

# بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن های سبک ژئوپلیمری مسلح به الیاف فولادی و پلی پروپیلن

علی صدر ممتازی<sup>۱</sup>، سمیرا کاظمی راد<sup>۲\*</sup>

۱- استاد دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گیلان

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گیلان

\* samirakazemirad22@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴

## چکیده

با توجه به میزان مصرف بالای بتن به ویژه در سازه‌ها و نیاز روز افزون به تولید سیمان، توجه به آثار مخرب زیست محیطی این ماده ضروری به نظر می‌رسد. در صنعت ساختمان برای رفع این مشکل از چسباننده‌های جایگزین در بتن استفاده می‌شود که ژئوپلیمرها یکی از این جایگزین‌ها می‌باشد. ساخت بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره می‌تواند یکی از راه کارها برای تولید مصالح سازگار با محیط زیست باشد که کاهش آثار مخرب تولید سیمان را به دنبال دارد. در این پژوهش از دو سری بتن سبک ژئوپلیمری استفاده شده است. در سری اول با ثابت نگه داشتن نسبت‌های ژئوپلیمری ( $SS/SH=1$ ,  $Al/Bi=0/65$ ) و غلظت هیدروکسید سدیم ۲ مولار) بتن‌هایی ژئوپلیمری با درصد‌های مختلف (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰) اسکوریا جایگزین درشت دانه ساخته شد. سپس با مقایسه وزن مخصوص و مقاومت فشاری نمونه‌ها، طرح‌هایی که شرایط سازه‌ای (مقاومت فشاری بالای ۱۷ مگاپاسکال و وزن مخصوص زیر  $Kg/m^3$  ۲۰۰۰) را داشتند انتخاب شدند. در سری دوم ساخت بتن‌های سبک ژئوپلیمری با افزودن الیاف فولادی (۰/۵ و ۱/۵ درصد)، الیاف پلی پروپیلن (۰/۱ درصد) و هیبریدی مشخصات مکانیکی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که نمونه‌های حاوی ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد اسکوریا شرایط سازه‌ای را دارا بوده و با بررسی ویژگی‌های مکانیکی با وجود الیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن می‌توان دریافت که الیاف پلی پروپیلن با افزایش مقاومت کششی و خمشی در جلوگیری از فروپاشی بتن، تاثیر مثبتی دارد و ترکیب این الیاف با الیاف فولادی موجب افزایش شکل پذیری می‌شود.

**واژگان کلیدی:** بتن، بتن سبک ژئوپلیمری، اسکوریا، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن.

## مقدمه

یکی از بزرگترین مشکلاتی که جهان امروز با آن مواجه است، آلودگی محیط زیست است. در صنعت ساختمان، تولید سیمان پرتلند معمولی (OPC) باعث انتشار آلاینده‌هایی می‌شود که منجر به آلودگی محیط زیست خواهد شد [1]. در صنعت ساختمان‌سازی برای رفع این مشکل چسباننده‌های جایگزین در بتن ساخته می‌شود. استفاده از فناوری ژئوپلیمر یکی از این جایگزین‌ها است. اتصال دهنده‌های ژئوپلیمری تولید شده از یک واکنش شیمیایی بین مولکول‌های سیلیس و آلومینا که در یک ماده‌ی پوزولانی فعال (مانند خاکستر بادی) موجود است، در شرایط بسیار قلیایی واکنش نشان می‌دهند [2]. رشد تدریجی تلاش‌های جهانی برای به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش پیدا کرده است، زیرا مشخص شده است که یک تن تولید OPC به حدود ۲/۸ تن مواد خام مانند سنگ آهک و زغال سنگ نیاز دارد. علاوه بر آن به دلیل کربن‌زدایی آهک در کوره، حدود ۰/۷ تن دی‌اکسید کربن  $CO_2$  در جو زمین آزاد می‌شود [3]. تقریباً ۱۲٪ از کل انتشار  $CO_2$  در جو زمین از مصرف سوخت‌های فسیلی برای گرمایش تجاری و مسکونی تخمین زده شده و علاوه بر این، مقادیر زیادی  $CO_2$  از خنک کننده تاسیسات منتشر می‌شود. در نتیجه، بهبود سیستم‌های صرفه‌جویی در انرژی و منابع جدید انرژی تجدید پذیر به یکی از موضوعات مهم در سازه‌های ساختمانی تبدیل شده است. استفاده از بتن سبک به عنوان مصالح ساختمانی به دلیل افزایش ظرفیت عایق حرارتی از طریق رسانایی حرارتی سنگدانه‌های سبک، در صرفه‌جویی در مصرف انرژی بسیار موثر است [4]. در اوایل دهه ۱۹۸۰، پروفیسور جوزف دیویدوویتز<sup>۱</sup>، فناوری ژئوپلیمریزاسیون را به عنوان یک فرآیند ایده‌آل و سازگار با محیط زیست برای تولید مواد مکمل سیمان پرتلند معمولی (OPC) معرفی کرد که دارای خواص مکانیکی و دوام بالاتری است. فناوری سنتز ژئوپلیمرها مبنی بر فعال سازی

قلیایی یک ماده پایه است که سرشار از سیلیکون Si و آلومینیوم Al به شکل آمورف در دمای نسبتاً پایین می‌باشد [5]. ژئوپلیمرها دسته‌ای از مواد آلومینوسیلیکاتی غیرآلی مصنوعی هستند که معمولاً از واکنش آلومینوسیلیکات‌ها (مانند خاکستر بادی، متاکائولن) با محلول سیلیکات (مانند  $Na_2SiO_3$ ،  $K_2SiO_3$ ) تحت شرایط شدید قلیایی یا اسیدی (مانند NaOH، KOH،  $H_3PO_4$ ) تشکیل می‌شوند [6]. محصولات با پایه ژئوپلیمرها با خواص بسیار خوبی مانند مقاومت فشاری، پایداری حرارتی، مقاومت در برابر اسید و مقاومت در برابر آتش همراه است [7]. با این حال کمی مقاومت در برابر ترک خوردگی، محدودیتی برای استفاده از این مواد در بسیاری از مناطق است. به همین دلیل، موضوع تقویت ژئوپلیمرها با استفاده از الیاف به صورت پویاتر و بیشتر در حال توسعه است [8]. تقویت ژئوپلیمرها با الیاف، فرصتی برای بهبود مقاومت خمشی و افزایش میزان انرژی جذب شده توسط مواد قبل از وقوع آسیب می‌دهد. افزودن الیاف تعداد ترک‌ها و ابعاد آن‌ها را در مواد کاهش می‌دهد که به نوبه خود آسیب ناشی از ترک خوردگی را به حداقل می‌رساند و مواد را برای مدت طولانی‌تری تحت بار معین منسجم نگه می‌دارد [9]. چنین رفتاری به ویژه در شرایط اضطراری مانند آتش سوزی یا زلزله که فرد زمان بیشتری برای ترک مکان در معرض خطر دارد، دارای اهمیت است. به همین دلیل، تقویت ماتریس‌های ژئوپلیمر با الیاف یک راه حل طراحی بسیار جالب است که از سایر راه حل‌های موجود در بازار متمایز می‌باشد [10]. در سطح جهانی، این که بتن سبک وزن LWC<sup>۲</sup> نسبت به بتن با وزن معمولی NWC<sup>۳</sup> با کاهش وزن مرده سازه، عایق حرارتی بهتری برای ساختمان‌ها بوده و هزینه کم‌تری نیز به دنبال دارد، کاملاً شناخته شده است. بتن‌های سبک LWC معمولاً در ساخت ساختمان‌ها، روسازی عرشه پل و روسازه‌های پل استفاده می‌شود [11]. استفاده از سنگدانه‌های سبک LWA<sup>۴</sup> یکی از رایج‌ترین روش‌هایی است که برای تولید مصالح ساختمانی سبک وزن استفاده می‌شود. بتن سبکدانه LWAC<sup>۵</sup>

2 Light Weight Concrete

3 Normal Weight Concrete

4 Lightweight Aggregates

5 Lightweight Aggregates Concrete

1 Joseph Davidovits

دارای مزایایی مانند نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاومت کششی خوب، ضریب انبساط حرارتی پایین و ویژگی‌های عایق حرارتی و صوتی برتر به دلیل وجود حفره‌های هوا در ساختار آن است [12]. به علاوه، استفاده از بتن سبک سازه‌ای دارای مزایای مفیدی از جمله کاهش بار مرده سازه بوده و همچنین چگالی کمتر بتن امکان استفاده از اعضای سازه‌ای با وزن کمتر و سبک‌تر را فراهم کرده تا فضای موجود را افزایش داده و ظرفیت مقاومت لرزه ای بتن را افزایش دهد. علاوه بر این، از عناصر کوچک‌تر و سبک‌تر اعضای بتنی پیش ساخته برای کاهش هزینه سیستم بالابر و حمل و نقل استفاده می‌شود [13].

صدر ممتازی و همکاران در سال ۱۳۹۹ [14]، در تحقیقی مشخصات مکانیکی بتن سبک ژئوپلیمری بر پایه سرباره را مورد بررسی قرار دادند. این بتن حاوی سبکدانه پومیس بوده که با درصدهای مختلف شامل ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰، جایگزین درشت دانه (شن) شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص شد که مطلوب‌ترین مقاومت فشاری را پس از نمونه شاهد، بتن حاوی ۲۰ درصد پومیس که حدوداً ۵۸ مگاپاسکال به دست آمد که ۹۲ درصد مقاومت نمونه شاهد را کسب نمود. همچنین، زمانی که نمونه‌ها در حرارت بالا قرار گرفتند، نسبت به نمونه خارج شده از آب دچار افت مقاومت فشاری شدند. در نهایت مشخص شد که با استفاده از سبکدانه پومیس و افزایش درصد استفاده از آن‌ها، بتن ژئوپلیمری به سمت سبک بودن سوق پیدا می‌کند. همچنین مقاومت مکانیکی نمونه‌های حاوی پومیس از مقاومت نمونه‌های شاهد پایین‌تر بوده اما نتیجه تقریباً نزدیکی از خود نشان داد. در برخی از کاربردهای ساختمانی، مقاطع بتنی با الیاف فولادی مورد نیاز است. با این وجود توانایی الیاف برای کنترل رشد و باز شدن ترک و مقاومت پس از ترک از دلایل اصلی استفاده از الیاف فولادی در بتن است. خواص الیاف، توزیع و پیوند بین الیاف و بتن، چقرمگی پس از ترک و شکست مقاطع بتن مسلح را تعیین می‌کند [15]. خلیل و همکاران در سال ۲۰۱۸ [16]،

برخی از خواص و ریزساختار بتن ژئوپلیمری سبک تقویت شده با الیاف را مورد بررسی قرار دادند. هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر الیاف فولادی روی ریز ساختار و برخی خواص بتن سبک ژئوپلیمری حاوی خاکستر بادی، مایعات قلیایی (مخلوط محلول‌های هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم) و الیاف فولادی است. نتایج نشان داد که الیاف فولادی، مقاومت کششی دو نیم شده و مقاومت خمشی را افزایش می‌دهند. نمونه‌های با درصد حجمی الیاف فولادی ۰/۵ نسبت به نمونه‌های بدون الیاف فولادی در سن ۲۸ روزگی به افزایش مقاومت خمشی ۶۳٪ درصدی دست یافتند. مقاومت فشاری نیز با افزایش سن، افزایش می‌یابد. همچنین به نظر می‌رسد، نمونه‌های تقویت شده با الیاف فولادی با افزایش سن رفتار مشابه‌ای دارند. این امر به فرآیند تجزیه‌ی پلیمر<sup>۶</sup> در هنگام عملیات حرارتی نسبت داده می‌شود. افزایش مقدار الیاف فولادی منجر به افزایش مقاومت فشاری SFLWGPC<sup>۷</sup> به دلیل سفتی و سطح مقطع بزرگ الیاف فولادی می‌شود که مقاومت پیوند و انتشار ترک را افزایش می‌دهد. ایسلام و همکاران در سال ۲۰۱۷ [17]، تاثیر الیاف فولادی بر خواص مکانیکی را در بتن سبک ژئوپلیمری مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که افزودن ۰/۵٪ الیاف فولادی، مقاومت کششی دو نیم شده و مقاومت خمشی را به ترتیب در حدود ۳۸-۱۹ درصد و ۴۴-۱۳ درصد در مقایسه با بتن سبک ژئوپلیمری غیرالیافی افزایش می‌دهد. واسان و همکاران در سال ۲۰۱۸ [18]، تاثیر الیاف فولادی را بر ساختار و برخی خواص بتن سبک ژئوپلیمری را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که الیاف فولادی، مقاومت کششی و خمشی را افزایش می‌دهد. نمونه‌های با درصد حجمی الیاف فولادی ۰/۵ درصد نسبت به نمونه‌های بدون الیاف فولادی در سن ۲۸ روزگی به افزایش مقاومت خمشی ۶۳٪ درصدی دست یافتند. محسنی و همکاران در سال ۲۰۱۹ [19]، خواص فیزیکی و مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمر سبک تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن را مورد ارزیابی قرار دادند. اسکوریا به عنوان سنگدانه سبک وزن با نسبت جایگزینی ۰، ۱۰ و

<sup>6</sup> Depolymerization

<sup>7</sup> Steel Fiber Lightweight Geopolymer Concrete

پژوهش های گذشته دیده می شود، می توان به یافتن طرح اختلاط هایی بهینه برای برآورده کردن شرایط سازه ای (مقاومت فشاری بالای ۱۷ مگاپاسکال و وزن مخصوص زیر  $2000 \text{ Kg/m}^3$ ) اشاره کرد. استفاده از معادن بومی کشور برای ساخت نمونه های بتنی سبک ژئوپلیمری و تقویت عملکرد آن ها با الیاف می تواند کمک شایانی به سرعت بخشیدن در استفاده از این مصالح جایگزین در صنعت ساخت و ساز شود. بنابراین با توجه به کمبود طرح اختلاط هایی با شرایط سازه ای در بررسی بتن های ژئوپلیمری سبک تقویت شده با الیاف، این بررسی ها در مقاله حاضر انجام شده است.

## ۲- روش انجام آزمایش

### ۲-۱- مواد استفاده شده

سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه تولید قطعات بتنی تهیه شده که مطابق با استاندارد ASTM C33 [21] است. مشخصات مکانیکی سنگدانه های مصرفی در جدول (۱) آمده است. سنگدانه اسکوریا در ایران با عنوان پوک معدنی قروه شناخته می شود. چرا که معادن نسبتاً بزرگی از این مصالح در قروه کردستان وجود دارد. سبکدانه طبیعی اسکوریا مورد استفاده در این پژوهش از شهرستان قروه تهیه شد، اندازه دانه های اسکوریای مصرفی  $4/75$  الی  $12/5$  میلی متر می باشد. دانه بندی در محدوده استاندارد ASTM C330 [22] می باشد. وزن مخصوص اسکوریا برابر با  $1435 \text{ Kg/m}^3$  و جذب آب ۲۴ و نیم ساعته آن به ترتیب برابر با  $10/71$  و ۶ درصد است. سرباره کوره آهن گدازی استفاده شده در این پژوهش از شرکت بنا بنیان زیست فناور تهیه شد که دارای وزن مخصوص  $2880 \text{ Kg/m}^3$  و بلین  $4200 \text{ gr/cm}^3$  بوده و به عنوان ماده آلومینوسیلیکاتی برای تولید بتن ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گرفت. متاکائولن مصرفی نیز در این پژوهش از شرکت تولیدی جهان پودر دلیجان تهیه شده دارای وزن مخصوص  $2600 \text{ Kg/m}^3$  و اندازه متوسط ذرات  $1/5$  تا  $2/5$  میکرون می باشد. آنالیز شیمیایی سرباره کوره آهن گدازی و متاکائولن در جدول (۲) ارائه شده

۲۰ درصد حجمی کل سنگدانه ها استفاده شده و الیاف پلی پروپیلن به مقدار ۰، ۰/۵ و ۱ درصد به مخلوط اضافه می شود. نتایج نشان داد که الیاف PP خواص مکانیکی (به ویژه مقاومت خمشی) را بهبود می بخشد. همچنین جذب آب نمونه های ژئوپلیمر با افزودن الیاف پلی پروپیلن کاهش یافت که می تواند تأثیر منفی جایگزینی سنگدانه سبک وزن اسکوریا را به طور قابل توجهی جبران کند. بتن ژئوپلیمری سبک معرفی شده به دلیل چگالی نسبتاً کم، مقاومت فشاری بالا و مقاومت خمشی مناسب، که با افزودن الیاف پلی پروپیلن بهبود می یابد، برای کاربردهای سازه ای مناسب است. گانش و همکاران در سال ۲۰۲۰ [20]، تأثیر الیاف فولادی را در بتن های ژئوپلیمری مورد بررسی قرار دادند. الیاف فولادی به نسبت هایی مانند ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و  $1/25$  درصد حجم بتن اضافه شده است. نتایج نشان داد که افزودن الیاف فولادی آثار مثبتی بر خواص مکانیکی، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی دارد.

نتیجه سودمند تولید بتن ژئوپلیمری سبک تقویت شده با الیاف با مقاومت متوسط، کاهش بار مرده اعضای ساختمان و بهبود خواص LWGPC است که این روش را جایگزین ساخت و ساز در آینده می کند. هدف از این پژوهش ساخت نمونه های بتن ژئوپلیمری به منظور آسیب کم تر به محیط زیست و همچنین کاهش وزن مخصوص به منظور افزایش ایمنی سازه می باشد. همچنین وجود معادن کائولن و اسکوریا در کشور و قیمت نسبتاً مناسب علت دیگر استفاده از این ماده در این تحقیق است. در این پژوهش سعی بر آن است که تأثیر افزودن الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر خواص مکانیکی بتن های سبک ژئوپلیمری مورد بررسی قرار داده و نمونه هایی منتخب طبق شرایط سازه ای (مقاومت فشاری بالای ۱۷ مگاپاسکال و وزن مخصوص زیر  $2000 \text{ Kg/m}^3$ ) را یافت. با توجه پژوهش های پیشین، تأثیر الیاف هیبریدی (ترکیب الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن) بر خواص مکانیکی بتن های سبک ژئوپلیمری به ندرت بررسی شده است. از جمله خلاءهایی که در

باشد. بر اساس استانداردهای مختلف، آب مناسب برای آشامیدن می‌تواند آب مناسب برای ساخت بتن باشد. آب مصرفی، آب شرب شهرستان رشت می‌باشد الیاف مصرفی در این پژوهش الیاف فولادی از نوع قلاب‌دار و الیاف پلی پروپیلن می‌باشد که به ترتیب از شرکت کیمیکس و شرکت پایازیک تهیه شده است. مشخصات الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن در جدول (۴) ارائه شده است. نمونه از الیاف فولادی و پلی پروپیلن در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی

Type of Agg	Water absorpt ion	Density (gr/cm <sup>3</sup> )	Saturated Surface Dry (SSD) (gr/cm <sup>3</sup> )
coarse aggregate	2.2	1.63	2.7
fine aggregate	3.85	1.74	2.7

Table.1. Physical specification of aggregates

است. در این تحقیق از متاکائولن نیز به عنوان ماده اولیه حاوی آلومینوسیلیکات استفاده شده است. در این تحقیق سیلیکات سدیم مایع (آب شیشه) با مدول رشیو ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) برابر ۲ و چگالی  $1560 \text{ Kg/m}^3$  تولید شده در شرکت صنایع سیلیکات ایران به عنوان یکی از فعال کننده‌های قلیایی مورد استفاده قرار گرفت. در جدول (۳) مشخصات سدیم سیلیکات مصرفی نشان داده شده است. هیدروکسید سدیم جامد (سود سوزآور) در این پژوهش با خلوص ۹۹٪ و تولید شده در شرکت بنا بنیان زیست می‌باشد. هیدروکسید سدیم با فرمول شیمیایی NaOH که ماده‌ای جامد و سفید رنگ با دمای ذوب ۳۱۸ درجه سانتی‌گراد و چگالی  $2/13$  گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. محلول هیدروکسید سدیم در غلظت ۲ مولار از طریق انحلال مقدار معینی هیدروکسید سدیم جامد در آب به دست آمد. آب مصرفی به این دلیل اهمیت دارد که ناخالصی‌های موجود در آن می‌تواند بر فرآیند هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون اثرگذار

جدول ۲. آنالیز شیمیایی سرباره کوره آهن گدازی و متاکائولن

Chemical mixture	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
Weight ratio(%) of Slag	35.7	11.2	37	11	0.68	0.6	1.2	1.58
Weight ratio(%) of Metakaolin	52.24	43.18	1.03	0.08	-	-	0.6	-

Table.2. Chemical analysis of Slag and Metakaolin

جدول ۳. آنالیز شیمیایی سدیم سیلیکات مصرفی

Chemical mixture	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
Weight ratio(%)	30	14.5	55.5

Table.3. Chemical analysis of sodium silicate

جدول ۴. مشخصات الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن

Type of Fiber	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Length (mm)	Diameter (mm)	Modulus of elasticity (GPa)	Tensile strength (MPa)
Steel Fiber	7850	35	0.8	200	1000
Polypropylene Fiber	910	12	0.032	3.5	350

Table.4. Properties of Steel Fibers and Polypropylene Fibers

شکل ۱. (a) الیاف فولادی (b) الیاف پلی پروپیلن

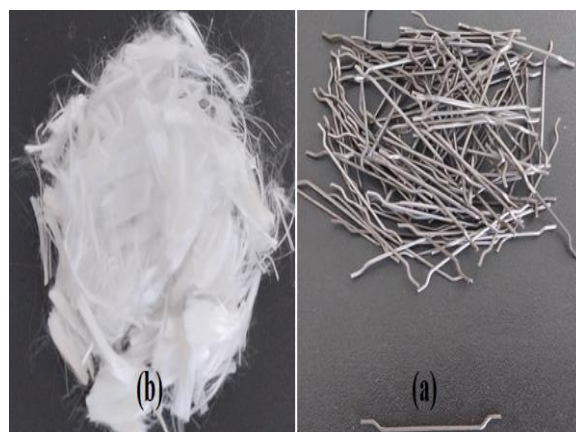


Fig. 1. a) Steel fibers b) Polypropylene fibers

دقیقه تا حصول یک مخلوط کاملاً همگن ادامه می‌یابد. الیاف مورد نظر به تدریج به مخلوط همگن اضافه می‌شود و عمل اختلاط باید تا حصول اطمینان از توزیع یکنواخت الیاف در بتن ادامه یابد. بتن آماده شده در قالب‌ها ریخته می‌شود و عمل تراکم با استفاده از میز مرتعش انجام می‌گیرد. بعد از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز می‌گردند و نمونه‌ها تا زمان آزمایش در دمای محیط (۲۳ درجه سانتی‌گراد) نگهداری می‌شوند. در این پژوهش نسبت‌های ژئوپلیمری مانند نسبت فعال کننده قلیایی به چسباننده و نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم مقدار ثابت و به ترتیب برابر با ۰/۶۵ و ۱ در نظر گرفته می‌شود. غلظت هیدروکسید سدیم نیز مقداری ثابت و برابر با ۲ در نظر گرفته شده است. همچنین لازم به ذکر است که برای دست یابی به بتن سبک از آنجایی که وزن مخصوص سرباره از متاکائولن بیشتر است، از نسبت سرباره به متاکائولن ۷۰ به ۳۰ استفاده شده است. پیش از این نیز آزمایش‌هایی برای به دست آوردن نسبت‌های بهینه برای ساخت بتن ژئوپلیمری انجام شده است. با ثابت نگه داشتن این نسبت‌ها سعی در سبک سازی بتن ژئوپلیمری شده است. در مرحله اول طرح اختلاط نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی درصد‌های مختلف اسکوریا مورد بررسی قرار گرفت و نمونه‌های منتخب که شرایط سازه‌ای را دارند، انتخاب شدند. سپس طرح‌های اختلاط مورد نظر با درصد‌های مختلف الیاف برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی مورد بررسی قرار گرفتند. جدول (۵) طرح‌های اختلاط و وزن مخصوص نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف اسکوریا را نشان می‌دهد.

### ۳- مراحل ساخت بتن ژئوپلیمری سبک وزن الیاف‌دار

استاندارد خاصی برای طرح مخلوط‌های بتن ژئوپلیمر وجود ندارد. اما پژوهشگران مختلف، طرح مخلوط‌های موفق خود را ارائه نموده‌اند. از آن جایی که در بتن‌های ژئوپلیمری و به ویژه بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی، کارایی و زمان گیرش مخلوط از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین لزوم طرح مخلوط‌های در نظر گرفته شده را باید برآورده سازند. ابتدا مواد خشک شامل سنگدانه، سرباره کوره آهن‌گدازی و متاکائولن در میکسر ریخته شده و به مدت ۳ دقیقه به آرامی با یکدیگر مخلوط می‌شوند. سپس محلول قلیایی فعال کننده به آرامی و در چند مرحله به مواد خشک اضافه می‌شود و عمل اختلاط به مدت حداقل ۳

جدول ۵. طرح‌های اختلاط در هر متر مکعب ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

Mix type	Slag	Metakaolin	Al/Bi	SS/SH	Gravel	Sand	Scoria	Special Weight( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
SC50	315	135	0.65	1	305	750	305	2180
SC60	315	135	0.65	1	244	750	366	2080
SC70	315	135	0.65	1	183	750	427	1995
SC80	315	135	0.65	1	122	750	488	1990
SC90	315	135	0.65	1	61	750	549	1897
SC100	315	135	0.65	1	0	750	610	1891.4

Table 5. Concrete mix design per cubic meter ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

#### ۴- آزمایش‌های انجام شده

نسبت به نمونه ۱۰٪ اسکوریا بود. همچنین با افزایش سن نمونه تا ۹۰ روز، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد، اما میزان افزایش مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نسبت به سن ۷ روزه به طور میانگین کم‌تر از ۱۱ درصد است. این افزایش ناچیز مقاومت فشاری در سنین بالا این نتیجه را می‌دهد که بتن سبک ژئوپلیمری بیشترین مقاومت فشاری خود را در سنین اولیه (سن ۷ روز) کسب کرده است.

جدول ۶. مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز (MPa)

Sample	7-day compressive strength (MPa)	28-day compressive strength (MPa)	90-day compressive strength (MPa)
SC50%	21.2	30.2	31.7
SC60%	20.78	27.4	29.8
SC70%	19.3	25.8	27.1
SC80%	15.6	24.8	26.5
SC90%	20.2	21.8	23.4
SC100	14.3	16.8	18.1

%

Table.6. Compressive strength at the ages of 7, 28 and 90 days (MPa)

شکل (۲) روند مقایسه‌ای نمونه‌های حاوی شرایط سازه‌ای را با وجود درصد‌های مختلف الیاف فولادی (۰/۵، ۱ و ۱/۵) نشان می‌دهد. مطابق شکل همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش درصد الیاف فولادی، مقاومت فشاری نمونه‌های سبک ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت فشاری با بالا بردن درصد الیاف فولادی خیلی چشمگیر نبوده و این افزایش در حدود ۱ تا ۳/۷ درصد است. در حالی که افزودن الیاف فولادی به نمونه‌های بدون الیاف مقاومت فشاری را در محدوده‌ی ۱۱/۴ تا ۱۹/۳ درصد افزایش می‌دهد. شکل (۳) مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در ترکیب با الیاف فولادی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل نمونه‌های حاوی ۰/۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن با کاهش مقاومت فشاری روبه‌رو شده و زمانی که با الیاف فولادی با درصد‌های (۰/۵، ۱ و ۱/۵) ترکیب می‌شود این کاهش مقاومت فشاری با افزایش روبه‌رو خواهد شد. با مشاهده نمودار می‌توان نتیجه گرفت که الیاف

برای سنجش خواص مکانیکی بتن‌های ساخته شده، آزمایش مقاومت فشاری مطابق BS1881-116 [23]، روی نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ cm، مقاومت کششی به روش برزیلی (دو نیم شدن) و مدول الاستیسیته به ترتیب بر اساس ASTM C496-96 [24] و ASTM C469-69 [25] روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۲۰ cm، مقاومت خمشی به در ابعاد ۷×۷×۲۸ cm مطابق با استاندارد ASTM C293 [26] آزمایش اولتراسونیک نیز طبق استاندارد ASTM C597 [27] بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متری در سن ۲۸ روز انجام شد. همچنین در این پژوهش ریزساختار بتن‌های ژئوپلیمری الیافی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۴-۱ مقاومت فشاری

هدف از انجام این آزمایش انتخاب نمونه‌های دارای مقاومت سازه‌ای (مقاومت فشاری بالای ۱۷ مگاپاسکال) می‌باشد. با بررسی جدول (۶) که به ترتیب مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف اسکوریا را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که نمونه‌های حاوی ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد اسکوریا دارای شرایط سازه بوده و می‌توان از این نمونه‌های منتخب برای ساخت بتن‌های سبک ژئوپلیمری الیافی استفاده نمود. مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مخلوط‌ها در جدول (۶) از میانگین‌گیری بین سه نمونه به دست آمده است.

همچنین از درصد‌های مختلف الیاف فولادی (۰/۵، ۱ و ۱/۵)، الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۱) و ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۱) درصد به همراه الیاف فولادی (۰/۵، ۱ و ۱/۵) درصد ساخته و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. از جدول (۶) می‌توان دریافت که با افزایش درصد اسکوریا تا ۱۰۰٪ می‌توان شاهد کاهش حداکثری مقاومت فشاری تا حدود ۵۲٪



الیاف فولادی نشان می دهد. مطابق شکل با افزایش درصد الیاف فولادی از ۰ تا ۱/۵٪ می توان شاهد افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بود. ضریب همبستگی قوی با استفاده از معادله درجه ۲ به دست آمد. همچنین شکل (۵) رابطه مقاومت فشاری نمونه های دارای شرایط سازه ای را با ۰/۱ درصد الیاف پلی پروپیلن به همراه درصدهای مختلف الیاف فولادی (۱/۵، ۱ و ۰/۵) به صورت ترکیبی را نشان می دهد. پراکندگی متمرکز وجود رابطه ی خطی قوی بین آن ها را تایید می کند و ضریب همبستگی بالا نمایانگر این رابطه مستقیم است.

پلی پروپیلن باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. که این کاهش مقاومت فشاری را می توان در دشواری مخلوط کردن الیاف در بتن، افزایش حفرات، محبوس ماندن هوا و ایجاد فضای خالی به خاطر افزایش درصد حجمی الیاف دانست [28] اما در ترکیب با الیاف فولادی به طور میانگین ۱۸/۲٪ افزایش (در ترکیب با ۰/۵٪ الیاف فولادی)، ۲۶/۵٪ افزایش (در ترکیب با ۱٪ الیاف فولادی) و ۳۱/۲٪ افزایش (در ترکیب با ۱/۵٪ الیاف فولادی) دیده می شود.

شکل ۲. تغییرات مقاومت فشاری با درصدهای مختلف الیاف فولادی

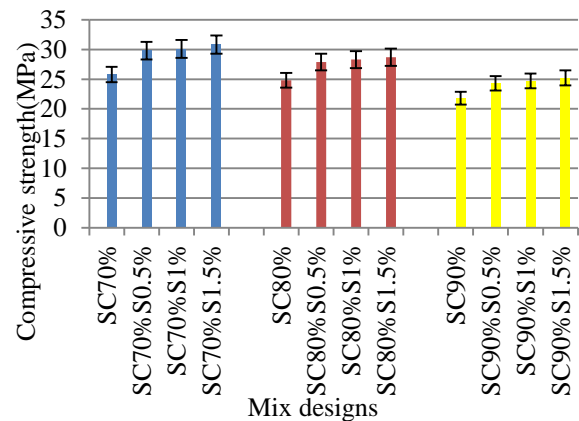


Fig. 2. Compressive strength variations with different percentages of steel fibers

شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن در ترکیب با درصدهای مختلف الیاف فولادی

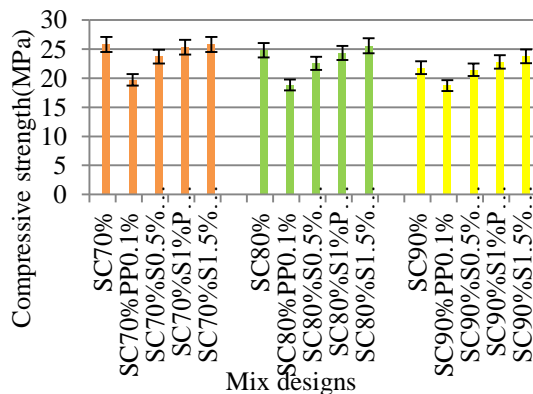


Fig. 3. Compressive strength variations of samples containing polypropylene fibers combined with different percentages of steel fibers

شکل ۴. رابطه مقاومت فشاری و درصدهای مختلف الیاف فولادی

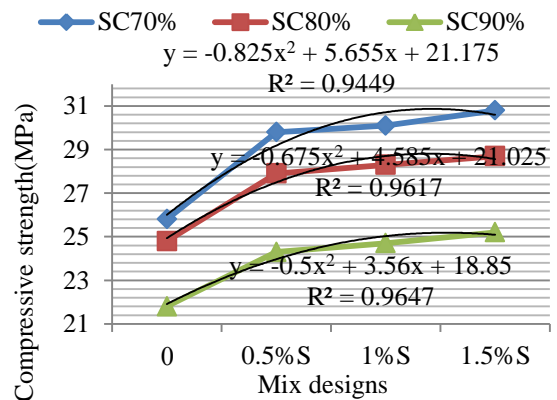


Fig. 4. The relationship between compressive strength and different percentages of steel fibers

شکل ۵. رابطه مقاومت فشاری و نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن در ترکیب با الیاف فولادی

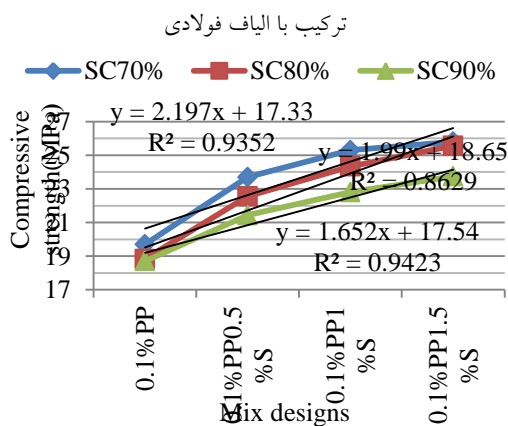


Fig. 5. The relationship between compressive strength and samples containing polypropylene fibers in combination with steel fibers

شکل (۴) رابطه مقاومت فشاری نمونه های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد اسکوریا که شرایط سازه ای را دارا بودند با درصدهای مختلف



## ۴-۲ مقاومت کششی

همچنین با افزایش درصد الیاف فولادی از ۰/۵ تا ۱/۵ درصد، مقاومت کششی نیز در حدود ۴۸/۳ تا ۸۲/۳۶ درصد افزایش می‌یابد. حضور الیاف پلی پروپیلن، مقاومت کششی را به طور میانگین در حدود ۲۸/۳ درصد افزوده و این مقدار با اضافه کردن الیاف فولادی به ترکیب، به بالای ۸۰ درصد می‌رسد.

شکل ۷. تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن در ترکیب با درصدهای مختلف الیاف فولادی

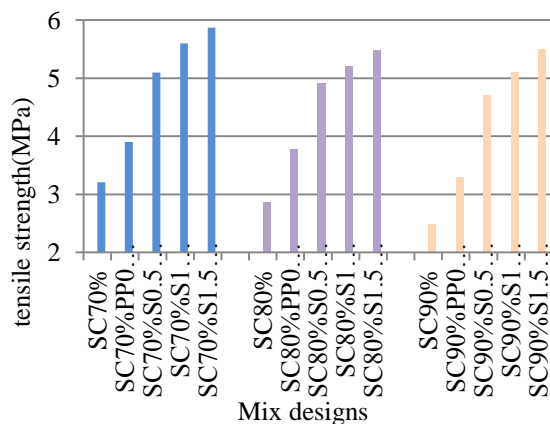


Fig. 7. Tensile strength variations of samples containing polypropylene fibers combined with different percentages of steel fibers

مقاومت کششی بتن یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که بر میزان ترک خوردگی بتن موثر است. به طور کلی بتن‌ها مقاومت کششی کمتری نسبت به مقاومت فشاری دارند و این آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی درصدهای مختلف الیاف (فولادی و پلی پروپیلن) را نشان می‌دهد. می‌توان چنین استنباط کرد که استحکام کششی تنها به طبیعت و اندازه مصالح به کار رفته در ساخت بتن‌ها بستگی دارد، پس می‌توان مقاومت کششی را بیشتر به میزان چسبندگی ترکیبات خمیر ژئوپلیمر به سنگدانه‌ها نسبت داد. شکل‌های (۶ و ۷) به ترتیب مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن در ترکیب با الیاف فولادی را نشان می‌دهد. همان طور که در هر دو شکل نشان داده شده است، افزودن الیاف فولادی و پلی پروپیلن هر دو موجب افزایش مقاومت کششی می‌شود و بیشترین افزایش در نمونه حاوی ۷۰ درصد اسکوریا حاوی الیاف پلی پروپیلن (۰/۱ درصد) در ترکیب با الیاف فولادی (۱/۵ درصد) به چشم می‌خورد. همان طور که مشاهده می‌شود، حضور الیاف باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود.

## ۴-۳ مقاومت خمشی

شکل‌های (۸ و ۹) به ترتیب مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن در ترکیب با الیاف فولادی را نشان می‌دهد. مطابق شکل مشاهده می‌شود که مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در هر دو صورت (تنها یا در ترکیب با الیاف پلی پروپیلن) روند صعودی داشته است. همان طور که انتظار می‌رفت، مقاومت خمشی با افزایش درصد الیاف فولادی، افزایش می‌یابد. و این افزایش در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی به طور میانگین در حدود ۵۴ درصد و در نمونه‌های ترکیبی الیاف پلی پروپیلن به طور میانگین در حدود ۳۴/۲۵

شکل ۶. تغییرات مقاومت کششی با درصدهای مختلف الیاف فولادی

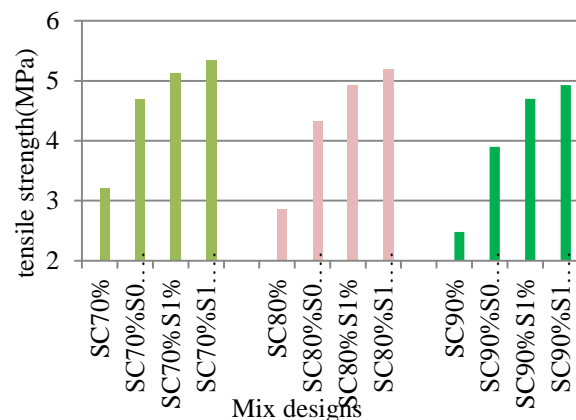


Fig. 6. Tensile strength variations with different percentages of steel fibers

شکل ۹. تغییرات مقاومت خمشی نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن در ترکیب با درصدهای مختلف الیاف فولادی

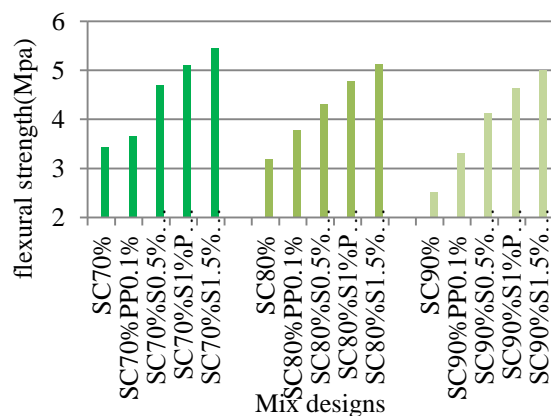


Fig. 9. Flexural strength variations of samples containing polypropylene fibers combined with different percentages of steel fibers

شکل ۱۰. نمونه ای از شکستگی نمونه بتن سبک ژئوپلیمری حاوی ۷۰٪ اسکوریا (a) بدون الیاف (b) با ۱/۵٪ الیاف فولادی

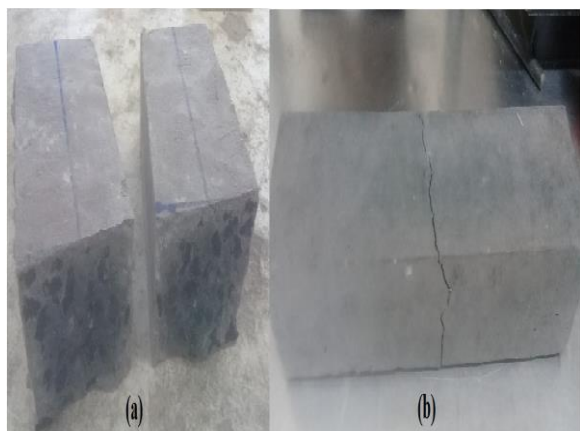


Fig. 10. An example of the fracture of a light geopolymer concrete sample containing 70% scoria a) without fibers b) with 1.5% steel fibers

#### ۴-۴ سرعت پالس اولتراسونیک

بررسی سرعت پالس اولتراسونیک منطبق بر استاندارد ASTM C597 [29] انجام شده است. در آرایش مولدها از روش مستقیم که مطلوب ترین آرایش قرار گیری مولدها است استفاده شد و فرکانس پالس های ارسالی ۶۰ kHz بوده است. این بر اساس توصیه های پیشنهادی سایر پژوهشگران که فرکانس مطلوب

درصد می باشد. شکل (۹) مقاومت خمشی نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن در ترکیب با الیاف فولادی را نشان می دهد. نمودار روند افزایشی را نشان داده و مشاهده می شود که تاثیر الیاف فولادی از الیاف پلی پروپیلن در افزایش مقاومت خمشی بیشتر است. به طور کلی الیاف فولادی و پلی پروپیلن چسبندگی بین سنگدانه ها و خمیر ژئوپلیمر را افزایش می دهد. همچنین وجود الیاف باعث ایجاد یک نوع قفل و بست بین دو سطح شکست شده که باعث عدم فروریزش بتن ژئوپلیمری سبک شده و مقاومت خمشی را افزایش می دهد.

شکل ۸. تغییرات مقاومت خمشی با درصدهای مختلف الیاف فولادی

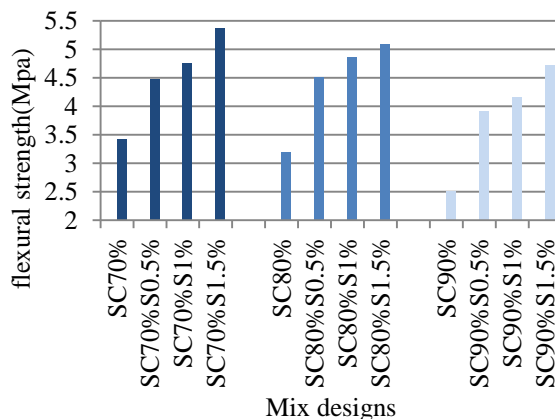


Fig. 8. Flexural strength variations with different percentages of steel fibers

شکل (۱۰) حالت شکست برای نمونه حاوی ۷۰٪ اسکوریا به همراه ۱/۵٪ الیاف فولادی را تحت تنش خمشی نشان می دهد. الیاف فولادی نقش مهمی در بهبود مقاومت خمشی دارند. نتایج نشان می دهد که الیاف فولادی در ناحیه تنش، ترک های بیشتری را تحمل می کنند. حالت شکست، تحت تنش خمشی برای نمونه های ساده فاقد الیاف شکست شکننده پس از رسیدن به بار خمشی نهایی است. نمونه ها به دو قسمت تقسیم شده و به طور کلی تمام نمونه های حاوی الیاف به صورت انعطاف پذیر شکست خوردند، الیاف از دو تکه شدن آن جلوگیری کرده است.

اسکوریا در این طرح می‌تواند باعث افزایش حفره‌های موجود شده و مقاومت در مقابل عبور موج فراصوت را کاهش داده است.

شکل (۱۱) سرعت پالس اولتراسونیک نمونه‌های حاوی الیاف فولادی را نشان می‌دهند. الیاف فولادی موجب افزایش سرعت امواج شده است و این تاثیر نسبت به افزودن الیاف پلی پروپیلن بیشتر می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند این باشد که الیاف فولادی به عنوان واسطه‌ای برای حرکت امواج اولتراسونیک عمل می‌کند [31].

شکل ۱۱. سرعت پالس اولتراسونیک ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف فولادی و پلی پروپیلن (m/s)

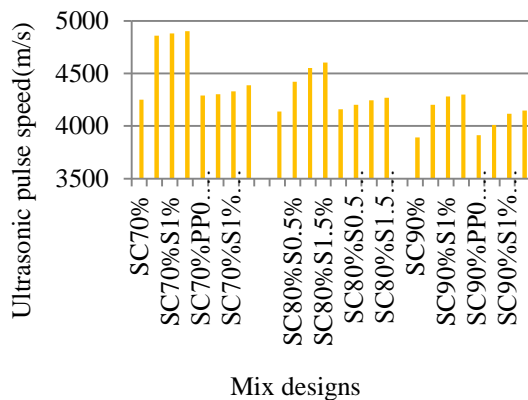


Fig.11. 28-day ultrasonic pulse speed of samples containing different percentages of steel and polypropylene fibers (m/s)

#### ۴-۵- مدول الاستیسیته

شکل (۱۲) مقایسه نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، پلی پروپیلن و ترکیب آن‌ها را نشان می‌دهد. مطابق شکل مشاهده می‌شود که مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی الیاف فولادی به مراتب از سایر نمونه‌ها بیشتر بوده و بیشترین افزایش در الیاف فولادی با درصد ۱/۵ به چشم می‌خورد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الیاف فولادی موجب افزایش مدول الاستیسیته شده در حالی که الیاف پلی پروپیلن این مقدار را کاهش می‌دهد. و برای جبران

برای ارزیابی بتن در بازه ۸۰-۸ kHz قرار دارد، انتخاب شده است. همچنین مدت انتقال پالس بر حسب میکروثانیه و با دقت ۰/۱ میکروثانیه اندازه‌گیری شده است.

شکل ۱۲. مدول الاستیسیته نمونه‌های دارای شرایط سازه‌ای حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن

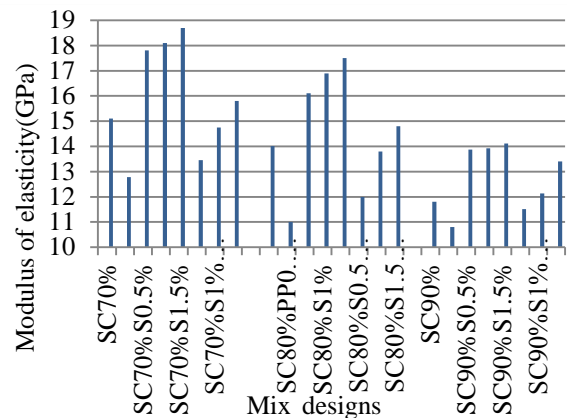


Fig. 12. Modulus of elasticity of samples with structural conditions containing steel fibers and polypropylene

هدف از این آزمایش تعیین کیفیت بتن‌های ساخته شده است. جدول (۵) سرعت پالس اولتراسونیک نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن و به صورت ترکیبی را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج مشاهده شده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد الیاف (فولادی و پلی پروپیلن) سرعت پالس اولتراسونیک نیز افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه‌های ۷۰ درصد اسکوریا حاوی الیاف فولادی دارای کیفیت عالی مطابق با طبقه بندی وایت هرست [30]<sup>۱</sup>، می‌باشند. و این بیانگر این است که این طرح دارای کیفیت خمیر ژئوپلیمری بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها است. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه بتن ژئوپلیمری حاوی ۹۰ درصد اسکوریا کم‌ترین مقدار سرعت پالس اولتراسونیک را دارا است و می‌توان این کاهش را به وجود خلل و فرج‌های زیادی که سنگدانه اسکوریا داراست نسبت داد و وجود ۹۰ درصد

1 Whitehurst

## ۵- نتیجه گیری

این پژوهش آزمایشگاهی به بررسی خواص مکانیکی بتن سبک ژئوپلیمری بدون الیاف و حاوی درصد های مختلف الیاف فولادی و پلی پروپیلن می پردازد. نتایج به دست آمده از این تحقیق به صورت خلاصه بیان می شود:

۱. طرح های اختلاط بتن سبک ژئوپلیمری به دلیل چگالی بالای مواد پایه (سرباره و متاکائولن)، وزن مخصوص بالایی خواهند داشت و تنها در نمونه های حاوی بالای ۷۰ درصد اسکوریا می توان شاهد وزن مخصوص مناسب بتن سبک بود.

۲. وجود الیاف پلی پروپیلن اگر چه موجب کاهش مقاومت فشاری می شود ولی در ترکیب با الیاف فولادی می توان تا حدی این ضعف را برطرف نمود. این کاهش مقاومت فشاری را می توان به دشواری مخلوط کردن الیاف در بتن، افزایش حفرات، محبوس ماندن هوا و ایجاد فضای خالی به خاطر افزایش درصد حجمی الیاف نسبت داد. به طور کلی وجود الیاف پلی پروپیلن به تنهایی تاثیر چشم گیری روی مشخصات مکانیکی بتن سبک ژئوپلیمری ندارد و بهتر است با الیاف دیگری مانند الیاف فولادی ترکیب شود.

۳. افزایش مقاومت کششی و خمشی با افزودن الیاف (فولادی و پلی پروپیلن) نشان گر این است که وجود الیاف بین سنگدانه ها و خمیر ژئوپلیمر چسبندگی را افزایش داده و باعث قفل و بست بین دو سطح شکست می شود بنابراین در صورت ترک، این الیاف با عمل پل زدن مانع از فروپاشیدن بتن سبک ژئوپلیمری خواهند شد.

۴. شکست انعطاف پذیر نمونه های حاوی الیاف فولادی در آزمایش مقاومت خمشی مطابق با نتایج مدول الاستیسیته بوده و این نمایانگر افزایش تغییر شکل در اثر اعمال بار می باشد.

ضعف مدول الاستیسیته در نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن می توان به آن درصدهای مختلف الیاف فولادی اضافه کرد.

## ۴-۵ بررسی ریزساختاری بتن سبک ژئوپلیمری الیافی

شکل (۱۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه حاوی ۷۰ درصد اسکوریا را در دو حالت با الیاف و بدون الیاف نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که وجود الیاف به ویژه الیاف پلی پروپیلن می تواند منجر به اتصال به خمیر ژئوپلیمر شود. همچنین عملکرد نمونه را برای مقاومت در برابر باز شدن و انتشار ترک ها بهبود بخشید و این نتیجه گیری نیز درستی نتایج قبلی را تایید می کند. همچنین در نمونه بتن ژئوپلیمری حاوی الیاف ناحیه ITZ به خوبی مشخص نیست. این به ماهیت متخلخل سطوح بتن سبک نسبت داده می شود که مکان های در هم قفل شده ای را برای خمیر ژئوپلیمری فراهم می کند تا پیوند بهتری بین سنگدانه و خمیر ژئوپلیمری در ناحیه ITZ ایجاد کند [32]. بنابراین مشاهده می شود که خمیر ژئوپلیمر تا عمق معینی به سطح سنگدانه نفوذ می کند.

شکل ۱۳. ریزنگار میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه بتن سبک ژئوپلیمری حاوی ۷۰٪ اسکوریا (a) بدون الیاف (b) با ۱/۵٪ الیاف فولادی و ۱/۰٪ الیاف پلی پروپیلن

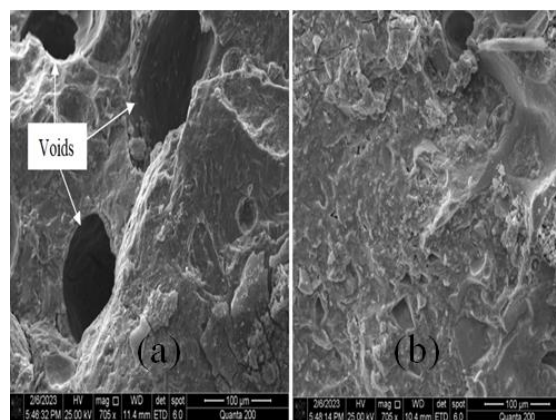


Fig. 13. Scanning electron microscope (SEM) micrographs of a light geopolymer concrete sample containing 70% scoria a) without fibers b) with 1.5% steel fibers and 0.1% Polypropylene fibers

[6].Bazan.P., Kozub.B., Łach.M.,Korniejenko.K, 2020 Evaluation of Hybrid Melamine and Steel Fiber Reinforced Geopolymers Composites. *Materials*, 13,5548.

[7] Korniejenko.K., Łach.M.,Mikuła.J, 2021 The Influence of Short Coir, Glass and Carbon Fibers on the Properties of Composites with Geopolymer Matrix. *Materials*,14,4599.

[8] Farhan. K.Z., Megat Johari. M.A., Demirbo ğa.R, 2021 Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: A review, *J. Build. Eng*, 44,102628.

[9] Adesina. A, 2020 Performance of fiber reinforced alkali-activated composites—A review, *Materialia*, 12,100782.

[10] Gailitis.R., Sprince.A., Kozlovskis.T., Radina.L., Pakrastins.L., Vatin. N,2021 Long-Term Properties of Different Fiber Reinforcement Effect on Fly Ash-Based Geopolymer Composite. *Crystals*,11,760.

[11] Swamy. R.N., Jiang. E.D, 1993 Pore structure and carbonation of lightweight concrete after 10 years' exposure. *ACI Spec. Publ*,136, 377–395.

[12] Mouli.M., Khelafi. H, 2008 Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Build. Environ*, 43, 31–36.

[13] Kayali. O, 2008 Fly ash lightweight aggregates in high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 22,2393-2399.

[14] Sadrmomtazi.A.,Hoshmandidyarjani.Y., Kohani. R, 2020 Investigating the mechanical characteristics of light geopolymer concrete based on slag containing light pumice grains and its durability against high temperature, *12th National Concrete Conference*,(In Persian).

[15] Centonze.G., Leone.M., Aiello.M, 2012 Steel Fibers from Waste Tires as Reinforcement in Concrete: a Mechanical Characterization. *Construction and Building Materials*, 36,46-57.

[16] Khalil. W.I., Abbas. W.A., Nasser. I.F, 2018 Some Properties and Microstructure of Fibre Reinforced Lightweight Geopolymer Concrete, *International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications (ICASEA)*, Wasit University, Kut, Iraq.

[17] Islam.A., Alengaram.U.J., Jumaat.M.Z., Ghazali.N.B.,Yusoff.S.,Bashar.I.I,2017 Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance

۵. در تمامی طرح‌ها، نمونه‌های حاوی ۷۰٪ اسکوریا، به دلیل داشتن تخلخل کم‌تر نسبت به سایر طرح‌های منتخب دارای شرایط سازه‌ای (حاوی ۸۰٪ و ۹۰٪ اسکوریا) بهترین نتایج را در ویژگی‌های مکانیکی از خود نشان می‌دهد.

## ۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند که از زحمات بی دریغ مسئولین آزمایشگاه بتن دانشگاه گیلان تشکر و قدردانی نمایند.

## ۷- سپاسگزاری از حمایت مالی

این پژوهش هیچ کمک‌هزینه خاصی از هیچ مؤسسه سرمایه‌گذار در بخش عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

## ۸- اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

## مراجع

[1] Pratik.A.S., shinde.B.,chougule.A.D. 2016 International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET),3.

[2] Diaz-Loya.E.I., Allouche.E.N and Vaidya.S. 2011. Mechanical Properties of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI materials journal*,108(3) 300-306.

[3] Gartner.E. 2004. Industrially Interesting Approaches to “Low-CO2” Cements. *Cement and Concrete research*. 34, 1489-1498.

[4]Neville. A.M. 2005 Properties of concrete. *Fourth and final edition. Longman Group. Ltd.*

[5] Hardjito.D., Rangan.BV,2005 Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete, Research report GC1, *Curtin University of Technology. Australia.*

- [25] ASTM C469/C469M: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. 2014 *ASTM International, West Conshohocken, PA, The USA*.
- [26] ASTM C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading).
- [27] ASTM C597 -02. 2002 Standard test method for pulse velocity through concrete, *Annual Book of American Society of Testing and Materials*, 04 -02.
- [28] Rezvanidivkalayee.S.M., Hoseinalibeigy.M., Mansori.A., Mohammadpornikbin. E, 2010 Properties of fresh and hardened light self-compacting concrete containing polypropylene and steel fibers, The first international concrete technology conference, Tabriz, National Center for Reinforcement, (In Persian).
- [29] ASTM C597. 2009 Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete.
- [30] Whitehurst E.A. 1951 Soniscope Tests Concrete Structures, *Journal of the American Concrete Institute*, 47443-444.
- [31] M.A.Hosen, M.I.Shammas, S.K.Sill, M.Z.J.umaat, U.J.Alengaram, R.Ahmmad, F.Althoey, A.B.M.S.Islam, Y.Lin. 2021 Investigation of structural characteristics of palm oil clinker based high-strength lightweight concrete comprising steel fibers, *Journal of Materials Research and Technology*. 15, 6736-6746.
- [32] Mouli.M., Khelafi. H. Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Build. Environ.* 2008 43, 31–36.
- of lightweight geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 152, 964-977.
- [18] Wasan.I.K., Waleed.A.A., Ibtesam.F.N, 2018 Some properties and microstructure of fibre reinforced lightweight geopolymer concrete, *International Conference on Advance of Sustainable Engineering and its Application (ICASEA), Wasit - Kut, Iraq*.
- [19] Mohseni.E., Jafar Kazemi.M., Koushkbaghi.M., Zehtab.B., Behforouz.B, 2019 Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nano-alumina, *Construction and Building Materials*, 209, 532-540.
- [20] Chithambar Ganesh.A., Sowmiya.K., Muthukannan.M, 2020 Investigation on the effect of steel fibers in geopolymer concrete, *Materials Science and Engineering*, 872, 012156.
- [21] ASTM C33. 2011 Standard specification for concrete aggregates, *Annual book of ASTM standards, vol. 04.02. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials*.
- [22] ASTM C330. 2005 Standard Specification for lightweight aggregates for structural concrete, *Annual Book of ASTM Standard; USA/ Philadelphia*.
- [23] BS 1881. Part 116: Testing Concrete. Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes. 1983 *BSI. London. The UK*.
- [24] ASTM C496/C496M: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2017 *ASTM International. West Conshohocken. PA. The USA*.



# Experimental Evaluation of the mechanical properties of lightweight geopolymer concretes Reinforced with Steel and Polypropylene Fibers

Ali Sadrmomtazi<sup>1</sup>, Samira Kazemi Rad<sup>2,\*</sup>

1Professor of Engineering Faculty, Faculty of Engineering, University of Guilan

2 PhD student, Faculty of Engineering, University of Guilan

samirakazemirad22@gmail.com\*

## Abstract:

Considering the high consumption of concrete, especially in structures, and the increasing need for cement production, it seems necessary to pay attention to the harmful environmental effects of this material. In the construction industry, to solve this problem, alternative adhesives are used in concrete, and geopolymers are one of these alternatives. Making geopolymer concretes based on slag can be one of the ways to produce environmentally friendly materials that reduce the harmful effects of cement production. Also, using lightweight concrete has valuable advantages, such as reducing the structure's dead load, and combining geopolymer with lightweight concrete can be beneficial. In this research, two series of lightweight geopolymer concrete have been used. In the first series, by keeping geopolymer ratios constant ( $Al/Bi=0.65$ ,  $SS/SH=1$  and sodium hydroxide concentration 2 M), Geopolymer concretes with different percentages (50, 60, 70, 80, 90, and 100) of scoria were made instead of coarse aggregate. Then, the designs with structural conditions (compressive strength above 17 MPa and specific weight below 2000 Kg/m<sup>3</sup>) were selected by comparing the samples' specific weight and compressive strength. In the second series of making lightweight geopolymer concretes by adding steel fibers (0.5, 1, and 1.5%), polypropylene fibers (0.1%), and hybrid, the mechanical characteristics of the samples were evaluated. By examining the compressive strength test, as expected, the compressive strength of the light geopolymer samples increases with the increase in the percentage of steel fibers. Also, samples containing 0.1% of polypropylene fibers face decreased compressive strength. When combined with steel fibers with percentages (0.5, 1, and 1.5), this decrease in compressive strength will be increased. By checking the compressive strength and specific weight, the samples containing 70, 80, and 90% scoria has structural conditions. By examining the tensile strength test, it can be concluded that adding steel and polypropylene fibers both increase the tensile strength can be seen. In the flexural strength test, flexural strength increases with an increase in the percentage of steel fibers. It can also be seen that the effect of steel fibers is more significant than polypropylene fibers in increasing the bending strength. An ultrasonic pulse speed test determines the quality of manufactured concrete. According to the observed results, it can be concluded that with the increase in the percentage of fibers (steel and polypropylene), the speed of the ultrasonic pulse also increases. The samples of 70% scoria-containing steel fibers are of excellent quality; this indicates that this design has a better quality geopolymer paste than other samples. Also, the geopolymer concrete sample containing 90% scoria has the lowest value of ultrasonic pulse speed. This reduction can be attributed to many voids in the scoria aggregate. The modulus of elasticity test results showed that the samples containing steel fibers were far more than the other samples, and the most significant increase was seen in steel fibers with a percentage of 1.5. Finally, by examining the microstructure of fiber geopolymer lightweight concrete using scanning electron microscope (SEM) images, it can be seen that the geopolymer sample without fibers contains voids, which are filled to a large extent when steel and polypropylene fibers are added.

**Keywords:** Concrete, Lightweight Geopolymer Concrete, Scoria, Steel Fibers, Polypropylene Fibers