

بررسی مشخصات مکانیکی و جمع‌شدگی خشک ملات تعمیری ژئوپلیمری الیافی حاوی ضایعات کارخانه‌های آهن و آلومینیوم

فرید حاتمی

دانشجوی دکتری عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

ملک محمد رنجبر تکلیمی*

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

در این مقاله از روبراه آسیاب شده کوره آهن گدازی و گل سرخ که محصول ضایعاتی کارخانه‌های آهن و آلومینیوم می‌باشند، به‌عنوان مواد پایه آلومینوسیلیکاتی در طرح مخلوط ملات تعمیری ژئوپلیمری استفاده شد. فعال‌سازی مواد پایه با ترکیبی از محلول هیدروکسید سدیم (سود) و سیلیکات سدیم (آب شیشه) انجام گرفت. تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری، چقرمگی و جمع‌شدگی خشک ملات بررسی شد. از ملات‌های الیافی ساخته شده به‌عنوان یک لایه تعمیری در تقویت تیرهای آجری استفاده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف فولادی در ملات ژئوپلیمری می‌تواند به نحو مؤثر مؤثری مقاومت فشاری و چقرمگی را بهبود بخشد و جمع‌شدگی خشک را کاهش دهد و رفتار گسیختگی ترد تیرهای آجری را به یک رفتار شکل پذیر تغییر دهد. نتایج آزمایش SEM-EDS و اندازه‌گیری نسبت مولی Si/Al بیان‌گر وجود یک ساختار سه بعدی و زنجیره‌ای شکل ژئوپلیمری در میکروساختار ملات بود. تحقیق انجام شده یک قدم مؤثر و رو به جلو در دستیابی به فرآورده‌های ژئوپلیمری با رویکرد زیست محیطی و اقتصادی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ملات تعمیری ژئوپلیمری، روبراه، گل سرخ، الیاف فولادی، چقرمگی، جمع‌شدگی خشک.

* نویسنده مسئول: ranjbar@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

می‌دهد که تحقیقات انجام شده روی ژئوپلیمرهای دو جزئی که حاوی روباره کوره آهن گدازی و گل سرخ باشند بسیار اندک است [۱۵-۱۱]. لی و همکاران [۱۱] تأثیر اندازه ذرات گل سرخ و همچنین درصد جایگزینی روباره با گل سرخ (۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد) را روی نمونه‌های گروت بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش درصد جایگزینی گل سرخ، زمان گیرش افزایش و ویسکوزیتی کاهش می‌یابد. از طرفی استفاده از گل سرخ با ذرات ریزتر سبب افزایش مقاومت فشاری و نیز کاهش بیشتر ویسکوزیتی نمونه‌های گروت می‌شود. تأثیر درصد جایگزینی روباره با گل سرخ (۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد) روی مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر توسط زکریا و همکاران مطالعه شد [۱۲]. آن‌ها توانستند با جایگزینی ۵۰ درصدی روباره کوره آهن گدازی با گل سرخ و تحت شرایط عمل آوری ۶۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۲۴ ساعت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی (اضلاع ۴۰ میلی‌متر) ۶۵/۷ مگاپاسکال دست یابند. تیان و همکاران نیز اثر درصد جایگزینی روباره با گل سرخ (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد) را روی نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر در دمای محیط بررسی نمودند [۱۳]. بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (۸۹/۹۳ مگاپاسکال) روی نمونه‌های مکعبی (اضلاع ۲۰ میلی‌متر) و حاوی ۴۰ درصد گل سرخ و ۶۰ درصد روباره حاصل شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که گل سرخ می‌تواند به دلیل خاصیت روانی بالا و همچنین واکنش پذیری پایین خود مشکل گیرش سریع ژئوپلیمرهای تک جزئی حاوی روباره را رفع نماید. بیات و همکاران نیز اثر درصد جایگزینی روباره با گل سرخ (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) را روی نمونه‌های خمیر و ملات ژئوپلیمر در دمای محیط آزمایش کردند [۱۵]. بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (۶۰ مگاپاسکال) روی نمونه‌های مکعبی (اضلاع ۵۰ میلی‌متر) و حاوی ۲۰ درصد گل سرخ و ۸۰ درصد روباره حاصل شد. آزمایشات میکرو ساختاری خمیر ژئوپلیمر نشان داد که ژل کلسیم-آلومینیوم-سیلیکات-هیدرات (C-A-S-H) محصول اصلی در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون بود. نتایج آزمایشات بین و همکاران نشان داد که افزودن الیاف پلی پروپیلن به نمونه‌های ملات ژئوپلیمری حاوی روباره و گل سرخ می‌تواند به نحو مؤثری سبب افزایش مقاومت خمشی، شکل پذیری و چقرمگی شکست آن‌ها شود [۱۶]. به طور مشابه وانگ و همکاران نیز نتیجه گرفتند که افزودن الیاف‌های پلی پروپیلن، شیشه

امروزه چسباننده‌های ژئوپلیمری به‌عنوان یک رقیب و جایگزین سیمان پرتلند که اثرات زیست محیطی کمتر نسبت به آن دارند در دنیا شناخته می‌شوند [۱]. این چسباننده‌ها از واکنش یک یا چند ماده آلومینوسیلیکاتی با فعال کننده‌های قلیایی ساخته می‌شوند [۲]. خاکستر بادی، روباره کوره آهن گدازی، خاکستر پوسته برنج، گل سرخ و متاکائولن از پرکاربردترین مواد آلومینوسیلیکاتی در ساخت ژئوپلیمرها می‌باشند [۳]. مهم‌ترین محلول‌های قلیایی جهت فعال سازی مواد پایه، هیدروکسید سدیم (سود سوزآور) و سیلیکات سدیم (آب شیشه) هستند. ژئوپلیمرها علاوه بر داشتن مشخصات مکانیکی بالا در سنین اولیه، مقاومت عالی در محیط‌های اسیدی و پایداری ذاتی در برابر آتش [۴-۶]، می‌توانند با به کارگیری حجم زیادی از انواع ضایعات صنعتی به‌عنوان مواد پایه آلومینوسیلیکاتی، به آن‌ها ارزش مجدد دهند و سبب بازگشت دوباره آن‌ها به چرخه اقتصادی شوند [۷].

در سال‌های اخیر علاقه رو به گسترشی در نقاط مختلف دنیا در تولید فرآورده‌های ژئوپلیمری دوستدار محیط زیست و کم هزینه با استفاده از مواد ضایعاتی محلی آغاز شده است [۹-۷]. در واقع استفاده از مواد ضایعاتی محلی می‌تواند موجب کاهش مسافت حمل و نقل مواد شود که در نهایت این منجر به کاهش هزینه مالی و کاهش آلودگی می‌شود. با توجه به نبود خاکستر بادی و خاکستر پوسته برنج در کشور، روباره کوره آهن گدازی و گل سرخ می‌توانند به‌عنوان دو منبع ضایعاتی محلی در تولید فرآورده‌های ژئوپلیمری استفاده شوند. به طور متوسط سالانه حدود ۱۰ میلیون تن روباره کوره آهن گدازی و نیز یک میلیون تن ضایعات گل سرخ در کشور باقی می‌ماند. اگرچه بخشی از تولید سالیانه روباره کوره آهن گدازی در سیمان تپ ۵ یا ضد سولفات مصرف می‌شود ولی تاکنون کاربرد مفید و روش مؤثری برای استفاده مجدد از ضایعات گل سرخ یافت نشده و معمولاً این ماده در اطراف کارخانه و در چندین سد باطله، انباشت و نگهداری می‌شود. به دلیل استفاده از هیدروکسید سدیم در فرآیند تولید آلومینیوم از سنگ معدن آلومینیوم یا بوکسیت، ضایعات گل سرخ خاصیت قلیایی بالایی دارد و انباشت آن می‌تواند منجر به خطرات زیست محیطی جدی شود [۱۰].

بررسی مقالات مروری چاپ شده در زمینه انواع ژئوپلیمرها نشان

تعمیری بر مقاومت خمشی تیرهای آجری مطالعه و بررسی گردید. همچنین آزمایش ریخت‌شناسی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDS) جهت مطالعه میکروساختار نمونه‌ها انجام شد. نتایج این تحقیق نه تنها یک حرکت رو به جلو در به کارگیری مواد ضایعاتی محلی جهت تولید انواع فرآورده‌های ژئوپلیمری با رویکردهای زیست محیطی و اقتصادی می‌باشد بلکه ملات تعمیری ژئوپلیمری ساخته شده با داشتن خواص مکانیکی عالی قابلیت استفاده در تعمیر و تقویت انواع سازه‌ها را دارد. مطالعه مقالات مروری بین‌المللی در زمینه انواع خمیر، ملات و بتن‌های ژئوپلیمری نشان می‌دهد که موضوع و هدف این تحقیق کاملاً جدید و نوآورانه بوده و برای نخستین بار است که ارائه می‌شود [۲۶-۲۹ و ۲۴، ۸، ۶، ۳].

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

از روباره کوره آهن گدازی کارخانه ذوب آهن اصفهان و گل سرخ کارخانه آلومینیوم جاجرم به عنوان مواد پایه آلومینوسیلیکاتی برای ساخت ملات ژئوپلیمری استفاده شد. جدول ۱ نتایج آزمون تعیین ترکیب شیمیایی (XRF) این مواد را نشان می‌دهد. مطابق این جدول بخش اصلی گل سرخ از هماتیت (Fe_2O_3) و بخش اعظم روباره از اکسید کلسیم (CaO) و دی اکسید سیلیسیم (SiO_2) بود. عدد کاهش وزن ناشی از احتراق (L.O.I.)^۱ در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱/۵ ساعت برای هر دو ماده اندازه‌گیری شد. بالا بودن عدد L.O.I.^۲ برای گل سرخ ناشی از رطوبت زیاد و وجود هیدروکسید سدیم محلول در این ماده بود. شکل ۱ رنگ ظاهری پودر گل سرخ و روباره کوره آهن گدازی را در محیط آزمایشگاه نشان می‌دهد. روباره رنگ خاکستری روشن دارد در حالی که گل سرخ به دلیل وجود هماتیت (Fe_2O_3) در آن رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای داشت. شکل ۲ عکس میکروساختاری تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی (SEM) این مواد را در مقیاس ۲ میکرومتر نشان می‌دهد. ذرات روباره کوره آهن گدازی تیز گوشه و تقریباً تفکیک شده از هم بود در حالی که گل سرخ ذرات به هم چسبیده‌تر و ورقه‌ای شکل داشت. این

و بازالت به نمونه‌های گروت ژئوپلیمری حاوی ۵۰ درصد روباره و ۵۰ درصد گل سرخ، سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی آن‌ها می‌شود [۱۷].

سازه‌های بنایی، قدیمی‌ترین سیستم ساختمان سازی هستند که همچنان به دلیل ارزان بودن در دنیا رایج و پرکاربرد می‌باشند. اما این سازه‌ها در برابر نیروهای جانبی ناشی از زلزله بسیار آسیب پذیر هستند [۱۸]. در سال‌های اخیر روش‌های مقاوم سازی مختلفی به منظور افزایش ظرفیت باربری جانبی این سازه‌ها به کار گرفته شده است. فروسمنت، شاتکریت، تزریق گروت و اپوکسی، الحاق میلگرد فولادی بر سطوح خارجی و چسباندن ورقه‌های FRP و ژئوتکستایل از متداول‌ترین روش‌ها می‌باشند [۱۹ و ۱۸]. یک روش مؤثر دیگر که در سال‌های اخیر توجه محققان را به خود جلب نموده، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح شده به الیاف فولادی به عنوان یک لایه تعمیراتی می‌باشد. نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط اسماعیلی و همکاران روی تیرهای آجری نشان داد که این روش می‌تواند به نحو مؤثری ظرفیت خمشی و شکل پذیری این المان‌ها را افزایش دهد [۲۰].

یک چالش مهم در چسباندن‌های ژئوپلیمری موضوع تردشکنندگی و جمع شدگی خشک بیشتر آن‌ها نسبت به ملات‌ها و بتن‌های سیمانی است [۲۱-۲۳]. مطالعات قبلی نشان داده که افزودن انواع الیاف همانند الیاف فولادی، کربن، شیشه، پلی‌پروپیلن، پلی‌وینیل الکل و بازالت به ماتریس ژئوپلیمرها علاوه بر کاهش جمع شدگی می‌تواند خواص مهندسی، چقرمگی و جذب انرژی آن‌ها را به نحو مؤثری ارتقا دهد [۲۴]. امروزه از الیاف‌های فولادی به دلیل داشتن استحکام کششی بالا، قیمت کم و همچنین تنوع در شکل و اندازه بیشتر استفاده می‌شود [۲۵].

هدف اصلی این تحقیق ساخت یک ملات ژئوپلیمری مسلح شده به الیاف فولادی در دمای محیط و با استفاده از ضایعات روباره کوره آهن گدازی و گل سرخ است. در این راستا از محلول سود ۵ مولار همراه سیلیکات سدیم جهت فعال سازی مواد پایه استفاده شد. تأثیر افزودن درصد مختلف الیاف فولادی بر مقاومت فشاری، چقرمگی و جمع شدگی خشک نمونه‌های ملات، آزمایش شد. کاربرد ملات‌های الیافی ژئوپلیمری ساخته شده به عنوان یک لایه

¹ Loss on ignition

ملات با الیاف مستقیم فولادی میکرو، محصول تولیدی شرکت گائزو چین با چگالی ۷/۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب، طول ۱۳ میلی متر، قطر ۰/۱۷۵ میلی متر و مقاومت کششی ۲۰۰۰ مگاپاسکال انجام گرفت. از ماسه رودخانه‌ای اشباع با سطح خشک، دانه بندی استاندارد و مطابق ASTM C778-17 و حداکثر قطر ۲ میلی متر استفاده شد. آجرهای فشاری استفاده شده نیز دارای ابعاد هندسی ۷۰×۱۰۰×۲۱۰ میلی متر و مقدار جذب آب ۲۴ ساعته، ۱۸ درصد بودند.

۲-۲- طرح مخلوط و روش ساخت نمونه‌ها

تحقیقات پیشین نشان داد که ۲۰٪ جایگزینی روبراره کوره آهن گدازی با گل سرخ در طرح ملات علاوه بر این که می‌تواند یک درصد بهینه برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری باشد می‌تواند مشکل گیرش سریع ژئوپلیمرهای تک جزئی بر پایه روبراره را نیز حل نماید [۲۶]. لذا در این تحقیق از ترکیب روبراره کوره آهن گدازی و گل سرخ به نسبت ۴ به ۱ به عنوان مواد پودری پایه در ساخت ملات بدون الیاف ژئوپلیمری استفاده شد. فعال سازی مواد پودری با استفاده از محلول فعال کننده قلیایی با نسبت برابر از محلول هیدروکسید سدیم ۵ مولار و آب شیشه انجام گرفت. چون انحلال هیدروکسید سدیم در آب یک فرآیند گرمازا است لذا جهت هم دما شدن محلول سود با دمای محیط، این محلول از یک روز قبل تهیه گردید. در طرح مخلوط نسبت مواد پایه به محلول قلیایی و نیز نسبت ماسه به مواد پایه ۲ به ۱ در نظر گرفته شد. همچنین در طرح مخلوط نمونه‌های الیافی از چهار درصد حجمی الیاف فولادی شامل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد استفاده شد. طرح‌های ملات با نام اختصاری GP-X بر چسب گذاری شد که X بیان گر درصد الیاف موجود در هر نمونه است.

برای ساخت نمونه‌های ملات ابتدا پودر روبراره کوره آهن گدازی و گل سرخ به مدت ۳۰ ثانیه در میکسر آزمایشگاهی مخلوط شدند. سپس ماسه به آن‌ها اضافه شد و به مدت ۹۰ ثانیه عمل اختلاط ادامه یافت. سپس محلول فعال کننده قلیایی (آب شیشه و سود) به آن‌ها اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه هم زدن مواد تا حصول یک مخلوط همگن از ملات ژئوپلیمری ادامه یافت. بلافاصله پس از ساخت، طی سه مرحله ملات داخل قالب ریخته شد و برای تراکم بهتر، نمونه‌ها به مدت ۱۵ ثانیه روی میز ویریه قرار گرفت. از قالب‌های

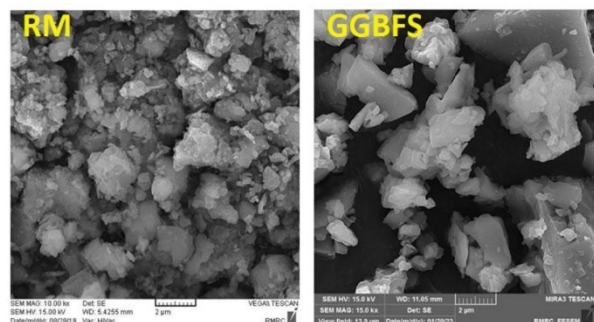
چسبندگی ذرات به دلیل داشتن رطوبت زیاد و داشتن عدد L.O.I. بالا در این ماده بود.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی روبراره و گل سرخ (درصد وزنی)

گل سرخ	روباره کوره آهن گدازی	
Al ₂ O ₃	۱۱/۹	۵/۳
SiO ₂	۳۴/۶	۷/۴
CaO	۳۵/۲	۱۱/۳
Fe ₂ O ₃	۰/۸	۶۵/۳
MgO	۱۰/۹	۰/۵۲
TiO ₂	-	۱/۵
K ₂ O	۰/۴۶	۰/۴۷
MnO	-	۰/۰۲
SO ₃	۱/۸	-
Na ₂ O	۰/۶	-
L.O.I.	۰/۷	۸/۲



شکل ۱- پودر روبراره کوره آهن گدازی و پودر گل سرخ



شکل ۲- عکس میکروسکوپ الکترونی در مقیاس ۲ میکرومتر از پودر روبراره و پودر گل سرخ

از هیدروکسید سدیم پرک با درجه خلوص ۹۸٪ و سیلیکات سدیم مایع محصول شرکت صنایع سیلیکات ایران با ترکیب شیمیایی $\text{H}_2\text{O}=50/4\%$ و $\text{SiO}_2=34/8\%$ ، $\text{Na}_2\text{O}=14/8\%$ جهت فعال سازی مواد آلومینوسیلیکاتی استفاده شد. مسلح کردن نمونه‌های

اندازه گیری شد. آزمایش مقاومت خمشی ۴ نقطه‌ای نیز در سن ۲۸ روزه، روی نمونه‌های ملات مطابق استاندارد ASTM C1609 و نیز روی تیرهای آجری تقویت شده با لایه تعمیراتی [۳۰ و ۳۱] انجام شد. آزمایشات به روش جابجایی کنترل و با سرعت پنج صدم میلی‌متر بر ثانیه انجام گرفت و با استفاده از یک سنسور جابجایی خطی (LVDT)، مقدار تغییر شکل وسط نمونه‌ها اندازه گیری و ثبت شد.

۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱- تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری

تحقیقات پیشین نشان داده که افزودن الیاف فولادی به ژئوپلیمرها سبب بهبود مقاومت فشاری و تغییر رفتار شکست آن‌ها از حالت ترد به نرم می‌شود [۲۵]. مطابق شکل ۳، نمونه بدون الیاف تحت نیروی فشاری، روی یک سطح ۴۵ درجه دچار گسیختگی از نوع دو نیم شدن شد. شکست نمونه با یک صدای انفجار همراه بود که بیانگر گسیختگی از نوع ترد در آن بود در حالی که در همه نمونه‌های الیافی، شکست از نوع نرم و شکل پذیر رخ داد و نوعی از پوسته اندازی لایه‌ای و ترک در سطوح جانبی آن‌ها مشاهده شد. شکل ۴ مقاومت فشاری نمونه‌های ملات الیافی و بدون الیاف عمل‌آوری شده در دمای محیط آزمایشگاه را در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشان می‌دهد. داشتن مقاومت فشاری بالا در سنین پایین از ویژگی‌های ملات‌های ژئوپلیمری است [۴]. مطابق این شکل، همه نمونه‌ها در سن ۷ روز به مقاومت فشاری بیش از ۵۰ مگاپاسکال رسیدند. دستیابی به چنین مقاومت بالا، بیانگر آن است که طرح مخلوط استفاده شده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک طرح مناسب در تعمیر و تقویت انواع سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

مکعبی ۵×۵×۵ و ۴×۴×۱۶ (ابعاد به سانتی‌متر) جهت ساخت نمونه‌های فشاری و خمشی استفاده شد. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفتند و پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند. برای نمونه‌های جمع‌شدگی از قالب منشوری با سطح مقطع ۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر مربع و طول ۲۸/۵ سانتی‌متر استفاده شد. به دلیل مقاومت کم این نمونه‌ها در سن یک روز و احتمال آسیب دیدگی در هنگام جدا کردن قالب، باز کردن قالب نمونه‌های جمع‌شدگی، ۴۸ ساعت پس از ساخت انجام گرفت. نگهداری و عمل‌آوری همه نمونه‌های ملات در دمای محیط آزمایشگاه (۲ ± ۲۳ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت ۵ ± ۵۵ درصد، انجام شد.

تیرهای آجری به طول ۵۵ سانتی‌متر توسط ۷ عدد آجر فشاری که از یک روز قبل در آب اشباع شده بودند ساخته شدند. از ملات ماسه سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۷۵ و نسبت ماسه به سیمان ۳ به ۱ جهت چسباندن آجرها به هم استفاده شد. ضخامت لایه ملات بین آجرها در همه تیرها ۱۰ میلی‌متر بود. تیرهای آجری پس از ساخت به مدت ۲۸ روز در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. سپس این تیرها به وسیله یک لایه ملات تعمیری ژئوپلیمری، به ضخامت ۲۰ میلی‌متر و تنها از یک سمت تقویت شدند.

۳-۲- روش آزمایش

مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مطابق استاندارد ASTM C109 اندازه‌گیری شد. آزمایش جمع‌شدگی مطابق استاندارد ASTM C596 و با استفاده از دستگاه کمپراتور انقباض ملات و ساعت دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر انجام شد. درصد تغییر طول نمونه‌ها نسبت به طول اولیه در یک دوره ۹۰ روزه



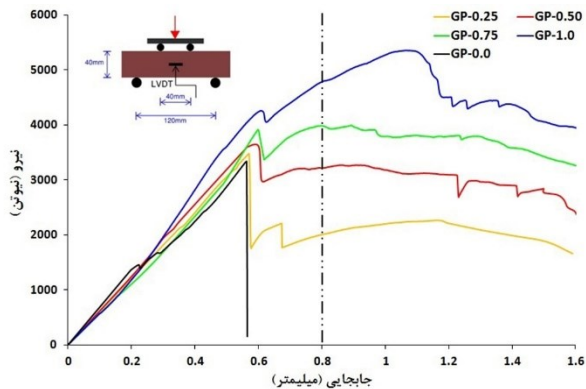
شکل ۳- نحوه شکست نمونه‌های مکعبی ملات ژئوپلیمری بدون الیاف و الیافی در آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز

مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی در همه سنین از نمونه بدون الیاف بیشتر بود. بیشترین مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه در نمونه GP-1.0 و به مقدار ۵۷/۲، ۹۴/۲ مگاپاسکال رخ داد در حالی که بیشترین مقاومت فشاری ۱۴ روزه در نمونه GP-0.75 و به مقدار

وسط دهانه متناظر با اوج اول بار (P_1) و اوج بار (P_p) هستند. f_1 و f_p نیز به ترتیب مقاومت خمشی متناظر با اوج اول بار (P_1) و اوج بار (P_p) می‌باشند و از روابط زیر محاسبه می‌شوند که در آن‌ها b و d عرض و ارتفاع مقطع نمونه هستند.

$$f_1 = \frac{P_1 L}{bd^2} \quad (1)$$

$$f_p = \frac{P_p L}{bd^2} \quad (2)$$



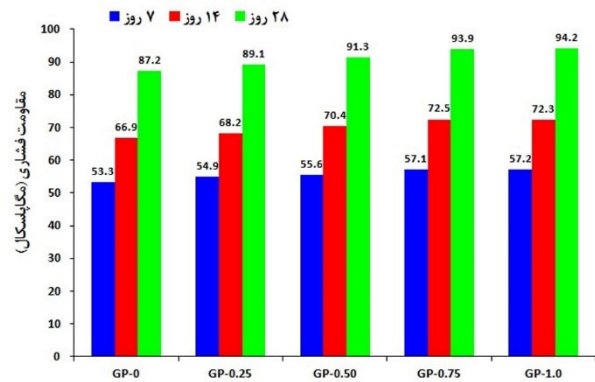
شکل ۵- منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌های ملات ژئوپلیمری در آزمایش خمش ۴ نقطه ای

مطابق نتایج جدول ۲، با افزایش درصد فولاد از ۰/۲۵ تا ۱/۰ درصد، مقدار بار متناظر با نقطه اوج اول و همچنین مقاومت خمشی متناظر با آن به ترتیب ۴/۳، ۹/۵، ۱۷/۳ و ۲۷/۹ درصد نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش داشت. همچنین افزایش درصد فولاد در نمونه‌ها سبب افزایش اختلاف جابجایی نظیر بار اول و بار اوج (Δ) شد که این بیان‌گر افزایش شکل پذیری در آن‌ها می‌باشد. مقایسه دو پارامتر f_1 و f_p نشان می‌دهد که نمونه‌های GP-0.25 و GP-0.50 با توجه به این که $f_p < f_1$ بود لذا این نمونه‌ها رفتار کرنش نرم شونده داشتند. درحالی‌که نمونه GP-0.75 و به‌ویژه GP-1.0 از آنجایی که $f_p > f_1$ بود این نمونه‌ها دارای رفتار کرنش سخت شونده بودند. مقایسه پارامتر چقرمگی بین نمونه بدون الیاف و نمونه‌های الیافی نشان داد که با افزایش درصد فولاد، چقرمگی نمونه‌های الیافی به ترتیب ۷۹، ۱۱۳، ۱۲۶ و ۱۶۲ درصد نسبت به نمونه GP-0 افزایش داشتند.

۳-۳- تأثیر الیاف فولادی بر جمع شدگی خشک

چسباننده‌های ژئوپلیمری و به‌ویژه ژئوپلیمرهای حاوی روباره کوره آهن گدازی، در مقایسه با چسباننده سیمانی به مراتب جمع شدگی

۷۲/۵ مگا پاسکال مشاهده شد. با افزایش درصد الیاف از ۰/۲۵ تا ۱/۰ درصد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها نسبت به نمونه بدون الیاف به ترتیب ۲/۲، ۴/۶، ۷/۳ و ۷/۴ درصد افزایش داشت. همچنین افزایش درصد الیاف فولادی از ۰/۷۵ به ۱/۰ درصد تأثیر چندانی در افزایش مقاومت فشاری نمونه GP-1.0 نسبت به نمونه GP-0.75 در سن ۲۸ روز و همچنین در سن ۷ و ۱۴ روز نداشت.



شکل ۴- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری

۳-۲- تأثیر الیاف فولادی بر منحنی بار- تغییر مکان و چقرمگی خمشی

شکل ۵ نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری را در آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای نشان می‌دهد. در نمونه بدون الیاف گسیختگی از نوع ترد بود و با افزایش بار و رسیدن آن به حداکثر مقاومت نمونه و وقوع اولین ترک، نمونه دو تکه شد. در حالی‌که گسیختگی نمونه‌های الیافی شکل پذیر بود. در این نمونه‌ها پس از ایجاد نخستین ترک، ابتدا ظرفیت باربری نمونه‌ها کاهش یافت و سپس یک افزایش ناگهانی در مقاومت خمشی آن‌ها رخ داد. این رفتار نمونه‌های الیافی ناشی از اثر پل زدگی الیاف در محل ترک است که سبب محدود کردن ترک‌ها و جلوگیری از گسترش آن‌ها می‌شود [۲].

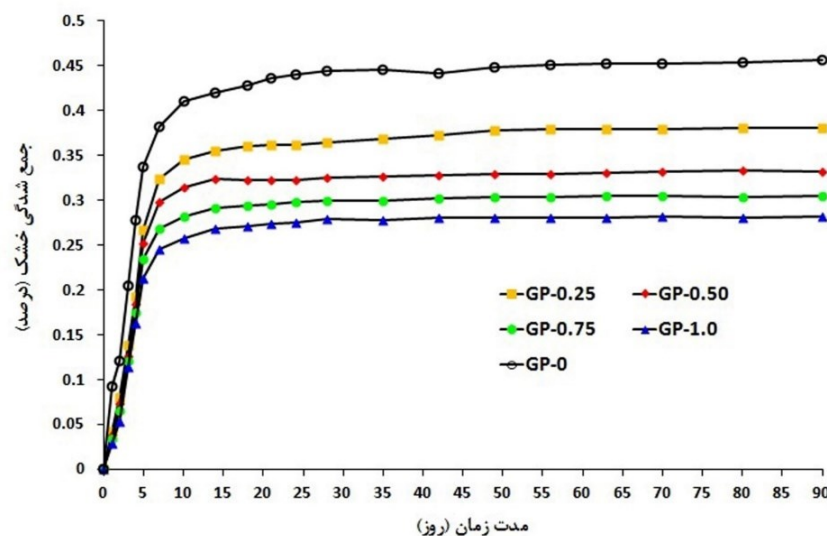
جدول ۲، مقادیر پارامترهای تعریف شده روی نمودار بار- تغییر مکان یا پاسخ‌های خمشی را براساس استاندارد ASTM C1609 و نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد. مطابق این استاندارد، چقرمگی (T_{150}) ملات ژئوپلیمری سطح زیر منحنی بار تغییر- مکان تا جابجایی نظیر $L/150$ تعریف می‌شود که در آن L طول دهانه بارگذاری نمونه در آزمایش خمش است. δ_1 و δ_p تغییر مکان

خشک بیشترى دارند. جمع شدگی در اثر خشک شدن آب موجود در طرح رخ می دهد و می تواند سبب ایجاد میکرو ترک در ماتریس ژئوپلیمر شود. عواملی همچون نوع عمل آوری، مقدار سنگ دانه، نوع ماده پایه و مقدار ریز بودن ذرات آن، مقدار آب و همچنین جنس، مولاریته و مقدار فعال کننده ها تأثیر زیادی در مقدار جمع شدگی دارند. با این وجود مؤثرترین روش در کنترل و کاهش جمع شدگی خشک و جلوگیری از ایجاد میکرو ترک در ژئوپلیمرها استفاده از الیاف می باشد [۲۱ و ۲۲].

جدول ۲- مقادیر پارامترهای تعریف شده در ASTM C1609 برای ملات های ژئوپلیمری

GP-1.0	GP-0.75	GP-0.50	GP-0.25	GP-0.00	
۴۲۵۹	۳۹۰۸	۳۶۴۷	۳۴۷۳	۳۳۳۱	$P_1(N)$
۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۵۶	$\delta_1(mm)$
۷/۹۹	۷/۳۳	۶/۸۴	۶/۵۱	۶/۲۵	$f_1(MPa)$
۵۳۵۵	۳۹۸۴	۳۲۱۱	۲۲۰۵	-	$P_P(N)$
۱/۰۸	۰/۸۹	۰/۷۳	۰/۶۷	-	$\delta_P(mm)$
۱۰/۰۴	۷/۴۷	۶/۰۲	۴/۱۳	-	$f_P(MPa)$
۰/۴۷	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۱۰	-	$\Delta=\delta_P-\delta_1(mm)$
۴۷۸۴	۳۹۷۹	۳۲۱۸	۲۰۰۴	-	$P_{L/150}(N)$
۲۰/۷۶	۱۷/۸۷	۱۶/۸۵	۱۴/۱۶	۷/۹۲	$T_{L/150}(KN.m)$

شکل ۶ نحوه اندازه گیری جمع شدگی ناشی از خشک شدن در نمونه های ملات با ساعت دیجیتال و نیز مقدار درصد تغییر طول نمونه ها نسبت به طول اولیه را نشان می دهد. نتایج اندازه گیری نشان داد که مقدار جمع شدگی در نمونه بدون الیاف در یک دوره ۹۰ روزه ۰/۴۶ درصد طول اولیه است. این تغییر طول تا سن یک ماه ادامه داشت و پس از آن ملات به یک پایداری ابعادی رسید و تغییر طول ناچیز شد. افزودن الیاف تأثیر چشم گیری در کاهش مقدار



شکل ۶- دستگاه اندازه گیری جمع شدگی خشک ملات و نتایج اندازه گیری درصد تغییر طول نمونه ها به طول اولیه

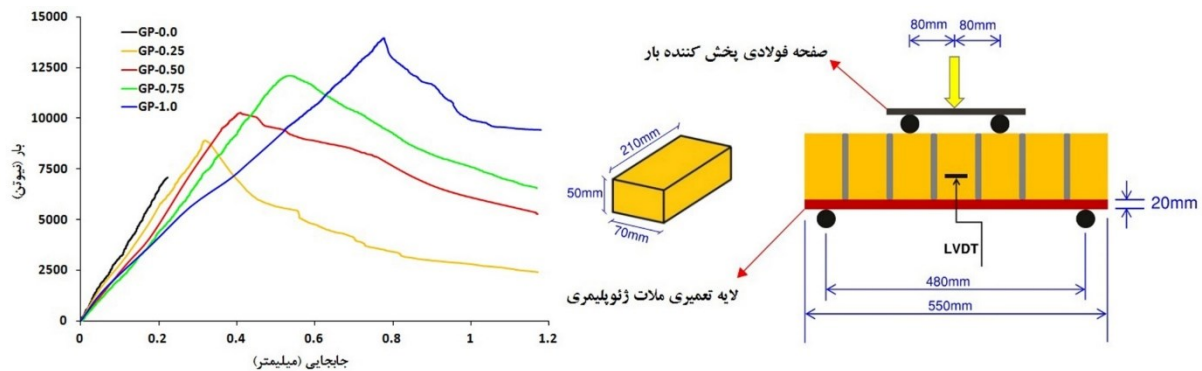
نتایج نشان داد که با افزایش درصد فولاد از ۰/۲۵ تا ۱/۰ درصد، بار متناظر با اولین ترک در تیرهای آجری در مقایسه با نمونه بدون الیاف، از ۷۱۰۰ نیوتن به ترتیب به ۸۹۱۸، ۹۷۳۰، ۱۳۴۷۹ و ۱۳۹۷۵ نیوتن افزایش یافت. به عبارتی افزودن الیاف فولادی سبب شد تا باربری این تیرها به ترتیب ۲۶، ۳۷، ۹۰ و ۹۷ درصد افزایش یابد. علاوه بر این جابجایی وسط دهانه متناظر با وقوع اولین ترک از مقدار ۰/۲۲ میلی‌متر به ۰/۳۲، ۰/۴۲، ۰/۵۴ و ۰/۷۸ میلی‌متر افزایش یابد. در واقع استفاده از الیاف فولادی در ملات ژئوپلیمری نه تنها می‌تواند ظرفیت باربری آن‌ها را ارتقا دهد بلکه می‌تواند به نحو مؤثری شکل پذیری آن‌ها را نیز بهبود بخشد.

۳-۴- تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت خمشی تیرهای آجری

شکل ۷ نحوه تقویت تیرهای آجری با یک لایه ملات تعمیری ژئوپلیمری و انجام آزمایش خمشی روی آن‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۸، نمودار بار- تغییر مکان وسط تیرهای تقویت شده با ملات‌های الیافی را در مقایسه با تیر آجری تقویت شده با ملات بدون الیاف نشان می‌دهد. گسیختگی نمونه بدون الیاف از نوع ترد بود و پس از وقوع اولین ترک در نمونه، به طور آنی به دو تکه تقسیم شد. در حالی که نمونه‌های الیافی پس از وقوع اولین ترک، رفتاری شکل پذیر از خود نشان دادند که این ناشی از چقرمگی بالای ملات‌های تعمیری الیافی بود.



شکل ۷- تقویت تیرهای آجری با یک لایه ملات ژئوپلیمری و نحوه بارگذاری آن‌ها در آزمایش خمش



شکل ۸- منحنی بار- تغییر مکان تیرهای آجری تقویت شده با ملات ژئوپلیمری در آزمایش خمش

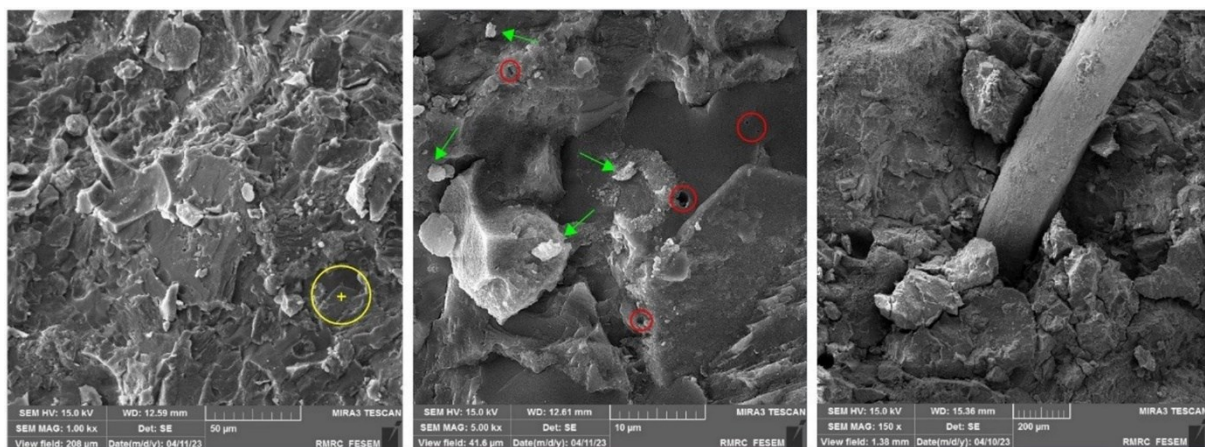
نشان دهنده ذرات واکنش نداده روپاره می‌باشند. در نمونه بدون الیاف GP-0 و در بزرگنمایی ۱۰ میکرومتر، تعدادی ذرات روپاره واکنش نداده مشاهده شد که در شکل ۹ با پیکان‌های سبز مشخص شده‌اند. در میکروساختار خمیر ژئوپلیمر، منافذ ریز متعدد که با دایره‌های قرمز مشخص شده‌اند مشاهده شد. ژئوپلیمرها در مقایسه با چسباننده‌های سیمانی از لحاظ تعداد، حفرات بیشتر و از لحاظ اندازه، حفرات ریزتری دارند [۲۹]. وجود

۳-۵- میکروسکوپ الکترونی SEM-EDS

جهت بررسی میکروساختار نمونه‌های ملات از سطح آن‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی در مقیاس میکرو تصویربرداری شد. شکل ۹ عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) از سطح نمونه‌های GP-0.75 و GP-0 را نشان می‌دهد. در این عکس‌ها رنگ خاکستری تیره بیان‌گر خمیر ژئوپلیمر و ذرات ریز واکنش داده روپاره می‌باشند در حالی که رنگ خاکستری روشن متمایل به سفید

کلسیم - آلومینیوم - سیلیکات - هیدرات (C-A-S-H) در خمیر ژئوپلیمر است. عناصر آهن و تیتانیوم نیز که به طور طبیعی در ساختار گل سرخ وجود داشتند در ملات شناسایی شد. مطابق نتایج این جدول، نسبت مولی Si/Al در نقطه مورد بررسی، ۳/۳۹ اندازه گیری شد. بر اساس پژوهش‌های قبلی، مقدار نسبت مولی Si/Al در محصول نهایی تأثیر مهمی روی مشخصات مکانیکی ژئوپلیمرها دارد [۲۶] و [۹]. برای این که یک زنجیره سه بعدی و چهار وجهی از SiO₄ و AlO₄ در ساختار ژئوپلیمر تشکیل شود باید این نسبت بزرگتر از ۳ باشد. تشکیل این ساختار سه بعدی و زنجیره‌ای، عامل اصلی در استحکام و مقاومت خمیر ژئوپلیمر است.

این خمیر مستحکم و بدون ترک در میکروساختار ملات، عامل اصلی در دستیابی به مقاومت‌های فشاری بالا می‌باشد. در نمونه الیافی GP-0.75 نیز ذرات و خمیر ژئوپلیمر مشاهده شد که به سطح پیرامونی الیاف فولادی چسبیده بودند. این چسبندگی بین خمیر و الیاف عامل اصلی در افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی نمونه‌های الیافی بود. جدول ۳، لیست عناصر موجود در نمونه GP-0 را بر حسب درصد وزنی (Wt) و درصد وزن اتمی آن‌ها (At) نشان می‌دهد. مطابق نتایج EDS نقطه‌ای که در شکل ۹ با دایره زرد نشان داده شده، تمرکز بالای عناصر اکسیژن، سیلیس، آلومینیوم و کلسیم در این نواحی بیان‌گر تشکیل و وجود ژل



نمونه ملات بدون الیاف، GP-0

نمونه ملات بدون الیاف، GP-0

نمونه ملات الیافی، GP-0.75

شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه‌های ملات GP-4-2.0 و GP-5-1.0

جدول ۳- نتایج آنالیز EDS روی نمونه ملات ژئوپلیمری بدون الیاف

عنصر	Fe	Ti	Ca	K	Si	Al	Mg	Na	O	نسبت مولی (Si/Al)
Wt(%)	۱/۸۷	۰/۲۶	۱۰/۰	۱/۷۸	۲۰/۰۴	۵/۶۹	۱/۵۳	۵/۰۷	۵۳/۷۶	-
At(%)	۰/۶۸	۰/۱۱	۵/۰۹	۰/۹۳	۱۴/۵۶	۴/۳۰	۱/۲۸	۴/۵۰	۶۸/۵۵	۳/۳۹

۴- نتیجه گیری
بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و بحث و بررسی‌های انجام شده، مهم‌ترین نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد.
- افزودن الیاف فولادی به ملات ژئوپلیمری سبب افزایش مقاومت فشاری آن‌ها در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز شد. با افزایش درصد الیاف فولادی از ۰/۲۵ به ۰/۷۵ مقاومت فشاری افزایش یافت ولی با افزایش بیشتر درصد الیاف به یک درصد مقاومت فشاری تغییر چندانی نداشت.
- افزودن الیاف فولادی به ملات ژئوپلیمری مقاومت خمشی و چقرمگی را افزایش داد به طوری که رفتار شکست آن‌ها را از حالت ترد به حالت نرم و شکل پذیر تغییر داد. بیشترین ظرفیت خمشی و چقرمگی در نمونه GP-1.0 رخ داد. همچنین در نمونه حاوی یک درصد الیاف فولادی رفتار کرنش سخت شونده‌گی مشاهده شد.
- افزودن الیاف فولادی به نحو مؤثری توانست جمع شدگی خشک ملات ژئوپلیمری را کاهش دهد و تغییر طول نمونه‌ها را تقریباً پس از ۱۴ روز متوقف نماید. با افزایش درصد الیاف در نمونه‌ها مقدار جمع شدگی خشک بیشتر کاهش داشت.

and Building Materials, 221, 514-526, (2019).

[7] Podolsky, Z., Liu, J., Dinh, H., Doh, J. H., Guerrieri, M., and Fragomeni, S. State of the art on the application of waste materials in geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00637, (2021).

[8] Qaidi, S. M., Tayeh, B. A., Isleem, H. F., de Azevedo, A. R., Ahmed, H. U., and Emad, W. Sustainable utilization of red mud waste (bauxite residue) and slag for the production of geopolymer composites: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00994, (2022).

[9] Heath, A., Paine, K., Goodhew, S., Ramage, M., and Lawrence, M. The potential for using geopolymer concrete in the UK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 166(4), 195-203, (2013).

[10] Mayes, W. M., Burke, I. T., Gomes, H. I., Anton, A. D., Molnár, M., Feigl, V., and Ujaczki, É. Advances in understanding environmental risks of red mud after the Ajka spill, Hungary. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2, 332-343, (2016).

[11] Li, Z., You, H., Gao, Y., Wang, C., and Zhang, J. Effect of ultrafine red mud on the workability and microstructure of blast furnace slag-red mud based geopolymeric grouts. *Powder Technology*, 392, 610-618, (2021).

[12] Zakira, U., Zheng, K., Xie, N., and Birgisson, B. Development of high-strength geopolymers from red mud and blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135439, (2023).

[13] Tian, K., Wang, Y., Dong, B., Fang, G., and Xing, F. Engineering and Micro-properties of alkali-activated slag pastes with Bayer red Mud. *Construction and Building Materials*, 351, 128869, (2022).

[14] Liang, X., and Ji, Y. Experimental study on durability of red mud-blast furnace slag geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 267, 120942, (2021).

[15] Bayat, A., Hassani, A., and Yousefi, A. A. Effects of red mud on the properties of fresh and hardened alkali-activated slag paste and mortar. *Construction and Building Materials*, 167, 775-790, (2018).

[16] Yin, H., Liu, J., Zhou, X., Qi H., Liu, S and Pang S. Flexural properties of fiber-reinforced alkali slag-red mud geopolymer. *Construction and Building Materials*, 370, e130708, (2023).

[17] Wang, C., Li, Z., Zhou, Z., Gao, Y. and Zhang, J. Compatibility of different fibres with red mud-based geopolymer grouts. *Construction and Building Materials*, 315, e125742, (2022).

[18] Babatunde, S. A. Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced

- به کارگیری ملات ژئوپلیمری مسلح شده به الیاف فولادی به عنوان یک لایه تعمیری در تیرهای آجری توانست ظرفیت باربری و تغییر شکل های خمشی آنها را افزایش دهد و رفتار شکست آنها را از حالت ترد به رفتار شکل پذیر تغییر دهد.

- بررسی عکس های میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS نقطه ای نشان داد که عامل اصلی در استحکام خمیر ژئوپلیمر وجود ژل کلسیم- آلومینیوم- سیلیکات- هیدرات (C-A-S-H) بود. وجود نسبت مولی Si/Al برابر ۳/۳۹ در خمیر ملات نیز حاکی از ایجاد یک ساختار سه بعدی و زنجیره ای شکل ژئوپلیمری در میکروساختار آن بود.

- استفاده از ضایعات کارخانه های آلومینیوم و فولاد به عنوان ماده پایه و فعال سازی آنها توسط محلول سود با مولاریته پایین و نیز مصرف کم آب شیشه در طرح مخلوط، نه تنها از لحاظ محیط زیستی بسیار اهمیت دارد بلکه از لحاظ اقتصادی نیز می تواند یک قدم مؤثر و رو به جلو برای تولید ملات های ژئوپلیمری با هزینه مالی کمتر باشد.

۵- مراجع

[1] Singh, N.B. and Middendorf, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*. 237, 117455, (2020).

[2] Davidovits, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656, (1991).

[3] Reddy, M. S., Dinakar, P. and Rao, B. H. A review of the influence of source material's oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete. *Microporous and Mesoporous Materials*, 234, 12-23, (2016).

[4] Duan, P., Yan, C., and Luo, W. A novel waterproof, fast setting and high early strength repair material derived from metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 124, 69-73, (2016).

[5] Zhang, W., Yao, X., Yang, T., Liu, C., and Zhang, Z. Increasing mechanical strength and acid resistance of geopolymers by incorporating different siliceous materials. *Construction and Building Materials*, 175, 411-421, (2018).

[6] Lahoti, M., Tan, K. H., and Yang, E. H. A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. *Construction*

33. Elsevier, (2021).
- [31] Najafgholipour, M. A., S. M. Dehghan, A. R. Mirzaee, and A. A. Aghaei. Experimental investigation on flexural behavior of masonry prisms strengthened by fiber-reinforced mortar layer. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 40, 277-286, (2016).
- polymers. *Composite Structures*, 161, 246-255, (2017).
- [19] Bhattacharya, S., Nayak, S. and Dutta, S. C. A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 7, 51-67, (2014).
- [20] Esmaeeli, E., Manning, E. and Barros, J. Strain hardening fibre reinforced cement composites for the flexural strengthening of masonry elements of ancient structures. *Construction and Building Materials*, 38, 1010-1021, (2013).
- [21] Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Firouz, R. M., and Illikainen, M. Drying shrinkage in alkali-activated binders—a critical review. *Construction and Building Materials*, 190, 533-550, (2018).
- [22] Ou, Z., Feng, R., Li, F., Liu, G., and Li, N. Development of drying shrinkage model for alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 323, 126556, (2022).
- [23] Collins, F., and Sanjayan, J. G. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1401-1406, (2000).
- [24] Ranjbar, N., Zhang, M. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, e103498, (2020).
- [25] Rashad, A. M. Effect of steel fibers on geopolymer properties – The best synopsis for civil engineer. *Construction and Building Materials*, 246, e118534, (2020).
- [26] Qaidi, S. M., Tayeh, B. A., Isleem, H. F., de Azevedo, A. R., Ahmed, H. U., and Emad, W. Sustainable utilization of red mud waste (bauxite residue) and slag for the production of geopolymer composites: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00994, (2022).
- [27] Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., and Zhang, J. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B: Engineering*, 152, 79-95, (2018).
- [28] Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., and Hussein, A. A. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 54-74, (2017).
- [29] Chen, S., Ruan, S., Zeng, Q., Liu, Y., Zhang, M., Tian, Y., and Yan, D. Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review. *Construction and Building Materials*, 328, 127064, (2022).
- [30] Dehghan, S. M., M. R. Karamian, and M. A. Najafgholipour. An experimental and analytical study on the out-of-plane behavior of URM prisms strengthened with SFRC overlays. *Structures. Vol.*

Investigating the mechanical properties and drying shrinkage of fiber geopolymer repair mortar containing waste from iron and aluminium factories

Farid Hatami

Ph.D. Candidate, Civil Engineering Department. Technical Faculty, Guilan University, Rasht, Iran.

Malek Mohammad Ranjbar Taklimi *

Associate Professor, Civil Engineering Department. Technical Faculty, Guilan University, Rasht, Iran.

Abstract

In this article, the ground granulated blast furnace slag and red mud, which are the waste products of iron and aluminum factories, were used as aluminosilicate base materials in the mix design of geopolymer repair mortar. The activation of base materials was done with a combination of sodium hydroxide solution (soda) and sodium silicate (water glass). The effect of steel fibers on compressive strength, toughness and drying shrinkage of mortar was investigated. Fiber mortars were used as a repair layer to retrofit brick beams. The results showed that the use of steel fibers in geopolymer mortar can effectively improve compressive strength and toughness, reduce drying shrinkage, and change the brittle fracture behavior of brick beams to a ductile behavior. The results of SEM-EDS test and measurement of Si/Al molar ratio indicated the existence of a three-dimensional and chained structure of geopolymer in the mortar microstructure. The conducted research is an effective and forward step in achieving geopolymeric products with an environmental and economic approach.

Keywords: Geopolymer repair mortar, slag, red mud, steel fiber, toughness, drying shrinkage.

* Corresponding Author: ranjbar@guilan.ac.ir