

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر افزودن الیاف و مصالح فرآوری شده معدنی بر روی بتن ژئوپلیمری

محمدحسین منصورقناعتی^۱، مرتضی بیک لریان^{۲*}، علیرضا مردوخ پور^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲

چکیده

بتن ژئوپلیمری در راستای رفع معایب (نظیر استحکام پایین و مضرات محیط زیستی) ناشی از مصرف بتن معمولی در سازه‌ها مطرح گردید. در ساخت این نوع از بتن، مواد ژئوپلیمری فرآوری شده حاصل از منابع معدنی مانند سرباره و نانوسیلیس جایگزین سیمان می شود و بتن مستحکم ژئوپلیمری را تولید می کند. در این پژوهش آزمایشگاهی به ساخت یک طرح اختلاط از بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند پرداخته شد. سپس بتن ژئوپلیمری در سه طرح تولید گردید. طرح اول، حاوی ۱۰۰ درصد سرباره کوره آهنگدازی و طرح دوم و سوم حاوی ۹۲ درصد سرباره کوره آهنگدازی و ۸ درصد نانوسیلیس، به ترتیب حاوی ۱ و ۲ درصد الیاف پلی الفین (در مجموع ۴ طرح اختلاط) است. در ادامه، آزمون های مدول الاستیسیته و مقاومت کششی در سن عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه در دمای اتاق، بر روی نمونه های بتنی انجام گرفت. آزمون SEM در سن عمل آوری ۹۰ روزه، بمنظور صحت سنجی با سایر نتایج، بر روی نمونه های بتنی انجام گرفت. نتایج حاکی از این موضوع است که افزایش سن عمل آوری در بتن، موجب بهبود نتایج شد. در آزمون مدول الاستیسیته و مقاومت کششی، افزودن الیاف به بتن ژئوپلیمری در سن ۲۸ روزه، به ترتیب موجب بهبود ۲۱/۱۹ و ۲۴/۰۷ درصدی نتایج در طرح ۴ (۲ درصد الیاف) نسبت به طرح ۲ (فاقد الیاف) شد. افزایش الیاف موجب بهبود نتایج آزمون های مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن کنترل شد. نتایج آزمون SEM در همپوشانی با نتایج سایر آزمون ها قرار گرفت.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، سرباره کوره آهنگدازی، نانوسیلیس، الیاف پلی الفین، مقاومت کششی.

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

۲. گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران. *M.biklaryan@iauc.ac.ir

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

* مسئول مکاتبات

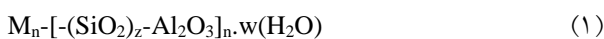
۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، یافتن ماده‌ای با ویژگی‌های پوزولانی بعنوان جایگزین سیمان در بتن که ضمن برطرف کردن دغدغه‌های محیط زیستی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گاز سمی دی‌اکسید کربن در جو، دارای خواصی برتر از سیمان در بتن باشد، چشم انداز گسترده‌ای را در پژوهش‌های مهندسی عمران، پیش روی محققین فراهم نموده است.

تحقیقات نشان می‌دهد که کارخانه‌های تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی‌اکسیدکربن وارد شده به جو کره زمین می‌باشند (Nosrati et al., 2018). در راستا این معضل، محققین خاکستر بادی، متاکائولین، سرباره کوره آهنگدازی و سایر پوزولان‌ها را به عنوان جایگزین‌های مناسب سیمان معرفی کردند (Nuaklong et al., 2016; Zhuang et al., 2016). جایگزینی سیمان با این پوزولان‌ها منجر به تولید بتن ژئوپلیمری می‌شود که می‌تواند آلودگی محیط زیستی را کاهش دهد، خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشد و نیاز قابل توجه به سیمان را نیز کاهش دهد (Ryu et al., 2013; Mehdipour et al., 2020). ساختار بتن ژئوپلیمری در ابتدا توسط محقق فرانسوی بنام ژوزف داویدویتس در سال ۱۹۷۲ میلادی مطرح شد (Davidovits., 2008). میزان دی‌اکسید کربن تولید شده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است (Neupan., 2018). تولید بتن ژئوپلیمری توسط روش‌های متداول تکنولوژی بتن انجام می‌گیرد (Vora and Urmil., 2013). در بتن ژئوپلیمری مصالح قلیایی حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی فراوان که دارای ویژگی چسبانندگی و پرکنندگی بالایی در ترکیب بتن هستند، جایگزین سیمان می‌شوند. تحقیقات نشان داده است که محصولات حاصل از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون مزایای ویژه‌ای از قبیل خواص مکانیکی عالی، مقاومت مناسب در برابر دمای بالا و حملات شیمیایی، جمع‌شدگی کم و دیگر موارد را دارند (Yunsheng et al., 2010). در واکنش ژئوپلیمریزاسیون بر اساس مکانیسم ژئوسپارش، با تبدیل شدن CH به ژل‌های هیدراته شده نظیر C-S-H،

ریزساختارها در بتن متراکم شده و موجب همگنی بتن می‌شود (Hongjian et al., 2014).

ساختار شیمیایی ژئوپلیمری بصورت سیالات متشکل از سیلیسیس - اکسیژن-آلومینیم (Si-O-Al)، سیالات سیلوکسو (Si-O-Al-O-Si-O) و سیالات دی‌سیلوکسو (Si-O-Al-O-Si-O-O-Si-O-Si-O) است که توسط دی‌ویدویتس معرفی شد، پلی سیالات زنجیره‌ای پلیمری از سیلیسیوم، آلومینیم و اکسیژن با فرمول تجربی براساس رابطه ۱ است، در این رابطه به بخش داخل کرشه در اصطلاح پلی سیالات (سیلیسیس - اکسیژن - آلومینیم) گفته می‌شود، پلی سیالات متشکل از چهار وجهی - های SiO_4 و AlO_4 می‌باشند که توسط به اشتراک گذاشتن تمام اکسیژن‌ها به هم متصل شده‌اند، در این پیکربندی چهار وجهی، AlO_4 با یک بار منفی ظاهر می‌شود که فلز قلیایی نقش تعادل سازی بار الکتریکی را بر عهده دارد، یون‌های ($Na^+, K^+, H_3O^+, Ca^{++}, Ba^{++}, NH_4^+$) بیشترین نقش را در ایجاد فضاهای خالی شبکه برای خثی کردن بار حاصل از وجود Al^{3+} در شبکه چهار وجهی ایفا می‌کنند (Davidovits., 2008).



هر یک از پارامترهای رابطه (۱) به شرح ذیل تعریف می‌شود: بخش داخل کرشه:

ژل سیالات (سیلیسیس - اکسیژن - آلومینیم)

M: کاتیون موجود در مخلوط (کاتیون قلیایی)

n: درجه ژئوپلیمریزاسیون (درجه ژئوسپارش تراکمی)

Z: نوع پیوند که می‌تواند ۱/۲ و ۳ باشد

w: تعداد مولکول‌های آب در پیوند (مقدار آب ساختاری)

در راستای تولید بتن ژئوپلیمری، دباغ و همکاران معتقدند که افزایش تراکم و سختی در بتن منجر به افزایش مدول الاستیسیته بتن می‌شود (Dabbagh and Akbarpour., 2017). با افزودن سرباره کوره آهنگدازی در ترکیب بتن ژئوپلیمری، ساختار منافذ در بتن بهینه سازی شده و توزیع اندازه منافذ بطور مناسب

گردیده است (Moradikhou et al., 2020). در تحقیقی 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 شود (Hajikarimi and Fallah, 2019). ژانگ و همکاران معتقدند که الیاف‌ها با پراکندن شدن در داخل بتن می‌توانند باعث اصلاح ساختار بتن شوند (Zhang et al., 2009). الیاف پلی‌الفین با جلوگیری از اتصال منافذ و اتصال کانال‌های جریان در بتن، آن را تقویت کرده و از پوسته شدن آن جلوگیری می‌کند (Yousefvand et al., 2019). تجزیه و تحلیل CMOD نشان می‌دهد که الیاف پلی‌الفین دارای خواص پیوندی مناسبی هستند و به دلیل سفتی مناسب می‌توانند قطعات بتن را پس از ترک اولیه در کنار یکدیگر نگهدارند (Adhikary et al., 2019). در یک مطالعه در مورد اثر افزودن ۰/۵ درصد الیاف بر روی بتن ژئوپلیمری، کاهش ۱۲٪ تا ۱۵٪ در مقاومت مشاهده شد. کاهش در نمونه‌های حاوی الیاف با طول ۵۵ میلی‌متر در مقایسه با نمونه‌هایی با طول ۴۴ میلی‌متر بیشتر بود (Noushini et al., 2018; Noushini et al., 2019). تجزیه و تحلیل SEM نشان می‌دهد که ذرات نانو فضای خالی موجود در ساختار بتن را پر می‌کند، این امر منجر به ایجاد یکنواختی، حفرات کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده می‌شود (Assaedi et al., 2019).

در مقاله پیش رو، تولید بتن ژئوپلیمری حاوی مصالح معدنی فرآوری شده به واسطه نقش مهم در دوام و استحکام، کاهش آلودگی هوا (به دلیل کاهش انتشار CO₂)، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی (در فرایند تولید بتن معمولی)، حفظ منابع سیمانی و حافظ محیط زیست (به دلیل مصرف دی‌اکسید سرباره در کارخانه‌های ذوب آهن)، بعنوان طرحی نوآورانه معرفی شده است.

۲. ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱. مصالح مصرفی

در این تحقیق آزمایشگاهی، سرباره کوره آهن‌گدازی محصول شرکت ذوب آهن اصفهان با وزن مخصوص ۲۴۵۰ کیلوگرم بر

تر خواهد بود، ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) متراکم تر و مقاومت و جنبه‌های دوام بتن به تدریج افزایش می‌یابد، به عبارتی توسعه مقاومت و دوام رابطه نزدیکی با تکامل ساختار حفره و ناحیه انتقال بین سطحی در بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای دارد (Duan et al., 2013).

کاربرد الیاف بطور فراگیر از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی در کشورهای صنعتی پیشرفته آغاز شد و در طی دهه‌های گذشته جنس و شکل الیاف و همچنین نحوه ساخت بتن الیافی به طور مستمر بهبود یافته است (Hajikarimi and Fallah, 2019). استفاده از الیاف موجدار با نسبت طول به قطر بالاتر مقاومت بیشتری را نتیجه می‌دهد، تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت کششی بتن خواهد شد (Mohtasham Moein et al., 2019). الیاف در داخل بتن به سه شکل زیر عمل می‌کنند:

- ۱- از رشد ترک‌ها جلوگیری می‌کنند.
- ۲- با پراکنده شدن در داخل بتن باعث اصلاح ساختار بتن می‌شوند.
- ۳- الیاف باعث تغییر مسیر ترک‌ها می‌شوند (Zhang et al., 2009).

افزایش طول الیاف تاثیر مثبت بر ویژگی‌های مکانیکی و شکست بتن دارد، تحقیقات نشان داده است که اضافه کردن ۰/۵ درصد حجمی الیاف به بتن موجب افزایش مقاومت می‌شود، علاوه بر این، اضافه کردن این مقدار الیاف موجب افزایش مدول الاستیسیته نیز می‌شود که ارتباط مستقیم با مقاومت بتن دارد (Hajikarimi and Fallah, 2019). الیاف پلی‌الفین یک محصول مصنوعی تجاری جدید است، این محصول امکان تولید ترکیبات سیمانی را بدون تجمع الیافی ممکن می‌سازد. 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 پلی‌الفین بیشترین کاربرد را دارند (Alberti et al., 2015). در تحقیقات مرادی خو و همکاران بر روی بتن ژئوپلیمری، با افزودن درصد بهینه الیاف، میزان افزایش مقاومت کششی ۳۷ درصد گزارش

جدول ۱ تهیه و تنظیم شد. در این جدول، طرح ۱ حاوی بتن با ۱۰۰ درصد سیمان پرتلند معمولی است و در طرح ۲، سرباره کوره آهنگدازی با ۱۰۰ درصد سیمان مصرفی جایگزین شده است. طرح ۳ و ۴ حاوی ۹۲ درصد سرباره کوره آهنگدازی و ۸ درصد نانوسیلیس است و به ترتیب شامل ۱ و ۲ درصد الیاف پلی الفین است. بمنظور ساخت نمونه های بتنی، در ابتدا مصالح خشک به داخل دستگاه مخلوط کن در حال گردش ریخته شد 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 قالب های از پیش روغن کاری شده در سه مرحله ریخته شدند و در هر مرحله با ۲۵ ضربه میله متراکم گردید. پس از سپری شدن ۲۴ ساعت اولیه از زمان بتن ریزی و نگهداری نمونه های بتنی در محیط خشک در دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس)، نمونه ها از قالب جداسازی شدند و نمونه های بتن کنترل (حاوی سیمان پرتلند) تا زمان انجام آزمون در داخل آب شرب و در دمای اتاق نگهداری شدند، نمونه های بتن ژئوپلیمری پس از جداسازی از قالب، بمنظور بهبود خواص استحکامی به مدت ۴۸ ساعت درون کوره الکتریکی تحت حرارت ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. در این راستا گزارش شده است که مقاومت بتن ژئوپلیمری با افزایش دمای عمل آوری افزایش می یابد (Ehsani et al., 2017). در پایان فرایند عمل آوری حرارتی، نمونه های بتن ژئوپلیمری تا هنگام انجام آزمون در دمای اتاق در محیط خشک نگهداری شدند.

۲-۳. روش های آزمایش و استانداردها

آزمون مدول الاستیسیته تحت استاندارد ASTM C469 بر روی نمونه های استوانه ای از بتن با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی متری در سن عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه جک بتن شکن انجام شد.

متر مکعب 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 متر مکعب و قطر ذرات ۷ الی ۱۴ نانو متر استفاده گردید. الیاف پلی الفین موج دار تحت استاندارد ASTM D7508/D7508M، دارای مقاومت کششی ۵۰۰ نیوتن بر میلی متر مکعب، نسبت طول به عرض ۳۷/۵، محصول شرکت ایتالیایی دوروچم خاورمیانه مورد استفاده قرار گرفت. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II، محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان)، تولید شده تحت استاندارد JSIRI 389، استفاده شد. سنگدانه های مصرفی محصول کارخانه های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده و به لحاظ کمی و کیفی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار داشتند. محلول قلیایی مصرفی در ساخت بتن ژئوپلیمری، ترکیبی از هیدرواکسید سدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) با نسبت سیلیکات به هیدرواکسید ۲/۵ و غلظت مولاریته ۱۲، وزن مخصوص ترکیبی ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب، است. ابروان 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 طرح های اختلاط تحقیق پیش رو (در بتن کنترل و ساخت محلول قلیایی)، از آب شرب شهر لاهیجان بود، این آب دارای PH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص 1000 kg/m^3 است.

۲-۲. طرح اختلاط، ساخت و عمل آوری نمونه ها

استاندارد مجزا برای تهیه و ساخت طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری موجود نیست، لذا به پیروی از سایر تحقیقات در حوزه ساخت بتن ژئوپلیمری (Deb et al., 2015)، از استاندارد طرح اختلاط بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89، برای ساخت بتن ژئوپلیمری در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده شد. در این راستا طرح اختلاط نمونه های بتنی براساس

جدول ۱. مشخصات طرح اختلاط بتن

Mixture NO	1	2	3	4
Mixture Name	OPC	GP0NS0PO	GP8NS1PO	GP8NS2PO
Type of concrete	Portland	Geopolymer	Geopolymer	Geopolymer
Cement	450	0	0	0
Blast furnace slag	0	450	432	432
Polyolefin fibers	0	0	9.2	18.4
Nano silica	0	0	36	36
Water	202.5	0	0	0
Alkaline solution	0	202.5	202.5	202.5
Fine aggregate	761.13	816.1	672.78	646.28
Coarse aggregate	1000	1000	1000	1000
Superplasticizer	6.75	6.75	8.6	9
Curing	Water	Dry	Dry	Dry

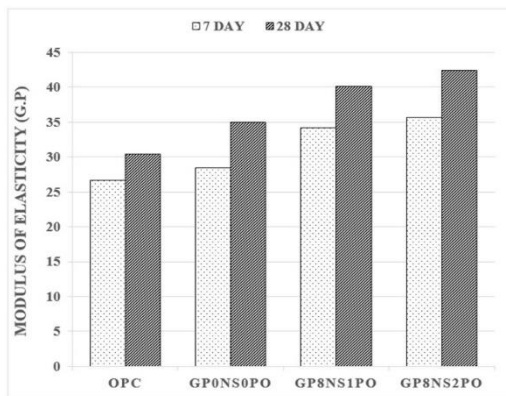
شکل ۱، نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته بتن در سن عمل آوری ۷ و ۲۸ روز را نشان می دهد. براساس این نتایج، مشهود است که افزایش سن عمل آوری در بتن موجب بهبود نتایج شده است، در این راستا کمترین و بیشترین میزان بهبود در مدول الاستیسیته، به ترتیب متعلق به طرح ۱ (OPC) شامل بتن کنترل (حاوی سیمان پرتلند) و طرح ۲ (GP0NS0PO) شامل بتن ژئوپلیمری (فاقد الیاف) به میزان ۱۳/۹۸ و ۲۲/۹۶ درصد است. کمترین (۳۰/۴) گیگاپاسکال و بیشترین (۴۲/۳۷) گیگاپاسکال) میزان مدول الاستیسیته کسب شده در سن عمل-آوری ۲۸ روزه (بعنوان سن با بهترین عملکرد)، به ترتیب متعلق به طرح ۱ (OPC) و طرح ۴ (GP8NS2PO) است. افزودن ۲ درصد الیاف پلی الفین و ۸ درصد نانوسیلیس به بتن طرح ۴ موجب بهبود مدول الاستیسیته بتن نسبت به طرح ۱ شامل بتن کنترل (OPC) و طرح ۲ (GP0NS0PO)، به ترتیب به میزان ۳۹/۳۷ و ۲۱/۱۹ درصد در سن عمل آوری ۲۸ روزه شده است. حضور نانوسیلیس در ترکیب بتن ژئوپلیمر سرباره‌ای ضمن تسریع در فرایند شیمیایی، به تولید حجم بالایی از ژل های هیدراته شده که نقش اصلی در بهبود استحکام بتن دارد، کمک می کند. در این راستا محققان بهبود مدول الاستیسیته با مصرف نانوسیلیس در بتن ژئوپلیمری را گزارش کرده اند (Ekinci et al., 2019). الیاف پلی الفین از طریق پل زدن در صفحات ترک خورده موجب عدم گسترش و انتشار ترک ها در ماتریس بتن می شود. تحقیقات سایرین نشان داده است که بهبود چسبندگی، هنگام استفاده از الیاف پلی الفین می تواند به علت

در این راستا نمونه مورد نظر داخل قاب آزمون مدول الاستیسیته بتن جانمایی شد، سپس نمونه بتنی از مقطع ۱۵ سانتی متر بطور عمود بین دو صفحه دستگاه جک بتن شکن قرار گرفت، در ادامه بار اعمالی با سرعت بین ۰/۵ الی ۰/۹ کیلونیوتن بر ثانیه تا زمان شکست نمونه بر محور عمود آن وارد شد و تغییر شکل طولی نمونه با استفاده از گیج یا کرنش سنج متصل به قاب، اندازه گیری شد.

آزمون مقاومت کششی بتن به روش برزیلی تحت استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای از بتن با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی متری در سن عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه جک بتن شکن انجام پذیرفت. در این راستا نمونه‌ها از وجه طولی در زیر دستگاه جک بتن شکن 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. آزمون SEM در سن عمل آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل FEI Quanta200 انجام گرفت، در این راستا نمونه بتنی خرد شده در دستگاه قرار گرفت و تصاویر با بزرگ نمایی مورد نظر ضبط و مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفتند.

۳. نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

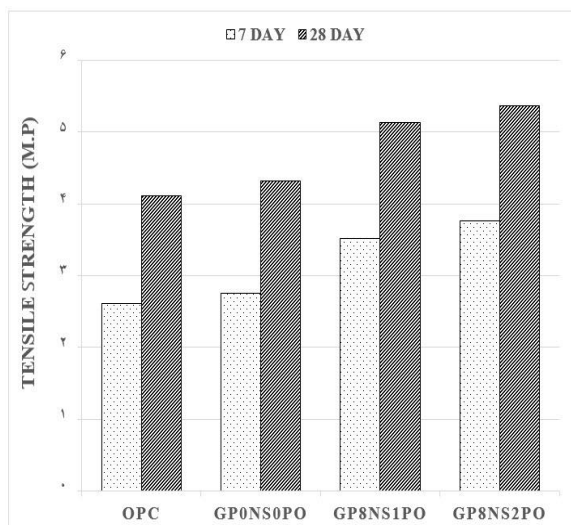
۳-۱. نتایج آزمایش مدول الاستیسیته



شکل ۱. نمودار نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بتن



شکل ۲. نمونه بتنی در حال انجام آزمون مدول الاستیسیته



شکل ۳. نمودار نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن

کاهش حفره‌های هوا در فصل مشترک ماتریس - الیاف باشد (Enfedaque et al., 2017).

۳-۲. نتایج آزمون مقاومت کششی

شکل ۳، نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی نمونه‌های بتنی در این پژوهش آزمایشگاهی را در سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد. شکل ۴، تصویر نمونه‌های بتنی حاصل از این آزمون را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج حاصله، افزایش سن عمل‌آوری در بتن، موجب بهبود نتایج شده است، در این راستا کمترین و بیشترین میزان بهبود مقاومت کششی در نمونه‌ها، به ترتیب متعلق به طرح ۴ شامل بتن ژئوپلیمری (GP8NS2PO) و طرح ۱ شامل بتن معمولی (OPC) به مقدار ۴۲/۵۵ و ۵۷/۴۷ درصد بدست آمد. در سن عمل‌آوری ۲۸ روزه (بعنوان سن بهینه در عملکرد برتر)، افزودن ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی الفین به بتن ژئوپلیمری در طرح ۴، موجب بهبود مقاومت کششی نسبت به نمونه‌های بتنی طرح ۱ شامل بتن کنترل (OPC) و طرح ۲ شامل بتن ژئوپلیمری (GP0NS0PO)، به ترتیب به میزان ۳۰/۴۱ و ۲۴/۰۷ درصد گردید. کمترین (۴/۱۱ مگاپاسکال) و بیشترین (۵/۳۶ مگاپاسکال) میزان مقاومت کششی کسب شده در سن ۲۸ روز عمل‌آوری در نمونه‌های بتنی، به ترتیب متعلق به طرح ۱ (OPC) و طرح ۴ (GP8NS2PO) است، اختلاف مقاومت کششی در این دو طرح ۳۰/۴۱ درصد است.

الیاف پلی الفین دو جزئی متشکل از دو پلیمر متفاوت در پوسته و هسته الیاف است، مواد هسته‌ی الیاف دارای مشخصات مقاومتی بالا و مدول الاستیسیته بالایی است و مواد پوسته‌ی الیاف، چسبندگی بالایی به ماتریس سیمان می‌بخشد، زبری سطح الیاف‌ها نیز می‌تواند موجب افزایش چسبندگی با سنگ سیمان شود (Smirnova et al., 2019).



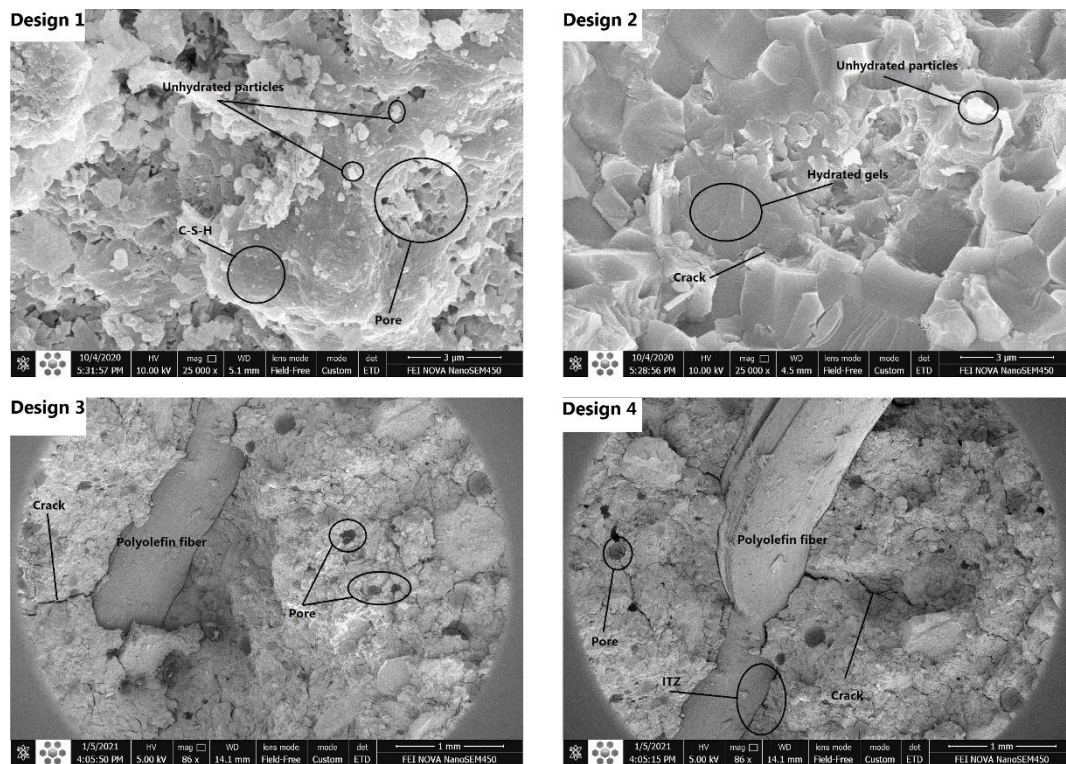
شکل ۴. نمونه بتنی پس از آزمون مقاومت کششی

۳-۳. نتایج آزمون SEM

شکل ۵، تصاویر حاصل از انجام آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی در مقیاس ۱ و ۳ میکرومتر را بر روی نمونه های بتنی در سن عمل آوری ۹۰ روزه به نمایش در آورده است. در طرح ۱ (OPC)، وجود حفرات متعدد، ذرات هیدراته نشده فراوان و ژل هیدراته شده C-S-H در حجم کم، نشان از ضعف ریزساختار بتن (نسبت به طرح ۲) است. وجود برخی از ریزترک های موجود در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری ناشی از عمل آوری حرارتی (۶۰ °C) در فرایند تولید این نوع از بتن در پژوهش پیش رو است. البته این ریزترک ها نتوانسته است در نتایج حاصل از آزمون های مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن خلل وارد کنند، زیرا تحقیقات نشان داده است که این ریزترک ها، تنها بر سرعت امواج اولتراسونیک تاثیر می گذارد و تاثیر چندانی بر مقاومت نمونه ها نخواهد گذاشت (Kwan et al., 2012). در طرح ۱ (OPC)، ژل سولفات آلومینیوم کلسیم هیدراته (C-A-S-H) موسوم به اترینگایت بصورت الیاف شش وجهی و سوزنی شکل در تصاویر دیده می شود که این فاز در سیمان هیدراته شده در اثر واکنش کلسیم آلومینات با کلسیم سولفات تشکیل می شود. در این راستا تحقیقات نشان داده است که در قسمت توده خمیر سیمان پرتلند، یون هایی مانند کلسیم، سولفات و هیدرواکسید و آلومینات که از طریق هوازی (حل) شدن به سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم ناشی شده، با هم ترکیب می شوند و تشکیل ژل اترینگایت (C-A-S-H) و هیدرواکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ می دهند، بدین مفهوم که در اثر واکنش کلسیم آلومینات با کلسیم سولفات، اترینگایت ایجاد

می شود و با پیشرفت در مرحله هیدراتاسیون، بلورهای ضعیف C-S-H و نسل دوم کریستال ها که از هیدرواکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ و ژل اترینگایت (C-A-S-H) شکل گرفته است شروع به پر کردن فضاهای خالی در شبکه اترینگایت و پرتلندایت می کنند و با این عملیات، تراکم و سختی و مقاومت ITZ (ناحیه انتقال بین سطحی) بتن زیاد می شود (Mehta and Monteiro., 2014). در طرح ۲ (GPONSOP) با توجه به وجود ذرات آلومینوسیلیکاتی در سرباره، شاهد ساختاری متراکم تر (نسبت به طرح ۱) در ترکیب بتن می باشیم. این تراکم به دلیل تولید حجم بالایی از ژل های هیدراته شده و کاهش ذرات هیدراته نشده در ترکیب بتن است. افزودن الیاف پلی الیفین به طرح GP8NS1PO و GP8NS2PO موجب کاهش میزان ترک ها گردیده است. الیاف از طریق پل زدن در صفحات ترک خورده می تواند در برابر نیرو مقاومت نماید. این امر موجب بهبود نتایج حاصل از آزمون ها در تحقیق پیش رو برای نمونه های حاوی الیاف شده است. بر اساس بند ۵-۱۰-۳-۱-۴ ویرایش پنجم آیین نامه مقررات ملی ساختمان ایران، مقاومت پیوستگی بین الیاف و خمیر سیمان در بتن نباید در حد کم باشد که در بارهای کم، الیاف به آسانی از خمیر سیمان بیرون کشیده شود و در حد زیاد نباشد که الیاف بدون جذب انرژی شکسته شود. تحقیقات نشان داده است که اضافه کردن الیاف با درصد های زیاد (بیش از ۲ درصد حجمی بتن) اگر چه موجب افزایش مقاومت کششی و مدول الاستیسیته نسبت به بتن معمولی می شود ولی نرخ افزایش مقاومت کششی و مدول

الاستیسیته بر حسب درصد الیاف را کاهش می دهد
(Hajikarimi and Fallah, 2019).



شکل ۵. تصاویر آزمون SEM

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، به ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر افزودن الیاف پلی الفین بر بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهنگدازی پیرو انجام آزمونهای مقاومت کششی و مدول الاستیسیته در سن عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه و آزمون SEM در سن عمل آوری ۹۰ روزه تحت دمای اتاق پرداخته شده است. اهم نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل است.

۱- افزایش سن عمل آوری در نمونه های بتنی، موجب بهبود نتایج در تمام آزمون ها گردیده است. بطوریکه در آزمون مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بهبود نتایج در سن ۲۸ روزه نسبت به سن ۷ روزه در بتن ژئوپلیمری در طرح ۴ (GP8NS2PO) (بعنوان بهترین عملکرد نسبت به سایر طرح های بتن ژئوپلیمری) به ترتیب به میزان ۴۲/۸۹ و ۱۸/۷۵ درصد بدست آمد.

۲- افزودن الیاف پلی الفین به طرح بتن ژئوپلیمری موجب بهبود نتایج کسب شده گردید. در این راستا در آزمون مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن، برای طرح ۴ (بتن ژئوپلیمری حاوی ۲ درصد

الیاف)، نسبت به طرح ۱ (بتن ژئوپلیمری فاقد الیاف)، بهبود نتایج به ترتیب آزمون ها به میزان ۲۱/۱۹ و ۲۴/۰۷ درصد رسید.
۳- نتایج حاصل از آزمون SEM حاکی از برتری ریزساختار نمونه های بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف پلی الفین است. در این راستا پیوند مناسب الیاف با ژل های هیدراته شده در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) و موضعی شدن ترک ها بواسطه حضور الیاف، مشهود است.
۴- نتایج حاصل از آزمون ها در این پژوهش حاکی از برتری عملکرد در بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن کنترل است. تمامی نتایج حاصل از آزمون های این مقاله در راستای هم و در هم پوشانی با یکدیگر قرار داشتند. از طرفی جایگزینی سیمان با برخی از مصالح حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی موجب بهبود نتایج گردیده است. این موضوع در تحقیقات سایر محققین نیز گزارش شده است (Yousefi et al., 2021).

منابع

- Adhikary, S. K., Rudzionis, Z., Balakrishnan, A., & Jayakumar, V. 2019. Investigation on the mechanical properties and post-cracking behavior of polyolefin fiber reinforced concrete. *Fibers*, 7(1), 8.
- Alberti, M., Enfedaque, A., & Gálvez, J. 2015. Improving the reinforcement of polyolefin fiber reinforced concrete for infrastructure applications. *Fibers*, 3(4), 504-522.
- 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.
- 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.
- 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.
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. 2013. Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(1), 52-59.
- 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.
- 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.
- Enfedaque, A., Alberti, M. G., Paredes, J. A., & Gálvez, J. C. 2017. Interface properties of polyolefin fibres embedded in self-compacting concrete with a bond improver admixture. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 90, 287-293.
- Hajikarimi, P., & Fallah, H. S. 2019. Investigation on the Effect of Volume, Length and Shape of Polyolefin Fibers on Mechanical Characteristics and Fracture Properties of High-Strength Concrete.
- Hongjian, D., Suhuan, D., & Liu, X. 2014. Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*, 73, 705-712.
- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. 2012. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565-573.
- Mehdipour, S., Nikbin, I. M., Dezhampannah, 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.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. 2014. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Mohtasham Moein, M., Mousavi, S. Y., Madandoust, R., & Naser Saeid, H. N. S. 2019. The Impact Resistance of Steel Fiber Reinforcement Concrete under Different Curing Conditions: Experimental and Statistical Analysis. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 49(94), 109-121.
- 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.
- Neupane, N., Chalmers, D., & Kidd, P. 2018. High-strength geopolymer concrete—properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*, 7(2), 15-25.
- Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M. D., Marto, A., ... & Khorami, M. 2018. Portland cement structure and its major oxides and fineness. *Smart structures and systems*, 22(4), 425-432.
- 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.
- 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.

- Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. 2016. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307. [3]
- 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.
- 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.
- Smirnova, O., Kharitonov, A., & Belentsov, Y. 2019. Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(4), 407-417.
- Vora, P., & Urmil V, D. 2013. Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete. *Procedia Engineering*, 51, 210-219.
- Yousefvand, M., Sharifi, Y., & Yousefvand, S. 2019. An Analysis of the Shear Strength and Rupture Modulus of Polyolefin-Fiber Reinforced Concrete at Different Temperatures. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(4), 225-233.
- Yousefi, R., Amel sakhi, M., Karimi, A. 2021. Effect of adding urease enzyme on uniaxial strength of soil stabilized by cement and zeolite. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 14(2), 43-57.
- 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.
- Zhang, Z. H., Yao, X., Zhu, H. J., Hua, S. D., & Chen, Y. 2009. Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer. *Journal of Central South University of Technology*, 16(1), 49-52.
- 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.