزمون مقاومت کششی در سن

اشعه‌ایکس طرح بتن ژئوپلیمری، وجود حداکثری این ماده در ترکیب شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی مصرفی، به میزان ۳۶/۷۲ درصد در این پژوهش است. در حالیکه میزان سیلیس و اکسید آلومینیوم در این ماده به ترتیب به میزان ۳۵/۵ و ۹/۱۷ درصد است. - نتایج حاصل از آنالیز و آزمون در این پژوهش حاکی از برتری عملکرد در بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند است. کلیه نتایج در این تحقیق ضمن همپوشانی یکدیگر، در هماهنگی با هم قرار گرفتند.

به طرح ۲ (بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس) و ۲۲/۶ درصد نسبت به بتن کنترل (حاوی سیمان پرتلند) گردید. - بالاترین درصد حضور عناصر سیلیس (SiO_2) و اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) به عنوان مواد قلیایی پایه تشکیل دهنده بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای، به ترتیب در طرح ۴ (بتن ژئوپلیمری حاوی ۸ درصد نانوسیلیس) و طرح ۲ (بتن ژئوپلیمری فاقد نانوسیلیس) به میزان ۳۶/۳۳ و ۸/۰۷ درصد به دست آمد. - علت اصلی حضور حداکثری عنصر اکسید کلسیم (CaO) بعد از عنصر سیلیس در آنالیز نتایج حاصل از طیف سنجی فلورسانس

۵- مراجع

- Neupane, N., Chalmers, D., & Kidd, P. (2018). High-strength geopolymers—properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*, 7(2), 15-25.
- 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.
- Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- 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.
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and building materials*, 47, 409-418.
- Scrivener, K., & R. James, K. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and concrete research*, 38(2), 128-136.
- Shih, J. Y., Chang, T. P., & Hsiao, T. C. (2006). Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. *Materials Science and Engineering: A*, 424(1-2), 266-274.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
- Assaedi, H., Alomayri, T., Shaikh, F., & Low, I. M. (2019). Influence of nano silica particles on durability of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Materials*, 12(9), 1459.
- Davidovits, J. (2008). Geopolymer chemistry and application 2nd ed. *Institut Géopolymère, France*.
- Deb, P. S., Sarker, P. K., & Barbhuiya, S. (2015). Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature. *Construction and building materials*, 101, 675-683.
- 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.
- 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.
- 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.
- Hongjian, D., Suhuan, D., & Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 73, 705-712.
- Li, H., Xiao, H., Yuan, J., & OU, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185-189.
- Mehdipour, S., Nikbin, I. M., Dezhmpanah, 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, 120126.

Cleaner Production of Concrete Containing Geopolymer Materials Used in Road Paving by Laboratory Examination by XRF

*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 Mardokhpour, Department of Civil Engineering, Lahijan Branch,
Islamic Azad University, Lahijan, Iran.*

E-mail: M.Biklaryan@iauc.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

Concrete pavement of roads is always considered due to the increasing development of the transportation industry, on the other hand, the use of geopolymeric materials in concrete due to reduced production of toxic carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere and high mechanical properties and durability of concrete the result has been the focus of researchers. In the process of producing geopolymer concrete, aluminosilicate materials (obtained from processing mineral materials) and alkaline solution are replaced by cement. The final product of this chemical compound is the production of large volumes of hydrated gels with high adhesion and filling properties in the geopolymer cement matrix. In this laboratory research, a mixing design was made of control concrete containing Portland cement. Then, slag geopolymer concrete was made in three mixing designs containing 0, 4 and 8% nanosilica. Following XRF analysis and tensile strength test at 7 days processing time at room temperature (20 to 25 °C) on the sample. Concrete was done. The results showed that in the spectra of XRF analysis, the presence of silica particles in the composition of geopolymer concrete in Scheme 4 (containing 8% nanosilica) reached the highest level of 36.33%, which improved 16.36%. Percentage in the results of tensile strength test of concrete. On the other hand, the production of aluminum oxide and calcium oxide in geopolymer concrete (design without nanosilica) reached its highest levels of 8.07 and 37.17%, respectively. At the end of the studies in this study, the results of the tests overlapped.

Keywords : Geopolymer Concrete, Blast Furnace Slag, Nanosilica, Polyolefin Fibers, X-Ray Fluorescence