

بررسی خصوصیات مکانیکی و ویژگی‌های شکست بتن ژئوپلیمری مسلح شده به الیاف بازیافتی

سید احسان سید حسنی

گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.

یاشار یثربی نیا *

گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.

محمد صابری

گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.

رضا وجودی مهربانی

گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.

مسعود مطلبیان

گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.

چکیده

بتن ژئوپلیمری به عنوان جایگزینی پایدار برای سیمان، با استفاده از فعال سازی پوزولان‌ها تولید می‌شود. این نوع بتن از مزایای زیست محیطی بسیاری، از جمله کاهش انتشار CO_2 ، برخوردار است. با این حال، بتن ژئوپلیمری دارای معایبی همچون ضعف در مقاومت خمشی، می‌باشد. افزودن الیاف می‌تواند تردشکنی و شکل‌پذیری آن را از طریق پل زنی ترک‌ها و افزایش تغییر شکل بهبود بخشد. در این پژوهش، شش طرح اختلاط با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار برای فعال سازی پوزولان طراحی شد. به منظور بهبود خواص مکانیکی، از الیاف نخ تایلر بازیافتی استفاده گردید. نمونه‌ها تحت سه دمای عمل‌آوری محیط، ۶۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده و مقاومت فشاری، خمشی، انرژی شکست و مدول الاستیسیته آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید موجب کاهش ۷ تا ۳۲ درصدی مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته می‌شود و محلول ۸ مولار بهترین عملکرد را داشت. استفاده از الیاف نخ تایلر بازیافتی در مقدار ۱ درصد، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته را ۹ تا ۵۰ درصد نسبت مقدار ۲ درصد افزایش داد، در حالی که نمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف مقاومت خمشی و انرژی شکست را ۲ تا ۶ درصد بهبود بخشید که بیانگر بهبود چقرمگی بوده است. عمل‌آوری در دماهای ۶۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد روند رشد مقاومت را ظرف ۷۲ ساعت به میزان ۸۸ تا ۹۵ درصد تسریع بخشیدند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بتن ژئوپلیمری قابلیت جایگزینی بتن معمولی را داشته و الیاف نخ تایلر بازیافتی عملکرد آن را بهبود بخشیده است.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، دمای عمل‌آوری، انرژی شکست، خصوصیات مکانیکی.

* نویسنده مسئول: yasrebinia@iaui.ac.ir

۱- مقدمه

با وجود مزایای قابل توجه، استفاده از بتن ژئوپلیمری با چالش‌هایی همچون ترک خوردگی، دمای عمل‌آوری، غلظت محلول فعال ساز و مواردی از این دست مواجه است [۱۶ و ۱۷]. یکی از پیشرفت‌های اخیر در صنعت بتن، توسعه بتن الیافی است. الیاف با موجب بهبود خواص مکانیکی می‌شوند. افزودن الیاف به بتن موجب بهبود عملکرد سازه‌ای از طریق افزایش مقاومت مکانیکی، مقاومت در برابر ضربه، و حفظ یکپارچگی طولانی‌مدت مصالح می‌گردد [۱۸]. زمانی که انواع مختلفی از الیاف در بتن ژئوپلیمری استفاده می‌شوند، این نوع بتن با عنوان بتن ژئوپلیمری مسلح شده به الیاف شناخته می‌شود [۱۹ و ۲۰]. احمد و العبدالرحمن [۲۱] اثرات الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و طبیعی را در بتن ژئوپلیمری بررسی کردند و دریافتند که الیاف فولادی منجر به افزایش چشمگیر مقاومت کششی و خمشی می‌شوند، در حالی که الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت بتن در برابر ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی را بهبود می‌بخشند. گانش و موتوکانان [۱۸] از الیاف شیشه‌ای در بتن ژئوپلیمری الیافی استفاده کرده و به ظرفیتی نزدیک به ده برابر در جذب انرژی و کاهش محسوس در تردی دست یافتند. قاسم‌زاده و فقیهی [۲۲] به بررسی عملکرد مبتنی بر شکست بتن ژئوپلیمری تقویت شده با الیاف فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف فولادی با هر کسر حجمی منجر به افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی غیرمستقیم شد.

در سال‌های اخیر، با توجه به چالش‌های زیست محیطی ناشی از انباشت تایلرهای فرسوده، استفاده از نخ تایلر بازیافتی به عنوان راهکاری جذاب برای مدیریت پسماندهای صنعتی و در عین حال ارتقای خواص بتن مورد توجه قرار گرفته است [۲۳]. این الیاف به عنوان موادی نوین و مؤثر جهت بهبود خواص مکانیکی بتن، به ویژه در طرح‌های بدون سیمان نظیر بتن ژئوپلیمری، شناخته می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نخ تایلر بازیافتی می‌تواند منجر به افزایش مقاومت کششی و خمشی شده و ترک خوردگی ناشی از تنش‌های حرارتی و مکانیکی را کاهش دهد [۲۴].

پژوهش حاضر به بررسی تأثیر الیاف نخ تایلر بازیافتی بر رفتار مکانیکی بتن ژئوپلیمری، با تمرکز بر مقاومت فشاری، خمشی و رفتار شکست آن می‌پردازد. طرح‌های اختلاط با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید با غلظت‌های مختلف تهیه شده و تحت شرایط

در سال‌های اخیر، مصالح ساختمانی سبز توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، به گونه‌ای که روش‌های تولید آن‌ها به عنوان یکی از معیارهای اساسی در ارزیابی اثرات زیست محیطی شناخته می‌شود [۱]. استفاده از بتن به شدت وابسته به چسبندگی سیمان است که طی فرایند گیرش به سرعت افزایش می‌یابد [۲]. با وجود نگرانی‌های زیست محیطی، تولید جهانی سیمان پرتلند همچنان رو به افزایش است و نشانه‌ای از کاهش آن مشاهده نمی‌شود [۳]. صنعت ساخت و ساز حدود ۴۲ درصد از کل مصرف انرژی را به خود اختصاص داده و تقریباً ۳۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را تولید می‌کند [۴ و ۵].

در دهه ۱۹۷۰، دیویدویس ژئوپلیمر را به عنوان ماده‌ای سیمانی معرفی کرد. بتن ژئوپلیمری به عنوان جایگزینی نوین و سازگار با محیط زیست برای بتن‌های مبتنی بر سیمان پرتلند، به منظور پاسخ‌گویی به نیازهای فزاینده در زمینه توسعه پایدار در صنعت ساخت و ساز معرفی شده است [۶ و ۷ و ۸]. بتن ژئوپلیمری نه تنها موجب کاهش پسماند می‌شود، بلکه انتشار کربن ناشی از تولید سیمان را نیز به طور چشمگیری کاهش می‌دهد [۹]. خواص برجسته‌ای نظیر مقاومت فشاری بالا و دوام بلند مدت مناسب در برابر شرایط محیطی، باعث کاربرد گسترده این بتن در اجزای مختلف سازه‌های نظیر تیرها، دال‌ها و روسازی‌ها شده است [۱۰ و ۱۱]. رحمان و احسان [۱۲] نشان دادند که ترکیب خاکستر بادی و سرباره کوره آهن می‌تواند عملکرد مکانیکی بتن ژئوپلیمری را بهبود بخشد. اُزچلیکجی و همکاران [۱۳] کاربرد ضایعات ساختمانی در کنار سرباره کوره آهن را در ملات‌های ژئوپلیمری بررسی کردند و به مقاومت‌های فشاری ۳۰ تا ۵۰ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز دست یافتند، هرچند با مقداری افزایش در جمع‌شدگی حاصل شد. سونگ و همکاران [۱۴]، بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی را با سرباره کوره فولاد ترکیب کرده و به بهبود کارایی و افزایش زمان گیرش دست یافتند. همچنین جایگزینی خاکستر بادی با سرباره فولاد تا ۲۰ درصد، تأثیر منفی بر مقاومت ۲۸ روزه نشان نداد. سینگ و میدنورف [۱۵]، بتن ژئوپلیمری را به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مورد ارزیابی قرار دادند و مشاهده کردند که خمیر سیمان ژئوپلیمری مقاومت فشاری به مراتب بالاتری نسبت به خمیر سیمان پرتلند از خود نشان می‌دهد.

می‌باشد. ترکیب شیمیایی آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سرباره کوره آهن	
ترکیبات شیمیایی	مقدار (%)
Si	۱۹/۰۰
Al	۳/۰۲
Ca	۵۱/۸۰
Fe	۱/۰۲
K	۱/۰۷
Na	۰/۶۷۸
Mg	۶/۲۸
Ti	۱/۵۰
Sr	۰/۴۸۲
S	۲/۴۹
Mn	۲/۱۵
Ba	۸/۰۱
Zr	۰/۰۴۱۴

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سدیم هیدروکسید	
ترکیبات شیمیایی	مقدار (%)
Na	۵۷/۴۸
O	۴۰/۰۰
H	۲/۵۲

جدول ۳- آنالیز شیمیایی سدیم سیلیکات	
ترکیبات شیمیایی	مقدار (%)
Na	۳۷/۶۹
Si	۲۳/۰۳
O	۳۹/۲۷

۲-۴- الیاف نخ تایر بازیافتی

الیاف مورد استفاده در این پژوهش، نخ تایر بازیافتی بوده است که از بازیافت لاستیک‌های فرسوده خودرو، بدون هیچ گونه پیش عمل‌آوری، بدست آمده است (شکل ۱). ویژگی‌های فیزیکی این الیاف در جدول ۴ ارائه شده است.

۲-۵- آب

آب مورد استفاده برای اختلاط در این پژوهش، آب آشامیدنی

مختلف عمل‌آوری قرار گرفته‌اند. هدف اصلی این پژوهش در ترکیب سه رویکرد برای بهبود عملکرد مکانیکی بتن ژئوپلیمری است. نخست، برای اولین بار الیاف نخ تایر بازیافتی به عنوان مسلح‌کننده در بتن ژئوپلیمری مورد ارزیابی قرار گرفته است که نه تنها راهکاری اقتصادی و زیست‌محیطی برای مدیریت پسماند صنعت تایرسازی ارائه می‌دهد، بلکه پتانسیل بهبود خواص مکانیکی رانیز فراهم می‌آورد. دوم، این تحقیق فراتر از آزمون‌های مقاومت معمول، به بررسی جامع رفتار شکست و مکانیزم‌های ترک‌خوردگی می‌پردازد، موضوعی که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است. سوم، با بهینه‌سازی همزمان غلظت سدیم هیدروکسید و شرایط عمل‌آوری، و ارتباط دادن ویژگی‌های ریزساختاری از طریق تحلیل SEM با رفتار ماکروسکوپی، این پژوهش چارچوبی جامع برای طراحی بتن ژئوپلیمری مسلح به الیاف بازیافتی با عملکرد بهینه ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سرباره کوره آهن

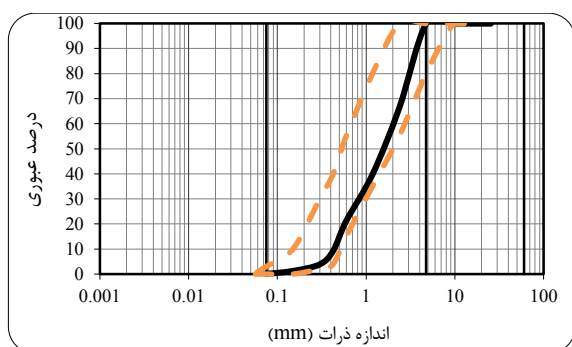
سرباره کوره آهن‌گدازی مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه فناوری بنا بنیان زیست همدان تأمین شده است. ترکیب شیمیایی این ماده مطابق استاندارد ASTM C989 بوده است [۲۵]. وزن مخصوص آن برابر با ۲۹۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد و ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- هیدروکسید سدیم

هیدروکسید سدیم یکی از اجزای کلیدی محلول فعال‌ساز در بتن ژئوپلیمری است که با تسهیل واکنش‌های شیمیایی به تشکیل ماتریس ژئوپلیمری کمک می‌کند. در این پژوهش، هیدروکسید سدیم از شرکت پارس شیمی تهیه شد و فرمول شیمیایی آن NaOH می‌باشد. ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۳- سدیم سیلیکات

سدیم سیلیکات که به همراه هیدروکسید سدیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، به عنوان یک فعال‌ساز قلیایی مکمل در تشکیل ساختار ژئوپلیمری نقش دارد. در این پژوهش، سیلیکات سدیم از شرکت آب شیشه تبریز تهیه شد و فرمول شیمیایی آن Na_2SiO_3



شکل ۲- دانه‌بندی سنگ‌دانه ریز مصرفی

۲-۷- پودرسنگ

پودرسنگ به وسیله خاصیت پرکنندگی خود می‌تواند تأثیر چشم‌گیری در کاهش نفوذپذیری بتن داشته باشد. این پودر جایگزین ماسه می‌باشد. پودرسنگ مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه پودر سنگ زرآرما تأمین شده است. چگالی پودر سنگ مورد استفاده ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- آنالیز شیمیایی پودرسنگ

ترکیبات شیمیایی	مقدار (%)
CaO	۳۸/۱۶
MgO	۱/۸
SiO ₂	۲/۱۳
Al ₂ O ₃	۰/۲۹
Fe ₂ O ₃	۰/۱۸
SO ₃	۰/۰۸
LOI	۴۲

۲-۸- طرح اختلاط

طرح اختلاط و مراحل اختلاط در این پژوهش با توجه به روش‌های ارائه‌شده در منابع پیشین تنظیم شده است [۲۷ و ۲۸ و ۲۹]. نسبت محلول به پوزولان ۰/۴ و نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲ در نظر گرفته شده است. محلول سدیم هیدروکسید با سه غلظت ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار مورد استفاده قرار گرفته است.

در طرح‌های اختلاط حاضر، به‌منظور ارزیابی تأثیر الیاف افزوده‌شده بر خصوصیات بتن تازه، مقدار آب اضافه و فوق‌روان‌کننده در تمامی طرح‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.

شهر تبریز بوده که با الزامات مندرج در استاندارد ASTM C1602 [۲۶] مطابقت داشته است.

جدول ۴- مشخصات فیزیکی الیاف نخ تایلر بازایافتی

مشخصات فیزیکی	مقدار
وزن مخصوص (Kg/m ³)	۱۱۴۰
طول (mm)	۱۸ - ۱۹
قطر (mm)	۰/۲۵
نسبت طول به قطر	~۷۴
جذب آب (%)	۵ - ۴
مدول الاستیسیته (GPa)	۵/۱۷
مقاومت کششی (MPa)	۸۹۴



شکل ۱- الیاف نخ تایلر بازایافتی

۲-۶- سنگ‌دانه ریز

سنگ‌دانه ریز مورد استفاده در این پژوهش از معدن قره قوم شهرستان مرند تهیه شد و بزرگ‌ترین دانه آن ۴/۷۵ میلی‌متر بوده است. سنگ‌دانه مورد استفاده با الزامات موجود در استاندارد ASTM C33 [۲۷] مطابقت داشته است. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه مورد استفاده در شکل ۲ ارائه شده است.

در بتن‌های با مقاومت بالا، استفاده از ماسه به تنهایی به دلیل کاهش ناپیوستگی‌های منطقه انتقالی (ITZ)، افزایش تراکم و همگنی ساختار، و بهبود توزیع تنش در مقایسه با سنگ‌دانه‌های درشت صورت می‌گیرد [۲۷ و ۲۸]. این رویکرد در بتن ژئوپلیمری اهمیت بیشتری می‌یابد، زیرا ماسه با ماتریس آلومینوسیلیکاتی ژئوپلیمر سازگاری شیمیایی بهتری داشته و سطح ویژه بالای آن درجه ژئوپلیمریزاسیون را افزایش می‌دهد، که منجر به دستیابی به مقاومت فشاری بالاتر و بهبود خواص مکانیکی می‌شود [۲۹ و ۳۰]. به همین دلایل سنگ‌دانه ریز در این پژوهش استفاده شده است.

ابتدا، سرباره کوره آهن با یک سوم از آب اضافی و محلول فعال ساز به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد. در مرحله بعد، سنگ دانه ریز و پودر سنگ به همراه یک سوم دیگر از محلول و آب باقی مانده به مخلوط افزوده شده و فرایند اختلاط به مدت ۵ دقیقه ادامه یافت. در مرحله نهایی، یک سوم باقی مانده آب و محلول، به همراه الیاف جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- مشخصات طرح اختلاط های مورد استفاده در این پژوهش (Kg/m^3)

نام نمونه	غلظت محلول سدیم هیدروکسید	درصد الیاف	سرباره کوره آهن	سدیم هیدروکسید	سدیم سیلیکات	فوق روان کننده	آب اضافی	الیاف نخ تایر بازیافتی	سنگ دانه ریز	پودر سنگ
12M-1F	۱۲	۱	۵۰۰	۶۶/۶۷	۱۳۳/۳۳	۵/۰	۹۵/۰	۱۰/۰	۱۲۲۹/۷۹	۲۷۶/۳۶
10M-1F	۱۰	۱	۵۰۰	۶۶/۶۷	۱۳۳/۳۳	۵/۰	۹۵/۰	۱۰/۰	۱۲۲۹/۷۹	۲۷۶/۳۶
8M-1F	۸	۱	۵۰۰	۶۶/۶۷	۱۳۳/۳۳	۵/۰	۹۵/۰	۱۰/۰	۱۲۲۹/۷۹	۲۷۶/۳۶
12M-2F	۱۲	۲	۵۰۰	۶۶/۶۷	۱۳۳/۳۳	۵/۰	۹۵/۰	۲۰/۰	۱۲۰۸/۴۳	۲۷۱/۵۶
10M-2F	۱۰	۲	۵۰۰	۶۶/۶۷	۱۳۳/۳۳	۵/۰	۹۵/۰	۲۰/۰	۱۲۰۸/۴۳	۲۷۱/۵۶
8M-2F	۸	۲	۵۰۰	۶۶/۶۷	۱۳۳/۳۳	۵/۰	۹۵/۰	۲۰/۰	۱۲۰۸/۴۳	۲۷۱/۵۶

۹-۲- عمل آوری

مطابق با شکل ۳، نمونه ها پس از خارج شدن از قالب، به مدت ۲۴ ساعت درون آون تحت عمل آوری قرار گرفتند. نمونه های مربوط به آزمایش مقاومت فشاری در سه دمای محیط، ۶۰ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد عمل آوری شدند.

۱۰-۲- روش های آزمایش

۱۰-۱-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی بتن ژئوپلیمری با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر و با استفاده از جک بتن شکن انجام شده است. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C109 [۳۵] انجام شده است. شکل ۴ نمونه مکعبی پس از انجام آزمایش را نشان می دهد. برای هر طرح اختلاط، ۱۲ نمونه مکعبی ساخته شد. در هر سن آزمایش، ۳ نمونه تحت آزمون قرار گرفت و میانگین نتایج به عنوان مقاومت فشاری گزارش شد.

۱۰-۲-۲- مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی، توانایی نمونه های بتنی در برابر نیروهای خمشی را ارزیابی می کند. در این پژوهش، نمونه های منشوری $45 \times 10 \times 10$ سانتی متر، مطابق شکل ۵، تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته است. برای هر طرح اختلاط، ۳ نمونه منشوری ساخته شد و میانگین نتایج به عنوان مقاومت خمشی گزارش شد. این آزمایش



الف ب



ج

شکل ۳- (الف) عمل آوری نمونه ها در آون، (ب و ج) نمونه های عمل آوری شده

برای آزمایش مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و انرژی شکست، نمونه ها فقط در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد عمل آوری شدند. پس

مطابق با استاندارد ASTM C78 [۳۶] انجام شده است.



شکل ۴- نمونه قرار گرفته تحت آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۶- آزمایش مدول الاستیسیته

$$E = (S_2 - S_1) / (\varepsilon_2 - 0.000050) \quad (۳)$$

که در آن، E مدول الاستیسیته (MPa) که شیب منحنی تنش-کرنش در ناحیه الاستیک را نشان می‌دهد، S_2 تنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی، S_1 تنش متناظر با کرنش طولی برابر با ۰.۰۰۰۰۰۵ و ε_2 کرنش طولی در ۴۰٪ بار نهایی را نشان می‌دهد. این روش، مدول الاستیسیته را با ارزیابی بخش خطی از منحنی تنش-کرنش نمونه‌های استوانه‌ای بتن سخت‌شده تحت فشار محوری تعیین می‌کند.

۲-۱۰-۴- انرژی شکست

آزمایش انرژی شکست بر روی نمونه‌های منشوری شیاردار، میزان انرژی لازم برای گسیختگی را نشان می‌دهد. نمونه‌های استاندارد مورد استفاده در این روش، نمونه‌های منشوری با ابعاد ۴۵×۱۰×۱۰ سانتی‌متر و دارای شیار در مرکز نمونه بوده‌اند. عمق شیار ایجادشده در نمونه‌ها برابر با ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای هر طرح اختلاط، ۳ نمونه منشوری شیاردار ساخته شد و میانگین نتایج



شکل ۵- آزمایش مقاومت خمشی، همراه با نمایش ترک‌های مشاهده شده در یک سوم میانی دهانه

طبق این استاندارد، اگر شکست در یک سوم میانی دهانه اتفاق بیفتد، مقاومت خمشی (R) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$R = PL/bd^2 \quad (۱)$$

در صورتی که شکست در خارج از یک‌سوم میانی دهانه رخ دهد (اما حداکثر تا ۵٪ از طول دهانه فاصله داشته باشد)، مقاومت خمشی باید با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردد.

$$R = 3Pa/bd^2 \quad (۲)$$

که در آن، R مقاومت خمشی (MPa)، P حداکثر بار اعمال‌شده (N)، L طول دهانه (mm)، b عرض نمونه (mm)، d عمق نمونه (mm) و a فاصله از نزدیک‌ترین تکیه‌گاه تا محل شکست (mm) را نشان می‌دهد.

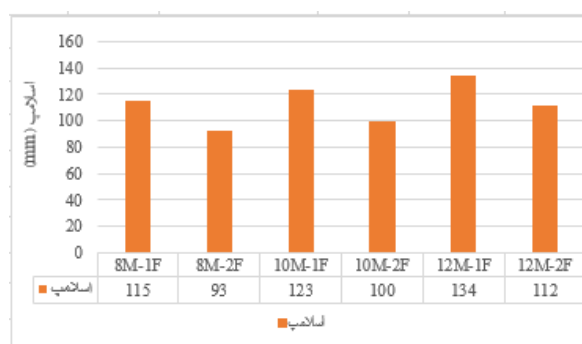
۲-۱۰-۳- مدول الاستیسیته

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، مدول الاستیسیته از

الیاف نخ تیر نشان داد که میزان روانی مخلوط‌ها تحت تأثیر هم‌زمان غلظت محلول فعال‌ساز و درصد الیاف قرار دارد. با افزایش مولاریته از ۸ به ۱۲، مقدار اسلامپ به‌طور کلی افزایش یافت، که بیانگر بهبود کارایی مخلوط ناشی از افزایش یون‌های فعال در فرایند ژئوپلیمریزاسیون است.



شکل ۸- آزمایش اسلامپ بر روی بتن تازه



شکل ۹- نتایج آزمایش اسلامپ

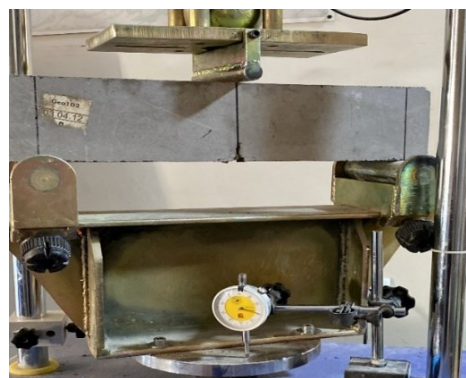
اضافه کردن الیاف نخ تیر موجب کاهش نسبی اسلامپ شد، که به علت افزایش مقاومت در برابر جریان و ایجاد شبکه درون ماتریس می‌باشد. در مخلوط‌هایی با ۱٪ الیاف، افت روانی کمتر از نمونه‌های ۲٪ مشاهده گردید، که نشان‌دهنده اثر منفی افزایش میزان الیاف بر کارایی بتن است.

در مجموع، مخلوط با مولاریته ۱۲ و ۱٪ الیاف نخ تیر (۱۳۴ mm) بیشترین مقدار اسلامپ را نشان داد و بهترین تعادل را میان روانی و یکنواختی مخلوط ارائه کرد؛ بنابراین می‌توان آن را ترکیب بهینه از نظر کارایی بتن ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف نخ تیر پیشنهاد نمود. شایان ذکر است که سایر ترکیبات آزمایشی بین ۸ تا ۳۰ درصد کاهش روانی نسبت به این مخلوط داشته‌اند، که این موضوع تأثیر قابل توجه پارامترهای مولاریته و درصد الیاف بر رفتار رئولوژیکی بتن ژئوپلیمری را تأیید می‌کند.

به‌عنوان انرژی شکست گزارش شد. شکل ۷ نشان‌دهنده آزمایش انرژی شکست بر روی نمونه شیاردار است. این روش به ویژه برای مصالحی که رفتار ترد یا مقاومت کششی پایینی دارند مناسب است. این آزمایش طبق استاندارد ASTM C1609 [۳۸] انجام شده است. با توجه به این استاندارد، انرژی شکست (G_f) با محاسبه کل سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی به دست می‌آید که نشان‌دهنده انرژی جذب شده در طی فرایند ترک خوردگی است. مقدار G_f با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$G_f = W/A \quad (4)$$

که در آن، G_f انرژی شکست (J/m^2)، W سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی و A سطح مقطع شکست (m^2)، که معمولاً از حاصل ضرب عرض نمونه در عمق نمونه بدست می‌آید، می‌باشد.



شکل ۷- آزمایش خمشی سه نقطه‌ای برای بدست آوردن انرژی شکست

۲-۱۰-۵- اسلامپ

آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C143 [۳۹] برای تعیین میزان کارایی و روانی بتن تازه انجام شد. در این آزمایش، بتن تازه داخل مخروط اسلامپ در سه لایه ریخته و متراکم شده و سپس قالب به صورت عمودی برداشته می‌شود. میزان افت ارتفاع بتن پس از برداشتن قالب، به عنوان مقدار اسلامپ اندازه‌گیری و بر حسب میلی‌متر گزارش می‌شود. در شکل ۸ نحوه انجام این آزمایش نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

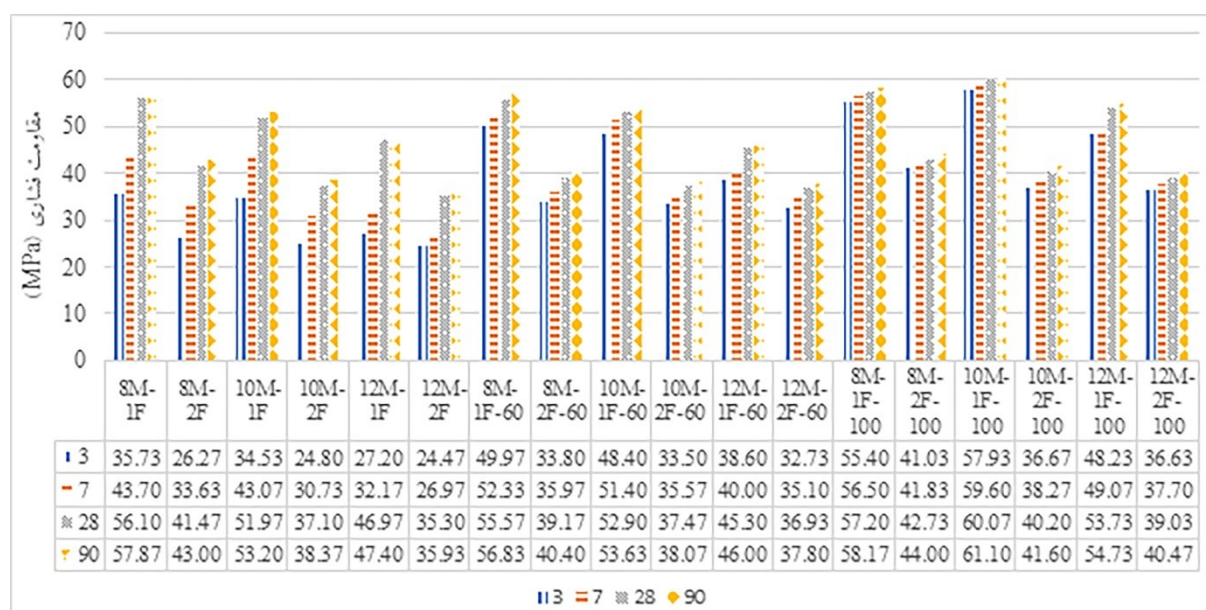
۳-۱- نتایج آزمایش اسلامپ

باتوجه به شکل ۹، بررسی نتایج اسلامپ بتن ژئوپلیمری حاوی

۲-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار عملکرد بهتری نسبت به محلول‌های ۱۰ مولار و ۱۲ مولار از خود نشان داده است. این کاهش مقاومت ممکن است به دلیل ویژگی خوردگی سدیم هیدروکسید در غلظت بالا باشد که ساختار داخلی ماتریس بتن را مختل می‌کند. این یافته با مطالعات پیشین همخوانی دارد که افزایش مولاریته سبب کاهش در مقاومت فشاری شده است و وجود یک مولاریته بهینه برای محلول قلیایی را تأیید می‌کنند. به عنوان مثال، گانش و موتوکانان گزارش کرده‌اند که افزایش بیش از حد NaOH به مقاومت فشاری آسیب می‌زند [۱۸].

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، نمونه 8M-1F در تمامی سنین (۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز) بالاترین مقاومت فشاری را در میان نمونه‌هایی که در دماهای مختلف عمل‌آوری شده‌اند از خود نشان داده است. در مقابل، نمونه‌های 12M-2F که دارای بالاترین درصد الیاف و غلظت محلول بوده است، در همان سنین کمترین مقدار مقاومت فشاری نشان داده است. نتایج نشان دهنده آن است که افزایش غلظت سدیم هیدروکسید تأثیر منفی بر مقاومت فشاری داشته است. به‌طور کلی، نمونه‌های حاوی محلول



شکل ۱۰- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها

مقاومت در سنین اولیه می‌شود. این یافته نیز با مطالعات پیشین کاملاً همخوان است. گانش و موتوکانان گزارش کرده‌اند که عمل‌آوری حرارتی مقاومت فشاری بالاتری نسبت به عمل‌آوری محیطی ایجاد می‌کند [۱۸].

غلظت‌های بیش از حد سدیم هیدروکسید می‌تواند تخلخل را، به دلیل خاصیت خوردگی محلول قلیایی مورد استفاده، افزایش دهد که در نهایت منجر به کاهش مقاومت مکانیکی بتن ژئوپلیمری می‌شود. این اثر مخرب به ویژه در مراحل اولیه فرایند ژئوپلیمریزاسیون آشکارتر است. به این موضوع در تحقیق هاردجیتو و رانگان [۴۰] نیز اشاره شده است.

علاوه بر این، مقدار بیش از حد الیاف می‌تواند منجر به پراکندگی غیر یکنواخت آن شود که در نهایت موجب ایجاد ضعف‌های

علاوه بر این، مقایسه بین نمونه‌های 1F و 2F نشان داده است که افزایش مقدار الیاف از ۱٪ به ۲٪ تأثیر منفی بر مقاومت فشاری داشته است. نمونه‌های 1F به‌طور پیوسته عملکرد بهتری در این زمینه از خود نشان داده‌اند.

در خصوص دمای عمل‌آوری، مشخص شد که نمونه‌هایی که تحت شرایط دمای محیط عمل‌آوری شده‌اند، افزایش تدریجی در مقاومت فشاری در طول زمان داشته‌اند. در مقابل، نمونه‌هایی که در دماهای ۶۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده بودند، تنها پس از ۲۴ ساعت، به مقاومت نهایی تقریبی خود دست یافتند و مقادیر مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز تغییر چندانی نداشته است. این موضوع را می‌توان به افزایش واکنش پذیری محلول فعال ساز در دماهای بالا نسبت داد، که منجر به تسریع رشد

ریزترک‌ها و تخریب ماتریس گردد و در نهایت موجب کاهش مقاومت خمشی شود. با این حال، به نظر می‌رسد که این اثر نامطلوب در مقایسه با تأثیر آن بر مقاومت فشاری کمتر محسوس باشد، که می‌تواند کاهش‌های نسبتاً جزئی مشاهده شده در برخی نمونه‌ها را توضیح دهد.

نتایج مطالعات پیشین نیز نشان داده است که افزایش درصد الیاف منجر به بهبود مقاومت خمشی شده است. در پژوهش انجام‌شده توسط سیلوا و همکاران [۴۱] و همچنین مطالعه آیشه و همکاران [۴۲] نشان داد که افزایش مقدار الیاف می‌تواند منجر به افزایش ۹۱ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف گردد. این نتایج تأیید می‌کند که الیاف با عملکرد به‌عنوان پل بر روی ریزترک‌ها و مهار گسترش ترک‌ها، نقش مؤثری در بهبود رفتار خمشی بتن ژئوپلیمر ایفا می‌کنند.

۳-۴- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، مقدار مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده در تمامی نمونه‌ها در بازه‌ای بین ۹ تا ۲۱ گیگاپاسکال قرار داشته است. طرح اختلاط 10M-1F بیشترین مقدار را با ۲۱ گیگاپاسکال ثبت کرده، در حالی که کمترین مقدار، یعنی ۹/۱۴ گیگاپاسکال، در نمونه 12M-2F مشاهده شده است. با افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید، یک روند کاهشی کلی در مدول الاستیسیته مشاهده گردیده است. نمونه‌های حاوی محلول سدیم هیدروکسید ۸ مولار به طور پیوسته مقادیر مدول الاستیسیته بالاتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با محلول‌های ۱۰ و ۱۲ مولار نشان داده‌اند. این رفتار عمدتاً به دلیل تخریب ریز ساختار بتن ناشی از خاصیت خوردگی محلول سدیم هیدروکسید می‌باشد. نکته جالب توجه این است که مدول الاستیسیته بالاتر مشاهده شده در نمونه 10M-1F ممکن است با دمای بالای عمل‌آوری (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) مرتبط باشد، که احتمالاً موجب افزایش واکنش پذیری محلول فعال ساز شده است. نتایج نمونه‌های 1F و 2F نیز نشان داده است که حجم الیاف تأثیر مهمی بر مدول الاستیسیته داشته است. به‌طور کلی، نمونه‌های 2F مدول الاستیسیته کمتری نسبت به نمونه‌های 1F از خود نشان داده‌اند، که بیانگر آن است که مقدار بالاتر الیاف ممکن است تا حدی رفتار الاستیک را تضعیف کند.

موضعی درون ماتریس خواهد شد. حجم بالاتر الیاف، ممکن است پیوند میان الیاف و خمیر ژئوپلیمری اطراف را مختل کند. گانش و موتوکائان نیز در پژوهش خود گزارش کرده‌اند که افزایش مقدار الیاف تا حدی مقاومت را افزایش داده و بیش از مقدار بهینه سبب کاهش مقاومت فشاری شده است [۱۸].

۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، مقاومت خمشی نمونه‌ها در محدوده ۳۰۳۵ تا ۴۰۰۲ مگاپاسکال بوده است. بیشترین مقدار (۴۰۰۲ مگاپاسکال) مربوط به نمونه 8M-2F بوده است، در حالی که نمونه 12M-2F با وجود داشتن ۲٪ نخ تایلر باز یافتی کمترین مقاومت خمشی (۳۰۵۵ مگاپاسکال) را داشته است. کاهش مقاومت خمشی با افزایش غلظت سدیم هیدروکسید نسبت مستقیم داشته است. نمونه‌های حاوی سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار به طور پیوسته عملکرد خمشی بهتری نسبت به غلظت‌های ۱۰ و ۱۲ مولار داشته است. این کاهش عمدتاً به ماهیت خوردگی سدیم هیدروکسید در غلظت بالا مربوط بوده است که می‌تواند به یکپارچگی ماتریس آسیب وارد کند. با این حال، کاهش مقاومت نسبتاً جزئی بوده است.



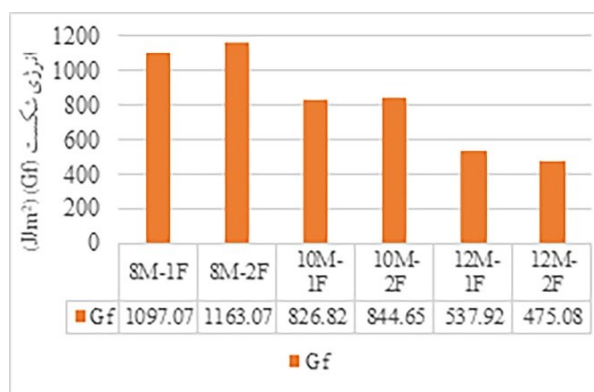
شکل ۱۱- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

مقایسه میان نمونه‌های 1F و 2F نشان داده است که مقدار الیاف بر رفتار خمشی تأثیرگذار بوده است و نمونه‌های 2F معمولاً مقاومت‌های بالاتری را نشان داده است. با این حال، در مورد نمونه 12M-2F، اثر خوردگی سدیم هیدروکسید ممکن است موجب از بین رفتن اثر الیاف و در نتیجه کاهش مقاومت شده باشد. افزایش غلظت هیدروکسید سدیم (NaOH) موجب افزایش خاصیت خوردگی مخلوط می‌شود. این موضوع ممکن است منجر به ایجاد

نشان داد، در حالی که نمونه‌های با مولاریته بالاتر رفتار نرم-شکل پذیر با مقاومت کمتر داشتند. علاوه بر این، تحلیل منحنی‌های تنش-کرنش، حالت شکست عمدتاً ترد را نشان داد، چرا که تمام نمونه‌ها بلافاصله پس از رسیدن به بار اوج دچار شکست ناگهانی شده‌اند.

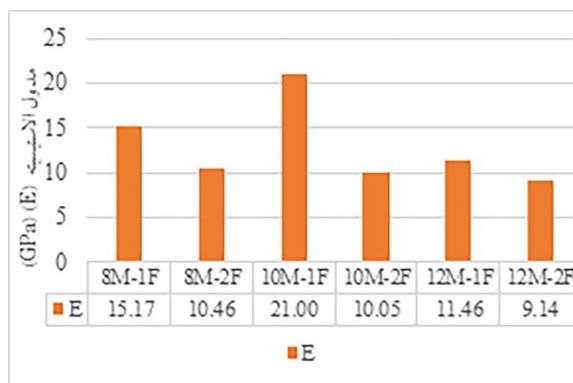
۳-۶- انرژی شکست

همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید منجر به کاهش انرژی شکست در نمونه‌های مورد آزمایش شده است. نمونه‌های حاوی محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار به طور پیوسته انرژی شکست بالاتری نسبت به نمونه‌های دارای محلول‌های ۱۰ و ۱۲ مولار نشان داده‌اند، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت غلظت کمتر در افزایش مقاومت در برابر ترک در بتن ژئوپلیمری است. برای مثال نمونه 8M-2F با مقدار 1163 J/m^2 بیش‌ترین انرژی شکست را داشته است که در مقایسه با سایر نمونه‌ها افزایشی ۶ تا ۱۰۰ درصدی داشته است. تفاوت عملکرد میان گروه‌های 1F و 2F در تمامی غلظت‌ها، نقش مقدار الیاف در رفتار شکست را برجسته ساخته است. در اغلب موارد، نمونه‌های 2F ۲ تا ۶ درصد انرژی شکست بیشتری نسبت به نمونه‌های 1F از خود نشان داده‌اند، که این موضوع نشان‌دهنده آن است که افزایش حجم الیاف، مقاومت ماده در برابر گسترش ترک را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱۴- نتایج آزمایش انرژی شکست

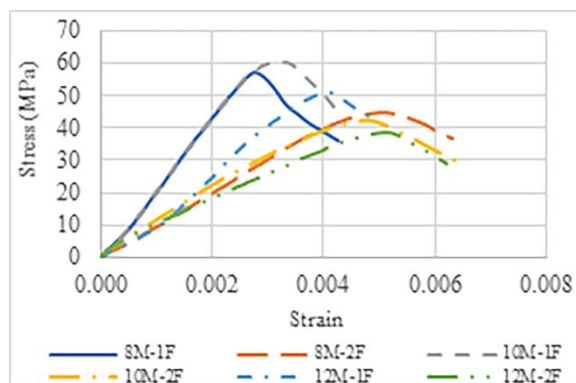
غلظت‌های بالاتر محلول سدیم هیدروکسید تمایل به افزایش تردی ماتریس ژئوپلیمری دارند، که این موضوع منجر به کاهش جذب انرژی و شکست ناگهانی‌تر می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر نیز بحث شد، محلول سدیم هیدروکسید بیش از حد همچنین موجب



شکل ۱۲- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته

۳-۵- نمودار تنش-کرنش

همان‌طور که در شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده شده است، مدول الاستیسیته نمونه‌ها در محدوده ۹/۱۴ تا ۲۱ GPa قرار گرفته است. نمونه 10M-1F با مدول الاستیسیته ۲۱ GPa بالاترین مقدار را نشان داد که نشان‌دهنده تشکیل ماتریس ژئوپلیمری متراکم و یکنواخت در این غلظت بهینه است. شاخص تردی (BI) از ۰/۷۱۲ تا ۰/۸۲۳ متغیر بود. نمونه 10M-2F کم‌ترین تردی را با مقدار ۰/۷۱۲ نشان داد که ۸/۵٪ کاهش نسبت به 10M-1F داشت. این یافته نقش الیاف در پل‌زنی بر ریزترک‌ها و به تعویق انداختن شکست ناگهانی را تأیید می‌کند. افزایش درصد الیاف از ۱٪ به ۲٪ باعث کاهش ۱۷-۳۱/۵٪ در مقاومت فشاری شد، که با نتایج مقاومت فشاری هم‌سو بوده است. این موضوع در مطالعه گانش و موتوکانان نیز گزارش شده است [۱۸].



شکل ۱۳- منحنی تنش-کرنش

کرنش اوج (ϵ_{peak}) از ۰/۰۳۳ تا ۰/۰۵۱ متغیر بود. نمونه 10M-1F با بالاترین مقاومت (۶۰/۱۷ MPa)، بالاترین مدول (۲۱ GPa) و کمترین کرنش اوج، رفتار الاستیک-ترد با مقاومت بالا

2F رفتار نرم‌شوندگی تدریجی پس از بار اوج را نشان داد که بیانگر مکانیزم‌های مؤثر پل زنی الیاف و جذب انرژی بالا است. این نمونه بالاترین بار اوج و بیشترین تغییر مکان نهایی را در بین تمام نمونه‌ها به دست آورده است.

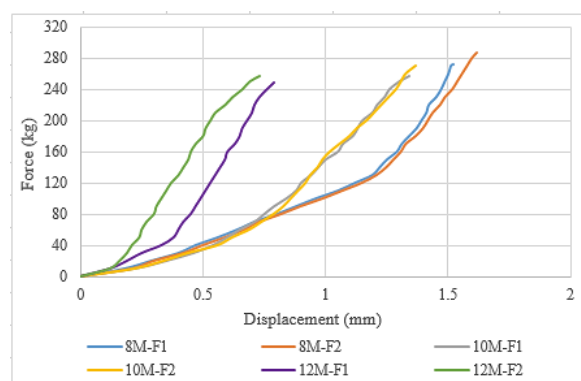
تأثیر مولارسته سدیم هیدروکسید بر رفتار بار-تغییر مکان نشان داد که بار اوج با افزایش مولارسته کاهش یافته است بطوریکه نمونه‌های ۱۰ و ۱۲ مولار نسبت به نمونه ۸ مولار ۵ تا ۱۰ درصد کاهش نشان داده است. همچنین تغییر مکان نهایی نمونه‌های ۱۰ و ۱۲ مولار نسبت به نمونه ۸ مولار ۱۵ تا ۵۵ درصد کاهش نشان داده است. این روند نشان می‌دهد که افزایش مولارسته اثرات منفی بر هم بار اوج و هم شکل‌پذیری داشته است.

۳-۲- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی ویژگی‌های ریزساختاری بتن ژئوپلیمری استفاده شده است. تصاویر مربوطه در شکل ۱۶ ارائه شده‌اند. تصاویر نشان دهنده حضور فازهای ژلی مبتنی بر سدیم و کلسیم را درون ماتریس است، که حاکی از انجام موفقیت‌آمیز واکنش ژئوپلیمریزاسیون می‌باشد. افزودن مواد با محتوای بالای کلسیم مانند سرباره کوره آهن تأثیر قابل توجهی بر ساختار تخلخلی ماتریس داشته است. هیچ ذره واکنش نداده‌ای مشاهده نشده، که نشان دهنده پلیمریزاسیون مؤثر در طول فرایند عمل‌آوری بوده است. در نواحی فاقد الیاف، جدایی ملات در ماتریس و ایجاد ترک مشاهده شده است. در مقابل، در نواحی حاوی الیاف، آنالیز SEM وجود یک لایه آلومینایی پیوسته و چسبندگی قوی بین ماتریس پلیمری و سطح الیاف را بدون هیچ‌گونه ترک قابل مشاهده نشان داده است. پوشش آلومینایی می‌تواند پیوند بین الیاف و ماتریس ژئوپلیمری را بهبود بخشد.

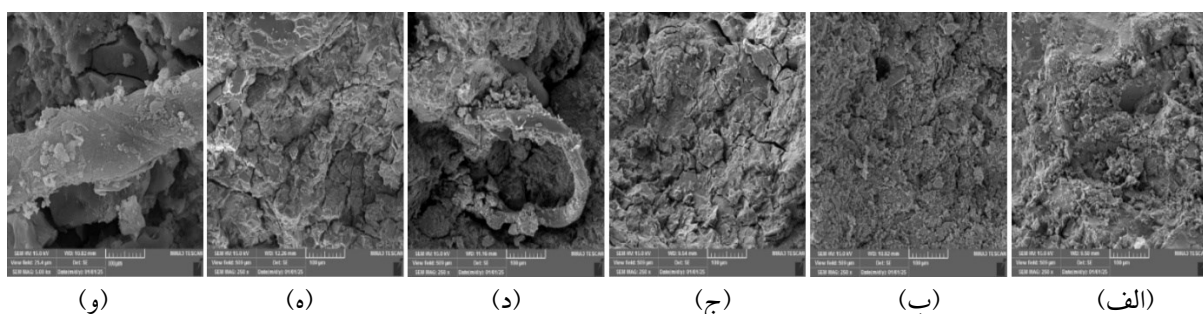
افزایش تخلخل داخلی و تشکیل ریزترک‌هایی می‌شود که به عنوان نقاط شروع برای گسترش شکست عمل کرده و آستانه انرژی لازم برای گسیختگی را کاهش می‌دهند. افزایش پیوسته انرژی شکست در نمونه‌های 2F در مقایسه با 1F، نقش مثبت الیاف در بهبود مقاومت شکست را برجسته می‌سازد. الیاف به عنوان عامل پل زننده در مسیر ترک‌های در حال گسترش عمل می‌کنند، گسترش ترک را به تعویق می‌اندازند و انرژی بیشتری برای گسیختگی نیاز دارند. مطالعه گومز و همکاران نیز نشان دهنده صحت این موضوع می‌باشد [۴۳].

منحنی‌های بار-تغییر مکان حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای در شکل ۱۵ ارائه شده است. این منحنی‌ها نشان‌دهنده تأثیر همزمان مولارسته محلول سدیم هیدروکسید و درصد حجمی الیاف نخ تایر بر رفتار مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمری است.



شکل ۱۵- منحنی نیرو-جابجایی

افزایش درصد حجمی الیاف از ۱٪ به ۲٪ در نمونه‌ها منجر به بهبود قابل توجه عملکرد خمشی شده است؛ برای مثال در نمونه‌های ۸ مولار بار اوج از ۲۷۲ به ۲۸۷ کیلوگرم افزایش یافته است که در حدود ۵/۵ درصد بوده و تغییر مکان نهایی از ۱/۵۲ به ۱/۶۲ میلی‌متر افزایش یافته است که در حدود ۶/۶ درصد بوده است. نمونه 8M-



شکل ۱۶- تصاویر SEM؛ (الف) 8M-1F، (ب) 8M-2F، (ج) 10M-1F، (د) 10M-2F، (ه) 12M-1F و (و) 12M-2F

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر غلظت محلول سدیم هیدروکسید و مقدار الیاف نخ تایلر بازپافتی بر رفتار مکانیکی بتن ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید به‌طور کلی منجر به کاهش مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته شده است. در میان غلظت‌های بررسی‌شده، محلول ۸ مولار عملکرد بهتری نسبت به غلظت‌های بالاتر داشته است بطوریکه در مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های ۱۰ و ۱۲ مولار ۷ تا ۳۲ درصد و در مقاومت خمشی ۴ تا ۱۱ درصدی داشته‌اند.

افزودن الیاف نخ تایلر بازپافتی تأثیر چشم‌گیری بر عملکرد مکانیکی داشته است. استفاده از الیاف به مقدار ۱٪ موجب بهبود مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به ترتیب به میزان ۲۲ تا ۵۰ درصد و ۹ تا ۵۰ درصد شده است، درحالی‌که به‌کارگیری الیاف به مقدار ۲٪ منجر به افزایش مقاومت خمشی و انرژی شکست به ترتیب به میزان ۱/۵ تا ۳ درصد و ۲ تا ۶ درصدی گردیده است. این امر نشان دهنده آن است که مقدار بهینه الیاف باید بر اساس نیازهای سازه‌ای به‌دقت انتخاب شود. عمل‌آوری در دماهای بالا (۶۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) رشد مقاومت را تسریع بخشیده و امکان دستیابی به مقاومت تقریباً نهایی را در طی ۷۲ ساعت فراهم نموده است. در نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای محیط نمونه‌های ۳ روزه به‌طور میانگین ۶۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه را کسب کرده‌اند در حالی‌که نمونه‌های عمل‌آوری شده در دماهای ۶۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۸۸ و ۹۵ درصد مقاومت ۲۸ روزه را کسب کرده‌اند. این فرایند می‌تواند برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت زود هنگام دارند، مانند ساخت قطعات پیش‌ساخته، بسیار مفید باشد.

در نهایت، انتخاب دقیق غلظت محلول سدیم هیدروکسید و مقدار الیاف برای بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی بتن ژئوپلیمری امری حیاتی است. با تنظیم صحیح این شاخص‌ها، می‌توان به نتایج مطلوبی میان مقاومت و چقرمگی دست یافت و پتانسیل این ماده را برای کاربردهای سازه‌ای در ساخت و ساز پایدار افزایش داد.

۵- مراجع

- and M. J. Al-Kheetan, "A review of 3D printing low-carbon concrete with one-part geopolymers: engineering, environmental and economic feasibility," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, no. e01818, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01818>.
- [2] A. Goyal et al., "The physics of cement cohesion," *Sci. Adv.*, vol. 7, no. eabg5882, 2021.
- [3] Bekun, F.V., A. A. Alola, B. A. Gyamfi, P. A. Kwakwa, and G. Uzuner, "Econometric analysis on cement production and environmental quality in European Union countries," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. 4265–4280, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04302-9>.
- [4] T. K. L. Nguyen, H. H. Ngo, W. Guo, T. L. H. Nguyen, and et.al., "Environmental impacts and greenhouse gas emissions assessment for energy recovery and material recycle of the wastewater treatment plant," *Sci. Total Environ.*, vol. 784, no. 147135, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147135>.
- [5] F. A. Shilar, S. V. Ganachari, V. B. Patil, N. Almakayeel, and T. M. Yunus Khan, "Development and optimization of an eco-friendly geopolymer brick production process for sustainable masonry construction," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, no. e02133, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02133>.
- [6] J. Davidovits, "Geopolymer cement to minimize carbon-dioxide greenhouse-warming," *Ceram. Trans.*, vol. 37, pp. 165–182, 1993.
- [7] D. D. B. Nergis, M. M. A. B. Abdullah, P. Vizureanu, and M. F. . Tahir, "Geopolymers and their uses: Review," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Bristol, UK: IOP, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/374/1/012019.
- [8] A. A. Adam and X. X. X. Horianto, "The effect of temperature and duration of curing on the strength of fly ash based geopolymer mortar," *Procedia Eng.*, vol. 95, pp. 410–414, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.199>.
- [9] G. Yildirim et al., "Development of alkali-activated binders from recycled mixed masonry-originated waste," *J. Build. Eng.*, vol. 33, no. 101690, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101690>.
- [10] J. Liu, X. Shi, G. Zhang, and L. Li, "Study the Mechanical Properties of Geopolymer under Different Curing Conditions," *Minerals*, vol. 13, no. 5, p. 690, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/min13050690>.
- [11] S. Sbahieh, G. McKay, and S. G. Al-Ghamdi, "Comprehensive Analysis of Geopolymer Materials: Properties, Environmental Impacts, and Applications," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 23, p.

- [1] Y. A. Al-Noaimat, S. H. Ghaffar, M. Chougan,

- [23] C. A. Rogers and et.al., "Recycled Tire Rubber as a Fiber Reinforcement in Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 10, pp. 1353–1361, 2012.
- [24] M. M. Ali and Et.al., "Use of Recycled Tire Fibers in Concrete for Improved Mechanical Properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 56, pp. 113–120, 2014.
- [25] ASTM C989, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars. USA: American Society for Testing and Materials, 1999.
- [26] ASTM C1602, Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. USA: American Society for Testing and Materials, 2004.
- [27] ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates. USA: American Society for Testing and Materials, 2006.
- [28] H. Yazıcı, M. Y. Yardımcı, S. Aydın, and A. S. Karabulut, "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, pp. 1223–1231, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003.
- [29] J. An, S. S. Kim, B. H. Nam, and S. A. Durham, "Effect of Aggregate Mineralogy and Concrete Microstructure on Thermal Expansion and Strength Properties of Concrete," *Appl. Sci.*, vol. 7, p. 1307, 2017, doi: 10.3390/app7121307.
- [30] Y. Zhou, J. Huang, X. Yang, Y. Dong, T. Feng, and J. Liu, "Enhancing the PVA fiber-matrix interface properties in ultra high performance concrete: An experimental and molecular dynamics study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 285, p. 122862, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122862>
- [31] Y. Liu, Z. Zhang, C. Shi, D. Zhu, N. Li, and Y. Deng, "Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): Influence of steel fiber on mechanical properties," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 112, p. 103670, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103670>.
- [32] N. Li, C. Shi, Z. Zhang, H. Wang, and Y. Liu, "A review on mixture design methods for geopolymer concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 178, no. 107490, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107490.
- [33] G. Alaneme, K. Olonade, E. Esenogho, and M. Lawan, "Proposed simplified methodological approach for designing geopolymer concrete mixtures," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 15191, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-15191-7.
- [34] M. Rihan, R. Onchiri, N. Gathimba, and B. Sabuni, "Mix design approaches of eco-friendly geopolymer concrete: A critical review," *Hybrid* 7363, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16237363>.
- [12] M. M. Rahman and M. A. Ahsan, "Sustainable Concrete with Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag: A Geopolymer Approach," *Constr. Build. Mater.*, vol. 312, no. 125459, 2021.
- [13] E. Ozcelikci et al., "A comprehensive study on the compressive strength and durability-related parameters of geopolymer mortars," *J. Clean. Prod.*, vol. 396, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136522>.
- [14] W. Song et al., "Effect of steel slag on fresh, hardened, and microstructural properties of high-calcium fly ash-based geopolymers under standard curing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 229, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116933>
- [15] N. B. Singh and B. Middendorf, "Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview," *Constr. Build. Mater.*, vol. 237, no. 117455, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>
- [16] H. Castillo et al., "Factors Affecting the Compressive Strength of Geopolymers: A Review," *Minerals*, vol. 11, no. 12, p. 1317, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/min11121317>.
- [17] H. Y. Zhang, V. Kodur, B. Wu, J. Yan, and Z. S. Yuan, "Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 163, pp. 277–285, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.043>.
- [18] A. C. Ganesh and M. Muthukannan, "Development of High-Performance Sustainable Optimized Fiber Reinforced Geopolymer Concrete and Prediction of Compressive Strength," *J. Clean. Prod.*, vol. 282, no. 124543, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124543>.
- [19] S. Samal and I. Blanco, "An application review of fiber-reinforced geopolymer composite," *Fibers*, vol. 9, no. 23, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/fib9040023>.
- [20] T. Lin, D. Jia, P. He, and M. Wang, "In situ crack growth observation and fracture behavior of short carbon fiber reinforced geopolymer matrix composites," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 527, pp. 2404–2407, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.12.004>.
- [21] M. Ahmed and A. Abdulrahman, "Performance of Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete: A Review," *J. Build. Eng.*, vol. 44, no. 103541, 2022.
- [22] S. H. Ghasemzadeh Mousavinejad, and K. Faghihi. "Investigation of the fracture-based performance of heavy weight geopolymer concrete reinforced with steel fibers," *Concrete Research*, 17(2), 2024, 103-113 (in persian). doi: 10.22124/jcr.2024.26649.1647.

Adv., vol. 7, no. 100290, 2024, doi: 10.1016/j.hyadv.2024.100290.

[35] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using Cube Specimens). USA: American Society for Testing and Materials, 2009.

[36] ASTM C78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). USA: American Society for Testing and Materials, 2010.

[37] ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. USA: American Society for Testing and Materials, 2009.

[38] ASTM C1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). USA: American Society for Testing and Materials, 2009.

[39] ASTM-C143, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete," 2003, American Society for Testing and Materials, USA.

[40] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V. Rangan, "Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," Aust. J. Struct. Eng., vol. 6, no. 1, pp. 77–86, 2005, doi: <https://doi.org/10.1080/13287982.2005.11464946>.

[41] A. C. R. da Silva et al., "Fatigue behavior of steel fiber reinforced geopolymer concrete," Case Stud. Constr. Mater., vol. 16, p. e00829, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00829>.

[42] Y. I. A. Aisheh, D. S. Atrushi, M. H. Akeed, S. Qaidi, and B. A. Tayeh, "Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete," Case Stud. Constr. Mater., vol. 17, p. e01234, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01234>.

[43] R. F. Gomes, D. P. Dias, and F. de A. Silva, "Determination of the fracture parameters of steel fiber-reinforced geopolymer concrete," Theor. Appl. Fract. Mech., vol. 107, p. 102568, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102568>.

Investigation of the Mechanical Properties and Fracture Characteristics of Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete Using Recycled Fibers

Seyed Ehsan Seyed Hassani

Department of Civil Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

Yashar Yasrebinia *

Department of Civil Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

Mohammad Saberi

Department of Civil Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

Reza Vojoudi Mehrabani

Department of Civil Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

Masoud Motallebian

Department of Civil Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

Abstract

Geopolymer concrete, as a sustainable alternative to Portland cement, is produced through the alkaline activation of pozzolanic materials. This type of concrete offers several environmental advantages, notably the reduction of CO₂ emissions. However, one of its main drawbacks is its relatively low flexural strength. The incorporation of fibers can enhance its ductility and reduce brittleness by bridging cracks and increasing deformation capacity.

In this study, six geopolymer concrete mix designs were prepared using 8, 10, and 12 molar sodium hydroxide solutions for pozzolan activation. To improve mechanical properties, recycled tire cord fibers were incorporated into the mixes. The specimens were cured under three different conditions: ambient temperature, 60°C, and 100°C. Compressive strength, flexural strength, fracture energy, and elastic modulus were measured for each case.

The results showed that increasing the concentration of the sodium hydroxide solution led to a 7 to 32% reduction in compressive strength, flexural strength, and modulus of elasticity, while the 8-molar solution exhibited the best performance. Using 1% recycled tire cord fibers increased the compressive strength and modulus of elasticity by 9 to 50% compared to the 2% dosage. In contrast, specimens containing 2% fibers improved the flexural strength and fracture energy by 2 to 6%, indicating enhanced toughness. Curing at temperatures of 60 and 100°C accelerated strength development, achieving 88 to 95% of the ultimate strength within 72 hours. The obtained results indicate that geopolymer concrete has the potential to replace conventional concrete, and recycled tire cord fibers improve its performance.

Keywords: Geopolymer concrete, Curing temperature, Fracture energy, Mechanical properties.

* Corresponding Author: yasrebinia@iau.ac.ir

