

Evaluation of the laterite powder-based geopolymer mortar samples reinforced with glass fibers

Yaser Marabi¹, Ali Reza Bagherieh^{2*}, Hadi Rezghi Maleki³, Ahmad Fahmi⁴

1- PhD Student in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer, Hamadan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer, Hamadan, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bonab University, Bonab, East Azerbaijan, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bonab University, Bonab, East Azerbaijan, Iran

ABSTRACT

Today, the production of high-quality construction materials with low production costs is one of the needs of the construction industry. By using geopolymerization technology, it is possible to produce construction materials such as mortar, concrete, and geopolymer bricks with high mechanical strength and desirable quality. One of the aluminosilicate minerals that can be used to produce geopolymeric adhesive material is laterite. To improve the mechanical strength, durability, and physical characteristics of the geopolymer product, its reinforcement using different fibers such as glass fibers has been considered by various researchers. In the current research, using laboratory tests, the effect of reinforcing geopolymer mortar based on laterite powder using glass fibers was studied. The alkaline solution containing 6, 10, and 14 M sodium hydroxide was used to make samples of geopolymer mortar with laterite powder, without and containing glass fibers after 5 minutes of complete mixing. The samples were poured into 50 × 50 × 50 mm wooden molds and 40 × 40 × 160 mm prism molds and vibrated on a vibrating machine. After processing for 3 days in the greenhouse, the compressive and bending strength of the geopolymer samples as well as the water absorption percentage of the samples were measured. The results showed that the concentration of activating solution and glass fibers has a significant effect on the compressive and bending strength of geopolymer samples based on laterite powder with glass fibers. According to the obtained results, the increase in 3, 7, and 28 days compressive strength of geopolymer samples containing fibers varies between 10.9 and 47% compared to geopolymer samples without fibers. According to the results of this research, it is recommended to make geopolymer building materials based on laterite powder containing glass fibers with relatively high strength.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 August 2022

Revise Date: 19 October 2022

Accept Date: 26 November 2022

Keywords:

Geopolymer Mortar

Laterite Powder

Glass Fibers

Alkaline Activator Mechanical Strength

Water Absorption Percentage

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.344995.2834>

*Corresponding author: Ali Reza Bagherieh.

Email address: bagheri@malayeru.ac.ir

ارزیابی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری بر پایه پودر لاتریت مسلح شده با الیاف شیشه

یاسر مارابی^۱، علیرضا باقریه^{۲*}، هادی رزقی ملکی^۳، احمد فهیمی^۴

۱- دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی، ایران

چکیده

تولید مصالح ساختمانی با کیفیت بالا و هزینه تولید پایین، یکی از نیازهای صنعت ساخت و ساز در عصر حاضر است. با بهره‌گیری از فناوری ژئوپلیمریزاسیون، امکان تولید مصالح ساختمانی دوستدار محیط زیست مانند ملات، بتن و آجر ژئوپلیمری با مقاومت مکانیکی بالا و کیفیت مطلوب فراهم شده است. یکی از مواد معدنی آلومینوسیلیکاتی قابل استفاده برای تولید ماده چسبنده ژئوپلیمری، لاتریت می‌باشد. برای بهبود هرچه بهتر مقاومت مکانیکی، دوام و مشخصات فیزیکی فرآورده ژئوپلیمری، تسلیح آن با استفاده از الیاف مختلف مانند الیاف شیشه نیز مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است. در پژوهش حاضر با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی، تأثیر تسلیح ملات ژئوپلیمری بر پایه پودر لاتریت با استفاده از الیاف شیشه مورد مطالعه قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های ملات ژئوپلیمری با پودر لاتریت، فاقد و حاوی الیاف شیشه از محلول قلیایی حاوی سدیم هیدرواکسید ۶، ۱۰ و ۱۴ مولار استفاده شد نمونه‌ها پس از ۵ دقیقه اختلاط کامل در درون قالب‌های ۵۰×۵۰×۵۰ میلیمتر چوبی و قالب‌های منشوری ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلیمتر ریخته شده و بر روی دستگاه لرزان وایبره زده شد. پس از عمل‌آوری به مدت ۳ روز در گرمخانه، مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های ژئوپلیمری و همچنین درصد جذب آب نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که غلظت محلول فعال‌کننده و الیاف شیشه تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های ژئوپلیمری بر پایه پودر لاتریت با الیاف شیشه دارد. طبق نتایج به دست آمده، افزایش مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های ژئوپلیمری فاقد الیاف بین ۱۰/۹ تا ۴۷ درصد متغیر است. طبق نتایج این تحقیق، ساخت مصالح ساختمانی ژئوپلیمری بر پایه پودر لاتریت حاوی الیاف شیشه با مقاومت نسبتاً بالا توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: ملات ژئوپلیمری، پودر لاتریت، الیاف شیشه، فعال‌کننده قلیایی، مقاومت مکانیکی، درصد جذب آب

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.344995.2834	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.344995.2834	۱۴۰۲/۰۶/۳۱	۱۴۰۱/۰۹/۰۵	۱۴۰۱/۰۹/۰۵	۱۴۰۱/۰۷/۲۷	۱۴۰۱/۰۵/۳۰
				علیرضا باقریه	*نویسنده مسئول:	
				bagheri@malayeru.ac.ir	پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در پیدایش فناوری ژئوپلیمر، غالباً از کاتولینیت برای ساخت ژئوپلیمرها استفاده می‌شد. اما با پیشرفت فناوری ژئوپلیمر، سایر منابع آلومینوسیلیکات مانند خاک رس کلسینه شده، لاتریت و همچنین منابع آلومینوسیلیکاتی حاصل از نخاله‌های ساختمانی و ضایعات مانند، خاکستر بادی، سرباره و پودر آجر و بتن نیز برای تولید مصالح ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از مواد ژئوپلیمری در تولید مصالح ساختمانی، می‌تواند به توسعه صنعت ساخت و ساز از نظر تولید مواد کارآمدتر و سازگار با محیط زیست و کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید مصالح قدیمی، کمک می‌کند. در فرآیند تولید سیمان پرتلند حجم عظیمی از گازهای CO₂ آزاد شده که مخاطرات زیست‌محیطی جدی به دنبال دارد. جایگزینی سیمان‌های دوستدار محیط زیست مانند سیمان ژئوپلیمری به جای (بخشی از) سیمان پرتلند باعث کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای شده و کاهش مخاطرات مربوطه می‌شود [۱-۳]. برای ساخت ژئوپلیمرها از مواد پایه آلومینوسیلیکات طبیعی و محلول‌های قلیایی (مانند سدیم هیدرواکسید و سیلیکات سدیم) استفاده می‌شود. مواد پایه آلومینوسیلیکات از منابع طبیعی مانند خاکسترها آتشفشانی، کاتولینیت و لاتریت و همچنین از ضایعات و پسماندهای مختلف صنعتی و ساختمانی مانند ضایعات آجر، خاکستر بادی و سرباره کوره قابل تأمین است [۴-۸]. مقاومت مکانیکی بالا، دوام بالا در برابر اسید، آتش و شرایط محیطی مختلف و تبادل حرارتی پایین از مزایای مصالح ساختمانی ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده از سیمان ژئوپلیمری می‌باشد. از این میان، استفاده از ماده معدنی لاتریت به عنوان یک مصالح پوزولانی آلومینوسیلیکاتی غنی از آهن، پتانسیل بالایی برای ساخت مصالح ژئوپلیمری با مقاومت مکانیکی بالا و دوام مطلوب دارد [۹-۱۲]. استفاده از منابع پوزولانی مختلف توسط محققین برای بهبود مقاومت مکانیکی و کاهش درصد جذب آب نمونه‌های بتن هوادار اتوکلاو شده و نمونه‌های ملات سیمانی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۳-۱۵]. بتن و فرآورده‌های ژئوپلیمری مقاومت کششی بالاتری در مقایسه با بتن‌های معمولی (ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند معمولی) دارند. استفاده از الیاف در خود بتن‌های ژئوپلیمری نیز باعث افزایش بیش از پیش مقاومت کششی و خمشی آن می‌شود. الیاف با انواع و اشکال مختلف و با هدف تقویت کامپوزیت‌های ژئوپلیمری برای افزایش مقاومت خمشی و جذب انرژی استفاده می‌شوند [۱۶]. معمولاً خواص مواد الیاف در تغییر عملکرد کامپوزیت ژئوپلیمری مسلح شده با الیاف بسیار تاثیرگذار می‌باشد. به عنوان مثال، مستقل از نوع چسباننده، الیاف پلی پروپیلن به دلیل برهمکنش ضعیف الیاف-چسباننده مقاومت فشاری کامپوزیت تسلیح شده با الیاف را کاهش می‌دهد [۱۷، ۱۸].

استفاده از الیاف شیشه نیز در تسلیح انواع مختلف بتن ژئوپلیمری (بر پایه خاکستر بادی و غیره) باعث افزایش مقاومت مکانیکی، افزایش شکل‌پذیری، افزایش دانسیته و کاهش کارایی آن می‌شود [۱۹، ۲۰]. در بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکاؤلن نیز استفاده از الیاف شیشه باعث بهبود شکل‌پذیری شده و الیاف با طول ۶ میلیمتر و دوز جرمی ۰/۳٪ به عنوان مقادیر بهینه بدست آمد. همچنین در بتن ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده از الیاف شیشه در صورت لرزاندن نمونه در هنگام ساخت، باعث افزایش چقرمگی شکست همراه با مقاومت بهتر در برابر ترک خوردگی می‌شود [۲۱]. در پژوهشی دیگر مشخص شد که استفاده از الیاف شیشه در ملات ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی-سرباره تأثیر قابل توجهی در کاهش جمع‌شدگی دارد که بیشترین کاهش مربوط به استفاده از ۱/۵٪ الیاف شیشه می‌شود [۲۲]. استفاده از الیاف طبیعی مانند الیاف سیسال و الیاف نارگیل در مقایسه با الیاف شیشه برای تسلیح ملات ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی پرکلسیم باعث افزایش قابل توجه مقاومت کششی و خمشی می‌شود. لیکن در صورت استفاده از الیاف، مقادیر چگالی خشک، کارایی، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد [۲۳]. همچنین در پژوهش‌هایی دیگر استفاده از الیاف فلزی بازیافتی و پلی پروپیلن در بهبود مقاومت مکانیکی بتن مورد آریایی قرار گرفته است [۲۴، ۲۵]. در پژوهش حاضر، برای ارزیابی امکان تسلیح فرآورده ژئوپلیمری بر پایه پودر لاتریت با استفاده از الیاف شیشه و تأثیر آن در بهبود مقاومت فشاری و خمشی آن و همچنین درصد جذب آب، نمونه‌های مکعبی و منشوری ساخته شد. در ساخت نمونه‌ها، پودر لاتریت به عنوان منبع آلومینوسیلیکات و همچنین محلول قلیایی شامل سدیم هیدرواکسید و سیلیکات سدیم (آب شیشه) به عنوان فعال‌کننده قلیایی مورد استفاده قرار گرفت و از دو طرح اختلاط فاقد و حاوی الیاف شیشه استفاده شد. نمونه‌ها پس از آماده‌شدن در گرمخانه در دمای عمل‌آوری ۷۰ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند. سپس مقاومت فشاری، مقاومت

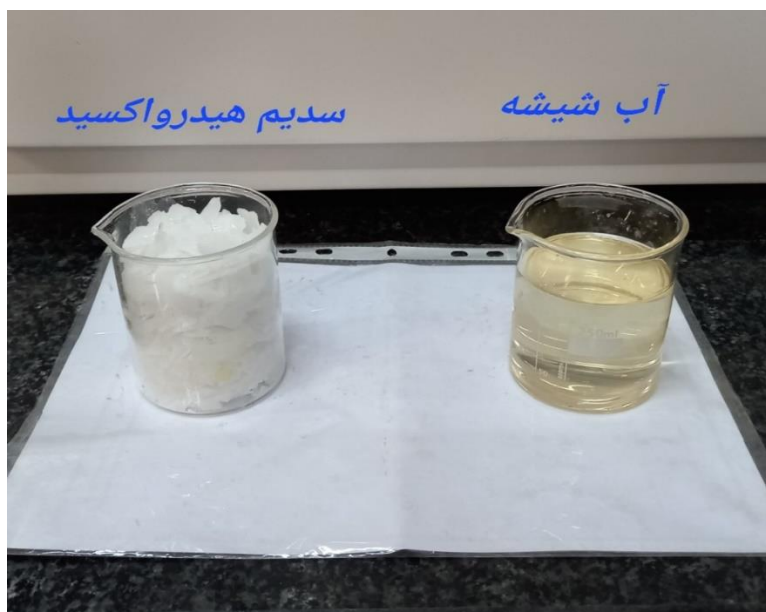
خمشی (روش بارگذاری ۳ نقطه) در سه سن ۷، ۳ و ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین درصد جذب آب نیم‌ساعته نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری شد. در خاتمه داده‌ها و نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و درصد جذب آب نمونه‌ها تحلیل شد.

۲- مواد و تجهیزات

برای ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری، از پودر سنگ لاتریت (تهیه شده از نهشته‌های معدن قاریاغدی میاندوآب) به عنوان مواد پایه آلومینوسیلیکات برای تهیه ماده چسبنده ژئوپلیمری و از الیاف شیشه به عنوان مسلح‌کننده استفاده شد. برای تهیه محلول فعال‌کننده قلیایی از سدیم هیدرواکسید (سود شرکت کلر پارس ۹۹٪) مطابق شکل ۱ و مشخصات آب شیشه صنعتی با نسبت ۲/۴ مطابق جدول ۱ و شکل ۱ استفاده شد. ترکیبات اکسیدی موجود در پودر سنگ لاتریت، بر اساس نتایج آنالیز XRF مطابق جدول ۲ می‌باشد. برای ساخت محلول قلیایی سدیم هیدرواکسید از آب شرب شهری استفاده شد. وسایل و تجهیزات مورد استفاده شده در این تحقیق شامل گرمخانه، پن‌میکسر، قالب چوبی مکعبی ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متری، قالب منشوری، ویبره و دستگاه ملات‌شکن است.

جدول ۱: مشخصات آب شیشه مورد استفاده

Ratio	2.4
Na ₂ O %	13-13.89
SiO ₂ %	31.2-33.33



شکل ۱: آب شیشه و سدیم هیدرواکسید مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری.

جدول ۲: ترکیب شیمیایی (ترکیبات اکسیدی) پودر سنگ لاتریت بر اساس آنالیز XRF

SO ₃ [^]	P ₂ O ₅ [^]	CaO [^]	MgO ^o	TiO ₂ ^ε	Fe ₂ O ₃ [^]	SiO ₂ [^]	Al ₂ O ₃ [^]
0.1	0.1	0.54	1.87	3.29	37.37	19.03	37.03

۳- روش‌ها

طرح اختلاط نمونه‌های ژئوپلیمری فاقد الیاف شیشه مطابق جدول ۳ و طرح اختلاط نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی الیاف مطابق جدول ۴ می‌باشد. ابتدا محلول فعال‌کننده قلیایی با مولاریته مشخص آماده شد. برای ساخت نمونه‌های ملات ژئوپلیمری با پودر لاتریت فاقد الیاف شیشه و حاوی الیاف شیشه از محلول سدیم هیدرواکسید ۶، ۱۰ و ۱۴ مولار استفاده شد. برای تهیه محلول فعال‌کننده قلیایی، نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ و ۲ انتخاب شد. به عنوان مثال نام G14-2 نشان‌دهنده استفاده از محلول سدیم هیدرواکسید ۱۴ مولار و نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید برابر با ۲ می‌باشد. به عنوان مثالی دیگر نام G6-1 نشان‌دهنده استفاده از محلول سدیم هیدرواکسید ۶ مولار و نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید برابر با ۱ می‌باشد. سنگ لاتریت در دستگاه سنگ‌شکن خرد شده و پودر سنگ لاتریت رد شده از الک استاندارد نمره ۳۰ (600μm) به عنوان ماده جامد پایه آلومینوسیلیکات مورد نیاز برای تهیه ماده چسبنده ژئوپلیمری انتخاب شد. همچنین در هر نمونه، نسبت وزنی الیاف شیشه به پودر لاتریت مصرفی ۵/۲۶ درصد انتخاب شد. سپس پودر لاتریت به همراه الیاف شیشه در ظرف پلاستیکی ریخته شده و محلول فعال‌کننده قلیایی به آرامی به آن افزوده شده و مخلوط شد.

سپس مصالح مذکور مطابق شکل ۲ در پن‌میکسر ریخته شده و پس از ۵ دقیقه اختلاط کامل در درون قالب‌های ۵۰×۵۰×۵۰ میلیمتر چوبی و قالب‌های منشوری ۴۰×۴۰×۱۶۰ میلیمتر ریخته شده و بر روی دستگاه لرزان ویبره زده شد. نمونه‌های ساخته شده (۹ نمونه مکعبی و ۹ نمونه منشوری فاقد الیاف مطابق جدول ۳ و ۹ نمونه مکعبی و ۹ نمونه منشوری حاوی الیاف مطابق جدول ۴ از هر طرح آزمایش) بعد از در آوردن قالب به مدت ۳ روز در گرمخانه با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شد. مواد اولیه مصرفی مورد نیاز برای ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری مطابق شکل ۳ می‌باشد. بعد از خروج نمونه‌ها از گرمخانه مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه‌ها در سن‌های مختلف اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ۳، ۷ و ۲۸ روزه توسط جک ملات‌شکن اندازه‌گیری شد. همچنین مقاومت خمشی نمونه‌های ژئوپلیمری ۳، ۷ و ۲۸ روزه توسط دستگاه تست خمش به روش بارگذاری ۳ نقطه‌ای اندازه‌گیری شد و میانگین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی سه نمونه محاسبه شد.

^۱ اکسید آلومینیوم یا آلومینا

^۲ اکسید سیلیس

^۳ همتایت

^۴ تیتانیوم دی‌اکسید

^۵ منیزیم اکسید

^۶ اکسید کلسیم

^۷ اسید فسفریک

^۸ تری اکسید گوگرد



شکل ۲: مواد خام اولیه پودر لاتریت با الیاف شیشه.



شکل ۳: فرآیند کلی ساخت نمونه‌های ملات ژئوپلیمری.

جدول ۳: برنامه آزمایش‌ها و طرح اختلاط نمونه‌های مکعبی و منشوری ملات ژئوپلیمری فاقد الیاف

ردیف	نام نمونه	نسبت فعال کننده به پوزولان	جرم مواد مصرفی (کیلوگرم بر متر مکعب)				تعداد نمونه‌های منشوری	تعداد نمونه‌های مکعبی
			پودر لاتریت	الیاف شیشه	سدیم هیدرواکسید محلول	آب شیشه		
۱	G 6-1	۰/۲۴	۲۰۰۰	-	۲۴۰	۲۴۰	۳×۳	۳×۳
۲	G 6-2	۰/۲۴	۲۰۰۰	-	۱۶۰	۳۲۰	۳×۳	۳×۳
۳	G 10-1	۰/۲۴	۲۰۰۰	-	۲۴۰	۲۴۰	۳×۳	۳×۳
۴	G 10-2	۰/۲۴	۲۰۰۰	-	۱۶۰	۳۲۰	۳×۳	۳×۳
۵	G 14-1	۰/۲۴	۲۰۰۰	-	۲۴۰	۲۴۰	۳×۳	۳×۳
۶	G 14-2	۰/۲۴	۲۰۰۰	-	۱۶۰	۳۲۰	۳×۳	۳×۳

جدول ۴: برنامه آزمایش‌ها و طرح اختلاط نمونه‌های مکعبی و منشوری ملات ژئوپلیمری حاوی الیاف

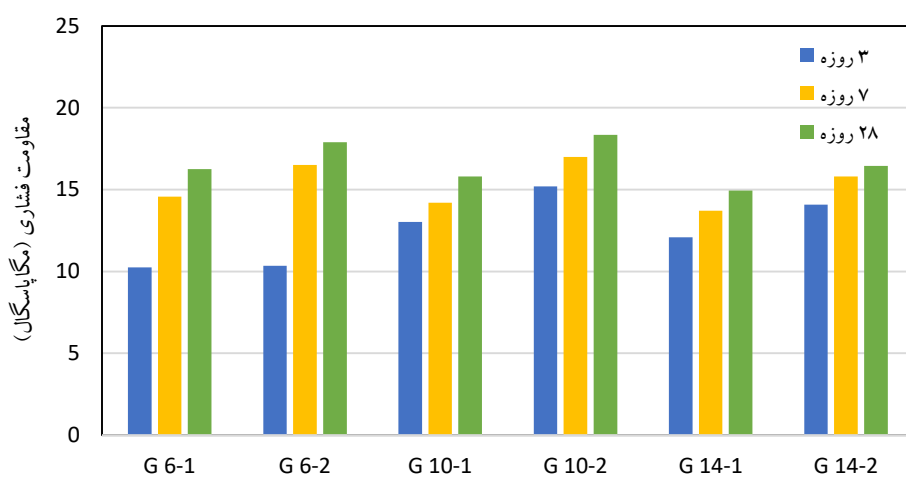
ردیف	نام نمونه	نسبت فعال کننده به پوزولان	جرم مواد مصرفی (کیلوگرم بر متر مکعب)				تعداد نمونه‌های منشوری	تعداد نمونه‌های مکعبی
			پودر لاتریت	الیاف شیشه	سدیم هیدرواکسید	آب شیشه		
۱	G 6-1	۰/۲۴	۱۹۰۰	۱۰۰	۲۴۰	۳×۳	۳×۳	
۲	G 6-2	۰/۲۴	۱۹۰۰	۱۰۰	۱۶۰	۳×۳	۳×۳	
۳	G 10-1	۰/۲۴	۱۹۰۰	۱۰۰	۲۴۰	۳×۳	۳×۳	
۴	G 10-2	۰/۲۴	۱۹۰۰	۱۰۰	۱۶۰	۳×۳	۳×۳	
۵	G 14-1	۰/۲۴	۱۹۰۰	۱۰۰	۲۴۰	۳×۳	۳×۳	
۶	G 14-2	۰/۲۴	۱۹۰۰	۱۰۰	۱۶۰	۳×۳	۳×۳	

۴- نتایج

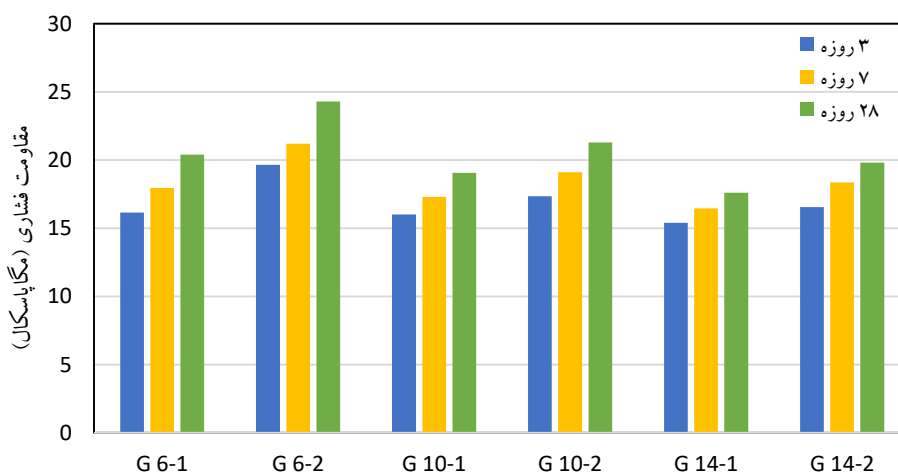
۴-۱- نتایج مقاومت فشاری

مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده پودر لاتریت و فاقد الیاف شیشه مطابق شکل ۴ و حاوی الیاف شیشه مطابق نمودار شکل ۵ ارائه شده است. منظور از مقاومت فشاری، همان میانگین مقاومت فشاری سه نمونه از هر طرح آزمایش می‌باشد. مطابق شکل ۴ و شکل ۵، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری فاقد الیاف و حاوی الیاف عمل‌آوری شده در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد ارائه شده است. مطابق نمودار، مقاومت فشاری تمام نمونه‌های ملات ژئوپلیمری به ازای نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲ بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌ها به ازای نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ بدست آمد. افزایش نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید باعث افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های ژئوپلیمری بر پایه پودر لاتریت می‌شد که با نتایج سایر پژوهش‌ها (بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستری بادی، بر پایه مخلوط خاکستر بادی و سرباره و همچنین بر پایه خاکستر پالم روغنی همخوانی دارد [۲۶-۲۸]). با افزایش نسبت آب شیشه به سدیم هیدرواکسید، مقدار آب شیشه موجود در ملات ژئوپلیمری افزایش یافته و به تبع آن به دلیل افزایش مقدار Na، واکنش‌پذیری ژئوپلیمریزاسیون افزایش یافته و منجر به افزایش تراکم و مقاومت فشاری نمونه‌های سفت‌شده می‌شود [۲۸، ۲۹] که با نتایج تحقیق حاضر نیز منطبق است.

مقاومت فشاری ۳ روزه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری با پودر لاتریت حاوی الیاف شیشه ساخته شده بالای ۱۵ مگاپاسکال و نمونه‌های فاقد الیاف بالای ۱۰ مگاپاسکال است. همچنین در هر طرح آزمایش، اختلاف مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها کم می‌باشد که نشانگر آن است که نمونه‌های ملات ژئوپلیمری در سنین کم بخش قابل توجهی از مقاومت مکانیکی خود را به دست می‌آورند. حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۱۹/۶۵، ۲۱/۲ و ۲۴/۳ مگاپاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۶ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۲ و حداقل مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۱۵/۴، ۱۶/۴۵ و ۱۷/۶ مگاپاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۱۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۱ می‌باشد. حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد الیاف ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۱۵/۲، ۱۷ و ۱۸/۳۵ مگاپاسکال) و حداقل مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۱۰/۲۵، ۱۳/۷ و ۱۴/۹۵ مگاپاسکال) می‌باشد. افزایش مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های ژئوپلیمری فاقد الیاف بین ۱۰/۹ تا ۴۷ درصد متغیر است. مقاومت فشاری نمونه‌ها حاوی الیاف عمل‌آوری شده در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد با نسبت جرمی فعال‌کننده به پوزولان (۰/۲۴) در سن ۳، ۷ و ۲۸ روزه حداقل ۱۶ و حداکثر ۲۴/۳ مگاپاسکال بدست آمد.



شکل ۴: میانگین مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری فاقد الیاف.



شکل ۵: میانگین مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری حاوی الیاف.

در خصوص مقایسه نمونه‌های ژئوپلیمری بر پایه لاتریت با نمونه‌های ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، در یک پژوهش، افزایش مقاومت فشاری ناشی از تسلیح با الیاف شیشه به طور متوسط ۳۰٪ نسبت به نمونه‌های تسلیح نشده افزایش یافت که با نتایج تحقیق حاضر همسو می‌باشد [۳۰]. در پژوهشی دیگر مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی با افزودن الیاف شیشه تا ۴۷٪ افزایش نشان داد [۲۰].

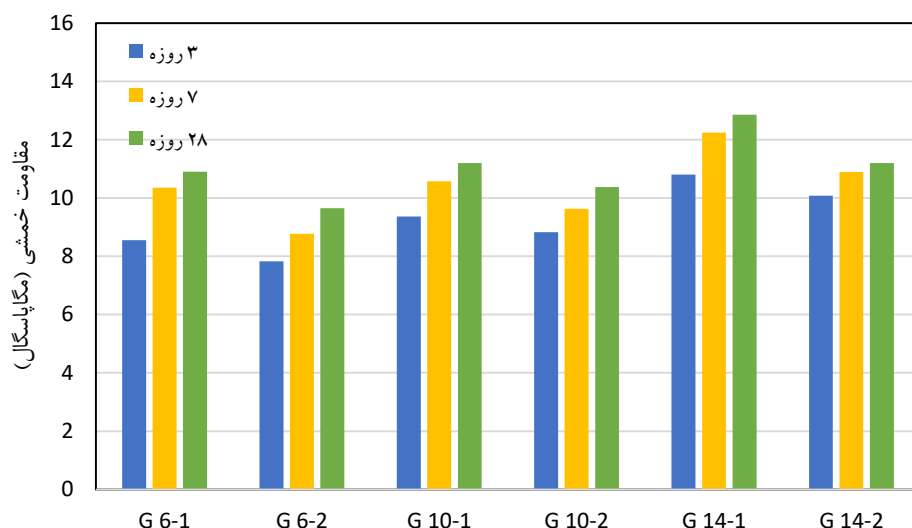
۴-۲- نتایج مقاومت خمشی

مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده پودر لاتریت و فاقد الیاف شیشه مطابق شکل ۶ و حاوی الیاف شیشه مطابق شکل ۷ ارائه شده است. منظور از مقاومت خمشی، همان میانگین مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه سه نمونه از هر طرح آزمایش می‌باشد.

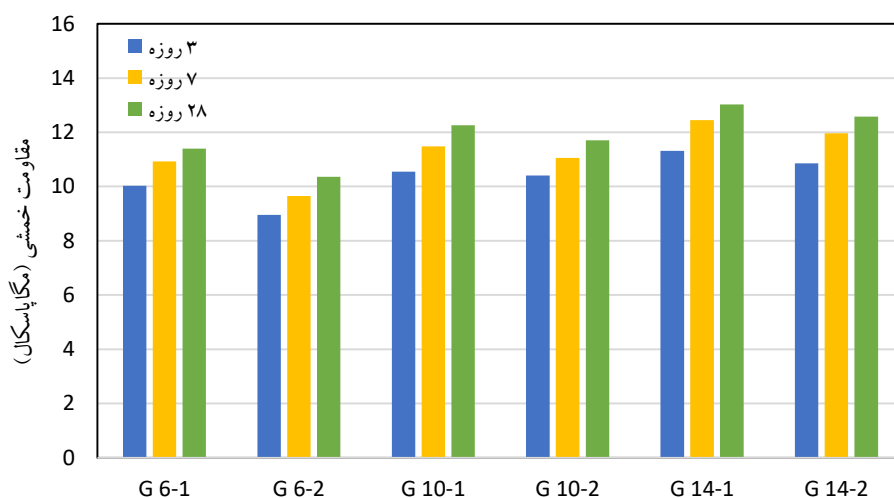
مطابق شکل ۶ و شکل ۷، مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری لاتریتی ساخته شده فاقد الیاف و حاوی الیاف با افزایش غلظت مولی محلول سدیم هیدرواکسید افزایش می‌یابد. همچنین مقاومت خمشی نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ در مقایسه با مقاومت خمشی نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲ بیشتر است. حداقل مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۸/۹۶، ۹/۶۵ و ۱۰/۳۶

مگاپاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۶ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۲ و حداکثر مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۱۱/۳۱، ۱۲/۴۵ و ۱۳/۰۳ مگاپاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۱۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۱ می باشد.

حداقل مقاومت خمشی نمونه‌های فاقد الیاف ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۷/۸۳، ۸/۷۷ و ۹/۶۵ مگاپاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۶ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۲ و حداکثر مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۱۰/۸، ۱۲/۲۴ و ۱۲/۸۵ مگاپاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۱۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۱ می باشد. افزایش مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های ژئوپلیمری فاقد الیاف بین ۱/۳ تا ۱۵/۲ درصد متغیر است، بنابراین مقاومت‌های به دست آمده در این پژوهش در دمای عمل آوری ۷۰ درجه سانتیگراد و نسبت فعال کننده به پوزولان ۰/۲۴ درصد و مقاومت خمشی نمونه‌ها حداقل ۸/۹۶ و حداکثر ۱۳/۰۳ مگاپاسکال متغیر است و تمام نمونه‌ها با غلظت محلول فعال کننده ۶، ۱۰ و ۱۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ و ۲، حاوی الیاف نسبت به فاقد الیاف مقاومت افزایش می یابد.



شکل ۶: میانگین مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های منشوری ژئوپلیمری فاقد الیاف.



شکل ۷: میانگین مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های منشوری ژئوپلیمری حاوی الیاف.

در خصوص مقایسه نمونه‌های ژئوپلیمری بر پایه لاتریت با نمونه‌های ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، در یک پژوهش، مقاومت کششی بتن ژئوپلیمری ناشی از تسلیح با الیاف شیشه به طور متوسط ۳۱٪ نسبت به نمونه‌های تسلیح نشده افزایش یافت. همچنین در پژوهشی دیگر مشخص شد که در بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی با استفاده از الیاف شیشه ظرفیت خمشی ۳۵٪ افزایش می‌یابد و البته استفاده بیش از حد از الیاف منجر به کاهش ظرفیت خمشی می‌شود [۳۰، ۳۱]. در پژوهش حاضر نیز مقاومت خمشی نمونه‌ها در اثر تسلیح با الیاف شیشه تا ۱۵/۲٪ افزایش یافت.

۳-۴- نتایج درصد جذب آب

در این پژوهش از نمونه‌های مکعبی برای ملات ژئوپلیمری با طول ضلع ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. نمونه‌ها ۲۴ ساعت قبل از آزمایش درون گرمخانه قرار داده شده تا رطوبت آنها کاملاً گرفته شود. پس از بیرون آوردن از دستگاه گرمخانه، جرم خشک هر نمونه اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها را به مدت ۳۰ دقیقه طبق استاندارد مبحث نهم مقررات ملی ساختمان داخل آب قرار داده و پس از خروج از آب، آب اضافی از سطح نمونه با حوله جذب شده و جرم نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. میزان جذب آب نمونه‌ها مطابق رابطه ۱ اندازه‌گیری شد.

رابطه ۱

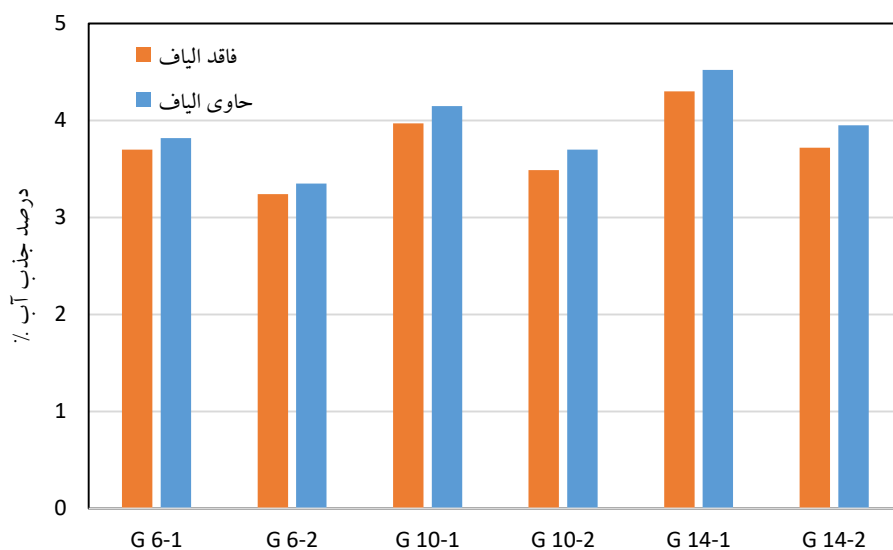
$$P_{wa} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

P_{wa} : درصد جذب آب

W_1 : جرم نمونه خشک

W_2 : جرم نمونه خیس

مطابق نمودار شکل ۸ درصد جذب آب نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده از پودر لاتریت فاقد الیاف و حاوی الیاف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای نمونه‌های ملات ژئوپلیمری فاقد الیاف و حاوی الیاف ساخته شده، با کاهش غلظت محلول سدیم هیدرواکسید درصد جذب آب کاهش یافته است. همچنین به ازای نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید برابر با ۲ در مقایسه با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید برابر با ۱، درصد جذب آب نمونه‌ها کمتر است. بیشترین درصد جذب آب نمونه‌های ملات ژئوپلیمری فاقد الیاف و حاوی الیاف مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۱۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید برابر با ۱ و کمترین درصد جذب آب مربوط به نمونه‌های ساخته شده با استفاده از محلول سدیم هیدرواکسید ۶ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید برابر با ۲ می‌باشد. مقادیر درصد جذب آب فاقد الیاف این نمونه‌ها بین ۳/۲۴ تا ۴/۳ درصد و مقادیر درصد جذب آب حاوی الیاف بین ۳/۳۵ تا ۴/۵۲ درصد بدست آمد.



شکل ۸: میانگین درصد جذب آب نمونه‌های ملات ژئوپلیمری

۵- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در نمونه‌های ژئوپلیمری (بر پایه لاتریت) ساخته شده با استفاده از الیاف شیشه:

- ۱) حداکثر مقاومت فشاری ۲۸ روزه (۲۴/۳ مگاپاسکال) به ازای غلظت کمتر محلول سدیم هیدرواکسید ۶ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲ حاصل شد.
- ۲) حداکثر مقاومت خمشی ۲۸ روزه (۱۳/۰۳ مگاپاسکال) به ازای غلظت بیشتر محلول سدیم هیدرواکسید ۱۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ حاصل شد.
- ۳) حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه (۱۷/۶ مگاپاسکال) برای نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده به ازای غلظت محلول سدیم هیدرواکسید ۱۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ حاصل شد.
- ۴) حداقل مقاومت خمشی ۲۸ روزه (۱۰/۳۶ مگاپاسکال) برای نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده به ازای غلظت محلول سدیم هیدرواکسید ۶ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲ بدست آمد.
- ۵) مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری در زمان ۳ روز به بالای ۱۵ مگاپاسکال رسید و لذا می‌توان از این فناوری برای ساخت مصالح ساختمانی مختلف با مقاومت مورد نیاز بالای ۱۵ مگاپاسکال اقدام نمود.
- ۶) افزایش مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های ژئوپلیمری فاقد الیاف بین ۱۰/۹ تا ۴۷ درصد متغیر است و افزایش مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های ژئوپلیمری فاقد الیاف بین ۱/۳ تا ۱۵/۲ درصد متغیر است. مقادیر درصد جذب آب نمونه‌های فاقد الیاف بین ۳/۲۴ تا ۴/۳ درصد و مقادیر درصد

جذب آب حاوی الیاف بین ۳/۳۵ تا ۴/۵۲ درصد بدست آمد. لذا برای ساخت قطعات پیش‌ساخته بتنی می‌توان از ملات ژئوپلیمری لاتریت ساخته‌شده با استفاده از الیاف شیشه و عمل‌آوری شده در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده نمود که به دلیل استفاده از محلول سدیم هیدرواکسید کم مولار اقتصادی‌تر نیز می‌باشد.

مراجع

- [1] Duxson, P., A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, and J.S. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 2007. 42(9): p. 2917-2933.
- [2] Gartner, E., Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete research*, 2004. 34(9): p. 1489-1498.
- [3] Kastiukas, G., S. Ruan, S. Liang, and X. Zhou, Development of precast geopolymer concrete via oven and microwave radiation curing with an environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 255: p. 120290.
- [4] Djobo, J.N.Y., A. Elimbi, H.K. Tchakouté, and S. Kumar, Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 2016. 124: p. 606-614.
- [5] Kaze, C.R., J.N.Y. Djobo, A. Nana, H.K. Tchakoute, E. Kamseu, U.C. Melo, C. Leonelli, and H. Rahier, Effect of silicate modulus on the setting, mechanical strength and microstructure of iron-rich aluminosilicate (laterite) based-geopolymer cured at room temperature. *Ceramics International*, 2018. 44(17): p. 21442-21450.
- [6] Migunthanna, J., P. Rajeev, and J. Sanjayan, Investigation of waste clay brick as partial replacement of geopolymer binders for rigid pavement application. *Construction and Building Materials*, 2021. 305: p. 124787.
- [7] Peng, Y. and C. Unluer, Analyzing the mechanical performance of fly ash-based geopolymer concrete with different machine learning techniques. *Construction and Building Materials*, 2022. 316: p. 125785.
- [8] Liang, G., T. Liu, H. Li, B. Dong, and T. Shi, A novel synthesis of lightweight and high-strength green geopolymer foamed material by rice husk ash and ground-granulated blast-furnace slag. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022. 176: p. 105922.
- [9] Gualtieri, M.L., M. Romagnoli, S. Pollastri, and A.F. Gualtieri, Inorganic polymers from laterite using activation with phosphoric acid and alkaline sodium silicate solution: mechanical and microstructural properties. *Cement and Concrete Research*, 2015. 67: p. 259-270.
- [10] Kaze, R.C., L.M.B. à Mougam, M. Cannio, R. Rosa, E. Kamseu, U.C. Melo, and C. Leonelli, Microstructure and engineering properties of Fe₂O₃ (FeO)-Al₂O₃-SiO₂ based geopolymer composites. *Journal of Cleaner Production*, 2018. 199: p. 849-859.
- [11] Fahmi, A., A. Babaeian Amini, Y. Marabi, and A. Majnoui-Toutakhane, Evaluation the Use of Stone Aggregates with Different Aggregates in Compressive Strength of Geopolymer Concrete by Environmental Assessment Approach Compared to Portland Concrete. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2021.
- [12] Majnoui-Toutakhane, A., A. Fahmi, Y. Marabi, and S.R. Zavaragh, Effect of Curing Temperature on the Mechanical Strength of Alkali Activated Laterite Geopolymeric Samples. *Journal of Engineering Research*, 2021.
- [13] Pachideh, G. and M. Gholhaki, Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete. *Journal of Building Engineering*, 2019. 26: p. 100856.
- [14] Pachideh, G., M. Gholhaki, and H. Ketabdari, Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars. *Journal of Building Engineering*, 2020. 29: p. 101178.
- [15] Pachideh, G. and M. Gholhaki, Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2020.
- [16] Ranjbar, N. and M. Zhang, Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 2020. 107: p. 103498.
- [17] Farooq, M., A. Bhutta, and N. Banthia, Tensile performance of eco-friendly ductile geopolymer composites (EDGC) incorporating different micro-fibers. *Cement and Concrete Composites*, 2019. 103: p. 183-192.
- [18] Sukontasukkul, P., P. Pongsopha, P. Chindaprasirt, and S. Songpiriyakij, Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer. *Construction and Building Materials*, 2018. 161: p. 37-44.
- [19] Alves, L., N. Leklou, F. de Souza, and S. De Barros, Assessment of the effect of fiber percentage in glass fiber reinforced slag-based geopolymer. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2021. 9(3): p. 1265-1274.
- [20] Korniejenko, K., M. Łach, and J. Mikula, The influence of short coir, glass and carbon fibers on the properties of composites with geopolymer matrix. *Materials*, 2021. 14(16): p. 4599.
- [21] Bai, T., B. Liu, Y. Wu, W. Huang, H. Wang, and Z. Xia, Mechanical properties of metakaolin-based geopolymer with glass fiber reinforcement and vibration preparation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020. 544: p. 120173.

- [22] Abdollahnejad, Z., M. Mastali, M. Mastali, and A. Dalvand, Comparative study on the effects of recycled glass–fiber on drying shrinkage rate and mechanical properties of the self-compacting mortar and fly ash–slag geopolymer mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017. 29(8): p. 04017076.
- [23] Wongsu, A., R. Kunthawatwong, S. Naenudon, V. Sata, and P. Chindaprasirt, Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 2020. 241: p. 118143.
- [24] Pachideh, G. and M. Gholhaki, An experimental investigation into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. *Structural Concrete*, 2021. 22(1): p. 550-565.
- [25] Pachideh, G. and M. Gholhaki, An experimental study on the effects of adding steel and polypropylene fibers to concrete on its resistance after different temperatures. 2019: ASTM International.
- [26] Ruengsilapanun, K., T. Udtaranakron, T. Pulngern, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, Mechanical properties, shrinkage, and heat evolution of alkali activated fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 2021. 299: p. 123954.
- [27] Anil, N., Compressive strength variation of alkali activated fly ash/slag concrete with different NaOH concentrations and sodium silicate to sodium hydroxide ratios. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2019. 4(2): p. 351-360.
- [28] Kwek, S.Y., H. Awang, and C.B. Cheah, Influence of Liquid-to-Solid and Alkaline Activator (Sodium Silicate to Sodium Hydroxide) Ratios on Fresh and Hardened Properties of Alkali-Activated Palm Oil Fuel Ash Geopolymer. *Materials*, 2021. 14(15): p. 4253.
- [29] Memon, F.A., M.F. Nuruddin, S. Khan, N. Shafiq, and T. Ayub, Effect of sodium hydroxide concentration on fresh properties and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete. *J. Eng. Sci. Technol*, 2013. 8(1): p. 44-56.
- [30] Mermerdaş, K., E.S. Mulapeer, and S.M. Oleiwi, Effect of glass fiber addition on the strength properties and pore structure of fly ash based geopolymer composites. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 2019. 20(4): p. 427-435.
- [31] Srinivasan, S., A. Karthik, and D. Nagan, An investigation on flexural behaviour of glass fibre reinforced geopolymer concrete beams. *Int. J. Eng. Sci. Res. Technol*, 2014. 3(4): p. 1963-1968.