



University Of Qom



## Enhancement of Mechanical Properties, Drying Shrinkage and High Temperature Resistance of Geopolymer Mortar Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag and Red Mud with Basalt Fiber

Malek Mohammad Ranjbar Taklimi<sup>1✉</sup>, Farid Hatami<sup>2</sup>

1. Corresponding author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran. E-mail: [ranjbar@guilan.ac.ir](mailto:ranjbar@guilan.ac.ir)
2. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran. E-mail: [f\\_hatami2002@yahoo.com](mailto:f_hatami2002@yahoo.com)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received 10 Sep 2023  
Revised 14 Nov 2023  
Accepted 17 Nov 2023

**Keywords:**  
Geopolymer Mortar,  
Basalt Fiber,  
Ground Granulated  
Blast-Furnace Slag,  
Red Mud,  
Resistance to High  
Temperatures.

### ABSTRACT

*The purpose of this research is to investigate the effect of adding basalt fibers on flowability, setting time, shrinkage and compressive and flexural strengths of geopolymer mortar cured at ambient temperature. 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 geopolymer mortar mix design. Also, for the first time, the residual compressive and flexural strengths of geopolymeric mortars containing basalt fibers exposed to three thermal regimes including 600°C for 60 minutes and 600°C and 800°C for 90 minutes were measured and investigated. XRD tests revealed that geopolymers undergo a structural phase change from amorphous to crystalline at high temperatures. In addition, the results showed that adding 0.5% of basalt fibers as an optimal percentage, not only can solve the problem of drying shrinkage of geopolymer mortars, but also the use of this amount of basalt fibers can increase the compressive and flexural strength of geopolymer mortars both at ambient temperature and at high temperatures. Therefore, geopolymer mortar containing 0.5% basalt fibers, in addition to having positive environmental aspects, can be used as a repair mortar with high mechanical characteristics and also suitable resistant to high temperature for the repair and retrofit of concrete structures.*

**Cite this article:** Ranjbar Taklimie MM, Hatami F. Enhancement of mechanical properties, drying shrinkage and high temperature resistance of geopolymer mortar containing slag and red mud with basalt fiber. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 67-83. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9855.1511>





## بهبود خواص مکانیکی، جمع‌شدگی خشک و مقاومت در برابر حرارت‌های بالای ملات ژئوپلیمری حاوی روباره کوره آهن‌گدازی و گل سرخ با الیاف بازالت

ملک محمد رنجبر تکلیمی<sup>۱</sup>، فرید حاتمی<sup>۲</sup>

۱. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران. رایانامه: [ranjbar@guilan.ac.ir](mailto:ranjbar@guilan.ac.ir)

۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران. رایانامه: [f\\_hatami2002@yahoo.com](mailto:f_hatami2002@yahoo.com)

### چکیده

هدف این مقاله بررسی تأثیر افزودن الیاف بازالت بر روانی، زمان گیرش، جمع‌شدگی خشک و مقاومت‌های فشاری و خمشی ملات‌های ژئوپلیمری دو جزئی عمل‌آوری شده در دمای محیط و حاوی روباره کوره آهن‌گدازی و گل سرخ است. بدین منظور، ملات‌های ژئوپلیمری مسلح شده به الیاف بازالت به مقدار ۰/۲۵، ۰/۵۰، و ۰/۷۵ درصد حجمی از مواد پایه در مقایسه با ملات پلیمری بدون الیاف ساخته شد. جهت فعال‌سازی مواد پایه از نسبت وزنی یکسان از محلول سود ۴ مولار و آب شیشه استفاده گردید. همچنین برای نخستین بار مقاومت‌های فشاری و خمشی باقیمانده این ملات‌های ژئوپلیمری در حرارت‌های بالا اندازه‌گیری و بررسی شد. بدین منظور ملات‌های ژئوپلیمری در معرض سه رژیم حرارتی شامل دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه و نیز دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد الیاف بازالت نه تنها می‌تواند به نحو مطلوبی مشکل جمع‌شدگی خشک ملات‌های ژئوپلیمری را رفع نماید، بلکه استفاده از این مقدار الیاف بازالت می‌تواند مقاومت‌های فشاری و خمشی ملات‌های ژئوپلیمری را هم در دمای محیط و هم در درجه حرارت‌های بالا بهبود و ارتقا دهد. همچنین جهت بررسی ساختار فازی ژئوپلیمرها در درجه حرارت‌های بالا آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) روی آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که ژئوپلیمرها در این دما دچار یک تغییر از فاز حالت آمورف به کریستالی می‌شوند.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۶

### کلیدواژه‌ها:

ملات ژئوپلیمری،

الیاف بازالت،

روباره کوره آهن‌گدازی،

گل سرخ،

مقاومت در حرارت‌های بالا.

استناد: رنجبر تکلیمی ملک محمد، حاتمی فرید. بهبود خواص مکانیکی، جمع‌شدگی خشک و مقاومت در برابر حرارت‌های بالای

ملات ژئوپلیمری حاوی روباره و گل سرخ با الیاف بازالت. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱): ۶۷-۸۳.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.9855.1511>



## ۱- مقدمه

نزدیک به دو قرن از اختراع سیمان توسط جوزف آسپیدین<sup>۱</sup> در سال ۱۸۲۴ به عنوان یک ماده چسباننده در تولید بتن گذشته و در طول این مدت، سیمان به محبوب‌ترین ماده ساختمانی تبدیل شده است [۱]. اما این موفقیت سیمان با اثرات نامطلوب زیست‌محیطی مانند تغییرات آب‌وهوا و گرم شدن کره زمین همراه بوده است. به‌طور کلی، حدود ۵ تا ۷ درصد از کل گاز دی‌اکسیدکربن تولید شده در دنیا ناشی از تولید و مصرف سیمان می‌باشد که این مسأله، همواره مورد توجه بسیاری از محققین بوده است [۲]. در سال ۱۹۷۹، دانشمند فرانسوی جوزف داویدوویتس<sup>۲</sup>، چسباننده‌های ژئوپلیمری را به عنوان ماده جایگزین سیمان معرفی نمود [۳].

ژئوپلیمر یک ماده معدنی یا غیرآلی است که از واکنش یک یا چند ماده آلومینوسیلیکاتی با فعال‌سازهای قلیایی ساخته می‌شود. نتایج پژوهش‌های انجام شده بر روی ژئوپلیمرها نشان داده که این مواد دارای مشخصات مکانیکی بالا در سنین اولیه، پایداری مناسب در محیط‌های خورنده، مقاومت فوق‌العاده در برابر حرارت‌های بالا و نیز اثرات مخرب زیست‌محیطی کمتری می‌باشند و از این‌رو، امروزه به‌عنوان یک رقیب و جایگزین برای سیمان شناخته می‌شوند [۴-۷].

خاکستر بادی، روباره کوره آهن‌گدازی و متاکائولن به عنوان منابع غنی سیلیس و آلومینیوم، بیشترین کاربرد را در تهیه ژئوپلیمرها دارند. هیدروکسیدسیدیم (سود سوزآور) و سیلیکات سدیم (آب شیشه) نیز از پرمصرف‌ترین فعال‌سازهای قلیایی در ساخت چسباننده‌های ژئوپلیمری هستند [۸]. در سال‌های اخیر، گل سرخ یا لجن قرمز به عنوان یک ماده پایه جدید در تولید محصولات ژئوپلیمری مطرح شده است [۹]. تحقیقات نشان داده که استفاده از این ماده به همراه

روباره کوره آهن‌گدازی می‌تواند به‌عنوان یک دیرگیرکننده مشکل گیرش سریع و ناگهانی ژئوپلیمرهای بر پایه روباره کوره آهن‌گدازی را به نحو مؤثری حل نماید [۱۰]. گل سرخ محصول جانبی فرآیند بایر در صنعت تولید آلومینیوم می‌باشد و از طرفی، مهم‌ترین آلودگی این صنعت است. در فرآیند بایر، سنگ معدن آلومینیوم یا بوکسیت به همراه هیدروکسیدسیدیم در مخازن تحت فشار و دمای ۱۵۰ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد به آلومینا تبدیل می‌شود که ماده اصلی در تولید فلز آلومینیوم است [۱۱]. در سال ۲۰۲۲، حدود نیم میلیون تن آلومینیوم در ایران تولید شده است. از آن‌جاکه تولید هر یک تن آلومینا، منجر به تولید دو تن گل قرمز می‌شود، برآورد می‌شود که هر سال در کشور حدود یک میلیون تن ضایعات گل سرخ باقی می‌ماند. از این‌رو علاوه بر این که انباشت این حجم گل سرخ نیاز به فضای زیادی دارد، به دلیل استفاده از هیدروکسیدسیدیم در فرآیند بایر، این ماده خاصیت قلیایی بسیار بالایی داشته و بنابراین در صورت نشت در محل‌های انباشت، می‌تواند خاک و حتی آب‌های زیرزمینی اطراف را به شدت آلوده نماید [۱۲].

یک چالش مهم در چسباننده‌های ژئوپلیمری، موضوع جمع‌شدگی و تردشدگی بیشتر آن‌ها نسبت به ملات‌ها و بتن‌های سیمانی است [۱۳]. مطالعات قبلی نشان داده که افزودن انواع الیاف همانند الیاف فولادی، کربن، شیشه، پلی‌پروپیلن، پلی‌وینیل الکل و بازالت به ماتریس ژئوپلیمرها علاوه بر کاهش جمع‌شدگی می‌تواند خواص مهندسی، چقرمگی و جذب انرژی آن‌ها را به نحو مؤثری ارتقا دهد [۱۴]. در بین انواع الیاف‌های موجود، الیاف بازالت به دلیل سمی نبودن، استحکام کششی بالا، دوام در برابر خوردگی و آتش، پایداری در محیط‌های قلیایی و همچنین هزینه و انرژی کمتر در تولید، به عنوان یک پتانسیل جدید در رقابت با سایر الیاف‌ها مطرح است [۱۵].

ژئوپلیمرها به عنوان یک ماده معدنی و غیرآلی هستند، بنابراین به طور ذاتی در برابر آتش و حرارت‌های

<sup>۱</sup>- Aspdin

<sup>۲</sup>- Davidovits

مقاومت در برابر حرارت بالای آن به کمک الیاف بازالت ارتقا یافته است. در این راستا از محلول سود ۴ مولار همراه سیلیکات سدیم جهت فعال سازی مواد پایه استفاده شد. تأثیر افزودن درصد های وزنی مختلف الیاف بازالت بر روانی، زمان گیرش، جمع شدگی، مقاومت فشاری و خمشی نمونه های ملات، آزمایش شد. علاوه بر این، درصد کاهش وزن و کاهش مقاومت های فشاری و خمشی نمونه های ملات پس از قرارگیری در معرض درجه حرارت های ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری و بررسی گردید. همچنین جهت بررسی فاز ساختاری نمونه های ملات قبل و پس از قرارگیری در معرض حرارت، آزمایش پراش اشعه ایکس ( $XRD^3$ ) روی آن ها انجام شد. مطالعه بیش از ۱۰ مقاله مروری بین المللی در زمینه انواع خمیر، ملات و بتن های ژئوپلیمری نشان می دهد که موضوع و هدف این تحقیق کاملاً جدید و نوآورانه بوده و برای نخستین بار است که ارائه می شود [۷-۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۷، ۲۰، ۲۲-۲۵].

## 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 تهیه ملات ژئوپلیمری استفاده شد. جدول ۱، نتایج آزمون تعیین ترکیب شیمیایی ( $XRF^4$ ) این مواد را نشان می دهد. مطابق این جدول هماتیت ( $Fe_2O_3$ ) بخش اصلی گل سرخ را تشکیل می دهد در حالی که بخش اعظم روباره از اکسید کلسیم ( $CaO$ ) و دی اکسید سیلیسیم ( $SiO_2$ ) است. عدد کاهش وزن ناشی از احتراق (L.O.I.) در دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۱/۵ ساعت برای هر دو ماده اندازه گیری شد. بالا بودن عدد L.O.I. برای گل سرخ

بالا مقاوم می باشند و می توانند پایداری حجمی و ابعادی خود را بدون پوسته اندازی حفظ کنند [۱۶-۱۸]. در حالی که بتن معمولی تحت اثر حرارت بالا، بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد در سطوح بیرونی خود دچار پوسته اندازی و ناپایداری ابعادی می شود. پوسته اندازی در بتن می تواند در اثر ایجاد فشار حفره های ناشی از بخار شدن رطوبت موجود در بتن و محبوس شدن بخار آب در داخل این حفرات ایجاد شود. زمانی که تنش های کششی ناشی از فشار حفره های از تنش کششی بتن بیشتر می شود پوسته اندازی رخ می دهد. توسعه گرادیان حرارتی و تنش های حرارتی ناشی از انبساط نیز یک عامل دیگر در پوسته اندازی بتن است [۱۹].

ژئوپلیمرها به دلیل داشتن ساختار آمورف و غیر کریستالی ذاتی خود، بسیار متخلخل تر از بتن معمولی هستند. حفرات و منافذ موجود در ساختار ژئوپلیمرها در مقایسه با بتن معمولی از لحاظ تعداد، بیشتر و از لحاظ اندازه نیز ریزتر می باشند. این تخلخل سبب کاهش انتقال حرارتی در ماتریس ژئوپلیمر می شود. تعدد بیشتر حفرات می تواند کانال هایی از حفرات به هم چسبیده را برای خروج فشار حفره های ناشی از بخار شدن رطوبت ایجاد نماید و مانع از محبوس شدن آن در ساختار ژئوپلیمر گردد. علاوه بر این، آب مورد نیاز جهت واکنش هیدراسیون سیمان در بتن بیشتر از آب موجود در ژئوپلیمرها و فرآیند ژئوپلیمریزاسیون است. بنابراین وجود آب کمتر، فشار حفره های کمتری را ایجاد می نماید [۲۰]. مطالعات پیشین نشان داده که در درجه حرارت بیش از ۶۰۰ درجه سانتی گراد، نوعی تغییر فاز ساختاری در ژئوپلیمرها شکل می گیرد و آن ها از حالت آمورف به حالت کریستالی تغییر ماهیت می دهند. این فرآیند تغییر فاز، عامل اصلی کاهش مقاومت فشاری و خمشی در دماهای بالای ۶۰۰ درجه سانتی گراد می باشد [۲۱].

هدف اصلی این تحقیق تولید یک ملات ژئوپلیمری در دمای محیط با استفاده از ضایعات کارخانه های فولاد و آلومینیوم می باشد که خواص مکانیکی، جمع شدگی و

<sup>3</sup>- X-Ray Diffraction

<sup>4</sup>- X-Ray Fluorescence

میکروسکوپ الکترونی (SEM) این مواد را در مقیاس ۲ میکرومتر نشان می‌دهد. روباره کوره آهن‌گدازی ذرات تیز گوشه و تقریباً تفکیک شده از هم دارد در حالی که ذرات گل سرخ به هم چسبیده و ورقه‌ای شکل هستند. این چسبندگی ذرات به دلیل داشتن رطوبت زیاد و عدد L.O.I. بالا در این ماده است.

ناشی از رطوبت زیاد و وجود هیدروکسید سدیم محلول در این ماده است.

شکل ۱، رنگ ظاهری پودر گل سرخ و روباره کوره آهن‌گدازی را در محیط آزمایشگاه نشان می‌دهد. روباره رنگ خاکستری روشن دارد در حالی که گل سرخ به دلیل وجود هماتیت در این ماده رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای دارد. شکل ۲ عکس میکروساختاری تهیه شده با

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی روباره کوره آهن‌گدازی و گل سرخ (درصد وزنی)

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

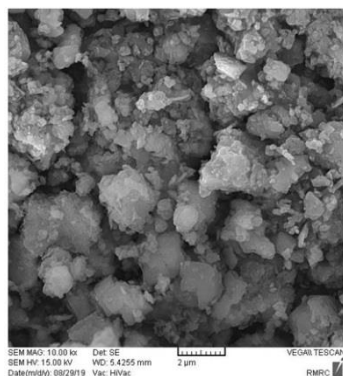


گل سرخ

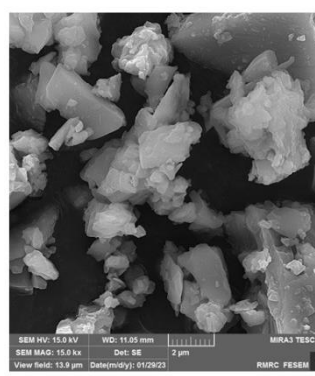


روباره کوره آهن‌گدازی

شکل ۱- رنگ ظاهری پودر روباره کوره آهن‌گدازی و پودر گل سرخ



(ب)



(الف)

شکل ۲- عکس میکروسکوپ الکترونی در مقیاس ۲ میکرومتر از (الف) پودر روباره و (ب) پودر گل سرخ

تولیدی شرکت بازالتکس بلژیک با چگالی ۲/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب و دمای ذوب ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. شکل ۳، مشخصات ظاهری این الیاف با طول ۶/۴ میلی‌متر و قطر ۱۷ میکرومتر را نشان می‌دهد. از ماسه رودخانه‌ای به حالت اشباع با سطح خشک، دانه‌بندی استاندارد مطابق ASTM C778-17 و حداکثر قطر ۲ میلی‌متر استفاده شد.

از سیلیکات سدیم مایع محصول شرکت صنایع سیلیکات ایران با نسبت مولی  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=2/35$  به همراه هیدروکسید سدیم پرک با درجه خلوص ۹۸٪ جهت فعال‌سازی مواد آلومینوسیلیکاتی استفاده شد. مسلح کردن نمونه‌های ملات با الیاف بازالت خرد شده<sup>۵</sup>، محصول

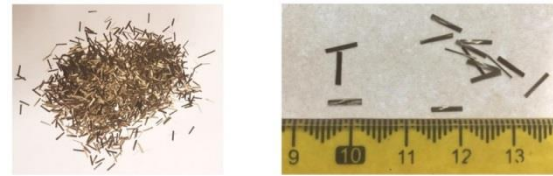
<sup>۵</sup>- Chopped

نمونه‌های الیافی، الیاف بازالت قبل از افزودن محلول فعال‌کننده و همراه ماسه به مواد پودری اضافه شد. بلافاصله پس از ساخت، طی سه مرحله ملات داخل قالب ریخته شد و برای تراکم بهتر، نمونه‌ها به مدت ۱۵ ثانیه روی میز ویبره قرار داده شد. از قالب‌های مکعبی  $5 \times 5 \times 5$  و  $4 \times 4 \times 16$  (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  $2/5 \times 2/5$  سانتی‌مترمربع و طول  $28/5$  سانتی‌متر استفاده شد. به دلیل مقاومت کم این نمونه‌ها در سن یک روز و احتمال آسیب‌دیدگی در هنگام جدا کردن قالب، باز کردن قالب نمونه‌های جمع‌شدگی، ۴۸ ساعت پس از ساخت انجام شد. نگهداری و عمل‌آوری همه نمونه‌های ملات در دمای محیط آزمایشگاه ( $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد) و رطوبت  $55 \pm 5$  درصد، انجام شد.

### ۳-۲- روش آزمایش

در مرحله اول آزمایش‌ها، تأثیر الیاف بازالت بر روانی و زمان گیرش ملات تازه بررسی گردید. روانی ملات بلافاصله پس از ساخت با استفاده از میز روانی و مطابق استاندارد ASTM C1437-07 اندازه‌گیری شد. همچنین زمان گیرش اولیه و نهایی ملات تازه نیز مطابق استاندارد ASTM C807-13 با استفاده از دستگاه سوزن و پیکت اندازه‌گیری شد.

در مرحله بعد، مقاومت فشاری نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C109 در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه اندازه‌گیری شد. مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز در سن ۲۸ روز مطابق استاندارد ASTM C348 اندازه‌گیری شد. آزمایش جمع‌شدگی مطابق استاندارد ASTM C596 و با استفاده از دستگاه کمپراتور انقباض ملات و ساعت دیجیتال با دقت  $0/001$  میلی‌متر انجام شد. درصد تغییر



شکل ۳- الیاف بازالت به طول ۶ میلی‌متر

### ۲-۲- طرح مخلوط و روش ساخت نمونه‌ها

تحقیقات پیشین نشان داد که ۲۰٪ جایگزینی روبره کوره آهن‌گدازی با گل سرخ در طرح اختلاط علاوه بر این که می‌تواند یک درصد بهینه برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری باشد می‌تواند مشکل گیرش سریع ژئوپلیمرهای تک جزئی بر پایه روبره را نیز حل نماید [۲۶]. بنابراین در این تحقیق از ترکیب روبره کوره آهن‌گدازی و گل سرخ به نسبت ۴ به ۱ به عنوان مواد پودری پایه در ساخت ملات بدون الیاف ژئوپلیمری استفاده شد. فعال‌سازی این مواد پودری با استفاده از محلول فعال‌کننده قلیایی با نسبت برابر از محلول هیدروکسیدسدیم ۴ مولار و آب شیشه انجام گرفت. از آنجاکه انحلال هیدروکسیدسدیم در آب یک فرآیند گرمازا است. بنابراین 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 سه مقدار متفاوت الیاف بازالت شامل ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد حجمی استفاده شد. ملات بدون الیاف یا کنترلی با GP-0 و ملات‌های الیافی به ترتیب با GP-0.25، GP-0.50 و GP-0.75 نام‌گذاری شدند.

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا پودر روبره کوره آهن‌گدازی 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 فعال‌کننده 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. در

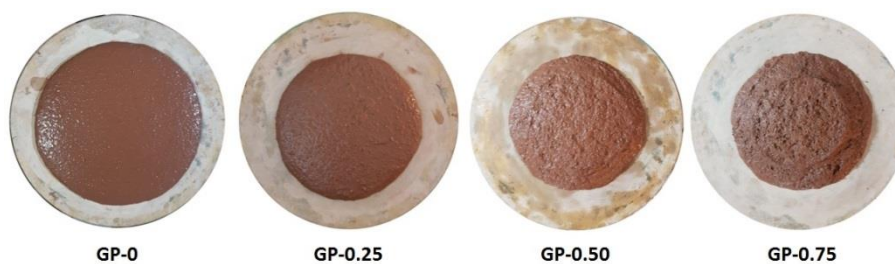
### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

#### ۳-۱- تأثیر الیاف بر روانی، گیرش و جمع‌شدگی خشک

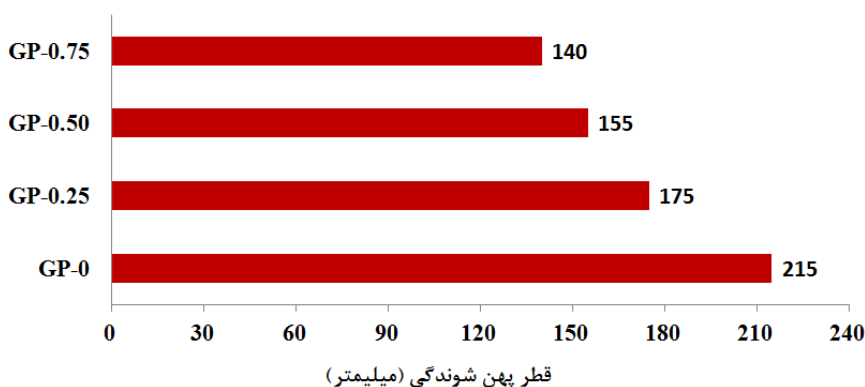
شکل ۴، مقدار روانی ملات ژئوپلیمری بدون الیاف را در مقایسه با نمونه‌های الیافی در آزمایش میز روانی نشان می‌دهد. قطر پهن‌شوندگی هر نمونه در دو جهت متعامد اندازه‌گیری شد و میانگین آن به عنوان قطر پهن‌شوندگی ملات ثبت گردید. نمونه ملات کنترلی (GP-0) کاملاً پایدار و چسبنده بود و هیچگونه جداشدگی ذرات و آب‌افتادگی در آن مشاهده نشد. مطابق شکل ۵، با افزایش الیاف بازالت قطر پهن‌شوندگی از ۲۱۵ میلی‌متر در نمونه کنترلی به ۱۷۵، ۱۵۵ و ۱۴۰ میلی‌متر در نمونه‌های الیافی کاهش یافت.

طول نمونه‌ها نسبت به طول اولیه در یک دوره ۹۰ روزه اندازه‌گیری گردید.

در مرحله آخر، تأثیر الیاف بازالت در بهبود مقاومت فشاری و مقاومت خمشی ملات ژئوپلیمری در درجه حرارت‌های ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. بدین منظور، نمونه‌های ملات با سن ۲۸ روز در کوره الکتریکی دیجیتال با نرخ دمایی ۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، با دو مدت زمان ۶۰ و ۹۰ دقیقه و همچنین تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۹۰ دقیقه تحت حرارت قرار گرفتند. پس از آن کوره خاموش شد و به نمونه‌ها اجازه داده شد تا به طور طبیعی خنک شوند و به دمای محیط برسند. جهت بررسی کاهش وزن نمونه‌ها، وزن آن‌ها قبل و بعد از قرارگیری در کوره الکتریکی با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد.



شکل ۴- فرم پهن‌شوندگی ملات ژئوپلیمری بدون الیاف و نمونه‌های الیافی روی میز روانی



شکل ۵- قطر پهن‌شوندگی ملات ژئوپلیمری بدون الیاف و نمونه‌های حاوی الیاف

می‌باشد و بنابراین می‌تواند بخشی از آب موجود در ملات را جذب کند و روانی را به طرز چشم‌گیری کاهش دهد [۲۷]. افزودن بیشتر الیاف سبب می‌شود که توزیع تصادفی آن در مخلوط ملات بیشتر شده و با جذب آب

به طور کلی، افزودن الیاف بازالت سبب کاهش روانی ملات می‌شود. این الیاف از نوع الیاف آب‌دوست<sup>۶</sup>

<sup>۶</sup>- Hydrophobic



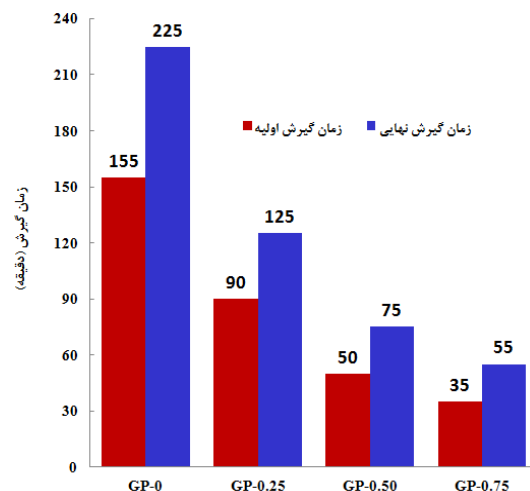
فرآیند ژئوپلیمرزاسیون یا فعال‌سازی یک ماده پایه جامد آلومینوسیلیکاتی و تبدیل آن به محصول نهایی یا ژئوپلیمر شامل سه مرحله می‌باشد. در مرحله نخست، انحلال هیدروکسید سدیم رخ می‌دهد و کاتیون‌های فلزی  $Na^+$  و یون‌های هیدروکسید سدیم  $OH^-$  آزاد می‌شوند. پس از آن باندهای Si-O و Al-O در ماده پایه که حاوی سیلیکا ( $SiO_2$ ) و آلومینا ( $Al_2O_3$ ) است شکسته شده و کاتیون‌های باردار  $Si^{4+}$  و  $Al^{3+}$  از آنها جداسازی می‌شود. سپس این کاتیون‌ها جذب یون‌های منفی  $OH^-$  شده و هیدرولیز می‌شوند و گروه‌های Si-OH و Al-OH را تشکیل می‌دهند که بعداً تبدیل به مونومرهای  $Si(OH)_4$  و  $Al(OH)_3$  می‌شوند. در مرحله بعد این مونومرها جهت‌گیری می‌کنند و با یک باند اکسیژنی به هم متصل می‌شوند و یک مولکول آب آزاد می‌کنند و ژل اولیه ژئوپلیمر را به وجود می‌آورند. در مرحله آخر، آب تولید شده از سیستم خارج شده و فرآیند سخت‌شوندگی و ژئوپلیمرزاسیون کامل می‌شود [۲۹ و ۳۰].

در واقع مدت زمان خارج شدن آب از سیستم و فرآیند سخت‌شوندگی تأثیر مهمی در زمان گیرش اولیه و نهایی محصول ژئوپلیمری دارد. با افزودن الیاف به طرح مخلوط، آب موجود در آن به وسیله الیاف جذب شده و سبب خشک شدن سریع‌تر ملات شده و زمان گیرش اولیه و نهایی کاهش می‌یابد. با افزودن بیشتر الیاف بازالت به طرح مخلوط، آب بیشتری از ملات، جذب الیاف شده و گیرش ملات سریع‌تر می‌شود.

همچنین در هنگام هم‌زدن مواد با الیاف بازالت در همزن مشاهده شد که بدنه کاسه فلزی همزن به سرعت گرم می‌شود. بخشی از این حرارت در اثر اصطکاک میان الیاف بازالت با مخلوط ملات و نیز بدنه و پره‌های همزن تولید می‌شود. الیاف بازالت مقاومت زیادی در برابر سایش دارد. حرارت ایجاد شده ناشی از هم‌زدن مواد باعث افزایش دمای درون مخلوط می‌شود. افزایش دما سبب تسریع در فرآیند سخت‌شوندگی ملات شده و زمان گیرش آن را سریع‌تر می‌کند.

بیشتر، باعث کاهش بیشتر روانی می‌شود. علاوه بر این، توزیع بیشتر الیاف‌های سوزنی‌شکل بازالت در طرح مخلوط، یک ساختار شبکه‌ای را به وجود می‌آورد. تشکیل این شبکه در ملات، سبب ایجاد یک نیروی مسدودکننده در مسیر حرکت آن می‌شود و در نتیجه ویسکوزیته ملات افزایش و روانی آن کاهش می‌یابد.

شکل ۶، زمان گیرش اولیه و نهایی ملات ژئوپلیمری بدون الیاف را در مقایسه با نمونه‌های الیافی نشان می‌دهد. زمان گیرش اولیه و نهایی در ملات کنترلی به ترتیب ۱۵۵ و ۲۲۵ دقیقه بود و گیرش سریع و ناگهانی در آن مشاهده نشد. به عبارتی، گل سرخ می‌تواند نقش یک دیرگیرکننده را در طرح مخلوط ایفا نماید و مشکل گیرش سریع ژئوپلیمرهای تک جزئی حاوی روبراه کوره آهن‌گدازی را رفع نماید [۲۶ و ۲۸].

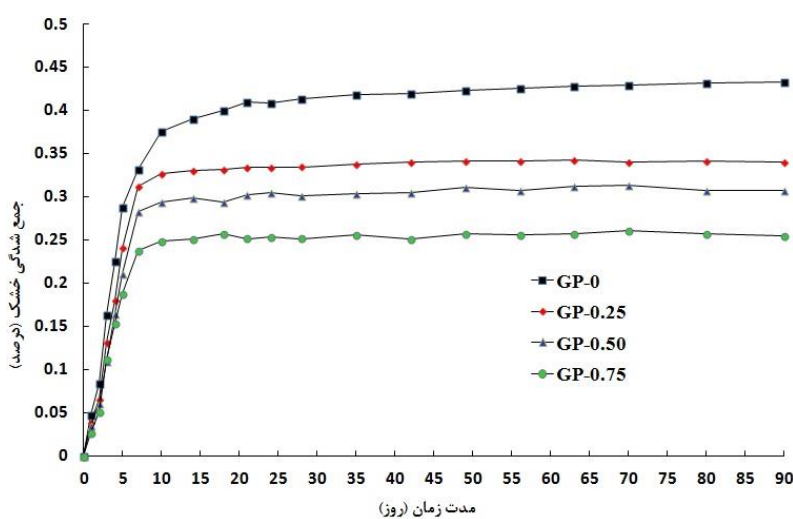


شکل ۶- زمان گیرش اولیه و نهایی ملات ژئوپلیمری بدون الیاف و نمونه‌های ملات الیافی

افزودن الیاف سبب کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی ملات‌های الیافی شد به طوری که تنها با افزودن ۰/۲۵ درصد الیاف، زمان گیرش اولیه ۴۲ درصد و زمان گیرش نهایی ۴۴ درصد کاهش یافت. این کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی در نمونه GP-0.50 به ترتیب ۶۸ و ۶۶ درصد و در نمونه GP-0.75 به ترتیب ۷۷ و ۷۵ درصد بود.



شکل ۷، نحوه اندازه‌گیری جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی در نمونه‌های ملات با ساعت دیجیتال و نیز مقدار درصد تغییر طول نمونه‌ها نسبت به طول اولیه را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری نشان داد که مقدار جمع‌شدگی در نمونه بدون الیاف در یک دوره ۹۰ روزه ۰/۴۳ 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.



(ب)



(الف)

شکل ۷- (الف) دستگاه اندازه‌گیری جمع‌شدگی خشک ملات و نتایج اندازه‌گیری درصد تغییر طول نمونه‌ها به طول اولیه

مخلوط بیات و همکاران ۱/۰ در نظر گرفته شده بود، در حالی که این نسبت در پژوهش حاضر ۱/۴۵ بود. افزودن الیاف تأثیر چشمگیری در کاهش مقدار جمع‌شدگی داشت به طوری که با افزودن ۰/۲۵ درصد الیاف بازالت، مقدار جمع‌شدگی به ۰/۳۴ درصد طول اولیه کاهش یافت. افزایش بیشتر الیاف سبب کاهش بیشتر جمع‌شدگی شد. به طوری که در نمونه‌های GP-0.50 و GP-0.75، جمع‌شدگی به ترتیب به ۰/۳۱ و ۰/۲۶ درصد طول اولیه کاهش یافت. علاوه بر این مشاهده شد که نمونه‌های الیافی در سن ۱۴ روز به پایداری ابعادی رسیدند و فرآیند تغییر طول در آن‌ها تقریباً متوقف گردید.

### ۲-۳- تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری و مقاومت خمشی

یکی دیگر از چالش‌های چسباننده‌های ژئوپلیمری و به ویژه ژئوپلیمرهای با ماده پایه روباره کوره آهن‌گدازی، جمع‌شدگی خیلی زیاد آن‌ها و ایجاد میکرو ترک در ساختار آن‌ها است. تحقیقات پیشین نشان داده که عواملی مانند درصد رطوبت، مقدار سنگدانه، دمای عمل‌آوری و همچنین نوع و مقدار فعال‌کننده قلیایی تأثیر زیادی در جمع‌شدگی خشک دارند. در این بین مؤثرترین روش در کنترل و کاهش جمع‌شدگی خشک و جلوگیری از ایجاد میکرو ترک در ژئوپلیمرها استفاده از الیاف می‌باشد [۱۳ و ۳۱-۳۲].

در تحقیق انجام شده توسط بیات و همکاران مقدار جمع‌شدگی نمونه بدون الیاف ۰/۳۶ درصد گزارش شد. این تفاوت می‌تواند ناشی از دو پارامتر مهم در طرح اختلاط ملات باشد. نخست آنکه نسبت ماسه به پودر استفاده شده توسط آن‌ها ۲/۷۵ به یک بود، در حالی که این نسبت در این تحقیق ۲ به یک می‌باشد [۲۶]. به عبارتی، وجود سنگدانه بیشتر در ملات می‌تواند خاصیت محدودکنندگی بیشتری ایجاد کند و سبب کاهش جمع‌شدگی شود. عامل دیگر، تأثیر نسبت مولی  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Na}_2\text{O}$  در محلول فعال‌کننده قلیایی می‌باشد. مطابق پژوهش‌های قبلی هرچه قدر این نسبت بیشتر باشد مقدار جمع‌شدگی نیز بیشتر می‌شود [۳۳]. این نسبت در طرح

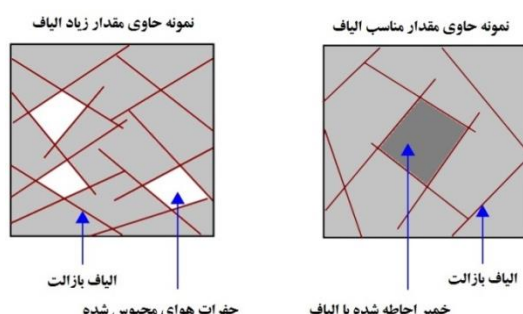
افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه بدون الیاف نداشت. مقاومت فشاری نمونه GP-0.50 در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب به مقادیر ۵۱/۳، ۶۹/۴ و ۸۶/۱ مگاپاسکال رسید که ۱۱، ۸ و ۶ درصد از نمونه ملات بدون الیاف بیشتر بود. در حالی که در نمونه GP-0.75 مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۱۱/۵، ۵ و ۶ درصد نسبت به نمونه GP-0 کاهش یافتند.

شکل ۸، مقاومت فشاری نمونه‌های ملات الیافی و بدون الیاف، عمل آوری شده در دمای محیط آزمایشگاه را در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز و همچنین مقاومت خمشی آن‌ها را در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد. مطابق این شکل، همه نمونه‌ها در سن ۷ روز به مقاومت فشاری بیش از ۴۰ مگاپاسکال رسیدند. دستیابی به مقاومت فشاری بالا در سنین پایین از ویژگی‌های ملات‌های ژئوپلیمری است [۲]. افزودن ۰/۲۵ درصد الیاف بازالت تأثیر چندانی در



شکل ۸- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

هوای محبوس شده سبب می‌شود که از مقاومت فشاری ملات کاسته شود [۳۴].

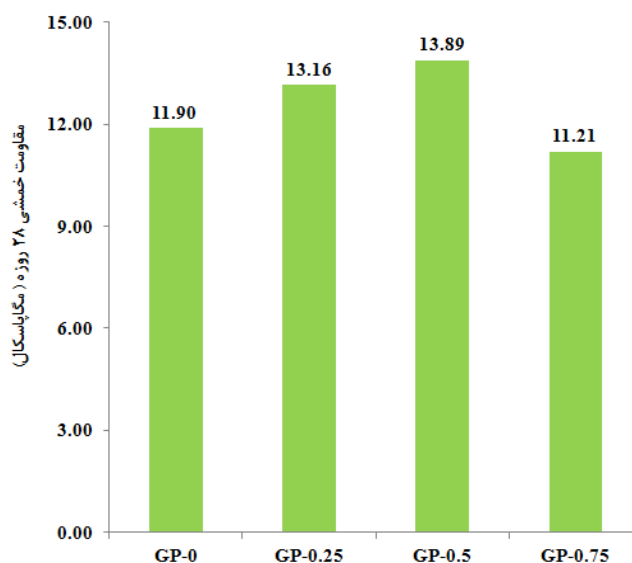


شکل ۹- تأثیر مقدار الیاف بر ساختار خمیر ژئوپلیمر

مطابق شکل ۱۰، بیشترین مقاومت خمشی در نمونه GP-0.50 مشاهده شد که ۱۶/۸ درصد بیشتر از نمونه بدون الیاف بود. مقاومت خمشی نیز در نمونه GP-0.75، ۵/۹ درصد نسبت به نمونه بدون الیاف کاهش داشت که هم راستا با رفتار این نمونه در آزمایش فشاری

افزایش مقاومت فشاری در نمونه GP-0.50 و کاهش مقاومت فشاری در نمونه GP-0.75 نسبت به نمونه بدون الیاف را می‌توان در مقدار درصد الیاف موجود در طرح مخلوط دانست. مطابق شکل ۹، در صورتی که مقدار درصد الیاف بازالت در ماتریس ژئوپلیمر مناسب باشد، نوعی محدودشوندگی توسط الیاف در خمیر ژئوپلیمر ایجاد می‌شود. بنابراین الیاف می‌تواند مانع از گسترش ترک در ماتریس شود و به عبارتی به انرژی بیشتری برای شکستن خمیر و از بین بردن باند بین الیاف و ماتریس ژئوپلیمر احتیاج است. در حالی که افزایش بیشتر الیاف در ماتریس ملات، مانع تراکم مناسب آن می‌گردد. تراکم نامناسب باعث ایجاد حفرات هوا و محبوس ماندن آن در ساختار ملات می‌شود. وجود حفرات

سانتی‌گراد، به مدت زمان ۶۰ و ۹۰ دقیقه و نیز در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۹۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حرارت بالا سبب نوعی رنگ‌پریدگی در همه نمونه‌ها شد. رنگ نمونه‌های ملات در دمای محیط، قهوه‌ای تیره بود که پس از قرارگیری در حرارت از شدت آن کاسته شد. هیچگونه پوسته‌اندازی، شکستگی و تکه‌تکه شدن در نمونه‌ها مشاهده نگردید. همه نمونه‌ها در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد از لحاظ ابعادی پایدار بودند و ترک چشمی در آن‌ها مشاهده نشد.



شکل ۱۰- مقاومت خمشی نمونه‌های ملات در سن ۲۸ روز

نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض حرارت، کاهش جرم داشتند. کاهش جرم نمونه‌ها در اثر تبخیر شدن آب موجود در طرح مخلوط ملات، شامل آب موجود در مواد فعال‌کننده، رطوبت سنگدانه‌ها و نیز رطوبت گل سرخ بود. در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰ دقیقه نمونه بدون الیاف ۸/۲ درصد و نمونه‌های الیافی به ترتیب ۷/۸، ۷/۱ و ۸/۰ درصد کاهش جرم داشتند. با افزایش مدت زمان حرارت به ۹۰ دقیقه، کاهش جرم نمونه‌ها بیشتر شد به طوری که جرم نمونه بدون الیاف ۸/۴ درصد و جرم نمونه‌های الیافی به ترتیب ۷/۹، ۷/۲ و ۸/۱ درصد کاهش یافتند. در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۹۰ دقیقه، نمونه‌ها کاهش جرم بیشتری را تجربه کردند

بود. با توجه به این‌که نمونه GP-0.50 بیشترین مقاومت فشاری و خمشی را در بین نمونه‌ها داشت، از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین درصد الیاف بازالت برای ملات‌های حاوی ۲۰ درصد گل سرخ و ۸۰ درصد روبره کوره آهن‌گدازی، ۰/۵ درصد می‌باشد.

### ۳-۳- وضعیت ظاهری و کاهش جرم نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض حرارت

شکل ۱۱، وضعیت ظاهری نمونه‌ها را در دمای محیط و پس از قرارگیری در معرض دمای ۶۰۰ درجه

افزایش مدت زمان حرارت از ۶۰ دقیقه به ۹۰ دقیقه نیز تأثیری در وضعیت نمونه‌ها نداشت و همچنان ترک چشمی در آن‌ها رویت نشد. ولی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، مطابق شکل ۱۲، ترک‌های ریز چشمی متعدد و به هم پیوسته‌ای در سطوح نمونه بدون الیاف و نمونه GP-0.25 ایجاد گردید. در حالی‌که چنین ترک‌هایی در نمونه‌های GP-0.50 و GP-0.75 مشاهده نشد. در دمای بالا الیاف بازالت توانسته با اثر پل‌زدگی سبب به هم پیوستگی میکروساختار ملات شود و از ایجاد و گسترش ترک در ملات جلوگیری نماید.

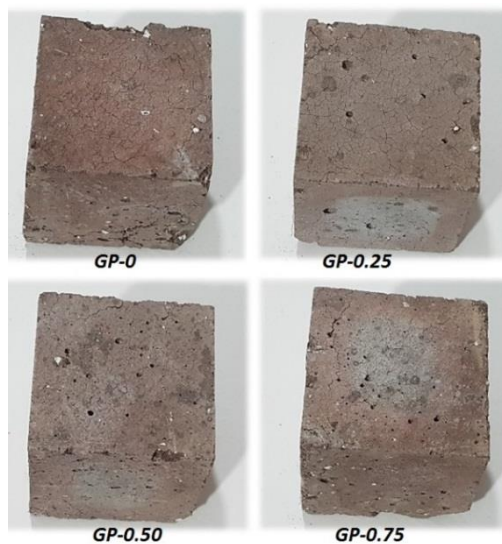
شکل ۱۳، مقدار کاهش جرم نمونه‌ها را پس از قرارگیری در معرض سه رژیم حرارتی نشان می‌دهد. همه

یافتند.

به طوری که جرم نمونه بدون الیاف ۹/۶ درصد و جرم نمونه‌های الیافی به ترتیب ۸/۹، ۸/۴ و ۹/۲ درصد کاهش

دمای محیط	دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۶۰ دقیقه	دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۹۰ دقیقه		
			GP-0	
			GP-0.25	
			GP-0.50	
			GP-0.75	

شکل ۱۱- وضعیت ظاهری نمونه‌های الیافی و بدون الیاف در دمای محیط و پس از قرارگیری در معرض حرارت

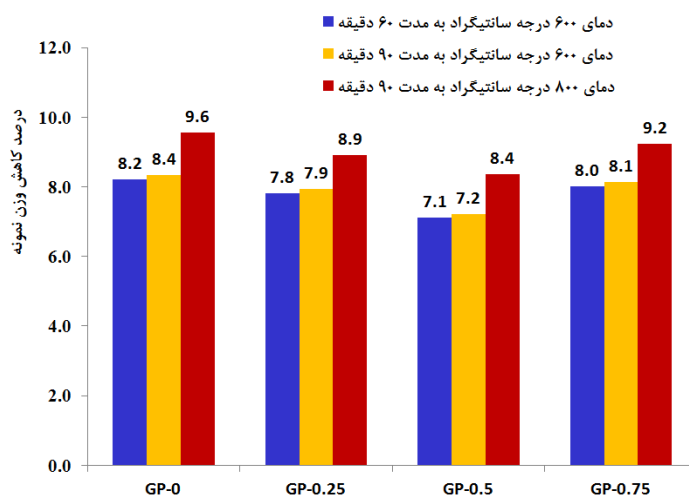


شکل ۱۲- وضعیت ظاهری سطح نمونه‌ها پس از قرارگیری در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۹۰ دقیقه

بیشتری در کاهش جرم نمونه‌ها داشت. همچنین بالا رفتن درجه حرارت از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۸۰۰

به عبارتی افزایش درجه حرارت از ۶۰۰ درجه به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با افزایش زمان قرارگیری در معرض حرارت از ۶۰ به ۹۰ دقیقه تأثیر

درجه سانتی‌گراد سبب گسترش ترک‌های میکرو در نمونه و تبدیل آن‌ها به ماکروتک شد [۱۸].



شکل ۱۳- درصد کاهش جرم نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض حرارت

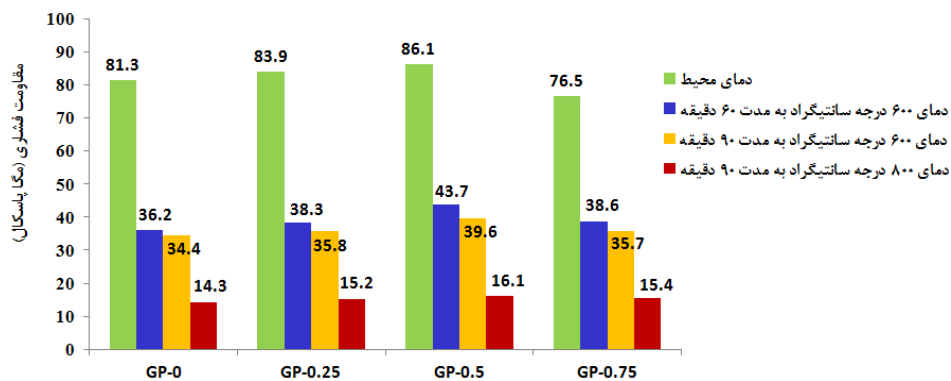
مقاومت فشاری نمونه بدون الیاف ۵/۰ درصد دیگر کاهش یافت، ولی این کاهش مقاومت در نمونه‌های الیافی بیشتر بود. بیشترین کاهش مقاومت فشاری در نمونه GP-0.50 و به مقدار ۹/۴ درصد بود. در واقع افزایش مدت زمان قرارگیری در معرض حرارت سبب می‌شود که الیاف، خاصیت پل‌زدگی و چسبندگی خود در ماتریس ملات را از دست بدهد و این می‌تواند نرخ کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌ها را افزایش دهد [۱۸].

نمونه بدون الیاف پس از قرارگیری در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۹۰ دقیقه، ۸۲/۴ درصد مقاومت فشاری خود را از دست داد. مقاومت فشاری همه نمونه‌های الیافی در این دما بیشتر از نمونه بدون الیاف بود. به عبارتی افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت نمونه‌های ملات ژئوپلیمری در برابر حرارت شد. بیشترین مقاومت فشاری در نمونه GP-0.50 مشاهده شد که این مقدار ۱۲/۶ درصد بیشتر از مقاومت فشاری نمونه بدون الیاف در این دما بود. علاوه بر این مشاهده شد که مقاومت فشاری نمونه GP-0.75 که در دمای محیط حتی از نمونه بدون الیاف نیز کمتر بود پس از قرارگیری در برابر حرارت، مقاومت فشاری بهتری از خود نشان داد به طوری که در هر سه رژیم حرارتی، مقاومت فشاری این نمونه از نمونه بدون الیاف بیشتر بود.

### ۳-۴- مقاومت فشاری باقیمانده نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض حرارت بالا

مطابق شکل ۱۴، مقاومت فشاری همه نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض حرارت به شدت کاهش یافت. در همه آزمایش‌های مقاومت در برابر حرارت، کمترین مقاومت فشاری در نمونه بدون الیاف مشاهده شد در حالی که نمونه GP-0.50 بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان داد. مهم‌ترین عامل کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش درجه حرارت، تبخیر شدن آب موجود در ملات و خشک‌شدگی و جمع‌شدگی حرارتی در آن است که منجر به ایجاد ترک‌های میکرو و ماکرو در سطح تماس بین خمیر و سنگدانه می‌شود [۲۱].

قرارگیری در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰ دقیقه سبب شد تا نمونه بدون الیاف ۵۵/۵ درصد مقاومت خود را از دست بدهد، در حالی که این کاهش مقاومت در نمونه GP-0.50، ۴۹/۲ درصد بود. به عبارتی، نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف در این دما ۵۱/۸ درصد از مقاومت خود را همچنان حفظ نمود. در واقع وجود الیاف توانست سبب بهبود میکرو ساختار ملات شود و انسجام آن را در حرارت بالا افزایش دهد. افزایش مدت زمان حرارت از ۶۰ دقیقه به ۹۰ دقیقه سبب شد تا مقاومت فشاری نمونه‌ها باز هم کاهش یابد، به طوری که



شکل ۱۴- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری قبل و پس از قرارگیری در معرض حرارت

ترتیب ۱/۷ و ۰/۷ درصد بود. مقاومت خمشی همه نمونه‌های الیافی در این دما بیشتر از نمونه بدون الیاف بود.

قرارگیری در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۹۰ دقیقه سبب شد تا نمونه بدون الیاف، ۹۵/۳ درصد مقاومت خمشی خود را از دست بدهد. بیشترین مقاومت خمشی (۲/۸۳ مگاپاسکال)، در نمونه GP-0.50 مشاهده شد. مقاومت خمشی این نمونه ۲۰/۹ درصد بیشتر از نمونه بدون الیاف در این دما بود. علاوه بر این هم‌راستا با نتایج مقاومت فشاری مشاهده شد که نمونه GP-0.75 که در دمای محیط کمترین مقاومت خمشی را در بین همه نمونه‌ها داشت در دمای بالا مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه بدون الیاف و نمونه GP-0.50 از خود نشان دهد. در واقع، حضور الیاف بیشتر در ملات، مانع از گسترش و رشد ترک‌ها در ناحیه کششی می‌شود و این عامل می‌تواند به مقاومت خمشی نمونه کمک نماید.

#### ۴-۶- آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD)

شکل ۱۶، نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) را روی نمونه‌های ژئوپلیمری در دمای محیط و پس از قرارگیری در معرض درجه حرارت ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه را نشان می‌دهد. مواد اصلی در ساختار ملات ژئوپلیمری بر پایه روباره کوره آهن‌گدازی و گل سرخ در دمای محیط شامل آل‌بیت  $(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2)$ ، کوارتز  $(\text{SiO}_2)$ ، دی‌پوسید  $(\text{CaMgSi}_2\text{O}_6)$  و کلسیت  $(\text{CaCO}_3)$  بود. در این دما،

#### ۳-۵- مقاومت خمشی باقیمانده نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض حرارت بالا

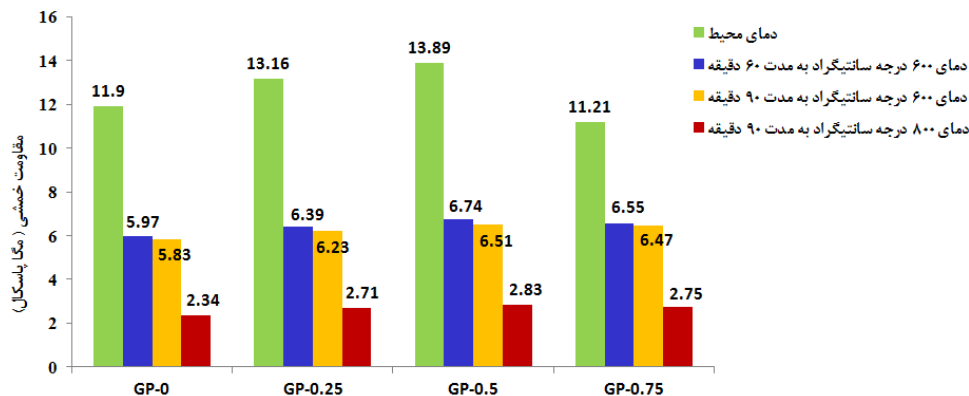
شکل ۱۵، مقاومت خمشی نمونه‌ها را قبل و پس از قرارگیری در معرض حرارت نشان می‌دهد. حرارت بالا سبب شد تا همانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز به شدت کاهش یابد. در هر سه رژیم حرارتی، مقاومت خمشی نمونه بدون الیاف کمتر از مقاومت خمشی نمونه‌های الیافی بود. به عبارتی الیاف بازالت می‌تواند با استفاده از خاصیت پل‌زدگی خود ترک‌های سریع و کنترل‌نشده را محدود نمایند و مانع از گسترش آن‌ها در ملات شوند و به این طریق انسجام بیشتری در ساختار آن ایجاد نماید.

نمونه بدون الیاف پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰ دقیقه، ۴۹/۸ درصد از مقاومت خمشی خود را از دست داد. این کاهش مقاومت در نمونه‌های الیافی GP-0.25، GP-0.50 و GP-0.75 به ترتیب ۵۱/۴، ۵۱/۵ و ۴۱/۶ درصد بود. علت کاهش کمتر مقاومت خمشی در نمونه GP-0.75 را می‌توان در میزان الیاف بیشتر در این نمونه دانست. با این حال، بیشترین مقاومت خمشی (۶/۷۴ مگاپاسکال)، در نمونه GP-0.50 مشاهده شد که ۱۲/۹ درصد بیشتر از نمونه بدون الیاف بود. افزایش مدت زمان حرارت از ۶۰ دقیقه به ۹۰ دقیقه، سبب کاهش بیشتر مقاومت خمشی نمونه‌ها شد. این کاهش مقاومت در نمونه بدون الیاف و نمونه GP-0.25، ۱/۲ درصد و در GP-0.50 و GP-0.75 به

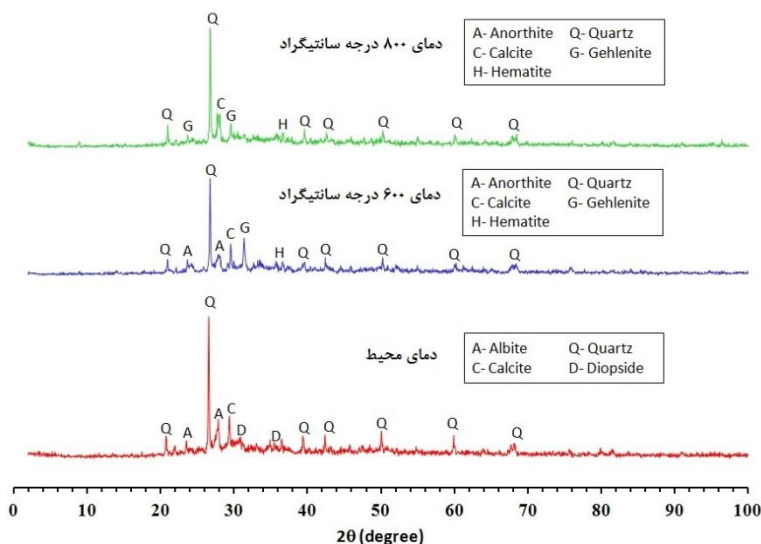


آن است. این ژل نقش اصلی در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و تکامل مقاومتی ملات‌های ژئوپلیمری بر پایه روباره کوره آهن‌گدازی را دارد.

یک قله پهن و عریض در زوایای  $2\theta$  بین ۲۰ تا ۴۰ درجه مشاهده شد که بیانگر وجود شبکه آمورف در ملات ژئوپلیمر است و همچنین مبین وجود ژل کلسیم-آلومینیوم-سیلیکات-هیدرات (C-A-S-H) در ساختار



شکل ۱۵- مقاومت خمشی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری قبل و پس از قرارگیری در معرض حرارت



شکل ۱۶- آزمایش طیف سنجی XRD روی نمونه‌های ملات در دمای محیط و پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد

شده که در زوایای ( $2\theta$ ) ۱۶، ۱۷، ۳۳، ۴۴، ۴۷، ۵۴ و نیز ۶۲، ۷۲ و ۷۶ درجه، ژلنیت با شدت کمتر ولی به طور منظم ظاهر شد.

ژلنیت یک فاز کریستالی است که تحت اثر حرارت بالا از واکنش اکسید کلسیم (CaO) آزاد با دی‌اکسید سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) و اکسید آلومینیوم ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ایجاد می‌شود [۲۱]. افزایش درجه حرارت از ۶۰۰ به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به تدریج باعث از بین رفتن شبکه آمورف ژئوپلیمر شد و در مقابل، سبب ظهور یک ساختار منظم کریستالی از ژلنیت با شدت کم در آن شد. ایجاد

همان‌طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، همچنان در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، کلسیت و کوارتز در ساختار ملات وجود داشت ولی به جای آلنیت در زوایای ( $2\theta$ ) ۲۳/۵ درجه و ۲۷/۹ درجه، آنورتیت در جایگزین شد. همچنین دیوپسیت در زوایای ( $2\theta$ ) ۳۱/۲ درجه و ۳۵/۵ درجه، جای خود را به ترتیب به ژلنیت ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ) و هماتیت ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) داد. در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد آنریت در زوایای ( $2\theta$ ) ۲۳/۶ درجه و ۲۷/۷ درجه حذف شد و ژلنیت در زاویه ( $2\theta$ ) ۲۸/۸ درجه نیز ظاهر شد. علاوه بر این مشاهده



گسترش ترک در ملات جلوگیری نماید. از این رو، نمونه‌های ملات ژئوپلیمری الیافی در درجه حرارت‌های بالا، مقاومت‌های فشاری و خمشی بیشتری نسبت به نمونه بدون الیاف دارند.

۵- درجه حرارت بالا سبب تغییر فاز آمورف ملات ژئوپلیمر به فاز کریستالی می‌شود. افزایش درجه حرارت از ۶۰۰ به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب تشکیل یک ساختار منظم کریستالی از ژلنیت در ساختار ژئوپلیمر می‌شود. تشکیل فاز کریستالی سبب کاهش مقاومت فشاری و خمشی ملات در این دما می‌شود.

۶- ملات الیافی ژئوپلیمری حاوی ۰/۵ درصد الیاف بازالت با داشتن ویژگی‌هایی همچون زمان گیرش مناسب، مقاومت فشاری اولیه و نهایی بسیار بالا و همچنین داشتن مقاومت باقیمانده بالا پس از قرار گیری در حرارت‌های بالا، می‌تواند به عنوان یک ملات محافظتی و یا یک لایه ترمیمی در سازه‌های مقاوم در برابر آتش استفاده شود و عملکرد آن‌ها را در برابر حریق افزایش دهد.

۷- استفاده از ضایعات کارخانه‌های آلومینیوم و فولاد به عنوان ماده پایه و فعال‌سازی آن‌ها توسط محلول سود با مولاریته پایین و نیز مصرف کم آب شیشه در طرح مخلوط، نه تنها از لحاظ محیط‌زیستی بسیار اهمیت دارد؛ بلکه از لحاظ اقتصادی نیز می‌تواند یک قدم مؤثر و رو به جلو برای تولید ملات‌های ژئوپلیمری با هزینه‌های مالی کمتر باشد. همچنین ملات بررسی شده در این تحقیق می‌تواند به عنوان یک ملات تعمیراتی و حفاظتی مقاوم در برابر آتش در انواع سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار گیرد.

۸- بررسی تأثیر آب به مواد پایه در طرح مخلوط و دوام درازمدت نمونه‌های ملات پس از قرارگیری در معرض درجه حرارت‌های بالا به عنوان موضوعات آزمایشگاهی آتی پیشنهاد می‌شود.

فاز کریستالی تأثیر منفی روی مشخصات مکانیکی ملات ژئوپلیمری دارد و سبب می‌شود تا مقاومت فشاری و خمشی ملات در درجه حرارت‌های بالا به شدت کاهش یابد.

#### ۴- نتیجه گیری

براساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و نیز بحث و بررسی‌های ارائه شده مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

۱- افزودن الیاف بازالت به ملات ژئوپلیمری اگرچه سبب کاهش روانی و زمان گیرش اولیه و نهایی آن می‌شود ولی می‌تواند به نحو مؤثری مشکل جمع‌شدگی خشک ملات‌های ژئوپلیمری را رفع نماید.

۲- استفاده از الیاف بازالت تا مقدار ۰/۵ درصد در ملات ژئوپلیمری تأثیر مثبت روی مقاومت‌های فشاری و خمشی در دمای محیط دارد. در حالی که استفاده بیشتر از این مقدار سبب تراکم نامناسب ملات و ایجاد حفرات هوا در ساختار آن می‌شود و روی مقاومت فشاری و مقاومت خمشی تأثیر منفی دارد.

۳- نمونه‌های ملات ژئوپلیمری بدون الیاف و حاوی الیاف بازالت تحت اثر درجه حرارت ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد پایداری ابعادی خود را حفظ می‌کنند و دچار پوسته‌اندازی نمی‌شوند و فقط نوعی کاهش شدت رنگ یا رنگ‌پریدگی در شکل ظاهری آن‌ها ایجاد می‌شود. حرارت بالا سبب تبخیر شدن رطوبت موجود در نمونه‌ها، کاهش جرم و در نتیجه کاهش شدید مقاومت فشاری و خمشی در آن‌ها می‌شود.

۴- از آن جا که الیاف بازالت در برابر حرارت‌های بالا مقاوم است، بنابراین تحت اثر درجه حرارت بالا می‌تواند با خاصیت پل‌زدگی خود سبب انسجام و به هم پیوستگی ساختار ملات شود و از ایجاد و

همچون شبکه عصبی می‌تواند به عنوان موضوعات تحلیلی و آتی، بررسی و مدنظر قرار گیرد [۳۵ و ۳۶].

همچنین مقایسه نتایج مشخصات مکانیکی انواع ژئوپلیمرهای دوجزئی بر پایه روباره کوره آهن‌گدازی توسط سایر پژوهشگران با نتایج این مقاله و به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی

## References

- [1] Igliński B, Buczkowski R. Development of cement industry in Poland—History, current state, ecological aspects. A review. *Journal of cleaner production*. 2017 Jan 10; 141: 702-720. doi: **10.1016/j.jclepro.2016.09.139**
- [2] Belaid F. How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges?. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2022 Nov 1; 15: 200084. doi: **10.1016/j.rcradv.2022.200084**
- [3] Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*. 1991 Aug 1; 37(8): 1633-1656. doi: **10.1007/bf01912193**
- [4] Turner LK, Collins FG. Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and building materials*. 2013 Jun 1; 43: 125-130. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023**
- [5] Duan P, Yan C, Luo W. A novel waterproof, fast setting and high early strength repair material derived from metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2016 Oct 15; 124: 69-73. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2016.07.058**
- [6] Zhang W, Yao X, Yang T, Liu C, Zhang Z. Increasing mechanical strength and acid resistance of geopolymers by incorporating different siliceous materials. *Construction and Building Materials*. 2018 Jun 30; 175: 411-421. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2018.03.195**
- [7] Lahoti M, Tan KH, Yang EH. A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. *Construction and Building Materials*. 2019 Oct 10; 221: 514-26. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2019.06.076**
- [8] Albidah AS. Effect of partial replacement of geopolymer binder materials on the fresh and mechanical properties: a review. *Ceramics International*. 2021 Jun 1; 47(11): 14923-14943. doi: **10.1016/j.ceramint.2021.02.127**
- [9] Kumar A, Saravanan TJ, Bisht K, Kabeer KS. A review on the utilization of red mud for the production of geopolymer and alkali activated concrete. *Construction and Building Materials*. 2021 Oct 4; 302: 124170. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2021.124170**
- [10] Qaidi SM, Tayeh BA, Isleem HF, de Azevedo AR, Ahmed HU, 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*. 2022 Jun 1; 16: e00994. doi: **10.1016/j.cscm.2022.e00994**
- [11] Khairul MA, Zanganeh J, Moghtaderi B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019 Feb 1; 141: 483-498. doi: **10.1016/j.resconrec.2018.11.006**
- [12] Mayes WM, Burke IT, Gomes HI, Anton AD, Molnár M, Feigl V, Ujaczki É. Advances in understanding environmental risks of red mud after the Ajka spill, Hungary. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016 Dec; 2: 332-343. doi: **10.1007/s40831-016-0050-z**
- [13] Mastali M, Kinnunen P, Dalvand A, Firouz RM, Illikainen M. Drying shrinkage in alkali-activated binders—a critical review. *Construction and Building Materials*. 2018 Nov 30; 190: 533-550. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2018.09.125**
- [14] Ansari MA, Shariq M, Mahdi F. Influence of fibres characteristics on the engineering properties of geopolymer concrete—a review. *Materials Today: Proceedings*. 2023 Jun 20; 2214-7853. doi: **10.1016/j.matpr.2023.06.119**
- [15] Ralegaonkar R, Gavali H, Aswath P, Abolmaali S. Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review. *Construction and Building Materials*. 2018 Mar 10; 164: 589-602. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2017.12.245**
- [16] Zhang HY, Kodur V, Qi SL, Cao L, Wu B. Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications. *Construction and Building Materials*. 2014 Mar 31; 55: 38-45. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2014.01.040**
- [17] Lahoti M, Tan KH, Yang EH. A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. *Construction and Building Materials*. 2019 Oct 10; 221: 514-26. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2019.06.076**

- [18] Guler S, Akbulut ZF. Effect of high-temperature on the behavior of single and hybrid glass and basalt fiber added geopolymer cement mortars. *Journal of Building Engineering*. 2022 Oct 1; 57: 104809. **doi: 10.1016/j.jobe.2022.104809**
- [19] Zhang HY, Qiu GH, Kodur V, Yuan ZS. Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure. *Cement and Concrete Composites*. 2020 Feb 1; 106: 103483. **doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103483**
- [20] Chen S, Ruan S, Zeng Q, Liu Y, Zhang M, Tian Y, Yan D. Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review. *Construction and Building Materials*. 2022 Apr 18; 328: 127064. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127064**
- [21] Aziz IH, Abdullah MM, Heah CY, Liew YM. Behaviour changes of ground granulated blast furnace slag geopolymers at high temperature. *Advances in Cement Research*. 2020 Oct; 32(10): 465-475. **doi: 10.1680/jadcr.18.00162**
- [22] Albidah AS. Effect of partial replacement of geopolymer binder materials on the fresh and mechanical properties: a review. *Ceramics International*. 2021 Jun 1; 47(11): 14923-43. **doi: 10.1016/j.ceramint.2021.02.127**
- [23] Reddy MS, Dinakar P, Rao BH. A review of the influence of source material's oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2016 Nov 1; 234: 12-23. **doi: 10.1016/j.micromeso.2016.07.005**
- [24] Zhang P, Zheng Y, Wang K, Zhang J. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B: Engineering*. 2018 Nov 1; 152: 79-95. **doi: 10.1016/j.compositesb.2018.06.031**
- [25] Huseien GF, Mirza J, Ismail M, Ghoshal SK, Hussein AA. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Dec 1; 80: 54-74. **doi: 10.1016/j.rser.2017.05.076**
- [26] Bayat A, Hassani A, Yousefi AA. Effects of red mud on the properties of fresh and hardened alkali-activated slag paste and mortar. *Construction and Building Materials*. 2018 Apr 10; 167: 775-90. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.105**
- [27] Wang C, Li Z, Zhou Z, Gao Y, Zhang J. Compatibility of different fibres with red mud-based geopolymer grouts. *Construction and Building Materials*. 2022 Jan 10; 315: 125742. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125742**
- [28] Tian K, Wang Y, Dong B, Fang G, Xing F. Engineering and micro-properties of alkali-activated slag pastes with Bayer red mud. *Construction and Building Materials*. 2022 Oct 10; 351: 128869. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128869**
- [29] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JS. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*. 2007 May; 42: 2917-33. **doi: 10.1007/s10853-006-0637-z**
- [30] Provis JL, Van Deventer JS, editors. Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM. Springer Science & Business Media; 2013 Nov 19.
- [31] Punurai W, Kroehong W, Saptamongkol A, Chindapasirt P. Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste. *Construction and Building Materials*. 2018 Oct 20; 186: 62-70. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.115**
- [32] Chen W, Xie Y, Li B, Wang J, Thom N. Role of aggregate and fibre in strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*. 2021 Sep 13; 299: 124002. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124002**
- [33] Riahi S, Nemati A, Khodabandeh AR, Baghshahi S. The effect of mixing molar ratios and sand particles on microstructure and mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Materials Chemistry and Physics*. 2020 Jan 15; 240: 122223. **doi:10.1016/j.matchemphys.2019.122223**
- [34] Ranjbar N, Zhang M. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2020 Mar 1; 107: 103498. **doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103498**
- [35] Hosseini P, Kaveh A, Naghian A. The use of artificial neural networks and metaheuristic algorithms to optimize the compressive strength of concrete. *Int. J. Optim. Civil Eng*. 2023 Jul 10; 13(3): 327-338.
- [36] Hosseini P, Kaveh A, Naghian A. Development and optimization of self-compacting concrete mixes: Insights from artificial neural networks and computational approaches. *Int. J. Optim. Civil Eng*. 2023 Oct 10; 13(4): 457-476.