



Semnan University



Research Article

Thermal Performance and Durability of Pavement-Grade Geopolymer Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers Containing Recycled Materials

Akbar Jooyandeh Mirza^a, Mohammad Hadi Alizadeh Eliyzei^{b*}, Mohsen Adabi^c

^a Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Roudehen, I. R. Iran.

^b Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Roudehen, I. R. Iran.

^c Assistant Professor, Department of Metallurgy and Materials Science, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Roudehen, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-08-05

Revised: 2025-10-14

Accepted: 2025-10-15

Keywords:

Fire resistance,
Geopolymer concrete,
Metakaolin,
Polypropylene fibers.

ABSTRACT

Geopolymer concrete (GPC) is gaining attention as an environmentally friendly alternative to traditional cementitious concretes. However, its performance in high-temperature environments and in operational conditions such as pavements requires improvement. This research was conducted with the aim of investigating the enhancement of thermal performance and durability of GPC when exposed to elevated temperatures. In this experimental study, fly ash and metakaolin were utilized as precursor materials in a binary blended GPC, and the effect of adding Polypropylene (PP) fibers at various volume fractions (up to 1.5%) on the mechanical properties and thermal performance of the concrete was examined under different temperature conditions (room temperature, 200, 500, and 800 °C). Compressive strength of the specimens was measured at 7 and 28 days, and Analysis of Variance (ANOVA) was employed to determine the degree of influence of each factor on compressive strength. The results indicated that addition of PP fibers up to 0.5% increased the GPC's compressive strength, and optimum replacement percentage for fly ash with metakaolin was 20%, where compressive strength of the specimens showed a significant improvement. This research demonstrated that incorporation of polypropylene fibers and using metakaolin can enhance the thermal performance (fire resistance) of binary blended GPC and ensure its durability in pavement applications at high temperatures. These findings offer practical solutions for improving the high-temperature performance of GPC, paving the way for its wider applications.

* Corresponding author.

E-mail address: paper109.sub@gmail.com

How to cite this article: Jooyandeh Mirza, A. , Alizadeh Eliyzei, M. H. and Adabi, M. (2025). Thermal Performance and Durability of Pavement-Grade Geopolymer Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers and Containing Recycled Materials. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(3), 21-38.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.38559.1729>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

عملکرد حرارتی و دوام بتن ژئوپلیمری روسازی شده با الیاف پلی پروپیلن حاوی مصالح بازیافتی

اکبر جوینده میرزا^۱، محمد هادی علیزاده الیزی^{۲*}، محسن آدابی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران.
^۲ استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران.
^۳ استادیار، گروه متالوژی و علم مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران.

چکیده

بتن ژئوپلیمری (GPC) به عنوان جایگزینی سازگار با محیط زیست برای بتن های سیمانی سنتی مورد توجه است. اما عملکرد آن در محیط های با دمای بالا و در شرایط عملیاتی نظیر روسازی ها نیازمند بهبود است. این پژوهش، با هدف بررسی بهبود عملکرد حرارتی و دوام GPC در مواجهه با دماهای بالا انجام شد. در این مطالعه تجربی، از خاکستر بادی و متاکائولن به عنوان مواد اولیه در GPC ترکیبی دوتایی استفاده شد و اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن (PP) با کسرهای حجمی مختلف (تا ۱/۵٪) بر خواص مکانیکی و عملکرد حرارتی بتن، تحت شرایط دمایی متفاوت (دمای اتاق، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس) بررسی شد. مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۷ و ۲۸ روز اندازه گیری شد و تحلیل واریانس (ANOVA) برای تعیین میزان تأثیر هر یک از عوامل بر مقاومت فشاری به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که افزودن الیاف PP تا ۰/۵٪ مقاومت فشاری GPC را افزایش می دهد. مقدار بهینه جایگزینی خاکستر بادی با متاکائولن، ۲۰٪ بود که در آن مقاومت فشاری نمونه ها بهبود قابل توجهی داشت. این پژوهش نشان داد که اختلاط الیاف پلی پروپیلن و استفاده از متاکائولن می تواند عملکرد حرارتی (مقاومت در برابر آتش) GPC ترکیبی دوتایی را بهبود بخشد و دوام آن را در کاربردهای روسازی در دماهای بالا تضمین کند. این یافته ها، راهکارهای عملی برای بهبود عملکرد GPC در دماهای بالا ارائه می دهد و زمینه را برای کاربردهای گسترده تر آن فراهم می سازد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

واژه های کلیدی:

مقاومت در برابر آتش،

بتن ژئوپلیمری،

متاکائولن،

الیاف پلی پروپیلن.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: paper109.sub@gmail.com

استناد به این مقاله: جوینده میرزا، اکبر، علیزاده الیزی، محمد هادی و آدابی، محسن. (۱۴۰۴). عملکرد حرارتی و دوام بتن ژئوپلیمری روسازی شده با الیاف پلی پروپیلن حاوی مصالح بازیافتی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۳)، ۲۱-۳۸

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.38559.1729>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

بتن، به دلیل مزایایی همچون در دسترس بودن، شکل پذیری آسان و مقرون به صرفه بودن، به پرکاربردترین مصالح ساختمانی در سراسر جهان تبدیل شده است (آلبیتار و همکاران، ۲۰۱۵). با این وجود، تولید سیمان پرتلند معمولی (OPC) که برای ساخت بتن معمولی استفاده می شود، اثرات مخرب قابل توجهی بر محیط زیست دارد (دی بلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ عرفانی-منش و شربتدار، ۲۰۲۰؛ پارک و همکاران، ۲۰۱۶). تولید OPC فرآیندی انرژی بر است که مقدار قابل توجهی گاز گلخانه ای وارد جو می کند و تقریباً پنج درصد از تولید سالانه گازهای گلخانه ای را به خود اختصاص می دهد (لوهر و همکاران، ۲۰۱۹؛ تاپ و همکاران، ۲۰۲۰). در نتیجه، شناسایی یک ماده نوآورانه با اثرات زیست محیطی کمتر ضروری است. ژئوپلیمرها، که با عنوان "چسباننده های فعال شده قلیایی" نیز شناخته می شوند، به عنوان یک چسباننده جایگزین برای تولید بتن پیشنهاد شده اند (مک لالان و همکاران، ۲۰۱۱؛ ترنر و کولینز، ۲۰۱۳). در مقایسه با بتن سیمانی، بتن ژئوپلیمری (GPC) انتشار دی اکسید کربن را تا ۸۰ درصد کاهش می دهد؛ در حالی که مقاومت قابل مقایسه و دوام بالاتری را حفظ می کند (پروویس، ۲۰۱۸). فرآورده های جانبی یا منابع آلومینوسیلیکات طبیعی مانند خاکستر بادی، سرباره ی کوره ی ذوب آهن آسیاب شده، زئولیت و متاکائولن، اغلب با فعال کننده های قلیایی مانند هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم ترکیب می شوند تا سیمان ژئوپلیمری ایجاد شود (ون دونتر و همکاران، ۲۰۱۰). فرآیند پلی تراکم هنگامی آغاز می شود که فعال کننده ی قلیایی، آلومینوسیلیکات را حل کرده و آلومینات ها و سیلیکات ها آزاد می شوند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). هنگامی که این فرآیند با پخت در دماهای بالا تسریع می شود، چنین محصولات پلیمری زاسیون می توانند جایگزین OPC در کاربردهای

پیش ساخته شوند (المطایری و همکاران، ۲۰۲۱؛ الفکی و همکاران، ۲۰۲۰؛ مائو و همکاران، ۲۰۲۲).

گرا دیان حرارتی بتن OPC به عملکرد نامناسب آن در دماهای بسیار بالا کمک می کند. بر این اساس، تلاش هایی برای جستجوی مصالح ساختمانی جایگزین با مقاومت عالی در برابر آتش و حرارت در دمای بالا، هم از نظر افت مقاومت و هم از نظر مقاومت در برابر بحران پوسته شدگی، صورت گرفته است. خوشبختانه، ساختار غیرآلی ژئوپلیمرها ذاتاً مقاوم در برابر آتش است و دارای پایداری حرارتی استثنایی با تخریب جزئی ساختار ژل تا ۷۰۰-۸۰۰ درجه سلسیوس است (لوچاب و همکاران، ۲۰۲۱؛ زید و همکاران، ۲۰۲۱). این را می توان مهم ترین مزیت ژئوپلیمرها نسبت به کامپوزیت های مبتنی بر OPC دانست، زیرا دومی به دلیل کم آبی محتوای هیدرات ها تخریب می شود. ژئوپلیمرها ثابت کرده اند که از نظر شیمیایی در هنگام قرار گرفتن در معرض دمای بالا تا حد زیادی پایدار هستند (مرادیخو و همکاران، ۲۰۲۰؛ تانیدیزی و یونار، ۲۰۱۶). علاوه بر این، مطالعات قبلی نشان داده است که بتن ژئوپلیمری دارای پتانسیل آتش سوزی عالی، واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR) و مقاومت در برابر اسید است. همچنین، هنگامی که در معرض آتش قرار می گیرد، گازهای سمی منتشر نمی کند. بنابراین، بتن ژئوپلیمری سبک وزن می تواند به عنوان یک مصالح ساختمانی سبز با پتانسیل فوق العاده برای توسعه پایدار و مقاومت در برابر آتش مورد استفاده قرار گیرد (کاناگراج و همکاران، ۲۰۲۳ a؛ کاناگراج و همکاران، ۲۰۲۳ b).

در این مطالعه، تلاشی صورت گرفته است تا برای بهبود عملکرد بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی از مصالح بتنی بازیافتی درشت (RCA) و متاکائولن در نسبت های حجمی صفر، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ ساخته شده است، استفاده شود. ماتریس بتن ژئوپلیمری با استفاده از خاکستر بادی (FA)، متاکائولن (MK) و محلول

فعال سازی قلیایی ساخته شده است. تأثیر دمای بالا بر مقاومت فشاری نمونه هایی که به مدت ۲ ساعت در معرض دمای بیش از ۸۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفته اند، بررسی شده است. انتظار می رود GPC حاوی RCA به عنوان یک جایگزین سازگار با محیط زیست برای بتن معمولی و به عنوان یک مصالح ساختمانی سبز که فاقد سیمان پرتلند است و مصرف مصالح طبیعی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد، مورد استفاده قرار گیرد.

بتن ژئوپلیمری (GPC) به عنوان یک جایگزین برای بتن های سیمانی معمولی، به دلیل خواص زیست محیطی مناسب و پایداری بالای آن در برابر حرارت، در سال های اخیر مورد توجه ویژه ای قرار گرفته است. این پیشینه پژوهش به مرور یافته های مطالعات اخیر در سال های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵ در این حوزه می پردازد و شکاف های موجود در تحقیقات قبلی را برای تأکید بر ضرورت انجام مطالعه حاضر مشخص می کند. حلقه و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه ای، به بررسی تأثیر ترکیب خاکستر بادی و متاکائولن بر خواص مکانیکی و حرارتی بتن ژئوپلیمری پرداختند و نشان دادند که با افزایش محتوای متاکائولن، مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد. این مطالعه همچنین تأکید کرد که بتن های ژئوپلیمری در دماهای زیاد تا ۸۰۰ درجه سلسیوس عملکرد بهتری نسبت به بتن های سنتی دارند (حلقه و همکاران، ۲۰۲۳). نقاط قوت: بررسی تجربی و تحلیل دقیق اثرات حرارتی بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری. نقاط ضعف: این مطالعه تنها روی دو نوع ماده اولیه متمرکز شده و نیاز به بررسی انواع دیگر ترکیبات و شرایط محیطی مختلف احساس می شود. صبوری و برهانی (۲۰۲۴) به بررسی رفتار حرارتی بتن ژئوپلیمری در شرایط دماهای بالا پرداختند. این مطالعه نشان داد که بتن ژئوپلیمری در دماهای بالا نه تنها مقاومت فشاری مناسبی دارد، بلکه می تواند به عنوان عایق حرارتی نیز عمل کند، و در نتیجه خطر تخریب یا پوسته زدن را کاهش می دهد (صبوری و برهانی، ۲۰۲۴). نقاط قوت:

تأکید بر رفتار مناسب بتن ژئوپلیمری در برابر آتش و حرارت، و ایجاد داده های جدید در این زمینه. نقاط ضعف: با این حال، این تحقیقات به تأثیرات بلندمدت و نتایج محیطی ناشی از استفاده مداوم از این نوع بتن توجه کافی نداشته اند. احمدپور و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن ژئوپلیمری می تواند اثرات مثبت قابل توجهی بر خواص مکانیکی و حرارتی آن بگذارد. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش میزان الیاف تا ۱/۵ درصد، مقاومت فشاری بتن افزایش یافته و این نوع بتن در مواجهه با دماهای بالا عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. نقاط قوت: پژوهش های فوق تنوع خوبی در استفاده از مواد افزودنی مانند الیاف را مورد بررسی قرار داده و نتایج مثبتی ارائه داده اند. نقاط ضعف: محدودیت در بررسی تأثیر این الیاف در ترکیب های مختلف یا در شرایط متنوع محیطی وجود دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر ترکیب متاکائولن و بازیافت مصالح (RCA) در بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی، به بررسی اثرات دماهای بالا (تا ۸۰۰ درجه سلسیوس) بر خواص مکانیکی پرداخته است. همچنین، این مطالعه نسبت به تحقیقات قبلی به صورت خاصی روی اثرات بلندمدت و مقایسه ای مواد اولیه از جمله خاکستر بادی و متاکائولن تمرکز دارد. نتایج این تحقیق می تواند به عنوان مبنایی برای توسعه بیشتر بتن های سازگار با محیط زیست در صنعت ساختمان ارائه شود.

۲. مقایسه بتن ژئوپلیمری (GPC) با بتن رایج

در زیرساخت های حمل و نقل

بتن رایج در زیرساخت های حمل و نقل، اغلب بتن سیمان پرتلند معمولی (OPC) است که برای مقاومت های بالا و دوام در برابر چرخه های یخ زدگی - ذوب شدگی و ترافیک سنگین بهینه سازی شده است. بتن سیمان پرتلند معمولی (OPC) استاندارد طلایی چندین دهه در مهندسی

عدم وجود هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 در فاز هیدراته، مقاومت شیمیایی بسیار بالاتری نسبت به OPC دارد. این امر GPC را برای کاربرد در محیط‌های خورنده (مانند عرشه‌های پل‌های در معرض نمک، یا کف‌های جاده‌های مجاور مواد شیمیایی صنعتی) ایده‌آل می‌سازد.

۲-۳. عملکرد حرارتی (ویژگی مهم برای شرایط خاص)

در OPC، مقاومت حرارتی آن محدود است. در دماهای بالاتر از حدود ۳۰۰ درجه سلسیوس، تغییرات فاز مواد هیدراته منجر به کاهش چشمگیر مقاومت و مدول الاستیسیته می‌شود.

در GPC، ساختار ژئوپلیمری پایداری حرارتی فوق‌العاده‌ای از خود نشان می‌دهد. طبق تحقیقات، این بتن تا ۸۰۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری خود را حفظ می‌کند. این خاصیت برای بخش‌هایی از زیرساخت که ممکن است در معرض آتش‌سوزی یا دمای عملیاتی بالا قرار گیرند (مثلاً در نزدیکی تجهیزات گرمایشی یا تونل‌ها)، یک برتری غیرقابل جایگزین است.

۲-۴. چالش‌های اجرا و مقاومت مکانیکی

مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته: همانطور که در پژوهش حاضر هدف‌گذاری شده است، دستیابی به مشخصات مکانیکی معادل OPC یک چالش فنی است. در حالی که GPC می‌تواند مقاومت فشاری مورد نیاز را تأمین کند، مدول الاستیسیته آن ممکن است کمی کمتر از بتن هم‌مقاومت OPC باشد، که این امر نیازمند مدل‌سازی دقیق‌تر برای سازه‌هایی با حساسیت بالا به تغییر شکل است.

نیاز به پخت حرارتی: بزرگترین چالش اجرایی GPC، نیاز به پخت با حرارت (معمولاً بین ۶۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس) برای دستیابی سریع به مقاومت اولیه

سازه‌های حمل و نقل بوده است؛ زیرا عملکرد مکانیکی قابل پیش‌بینی، پخت سریع و روش‌های اجرایی به خوبی مستند شده‌ای دارد. با این حال، تولید سیمان پرتلند سهم قابل توجهی در انتشار دی‌اکسید کربن جهانی دارد، و دوام آن در برابر عوامل مهاجم شیمیایی چالش‌برانگیز است. در مقابل، بتن ژئوپلیمری (GPC) با استفاده از منابع آلومینوسیلیکاتی غنی (مانند خاکستر بادی و متاکائولن) که با محلول‌های قلیایی فعال می‌شوند، به عنوان یک جایگزین پایدار ظهور کرده است. هدف اصلی استفاده از این بتن در زیرساخت‌های حمل و نقل، غلبه بر نقاط ضعف محیط‌زیستی و دوام OPC است.

۲-۱. اثرات زیست‌محیطی و پایداری

در OPC، تولید کلینکر سیمان مستلزم مصرف انرژی زیاد و انتشار مقدار زیادی CO_2 است. در شرایط فعلی که کاهش اثر کربن یک ضرورت جهانی است، این بزرگترین نقطه ضعف GPC محسوب می‌شود.

در GPC با جایگزینی کامل سیمان با مواد جانبی صنعتی (مانند FA و MK) انتشار CO_2 می‌تواند تا ۸۰ درصد کاهش یابد. این ویژگی، GPC را به انتخابی برتر برای پروژه‌های دولتی با الزامات پایداری بالا تبدیل می‌کند. همچنین، قابلیت GPC برای جذب سنگدانه‌های بتنی بازیافتی (RCA) بدون افت شدید عملکرد (به دلیل ماهیت جذب‌کننده ماتریس ژئوپلیمری) آن را در اقتصاد چرخشی مصالح ساختمانی پیشرو می‌سازد.

۲-۲. دوام و مقاومت در برابر محیط‌های خورنده

در OPC، در برابر حملات سولفاتی، نفوذ کلرید (ناشی از نمک‌های ذوب یخ در زمستان یا آب دریا) و کربناتاسیون، آسیب‌پذیر است. نفوذ کلرید منجر به خوردگی آرماتورها و خرابی سازه می‌شود که نیازمند تعمیرات پرهزینه در زیرساخت‌هایی مانند پل‌ها است. در GPC، به دلیل ساختار میکروسکوپی متراکم‌تر و

مخلوط GPC اضافه شد. جدول ۱، جزئیات الیاف PP را نشان می‌دهد. ماسه طبیعی مورد استفاده به عنوان سنگدانه ریز از یک معدن محلی با مدول نرمی ۳/۰۵ تهیه شد که در محدوده توصیه شده توسط ASTM C33 بود. سنگدانه بازیافتی از بتن سازه‌ای خردشده که از آزمایش مقاومت در آزمایشگاه به دست آمده، به عنوان سنگدانه درشت استفاده شد.



شکل ۱. خاکستر بادی - متاکائولین



شکل ۲. سیلیکات سدیم (آب شیشه) - هیدروکسید سدیم (سود پرک)

است. این امر اجرای قطعات پیش ساخته را تسهیل می‌کند اما استفاده از آن را برای بتن ریزی‌های حجیم در محل (مانند روسازی وسیع جاده) پیچیده تر می‌سازد، مگر اینکه از فعال کننده هایی استفاده شود که امکان پخت در دمای محیط را فراهم آورند.

۲-۵. نتیجه گیری تحلیلی

در حالی که OPC به دلیل استاندارد سازی و اجرای آسان در محل همچنان غالب است، GPC حاوی FA، MK و RCA یک جایگزین مهندسی شده است که برتری های ساختاری عمده ای در پایداری و دوام حرارتی/شیمیایی دارد. برای زیرساخت هایی که طول عمر بالا و مقاومت در برابر محیط های خشن مورد نیاز است، GPC مزیت رقابتی آشکاری دارد، مشروط بر اینکه چالش های اجرایی مربوط به پخت آن مدیریت شود و خواص مکانیکی دقیق آن از طریق آزمایش های آزمایشگاهی تأیید گردد.

۳. مواد و روش ها

۳-۱. مواد

در این مطالعه، خاکستر بادی (FA) با چگالی ذرات ۲۶۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب از شرکت فولاد مبارکه در اصفهان تهیه شد. همچنین، متاکائولن دلیجان (MK) به عنوان پوزولان از شرکت صنایع فروآلیاژ با چگالی ذرات ۲۵۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب تهیه شد (شکل ۱). محلول قلیایی مورد استفاده در این مطالعه برای فعال کردن مواد سیمانی مکمل (SCM) به عنوان مثال، FA و MK ترکیبی از آب شیشه (سیلیکات سدیم) یا Na_2SiO_3 و هیدروکسید سدیم (NaOH) بود (شکل ۲). بررسی تجربی برای توسعه مخلوط های GPC سازگار با محیط زیست و ساختاری با استفاده از الیاف پلی پروپیلن (PP) انجام شد. الیاف PP به طول ۶ میلی متر برای تقویت GPC استفاده شد. برای این منظور، PP در نسبت های ۰/۵، ۱، ۱/۵ درصد حجمی به نسبت های



شکل ۳. سنگدانه بازیافتی

۲-۳. سنگدانه درشت بازیافتی

سنگدانه‌ای که در اینجا استفاده شده سنگدانه بازیافتی از بتن سازه‌ای خردشده است که از آزمایش مقاومت در آزمایشگاه به دست آمده است (شکل ۳). این یک نکته فنی بسیار مهم در تحقیقات بتن است، زیرا کیفیت سنگدانه بازیافتی (RCA) تأثیر مستقیمی بر خواص بتن جدید (GPC) دارد. سنگدانه‌های درشت بازیافتی (RCA) از خردایش نمونه‌های بتنی که برای آزمایش مقاومت فشاری در آزمایشگاه تولید شده بودند، به دست آمده‌اند. به دلیل ماهیت آزمایشگاهی و معمول بودن پروژه‌های GPC، این بتن مبدأ احتمالاً یک بتن استاندارد با عملکرد خوب بوده است. از نظر نوع بتن مبدأ یک بتن پرتلند سیمانی (OPC) با درجه مقاومت متوسط تا بالا (مقاومت مشخصه f'_c بین ۳۰ تا ۴۵ مگاپاسکال) می‌باشد. از نظر تأثیر بر GPC، این سطح از مقاومت برای بتن مبدأ نشان می‌دهد که لایه سیمانی چسبیده به سنگدانه طبیعی (NA) چگالی معقولی دارد. این موضوع باعث می‌شود که RCA ما جذب آب بالاتری نسبت به سنگدانه طبیعی داشته باشد، که این امر در محاسبات مخلوط نهایی GPC باید با کاهش آب فعال‌کننده (یا کاهش مقدار آب اضافه در صورت وجود آب آزاد) لحاظ شود. در این طرح، استفاده از فعال‌کننده‌های قلیایی قوی (NaOH و Na_2SiO_3) به خیساندن و فعال‌سازی این لایه سیمانی قدیمی کمک می‌کند. نکته کلیدی که باید یادآوری شود این است که: هنگام استفاده از RCA، چالش اصلی افزایش جذب آب و کاهش دانسیته است. برای رفع این مشکل، در طراحی مخلوط GPC معمولاً از زمان اختلاط طولانی‌تر برای اطمینان از خیس شدن کامل سطح RCA، یا تنظیم دقیق غلظت فعال‌کننده قلیایی استفاده می‌شود.

۳-۳. انتخاب طول الیاف ۶ میلی‌متر

انتخاب طول الیاف ۶ میلی‌متر در این طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری (GPC) بر اساس توازن بین عملکرد تقویتی و قابلیت مخلوط‌پذیری^۱ صورت گرفته است:

۳-۳-۱. نسبت ابعادی بهینه

در بتن‌های مهندسی، طول الیاف باید یک نسبت ابعادی^۱ مناسب (طول به قطر) داشته باشد تا بتواند به طور مؤثری تنش‌های کششی را تحمل کند و پل^۲ بزند و مانع گسترش ترک شود. طول ۶ میلی‌متر معمولاً یک طول استاندارد و بهینه برای الیاف پلی‌پروپیلن در کاربردهای سازه‌ای معمولی است که در آن‌ها نیاز به کنترل دقیق ترک‌های انقباضی و افزایش مقاومت نهایی وجود دارد.

۳-۳-۲. سازگاری با ابعاد سنگدانه‌ها^۳

طول الیاف باید همواره کوچک‌تر از کوچک‌ترین اندازه اسمی سنگدانه درشت (RCA) باشد تا از بروز مشکلاتی نظیر تراکم بیش از حد الیاف^۴، توزیع ناهمگن، و کاهش

بیش از حد روانی بتن جلوگیری شود. با توجه به این که RCA برابر با ۹۸۰ واحد وزنی است و ابعاد سنگدانه‌ها در جدول مشخص نیست، فرض بر این است که طول ۶ میلی‌متر، کوچکترین اندازه سنگدانه درشت را نقض نمی‌کند.

۳-۳-۳. هدف عملکردی (مقاومت در برابر آتش)

از آنجا که هدف تولید بتن مقاوم در برابر آتش است، الیاف PP در دماهای کمتر از ۷۰۰ درجه سلسیوس ذوب می‌شوند. این ذوب شدن یک مزیت محسوب می‌شود زیرا مسیرهایی برای خروج بخار آب محبوس ایجاد کرده و از انفجار بتن^۵ جلوگیری می‌کند. طول ۶ میلی‌متر برای ایجاد این شبکه داخلی تخلیه بخار مؤثر است.

جدول ۱. ویژگی‌های الیاف پلی‌پروپیلن

Fiber type	Length (mm)	Density (gr/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Water absorbency	Alkaline and acid resistant	Diameter (mm)
PF	6	0.93	400	No	Excellent	-

۳-۳-۳. طرح اختلاط، آماده‌سازی نمونه و روش آزمایش

بتن‌های ژئوپلیمری (GPC) با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن (PP) به مخلوط ملات با کسر حجمی ۱٪، ۰/۵٪، و ۱/۵٪ از کل حجم مخلوط تهیه شدند. یک مخلوط ساده بدون هیچ‌گونه الیافی نیز برای اهداف مقایسه‌ای تولید شد. نسبت‌های اختلاط در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. مخلوط‌ها با نسبت قلیایی ۲/۵، نسبت مایع به بایندر ۰/۴۷۵ و غلظت NaOH برابر ۱۴ مولار تهیه شدند. در ابتدا مواد سیمانی مکمل (SCMs) و خاکستر بادی (FA) برای ایجاد همگنی با هم مخلوط شدند. سنگدانه‌های بازیافتی (CA) با اندازه و مقدار موردنظر به‌طور جداگانه آماده شدند. مخلوط خشک آماده شده از SCMs-FA با

سنگدانه بازیافتی مخلوط شده و به مدت سه دقیقه به‌طور کامل مخلوط شد. پس از آن، سنگدانه‌ها و الیاف پلی‌پروپیلن (PP) به صورت تدریجی و پاششی^۶ روی سطح مصالح خشک و نیمه‌مخلوط شده پاشیده شد، در حالی که میکسر در حال کار است. پس از افزودن کامل الیاف، اختلاط برای مدت زمان کافی (معمولاً ۲ تا ۵ دقیقه دیگر) ادامه پیدا کرد تا اطمینان حاصل شود که الیاف کاملاً در ماتریکس پخش شده و اثر انقباضی بر روانی نمونه به حداقل رسیده است. سپس به همراه آب اضافی به مخلوط اضافه شدند. فرآیند اختلاط تا زمانی که یک مخلوط همگن به دست آید ادامه یافت. لازم بود الیاف به‌تدریج به مخلوط اضافه شوند تا از تجمع آن‌ها جلوگیری شود. در مرحله بعد، مخلوط تازه در قالب‌هایی

4- Ball Effect
5- Spalling
6- Sprinkling

1 - Aspect ratio
2- Bridge
3- Aggregate Size



شکل ۴. قالب گیری نمونه ها

با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی متر (نمونه های مکعبی) ریخته شد و به مدت ۱۵ ثانیه ویبره شد. نمونه ها به مدت یک روز در دمای 60 ± 5 درجه سلسیوس نگهداری شدند. پس از خارج کردن آن ها از قالب، به مدت ۷ و ۲۸ روز در دمای ۲۳ درجه سلسیوس در آون عمل آوری شدند. آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه های مکعبی GPC به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ بر اساس استاندارد ASTM C39 (گاسکن-مورنو و همکاران، ۲۰۱۳) انجام شد (شکل ۴). همه آزمایش ها به صورت سه تکرار انجام شدند و میانگین مقادیر به دست آمده به عنوان نتایج استفاده شدند.

جدول ۲. نسبت های اختلاط بتن های ژئوپلیمری

Sample	FA	MK	MK (%)	Sand	RCA	PP (%)	SS/SH
GPC-Ref	600	0	0	525	980	0	2.5
GPC-MK10	540	60	10	525	980	0	2.5
GPC-MK20	480	120	20	525	980	0	2.5
GPC-MK30	420	180	30	525	980	0	2.5
GPC-MK10-PP0.5	540	60	10	525	980	0.5	2.5
GPC-MK20-PP0.5	480	120	20	525	980	0.5	2.5
GPC-MK30-PP0.5	420	180	30	525	980	0.5	2.5
GPC-MK10-PP1	540	60	10	525	980	1	2.5
GPC-MK20-PP1	480	120	20	525	980	1	2.5
GPC-MK30-PP1	420	180	30	525	980	1	2.5
GPC-MK10-PP1.5	540	60	10	525	980	1.5	2.5
GPC-MK20-PP1.5	480	120	20	525	980	1.5	2.5
GPC-MK30-PP1.5	420	180	30	525	980	1.5	2.5

جرم فعال کننده (FA- خاکستر بادی): جرم پایه FA در نمونه مرجع (GPC-Ref) برابر ۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب (یا در واحد پایه ای که جدول بر اساس آن تنظیم شده) در نظر گرفته شده است. این مقدار به عنوان نقطه شروع برای واکنش ژئوپلیمریزاسیون تعیین شده است، زیرا بر میزان محصولات (ژئوپلیمرها) تأثیر مستقیم دارد. ماسه و مصالح سنگی بازیافتی (RCA): مقادیر ماسه (۵۲۵) و RCA (۹۸۰) در تمام طرح ها ثابت نگه داشته شده اند. این ثبات به این معنی است که تمرکز اصلی تحقیق روی اثر متغیرهای نسبت فعال کننده به جایگزین

۳-۴. معیار انتخاب درصد مصالح مصرفی و مقادیر

الیاف در طرح اختلاط

معیار انتخاب مقادیر مصالح در این مجموعه از طرح های اختلاط بتن ژئوپلیمری بر اساس بهینه سازی عملکرد سازه ای (به ویژه مقاومت فشاری) در کنار بررسی اثر جایگزینی منبع فعال کننده و تأثیر افزودن الیاف پلیمری صورت گرفته است.

۳-۴-۱. معیار انتخاب مقادیر مصالح پایه (FA, Sand, RCA)

بتن GPC، یعنی سطح فعال‌سازی شیمیایی (از طریق MK) و پشتیبانی مکانیکی/حرارتی (از طریق PP)، به صورت سیستماتیک مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳-۵. حرارت

با توجه به استفاده از فعال‌کننده $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ برای نمونه‌های مکعبی با هدف ارزیابی مقاومت، فرآیند حرارت‌دهی شامل دو مرحله است (شکل ۵): ابتدا، نمونه‌ها پس از قالب‌گیری باید به مدت ۲۴ ساعت در یک آون با دمای کنترل‌شده عمل‌آوری شوند تا واکنش ژئوپلیمریزاسیون اولیه آغاز و مقاومت لازم برای تحمل شوک حرارتی بعدی کسب گردد. پس از خنک شدن در دمای اتاق 23°C ، نمونه‌ها برای تست‌های تخریب حرارتی آماده می‌شوند. برای این تست‌ها در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۷۰۰ درجه سلسیوس، نمونه‌ها باید کاملاً خشک شده و سپس در کوره‌ای که از قبل روی دمای هدف تنظیم شده است، قرار گیرند. به دلیل حساسیت به شوک حرارتی، نمونه‌ها را پس از تنظیم کوره روی دمای هدف به مدت ۲ تا ۴ ساعت در آن دما نگه دارید (زمان دقیق بسته به ضخامت نمونه و ابعاد کوره متفاوت است). لازم است برای اطمینان از یکنواختی حرارت و جلوگیری از شکست ناگهانی، نمونه‌ها به آرامی به دمای هدف رسانده شده و برای چند ساعت در آن دما نگهداری شوند و نهایتاً سرد کردن پس از اتمام زمان نگهداری، نمونه‌ها را از کوره خارج کرده و اجازه دهید در هوای آزاد و در دمای محیط (23°C) کاملاً سرد شوند.

(MK) و درصد بهینه الیاف (PP) است، در حالی که شرایط کلی بافت و پراکنندگی (فیلر) بتن ثابت بماند.

۳-۴-۲. معیار انتخاب درصد جایگزینی متاکائولن

(MK و MK /%)

متاکائولن (MK) به دلیل داشتن واکنش‌پذیری بالاتر نسبت به خاکستر بادی، به منظور افزایش نرخ گیرش و دستیابی به مقاومت بالاتر یا بهبود عملکرد در دماهای بالا به مخلوط اضافه شده است. تنوع‌بخشی با استفاده از سه سطح جایگزینی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ (که متناظر با کاهش جرم FA از ۶۰۰ به ۵۴۰، ۴۸۰ و ۴۲۰ کیلوگرم است)، محقق اثر افزایش فعالیت شیمیایی کلی سیستم بر خواص بتن را بررسی می‌کند. این تغییرات در جرم FA در حقیقت نشان‌دهنده تغییر در «نسبت فعال‌کننده به غیرفعال» یا «نسبت فعال‌کننده کل به سیمانه‌سازهای دیگر» است.

۳-۴-۳. معیار انتخاب مقادیر الیاف (PP/%)

الیاف پلی‌پروپیلن (PP) معمولاً به منظور افزایش مقاومت کششی، بهبود چقرمگی^۱، کنترل ترک‌خوردگی (به ویژه در مرحله انقباض اولیه) و بهبود مقاومت در برابر آتش‌سوزی (به دلیل ذوب شدن الیاف و ایجاد کانال برای خروج بخار) به بتن اضافه می‌شوند. تنوع‌بخشی انتخاب درصدهای ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف (PP) بر اساس درصد حجمی یا جرمی که در این جدول به نظر می‌رسد درصدی از جرم کلی مخلوط یا فعال‌کننده باشد) به منظور تعیین درصد بهینه الیاف است؛ یعنی بررسی اینکه چه مقدار الیاف بیشترین بهبود عملکرد را بدون ایجاد اختلال در مخلوط‌کنندگی یا کاهش بیش از حد روانی فراهم می‌کند.

این طرح اختلاط به صورت فاکتوری جزئی طراحی شده است تا اثرات متقابل دو پارامتر کلیدی بر عملکرد

1- Toughness



شکل ۵. حرارت دادن نمونه‌ها

از نظر افزایش چقرمگی، الیاف مانع از شکست ترد^۳ می‌شوند. حتی اگر مقاومت نهایی (Peak Stress) کمی افزایش یابد، انرژی مورد نیاز برای شکست (Fracture Energy) افزایش یافته که این به طور غیرمستقیم در تست‌های مکانیکی منعکس می‌شود. اما به دلیل عملکرد منفی در دوزهای بالا (بالتر از ۰/۵٪) که شامل اختلال در پیوستگی^۴: الیاف PP دارای آب‌دوستی بسیار کمتری نسبت به ماتریس ژئوپلیمری (که بر پایه آب و فعال‌کننده‌های قلیایی است) هستند. در دوزهای بالا، سطح زیادی از الیاف با ماتریس در تماس قرار می‌گیرد که منجر به ایجاد مناطق رابط ضعیف^۵ می‌شود. این ITZs به عنوان نقطه تمرکز تنش^۶ عمل کرده و زودتر از ماتریس سالم شروع به ترک خوردن می‌کنند و در نهایت مقاومت فشاری کلی را کاهش می‌دهند. همچنین، اثر اختلال در هیدراتاسیون: همانطور که در متن اشاره گردید، میزان بالای الیاف می‌تواند بر فرآیند هیدراتاسیون تأثیر منفی بگذارد. این موضوع ممکن است ناشی از جذب بخشی از آب آزاد یا ایجاد اختلال در مسیرهای نفوذ یون‌های فعال‌کننده در مراحل اولیه باشد.

اما تأثیر متاکائولن (MK) بر توسعه مقاومت در حضور الیاف که با جایگزینی خاکستر بادی (FA) با MK تا ۲۰٪ به عنوان جایگزین بهینه عمل کرد؛ جایی که بیشترین افزایش مقاومت فشاری در تمام دوزهای الیاف مشاهده شد. از نظر تحلیل مکانیزمی (نقش دوگانه MK) را خواهیم بررسی کنیم ابتدا باید تأثیر بر واکنش شیمیایی (فعال‌سازی پوزولانی) را مورد بررسی قرار دهیم. از آنجایی که متاکائولن یک ماده پوزولانی بسیار فعال‌تر نسبت به خاکستر بادی است، به خصوص در دمای محیط^۷ MK غنی از سیلیکای آمورف است که سریعاً با یون‌های کلسیم و قلیایی آزاد شده از سیمان/فعال‌کننده

۴. نتایج و بحث

۴-۱. اثر الیاف پلی پروپیلن و متاکائولن بر مقاومت

فشاری

مقاومت‌های فشاری بتن‌های ژئوپلیمری تقویت شده با الیاف حاوی سنگدانه بازیافتی (RCA) در روزهای ۷ و ۲۸ نشان داده شده است (شکل ۶). به طور متوسط، پس از ۷ روز عمل‌آوری در دمای محیطی، تمام مخلوط‌ها به حدود ۷۵ درصد از مقاومت فشاری ۲۸ روزه خود رسیدند. دوز الیاف PP تأثیر قابل توجهی بر نرخ توسعه مقاومت نداشت. افزودن الیاف PP تا دوز ۰/۵٪ مقاومت فشاری را بهبود بخشید. اما دوزهای بالاتر (۱٪ و ۱/۵٪) باعث کاهش مقاومت در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه شد. عملکرد مثبت تا دوز بهینه (صفر تا ۰/۵٪) باعث کنترل انقباض و تنش‌های داخلی می‌باشد. الیاف PP یک شبکه سه بعدی در ماتریس ایجاد می‌کنند. در مراحل اولیه کیورینگ (به ویژه در دمای محیط)، تبخیر آب و جمع‌شدگی ناشی از آب‌گیری ژئوپلیمری^۱ باعث ایجاد ترک‌های ریز می‌شود. الیاف با تولید پل‌های فیزیکی، این ترک‌ها را مسدود کرده و مانع از رشد آن‌ها به ترک‌های ماکروسکوپی می‌شوند (پدیده پل زدن^۲). این امر باعث افزایش یکپارچگی و مقاومت کلی می‌شود. از طرف دیگر

5 - Weak Interfacial(Transition Zones – ITZs

6 - Stress Concentration Points

7 - Ambient Curing

1- Geopolymerization Shrinkage

2- Bridge effect

3 - Brittle Failure

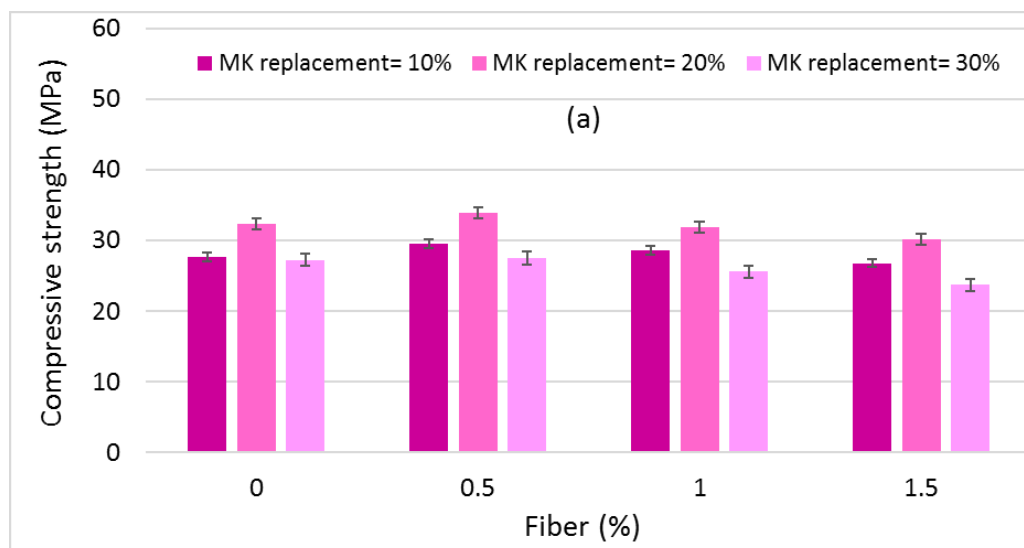
4 - Bonding Interference

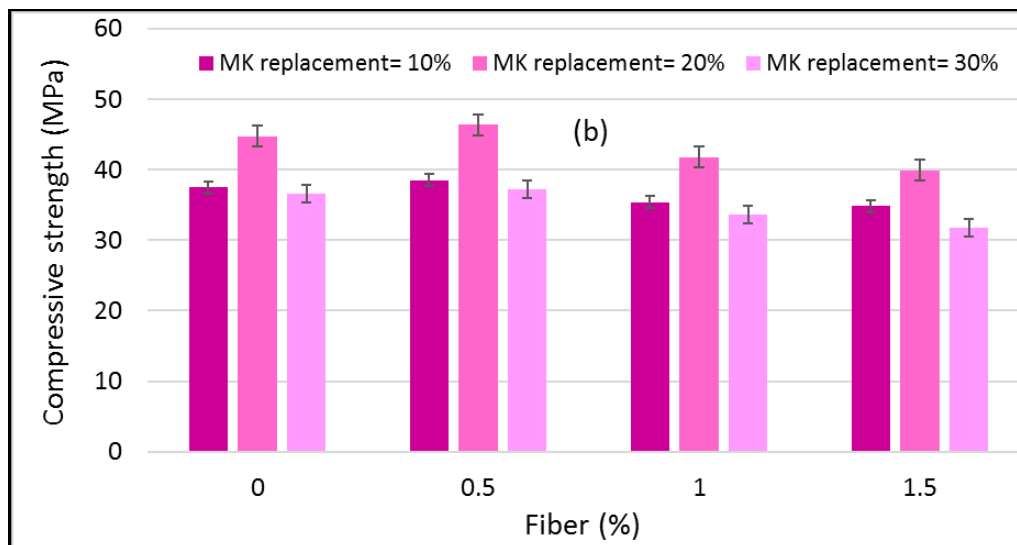
۰/۵٪ افزایش یافت؛ با این حال، افزودن بیشتر الیاف PP به کاهش مقاومت فشاری در هر دو زمان ۷ و ۲۸ روز منجر شد.

در سنین ابتدایی، روند هیدراسیون ماتریس‌ها هنوز در حال انجام است و به همین دلیل، مقاومت فشاری در حال توسعه است. قبلاً نشان داده شده که محتوای بالای الیاف ممکن است تأثیرات معکوس بر روند هیدراسیون داشته باشد و Interfaces اضافی ایجاد کند که ممکن است ماتریس را تضعیف کند (گاسکن-مورنو و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر این، می‌توان مشاهده کرد که جایگزینی MK از ۱۰٪ به ۳۰٪ می‌تواند بر مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف تأثیر بگذارد. میزان بهینه افزودن MK به‌عنوان جایگزین FA، ۲۰ درصد است که در آن مقاومت فشاری نمونه‌ها با صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف PP به ترتیب حدود ۲۷٪، ۳۱٪، ۱۸٪ و ۱۳٪ افزایش یافته است.

نتایج بیانگر این است که در استفاده از الیاف PP و متاکائولن، رسیدن به تعادل مناسب برای حداکثر کردن مقاومت فشاری اهمیت بالایی دارد.

واکنش داده و محصولات ژئوپلیمری ثانویه (مانند C-A-S-H/S-H-N-A-S-H متراکم) تولید می‌کند. این واکنش سریع‌تر، منجر به پر شدن سریع‌تر و کامل‌تر تخلخل‌های ریز در مقایسه با FA خالص در سنین اولیه (۷ روز) می‌شود، که این امر به طور مستقیم نرخ کسب مقاومت را افزایش می‌دهد. ثانیاً هم‌افزایی (Synerg) متاکائولین با الیاف PP که همانطور که قابل مشاهده بود در دوز بهینه ۲۰٪ MK، ماتریس ژئوپلیمری در سن ۷ و ۲۸ روزه، به دلیل تراکم بالا، سطح چسبندگی (Adhesion) بهتری نسبت به الیاف PP فراهم می‌کند. این امر باعث می‌شود که نقاط ضعف ایجاد شده توسط الیاف (ITZs) کاهش یافته و قابلیت انتقال بار از ماتریس به الیاف بهینه شود. افزایش ۲۷٪ مقاومت در نمونه با صفر درصد الیاف و ۲۰٪ MK نشان‌دهنده بهبود ذاتی ساختار ماتریس است. افزایش متعاقب مقاومت با افزودن ۰/۵٪ الیاف (افزایش ۳۱٪ کلی) نشان می‌دهد که الیاف در این بستر متراکم، اثر تقویتی خود را به بهترین نحو اعمال کرده‌اند. به‌طور کلی، با افزودن الیاف، مقاومت فشاری مخلوط‌ها افزایش یافت. مقاومت فشاری مخلوط‌ها با افزودن الیاف PP تا





شکل ۶. مقاومت فشاری مخلوط‌ها: (a) مقاومت فشاری مخلوط‌ها در روز ۷، (b) مقاومت فشاری مخلوط‌ها در روز ۲۸، نسبت جایگزینی متاکائولن (MK): ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪

۴-۲. اثر دماهای بالا بر مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری و مقادیر نسبی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف پلی پروپیلن که پس از ۲۸ روز عمل‌آوری و در دماهای مختلف آزمایش شدند، در شکل ۷ نشان داده شده است. از هر بیج، دو آزمایش انجام شده و میانگین مقاومت فشاری گزارش شده است. در سن ۲۸ روزگی، نمونه‌ها در کوره برقی به دماهای °C ۲۰۰، °C ۴۰۰ و °C ۷۰۰ گرم شدند. از نظر تحلیل مکانیزمی (واکنش‌های مثبت)، که یکی از آنها فعال‌سازی ثانویه پوزولانی^۱ می‌باشد. این افزایش مقاومت یک پدیده شناخته شده در بتن‌های گوگردی و ژئوپلیمری است. دمای °C ۲۰۰ برای ادامه واکنش‌هایی که در دمای محیط (کیورینگ ۲۸ روزه) کند شده بودند، انرژی فعال‌سازی کافی را فراهم می‌کند. اما تأثیر متاکائولن در این مرحله به خوبی وارد عمل می‌شود. گرما، سرعت واکنش پوزولانی باقیمانده ذرات MK و یا FA را به شدت تسریع کرده و محصولات سیمانی ثانویه (مانند C-A-S-H/N-A-S-H متراکم‌تر) تولید می‌کند که فضاهای خالی میکروسکوپی (Micro-voids) باقی‌مانده در ماتریس را پر می‌کنند. این پر شدن، ساختار را متراکم‌تر کرده و

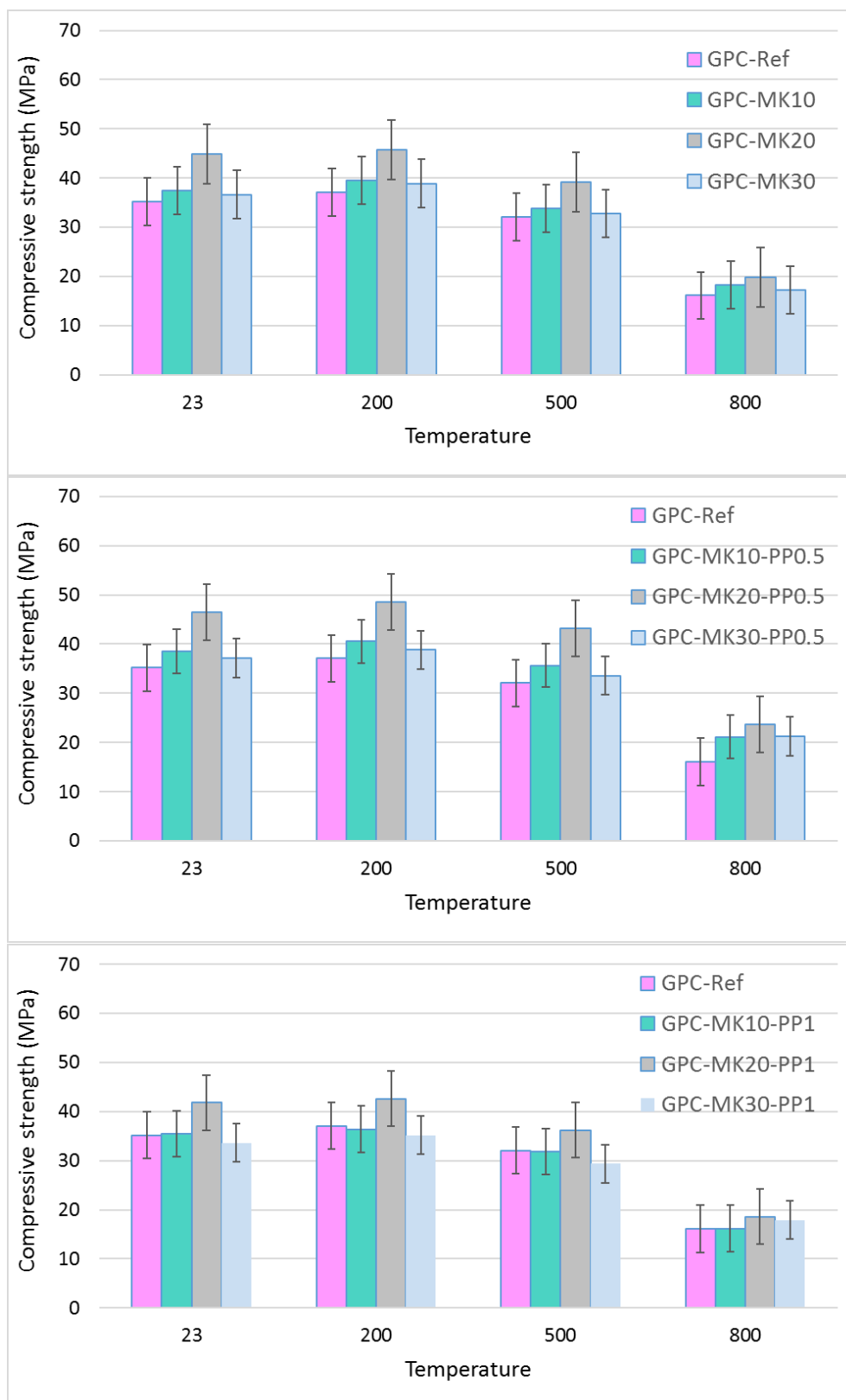
مقاومت را افزایش می‌دهد. اما در مورد تأثیر الیاف PP بر نقطه ذوب، همانطور که مشاهده شده نقطه ذوب الیاف PP در حدود ۱۶۰-۱۷۰ درجه سلسیوس است. در دمای °C ۲۰۰، الیاف شروع به ذوب شدن کرده و سوراخ‌هایی در ماتریس ایجاد می‌کنند (همانطور که در تحلیل حرارتی ذکر شد). با وجود ایجاد سوراخ، افزایش مقاومت کلی نشان می‌دهد که اثر مثبت ناشی از تراکم ماتریس (MK) بسیار قوی‌تر از اثر منفی ناشی از ذوب رفتن فیزیکی الیاف در این مرحله بوده است. سوراخ‌های ایجاد شده، اگرچه مقاومت فشاری را در طولانی‌مدت کاهش می‌دهند، اما در این مرحله اولیه ممکن است تنش‌های داخلی ناشی از گرما را با تخلیه موضعی فشار آزاد کرده باشند، بدون آنکه به اندازه کافی بزرگ شوند تا موجب شکست ساختاری شوند. اما از نظر برتری ژئوپلیمر بر OPC می‌توان اشاره به مطالعات دیگر (مانند منجونان و همکاران، ۲۰۱۹) مبنی بر عملکرد بهتر AAS نسبت به OPC در دماهای بالا، تأکیدی بر پایداری پیوندهای سیلیکاتی/آلومینوسیلیسی در ژئوپلیمر در برابر شوک حرارتی اولیه در مقایسه با شبکه‌های هیدراتاسیون OPC است. از نظر تحلیل مکانیزمی (واکنش‌های مثبت)، رفتار

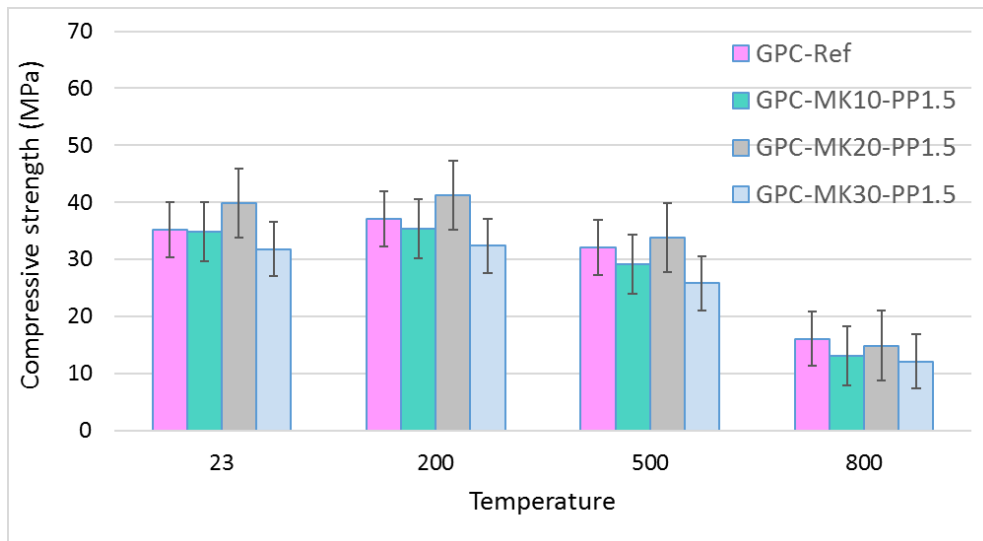
1- Secondary Pozzolanic Reaction

در دماهای 400°C و 700°C جهت تخریب حرارتی و بقاء ساختاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در دمای 400°C به جهت ذوب الیاف PP که به طور کامل از بین رفته و باقی‌مانده‌های کربنی یا ناچیز حرارتی آن‌ها باقی می‌ماند. این امر به معنای از دست دادن کامل اثر پل زنی و چقرمگی ناشی از الیاف است. همچنین تخریب ژئوپلیمر صورت می‌گیرد که آب شیمیایی در ساختار ژئوپلیمر شروع به خروج می‌کند. اگر کیورینگ اولیه در دمای محیط بوده باشد، این مرحله باعث کاهش چشمگیر مقاومت فشاری نسبت به مقاومت اولیه (23°C) می‌شود، زیرا ساختار متخلخل‌تر شده و محصولات سیمانی شروع به تغییر فاز می‌کنند. اما در مورد بررسی دمای 700°C که فاز پایداری در دمای بالا می‌باشد. در این دما، بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی (FA-based) معمولاً بسیار بهتر از OPC عمل می‌کنند. دلیل برتری، واکنش‌های پوزولانی که توسط MK و FA فعال شده‌اند، در دماهای بالاتر (به ویژه پس از حذف آب ساختاری) که منجر به تشکیل فازهای پایدارتر کریستالی یا ویتره می‌شوند که برای مقاومت در برابر حرارت طراحی شده‌اند. در این دما، مقاومت به شدت کاهش یافته اما معمولاً مقداری از مقاومت اولیه (یا حتی گاهی مقداری بالاتر از مقاومت در 400°C)، به دلیل پدیده‌هایی مانند بازآرایی سیلیکات‌ها) حفظ می‌شود. نقش متاکائولین در دمای 700°C درجه سلیسوس (متاکائولین که در اصل کائولن بوده) به مولایت و سیلیکا تبدیل می‌شود. این

محصولات، اگرچه مقاومتی کمتر از بتن در دمای اتاق دارند، اما نسبت به محصولات ناشی از هیدراتاسیون OPC در همین دما، از ثبات حرارتی بهتری برخوردارند. طبق نتایج آزمایش، از آنجایی که نمونه‌های بتن ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف تحت گرما قرار گرفتند، مشاهده شد که مقاومت فشاری در دمای 200°C برای همه نمونه‌ها افزایش یافته است. این افزایش ممکن است ناشی از فعال‌سازی تأخیری ذرات مواد سیمانی مکمل (SCM) باشد که پس از فعال‌سازی اولیه، هنوز واکنشی نشان نداده‌اند. به‌خوبی شناخته شده است که قرارگیری مخلوط‌های فعال‌سازی قلیایی (AAS) در دماهای بالا می‌تواند به افزایش مقاومت مکانیکی کمک کند، زیرا گرما می‌تواند فرآیند فعال‌سازی قلیایی ذرات SCM را تسریع کند (کاناگراج و همکاران، ۲۰۲۳). روند مشابهی در یک مطالعه قبلی نیز مشاهده شده است (مک‌لارن و همکاران، ۲۰۱۱). منجوناث و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که مخلوط‌های AAS نسبت به مخلوط‌های مشابه سیمانی (OPC) عملکرد بهتری در دماهای بالا از خود نشان داده‌اند.

نتایج حاکی از آن است که وقتی دما از 23°C به 200°C افزایش یافت، میزان افزایش در مقاومت فشاری مخلوط کنترل و مخلوط‌های تقویت‌شده شامل مخلوط‌های GPC-MK10-PP0.5، GPC-MK20-PP0.5 و GPC-MK30-PP0.5 به ترتیب $5/6\%$ ، $5/4\%$ و $7/7\%$ بود.





شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف در دماهای بالا در ۲۸ روز

۴-۳. تأثیر دماهای بالا بر مقاومت فشاری

در این بخش، تأثیر پارامترهای مؤثر بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف، شامل درصد جایگزینی خاک‌دانه متراکم (MK)، میزان الیاف پلی‌پروپیلن و دما مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور از روش تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده شد که ابزاری قوی برای محاسبه تأثیر پارامترهای ورودی بر پاسخ یک سیستم است و به‌طور گسترده‌ای در مسائل مهندسی به کار می‌رود. نتایج دقیق تحلیل در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول، متغیرهای SS، Df و MS به ترتیب نشان‌دهنده مجموع مربعات، درجه آزادی و میانگین مربعات هر متغیر هستند. همچنین، مقادیر p و F برای آزمون فرض‌های آماری استفاده شده‌اند و همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده، در تمامی موارد کمتر از ۰/۰۵ و مقدار F بحرانی بوده‌اند، که نشان می‌دهد پارامترهای ورودی به‌طور معناداری بر خواص مقاومت و نفوذپذیری تأثیر داشته‌اند.

افزایش دما تأثیری منفی بر مقاومت فشاری مصالح دارد. با افزایش دما از ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس، تبخیر آب منجر به افزایش خلل و فرج و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری می‌شود. در محدوده ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس، علاوه بر تبخیر آب، تجزیه ژل C-A-S-H و شکستن پیوندهای شیمیایی نیز به تخریب میکرو ساختار و کاهش مقاومت منجر می‌شود. افزایش دما از ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس منجر به افت شدید مقاومت فشاری می‌شود. در این بازه، فروپاشی محصولات هیدراتاسیون و افزایش تنش بین خمیر و دانه‌ها، توان تحمل بار نمونه‌ها را کاهش می‌دهد (تورکر و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل ۸. دستگاه آزمایش مقاومت‌های فشاری

جدول ۳. نتایج ANOVA برای مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری تقویت شده با الیاف حاوی RCA

Property	SS	Df	MS	F	p-value	Contribution
Temperature	3941.92	3	1313.97	578.4	0.00	75.16
PP fibre	321.13	3	107.04	47.12	0.00	4.62
MK	442.32	3	147.45	64.90	0.00	19.07
Error	95.41	42	2.27	-		1.15
Total	4782.73	51	-	-		-

۵. نتایج و نتیجه گیری

مطالعات گذشته نشان می دهد که افزودن الیاف پلی پروپیلن در بتن پلیمری می تواند باعث افزایش مقاومت فشاری شود. این افزایش به دلیل سازوکار تقویت کامپوزیتی و چسبندگی عالی بین رزین و الیاف است. با این حال، باید تأکید کرد که این افزایش مقاومت فشاری معمولاً یک مزیت ثانویه در کنار مزایای اصلی یعنی افزایش چقرمگی، کنترل ترک و بهبود رفتار پس از ترک خوردگی محسوب می شود. این مطالعه به بررسی مقاومت در برابر آتش بتن ژئوپلیمری با ترکیب دوتایی، تقویت شده با درصد های مختلف الیاف پلی پروپیلن و جایگزینی خاکستر بادی با متاکائولن در سطوح صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد پرداخت. یافته ها نشان داد که افزودن الیاف PP تا ۰/۵٪ باعث افزایش مقاومت فشاری می شود. اما مقادیر بیشتر منجر به کاهش مقاومت در روزهای ۷ و ۲۸ شد. همچنین، مشخص شد که جایگزینی FA با MK بین ۱۰٪ تا ۳۰٪ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری تقویت شده با الیاف تأثیرگذار است و بهینه ترین میزان MK، ۲۰٪ است که در این حالت، مقاومت فشاری نمونه ها به طور قابل توجهی افزایش یافت. افزودن الیاف، مقاومت در

برابر آتش بتن ژئوپلیمری را نیز بهبود بخشید. تمامی مخلوط ها در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش مقاومت فشاری را نشان دادند. اما افزایش بیشتر دما تا ۸۰۰ درجه سلسیوس منجر به افت مقاومت شد که احتمالاً به دلیل تبخیر آب و افزایش خلل و فرج بود. تحلیل واریانس نشان داد که دما با ۷۵/۱۶٪ بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری دارد و پس از آن، متاکائولن با ۱۹/۰۷٪ قرار دارد. کاربرد این یافته ها می تواند در تولید بتن های ژئوپلیمری مقاوم در برابر آتش برای استفاده در سازه هایی که در معرض دماهای بالا قرار دارند، مفید باشد. محدودیت این مطالعه، بررسی تنها چند درصد مشخص از الیاف PP و MK است. بنابراین، تعمیم پذیری نتایج به سایر ترکیبات و شرایط محیطی نیازمند احتیاط است. برای مطالعات آتی، پیشنهاد می شود اثرات بلندمدت دماهای بالا بر خواص دوام بتن ژئوپلیمری و همچنین بررسی سایر انواع الیاف و مواد افزودنی مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، انجام مطالعات اقتصادی و ارزیابی چرخه عمر برای تعیین پایداری و مقرون به صرفه بودن استفاده از این نوع بتن در مقیاس بزرگ توصیه می شود.

۶. مراجع

- Ahmadpour, M., Kiani, F. and Mazaheri, N. 2025. "Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of geopolymer concrete". J. Constr. Res., 30(4): 89-103.
- Albitar, M., Mohamed Ali, M. S., Visintin, P. and Drechsler, M. 2015. "Effect of granulated lead smelter slag on strength of fly ash-based geopolymer concrete". Constr. Build. Mater., 83: 128-135.
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F. and Zeyad, A. M. 2021. "Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review". Case Stud. Constr. Mater., 15: e00733.
- De Belie, N., Soutsos, M. and Gruyaert, E. 2018. "Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials". Springer.

- El-Feky, M. S., Kohail, M., El-Tair, A. M. and Serag, M. I. 2020. "Effect of microwave curing as compared with conventional regimes on the performance of alkali activated slag pastes". *Constr. Build. Mater.*, 233: 117268.
- Erfanimesh, A. and Sharbatdar, M. K. 2020. "Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by sodium carbonate". *J. Build. Eng.*, 32: 101781.
- Gascón-Moreno, J., Salcedo-Sanz, S., Saavedra-Moreno, B., Carro-Calvo, L. and Portilla-Figueras, A. 2013. "An evolutionary-based hyper-heuristic approach for optimal construction of group method of data handling networks". *Inform. Sci.*, 247: 94–108.
- Halgh, S., Moghimi, M. and Hosseini, K. 2023. "Investigation of the effect of fly ash and metakaolin on the thermal and mechanical behavior of geopolymer concrete". *Int. J. Concrete Struct.*, 25(2): 201-220.
- Kanagaraj, B., Anand, N., Diana Andrushia, A., Kiran, T. and Lubloy, E. 2023a. "Pull-out behavior and microstructure characteristics of binary blended self-compacting geopolymer concrete subjected to elevated temperature". *Alexandria Eng. J.*, 76: 469–490.
- Kanagaraj, B., Anand, N., Jerry, R., Samuvel Raj, R. and Lubloy, E. 2023b. "Axial compressive behaviour and physical characteristics of high strength self-compacting geopolymer concrete (HSGC) columns exposed to elevated temperature". *Constr. Build. Mater.*, 401: 132866.
- Kanagaraj, B., Anand, N., Raj, R. S. and Lubloy, E. 2023c. "Behavioural studies on binary blended high strength self compacting geopolymer concrete exposed to standard fire temperature". *Ain Shams Eng. J.*, 102394.
- Lochab, B., Monisha, M., Amarnath, N., Sharma, P., Mukherjee, S. and Ishida, H. 2021. "Review on the accelerated and low-temperature polymerization of benzoxazine resins: Addition polymerizable sustainable polymers". *Polym.*, 13(8): 1260.
- Luhar, S., Chaudhary, S. and Luhar, I. 2019. "Development of rubberized geopolymer concrete: Strength and durability studies". *Constr. Build. Mater.*, 204: 740-753.
- Manjunath, R., Narasimhan, M. C. and Umesha, K. M. 2019. "Studies on high performance alkali activated slag concrete mixes subjected to aggressive environments and sustained elevated temperatures". *Constr. Build. Mater.*, 229: 116887.
- Mao, Q., Li, Y., Liu, K., Peng, H. and Shi, X. 2022. "Mechanism, characterization and factors of reaction between basalt and alkali: Exploratory investigation for potential application in geopolymer concrete". *Cement Concrete Compos.*, 130: 104526.
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A. and Corder, G. D. 2011. "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement". *J. Clean. Prod.*, 19(9-10): 1080-1090.
- Moradikhou, A. B., Esparham, A. and Jamshidi Avanaki, M. 2020. "Physical and mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete". *Constr. Build. Mater.*, 251: 118965.
- Park, Y., Abolmaali, A., Kim, Y. H. and Ghahremannejad, M. 2016. "Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber partially replacing sand". *Constr. Build. Mater.*, 118: 43-51.
- Provis, J. L. 2018. "Alkali-activated materials". *Cement Concrete Res.*, 114: 40-48.
- Saboori, R. and Borhani, A. 2024. "Thermal and fire challenges in geopolymer concrete: A comprehensive review". *J. Build. Mater.*, 32(3): 115-130.
- Tanyildizi, H. and Yonar, Y. 2016. "Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature". *Constr. Build. Mater.*, 126: 381-387.
- Top, S., Vapur, H., Altiner, M., Kaya, D. and Ekicibil, A. 2020. "Properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete prepared using pumice and expanded perlite as aggregates". *J. Molecul. Struct.*, 1202: 127236.
- Türker, H. T., Balçikanlı, M., Durmuş, I. H., Özbay, E. and Erdemir, M. 2016. "Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level". *Constr. Build. Mater.*, 104: 169-180.
- Turner, L. K. and Collins, F. G. 2013. "Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete". *Constr. Build. Mater.*, 43: 125-130.
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P. and Brice, D. G. 2010. "Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials". *Waste Biomass Valor*, 1(1): 145-155.
- Wang, Y., Aslani, F. and Valizadeh, A. 2020. "An investigation into the mechanical behaviour of fibre-reinforced geopolymer concrete incorporating NiTi shape memory alloy, steel and polypropylene fibres". *Constr. Build. Mater.*, 259: 119765.
- Zeyad, A. M., Azmi Megat Johari, M., Abutaleb, A. and Tayeh, B. A. 2021. "The effect of steam curing regimes on the chloride resistance and pore size of high-strength green concrete". *Constr. Build. Mater.*, 280: 122409.