

Effect of short metal fibers, along with Ground granulated blast furnace slag, metakaolin, and mica, on the mechanical properties and durability of geopolymer mortar

Arian Darvishalinezhad¹, Amin Gholizad^{2*}

1- Ph.D. (c) of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

ABSTRACT

This research aims to investigate the effect of using different weight percentages of metakaolin and mica powder on the mechanical properties and durability of the samples. Studying the effect of using steel fibers with a volume percentage of 1% on the mechanical properties, especially the bending and tensile properties of geopolymer mortar, is one of the goals of this research. In total, 20 samples of different mixing plans were made from geopolymer mortar, containing metakaolin, mica, Ground granulated blast-furnace slag, and steel fibers. Metakaolin and mica were replaced by slag with weight percentages of 5%, 10%, and 15%. The tests performed in this research include compressive strength (at ages 7, 28, and 90 days), bending strength at the age of 28 days, direct tensile strength at the age of 28 days, compressive strength after exposure to temperatures of 100°C, 200°C, 400°C, and 600°C, Flexural strength coefficients of heated and unheated samples, initial and final water absorption tests, electrical resistance tests, and scanning electron microscope tests. The results of the compressive strength test showed that the concentration of sodium hydroxide solution had a significant effect on the outcomes of the aforementioned tests. Additionally, the results indicate the positive effect of mica on improving thermal resistance under high temperatures (600°C). In both groups A (without fibers) and B (containing fibers) with sodium hydroxide concentrations of 4 and 8 M, the replacement of 5% mica increased the bending strength by 14.7% and 3.3%, respectively, compared to the control sample. An increase in the percentage of mica replacement resulted in a decrease in the flexural strength of geopolymer mortar.

ARTICLE INFO

Receive Date: 03 November 2024

Revise Date: 24 June 2025

Accept Date: 11 July 2025

Keywords:

Mica
Metakaolin
Geopolymer Mortars
Durability
Short Steel Fibers
(SEM)
GGBFS
Mechanical Properties

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.486232.3558>

*Corresponding author: Amin Gholizad

Email address: gholizad@uma.ac.ir

اثر الیاف فلزی کوتاه به همراه سرباره کوره آهن گدازی و متاکائولن و میکا در خواص مکانیکی و دوام ملات ژئوپلیمری

آرین درویشعلی نژاد^۱، امین قلی زاد^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

این پژوهش قصد دارد به بررسی تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف وزنی پودر متاکائولن و میکا بر مشخصات مکانیکی و دوام آزمونه‌ها بپردازد. مطالعه اثر استفاده از الیاف فولادی با درصد حجمی ۱٪، بر خواص مکانیکی به ویژه مشخصات خمشی و کششی ملات ژئوپلیمر، از اهداف دیگر پژوهش حاضر است. در مجموع در این پژوهش ۲۰ نمونه طرح اختلاط مختلف از ملات ژئوپلیمری، حاوی متاکائولن، میکا، سرباره کوره آهن‌گدازی و الیاف فولادی ساخته شده است. متاکائولن و میکا با درصد‌های وزنی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ با سرباره جایگزین شده‌اند. آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش عبارتند از: مقاومت فشاری (سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز)، مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز، مقاومت کششی مستقیم در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری پس از قرارگیری تحت حرارت‌های 100°C ، 200°C ، 400°C و 600°C ، ضریب طاقت خمشی نمونه‌های حرارت دیده و حرارت ندیده، آزمایش جذب آب اولیه و نهایی، آزمایش مقاومت الکتریکی و در نهایت آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر نتایج آزمایش‌های مذکور تأثیر چشمگیری داشته است، این موضوع به ویژه در نتایج مربوط به مقاومت فشاری در سن ۷ روزه دیده شد، به طوری که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۴ به ۸ مول باعث شد، مقاومت فشاری ۷ روزه به طور متوسط ۲۲٪ افزایش یابد. این مقدار برای سن ۹۰ روزه ۶٪ بدست آمد. همچنین نتایج نشان دهنده اثر مثبت میکا بر بهبود مقاومت حرارتی تحت اثر دمای بالا (600°C) بوده است. در هر دو گروه (فاقد الیاف) و (حاوی الیاف) با غلظت‌های هیدروکسید سدیم ۴ و ۸، جایگزینی ۵٪ میکا به ترتیب باعث افزایش ۱۴/۷٪ و ۳/۳٪ مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد حاصل شد. افزایش درصد جایگزینی میکا، کاهش مقاومت خمشی ملات ژئوپلیمری را در پی داشت.

کلمات کلیدی: میکا، متاکائولن، ملات‌های ژئوپلیمری، دوام، الیاف فولادی کوتاه، ریزساختار، سرباره کوره آهن‌گدازی، خواص مکانیکی.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۳/۰۸/۱۳	۱۴۰۴/۰۴/۰۳	۱۴۰۴/۰۴/۲۰	۱۴۰۴/۰۴/۲۰	۱۴۰۵/۰۲/۳۱	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.486232.3558
*نویسنده مسئول:		امین قلی زاد			
پست الکترونیکی:		gholizad@uma.ac.ir			

۱- مقدمه

کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و استفاده از محصولات سازگار با محیط زیست از جمله روش‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. یکی از صنایع بزرگی که باعث تولید گاز دی اکسید کربن می‌شود صنعت تولید سیمان است. نیاز به ساخت سازه‌ها، همزمان با گسترش و توسعه شهرها، روز به روز افزایش می‌یابد و همین امر موجب شده بتن به عنوان یکی از پرمصرف ترین مواد و مصالح ساختمانی شناخته شود. یک راه حل مناسب برای کاهش گازهای گلخانه‌ای تولید بتنی است که در آن مصرف سیمان به حداقل برسد. در سال‌های اخیر محققان بتن ژئوپلیمری را به عنوان بتنی که سیمان در ساختار آن به عنوان ماده اصلی استفاده نمی‌شود معرفی کرده‌اند. خمیر چسباننده در ساختار این نوع بتن از ترکیب یک ماده پایه و محلول فعالساز ایجاد می‌شود. ساختن بتنی که علاوه بر داشتن مشخصات مکانیکی مطلوب، دوام بالایی نیز داشته باشد، گام مؤثری در جهت رسیدن به اهداف توسعه پایدار محسوب شود. به کار گرفتن برخی از مواد معدنی در مخلوط‌های بتنی، نقش مؤثری بر بهبود مشخصات دوامی و مکانیکی بتن دارد؛ از این رو محققان در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای را درباره استفاده از مواد با خاصیت پوزولانی در مخلوط‌های سیمانی (به عنوان سیمان ژئوپلیمری یا سیمان سبز) انجام داده‌اند. استفاده از این مواد می‌تواند راه حل مؤثری برای کاهش گازهای گلخانه‌ای معرفی شود.

این پژوهش به بررسی کاربرد الیاف فلزی کوتاه به صورت ترکیبی و انفرادی بر مبنای سرباره کوره آهنگدازی و متاکائولن و میکا در مخلوط ملات ژئوپلیمری جهت بررسی مقاومت‌های مکانیکی می‌پردازد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در مورد خواص مکانیکی و دوام ملات-های ژئوپلیمری انجام شده است که در این جا به اهم آنها اشاره می‌شود:

Okye و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی ریزساختار ملات ژئوپلیمری حاوی میکروسیلیس و سرباره پرداختند. نتایج تصاویر SEM نشان داد که میکروسیلیس باعث تشکیل ساختارهای متراکم تر و کاهش تخلخل ملات می‌شود [۱]. آنها دریافتند که واکنش‌های شیمیایی میکروسیلیس با سرباره سبب تشکیل پیوندهای قوی تری می‌شود که به دوام حرارتی ملات کمک می‌کند.

Islam و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی اثر الیاف فولادی بر خواص مکانیکی و مقاومت ضد ضربه‌ای بتن ژئوپلیمری سبک نتیجه گرفتند که افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن ژئوپلیمری سبک در مقاومت خمشی، کششی و ضد ضربه‌ای آن بهبود ایجاد می‌کند [۲]. Saghafi و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی نقش الیاف فولادی در کاهش تنش داخلی و بهبود رفتار ملات ژئوپلیمری تحت بارهای تکراری دریافتند که الیاف فولادی باعث تشکیل ساختارهای کششی پایدار می‌شود و تنش‌های داخلی تحت دماهای بالا را کاهش می‌دهد و در رفتار ملات بعد از ایجاد اولین ترک بهبود ایجاد می‌کند [۳].

He و همکاران (۲۰۲۰) با مطالعه خواص حرارتی و مکانیکی ژئوپلیمرها تحت تأثیر دماهای بالا به این نتیجه رسیدند که عواملی نظیر نوع ماده پایه (مانند سرباره کوره آهنگدازی، متاکائولن و میکا)، غلظت محلول فعال کننده (مانند NaOH) و وجود الیاف فولادی نقش مهمی در تغییرات ریزساختاری و عملکرد مکانیکی ژئوپلیمرها دارند [۴].

Kohani Khoshkbijari و همکاران (۲۰۲۰) نقش میکا را در کاهش جذب آب و بهبود دوام حرارتی ملات ژئوپلیمری بررسی کردند و نتیجه گرفتند که جایگزینی ۵٪ میکا با سرباره علاوه بر کاهش جذب آب اولیه، مقاومت حرارتی تحت دماهای بالا (۶۰۰°C) را افزایش می‌دهد [۵]. این امر به دلیل وجود ذرات ورقه‌ای میکا است که باعث تشکیل ساختارهای متراکم تر می‌شود.

Madani و Hosseinbor (۲۰۲۰) به بررسی خواص مکانیکی و دوام ملات ژئوپلیمری حاوی ترکیب میکا و متاکائولن پرداختند. نتایج نشان داد که ترکیب ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن در مقایسه با استفاده انفرادی از این مواد بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد [۶]. این ترکیب ساختارهای C-S-H پایداری را تشکیل می‌دهد که سبب بهبود دوام حرارتی و مقاومت فشاری ملات می‌شود.

Gencil و همکاران (۲۰۲۰) خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمری را با بتن سیمانی معمولی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که ملات ژئوپلیمری حاوی میکا و متاکائولن در دماهای بالا مقاومت فشاری و خمشی بالاتری نسبت به بتن سیمانی دارد [۷]. مطابق نتایج تحقیق استفاده از مواد پوزولانی مانند متاکائولن و میکا به دوام حرارتی و مقاومت ضد خوردگی ملات کمک می‌کند.

Pachideh و Gholhaki (۲۰۲۰) با مطالعه رفتار پس از حرارت ملات سیمانی حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهنگدازی گرانوله شده (GGBFS) دریافتند که افزودن میکروسیلیس و سرباره کوره آهنگدازی به ملات سیمانی تحت شرایط حرارتی بالا در

مقاومت فشاری و دوام حرارتی بهبود ایجاد می‌کند [۸]. بررسی‌ها نشان داد که افزایش غلظت فعال‌کننده (NaOH) باعث شد که مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری در سن ۷ روزه به‌طور متوسط ۲۵٪ افزایش یافت، اما این اثر در سن ۹۰ روز کاهش داشت [۸].

Pachideh و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی عملکرد بتن حاوی فنرهای بازیافت‌شده در شرایط پس از آتش‌سوزی نتیجه گرفتند که استفاده از فنرهای بازیافت‌شده به‌عنوان الیاف فولادی کوتاه در بتن، تحت شرایط حرارتی بالا در مقاومت فشاری و ظرفیت کرنش قبل از شکست بهبود قابل توجهی ایجاد می‌کند. بر اساس یافته‌های پژوهش می‌توان از مواد بازیافت‌شده به‌عنوان جایگزین مؤثری برای الیاف فولادی استاندارد در بتن‌های مقاوم به حرارت استفاده کرد [۹].

Pachideh و Gholhaki (۲۰۲۰) اثر الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در بهبود عملکرد تراورس‌های بتنی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف فولادی با درصد حجمی ۱٪ و الیاف پلی‌پروپیلن با درصد حجمی ۰.۵٪ باعث شد که خواص مکانیکی و دوام بتن تحت شرایط مختلف حرارتی بهترین عملکرد را ارائه دهد [۱۰].

Nanditha و Saikumar (۲۰۲۱) به مطالعه اثر میکا بر مقاومت کششی ملات ژئوپلیمری پرداختند و دریافتند که افزودن ۵٪ میکا باعث افزایش ۱۵٪ مقاومت کششی می‌شود، اما با افزایش درصد جایگزینی مقاومت مذکور به‌صورت معکوس افزایش می‌یابد [۱۱].

Dalvand و Ahmadi (۲۰۲۱) در تحقیق خود نتیجه گرفتند که متاکائولن به‌عنوان یک ماده فعال، واکنش‌های شیمیایی را در ساختار ملات ژئوپلیمری تقویت می‌کند و باعث افزایش ظرفیت کرنش کششی و خمشی می‌شود [۱۲]. افزودن ۱۰٪ متاکائولن به مخلوط، بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری سنین اولیه (۷ روز) ایجاد کرد.

Mohammadi Fatideh و Ranjbar (۲۰۲۱) به بررسی اثر غلظت محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) بر روی رشد مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری پرداختند و دریافتند که افزایش غلظت NaOH از ۴ به ۸ مولار، مقاومت فشاری در سنین اولیه (۷ روز) را تا ۲۲٪ افزایش می‌دهد [۱۳]. این اثر به‌دلیل تسریع واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون در ساختار ملات است.

Singh (۲۰۲۱) دریافت که افزایش غلظت فعال‌کننده قلیایی (NaOH) به‌ویژه در سنین اولیه، بهبود چشمگیری در مقاومت فشاری و خمشی ملات ایجاد می‌کند [۱۴]. نتایج نشان داد غلظت بالای فعال‌کننده، واکنش‌های شیمیایی بین مواد آلومینوسیلیکاتی و محلول قلیایی را تقویت می‌کند.

Moodi و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که ترکیب میکا و متاکائولن به‌عنوان جایگزین سرباره با تقویت واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون در مقاومت فشاری تحت دماهای بالا بهبود ایجاد می‌کند [۱۵]. آنها از طریق آنالیز EDS و SEM به بررسی تأثیر میکا و متاکائولن در ساختار داخلی ملات ژئوپلیمری پرداختند و نتیجه گرفتند که میکا به‌دلیل داشتن ساختار ورقه‌ای سبب تشکیل پیوندهای C-S-H پایداری می‌شود که به دوام حرارتی و مقاومت فشاری در دماهای بالا کمک می‌کند [۱۵].

Ahmed و Kishar (۲۰۲۱) با بررسی تأثیر دماهای بالا بر رفتار حرارتی سیمان‌های ژئوپلیمری (ترکیب متاکائولین با گرد و غبار کوره سیمان) نتیجه گرفتند که استفاده از متاکائولن به‌همراه پودر گرد و غبار کوره سیمان، تحت شرایط حرارتی بالا، بهبود اساسی در مقاومت فشاری و خواص دوامی مخلوط‌های ژئوپلیمری ایجاد می‌کند. به این ترتیب افزودن مواد پوزولانی می‌تواند در دماهای بالا نقش مؤثری در تشکیل ساختارهای مترکم‌تر و پایداری داشته باشد [۱۶].

Toufigh و Pachideh (۲۰۲۲) به مطالعه رفتار ملات سیمانی حاوی مواد پوزولانی در دماهای بالا پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از پوزولان‌ها مانند متاکائولن و میکا در مقاومت حرارتی ملات سیمانی عملکرد مطلوبی دارد. استفاده از میکا به‌عنوان جایگزین سرباره در دماهای بالاتر ۴۰۰°C و ۶۰۰°C در کاهش تخریب و افزایش مقاومت حرارتی نقش مؤثری داشت. افزودن الیاف فولادی در درصد حجمی ۱٪، باعث شد که ملات سیمانی حاوی پوزولان‌ها تحت دماهای بالا، رفتار پایداری‌تری نشان دهد و از ایجاد ترک‌های ریز جلوگیری کند [۱۷].

Kljajević و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود نتیجه گرفتند که تغییر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر رشد مقاومت فشاری و خواص دوامی نمونه‌های ژئوپلیمری تحت شرایط حرارتی مختلف تأثیرگذار است. تنظیم غلظت فعال‌کننده قلیایی می‌تواند روشی مؤثر برای بهبود عملکرد ملات ژئوپلیمری در دماهای بالا باشد [۱۸].

Kozhukhova و همکاران (۲۰۲۲) دریافتند که افزودن مواد اصلاح کننده مانند متاکائولن و میکا به مخلوط ژئوپلیمری، تحت شرایط حرارتی مختلف در خواص مکانیکی و حرارتی بهبود چشمگیری ایجاد می کند. از این مواد می توان برای کاهش مصرف سیمان و بهبود دوام حرارتی ساختمان ها استفاده کرد [۱۹].

Kaya (۲۰۲۲) به بررسی اثر الیاف فولادی به عنوان ماده افزودنی در مقاومت حرارتی بالای ملات ژئوپلیمری پرداخت. نتایج نشان داد که افزودن الیاف فولادی با درصد حجمی مختلف به مخلوط ملات ژئوپلیمری تحت شرایط حرارتی بالا (بالتر از 400°C) در کاهش تنش داخلی و بهبود مقاومت حرارتی نقش مهمی دارد [۲۰].

Chen و همکاران (۲۰۲۳) تاثیر الیاف فولادی کوتاه در ملات ژئوپلیمری را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که افزودن الیاف فولادی با درصد حجمی ۱٪، مقاومت خمشی و کششی ملات را به طور معناداری افزایش می دهد [۲۱]. این الیاف در کاهش تنش داخلی تحت بارهای حرارتی و ایجاد پل زدن در ترک های ریز نقش کلیدی دارند که به بهبود رفتار ملات تحت بارهای تکراری منجر می شود.

Mermerdaş و همکاران (۲۰۲۳) اثرات ترکیبی میکروسلیس، الیاف فولادی و سنگدانه های سبک مصنوعی بر خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری بررسی کردند. نتایج نشان داد که متاکائولن به عنوان یک ماده پوزولانی، واکنش های ژئوپلیمریزاسیون را تسریع می کند و باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی می شود [۲۲]. بر اساس این تحقیق جایگزینی ۵-۱۰٪ متاکائولن با سرباره، بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر درصد های جایگزینی ارائه می دهد.

Usman Kankia و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی تأثیر دماهای بالا بر مقاومت فشاری و ریزساختار ملات ژئوپلیمری حاوی خاکستر بادی و خاکستر لجن نفتی نتیجه گرفتند که افزودن خاکستر لجن نفتی به مخلوط ژئوپلیمری در بهبود مقاومت حرارتی نمونه ها تأثیر بسزایی داشت [۲۳]. در پژوهش حاضر از سرباره کوره آهنگدازی با کلسیت بالا (۳۸/۱۰٪) و آلومینات پایین (۱۳/۰۰٪) استفاده شده است. این تحقیق به بررسی تأثیر الیاف فولادی کوتاه به همراه سرباره کوره آهنگدازی (GGBFS)، متاکائولن و میکا در بهبود خواص مکانیکی و دوام ملات ژئوپلیمری می پردازد. نوآوری های تحقیق شامل موارد زیر است:

- ۱- استفاده همزمان از مواد پوزولانی طبیعی (میکا) و صنعتی (متاکائولن) به عنوان جایگزین سرباره.
- ۲- بررسی اثر ترکیب میکا و متاکائولن در درصد های وزنی مختلف (۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) بر خواص مکانیکی و دوام ملات.
- ۳- بررسی اثر حرارت در دماهای مختلف (100°C ، 200°C ، 400°C و 600°C) بر مقاومت فشاری، خمشی و کششی ملات ژئوپلیمری.
- ۴- ارزیابی نقش الیاف فولادی کوتاه در کاهش تأثیرات منفی حرارت و بهبود رفتار پس از شکست.
- ۵- تحلیل ریزساختار ملات ژئوپلیمری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز عناصر با EDS، به منظور شناسایی تغییرات ساختاری قبل و بعد از قرارگیری تحت حرارت.
- ۶- ارائه طرح اختلاط بهینه برای ملات ژئوپلیمری حاوی میکا، متاکائولن و الیاف فولادی کوتاه که از لحاظ کارایی و دوام بهترین عملکرد را ارائه می دهد.

نوآوری و تمایز پژوهش حاضر: این پژوهش با تمرکز بر استفاده همزمان از مواد پوزولانی طبیعی (میکا) و صنعتی (متاکائولن) به عنوان جایگزین سرباره کوره آهنگدازی، به بررسی خواص مکانیکی و دوام ملات ژئوپلیمری می پردازد. برخلاف تحقیقات پیشین که عمدتاً بر استفاده انفرادی از میکا یا متاکائولن تمرکز داشته اند، این مطالعه اثر ترکیبی این مواد در درصد های وزنی مختلف (۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) را بررسی کرده و طرح اختلاط بهینه ای را با استفاده از الیاف فولادی کوتاه پیشنهاد می دهد. همچنین، تحلیل ریزساختار ملات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز عناصر با EDS، تغییرات ساختاری قبل و بعد از قرارگیری در معرض دماهای مختلف (100°C ، 200°C ، 400°C و 600°C) را به صورت جامع مورد ارزیابی قرار داده است. نوآوری دیگر این پژوهش، بررسی نقش الیاف فولادی کوتاه در کاهش اثرات منفی حرارت و بهبود رفتار پس از شکست ملات ژئوپلیمری است که در مقایسه با تحقیقات قبلی، رویکردی جامع تر به عملکرد حرارتی و مکانیکی ارائه می دهد. این مطالعه با ارائه طرح اختلاط بهینه و تحلیل دقیق ریزساختاری، گامی مؤثر در جهت توسعه مصالح ساختمانی پایدار و مقاوم در شرایط محیطی سخت برمی دارد.

۲- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده برای آزمایش مورد نظر عبارتند از: سدیم هیدروکسید (سود)، سدیم سیلیکات (آب شیشه)، سرباره کوره آهن گدازی، متاکائولن، میکا، الیاف فلزی کوتاه و ماسه.

۲-۱- سدیم هیدروکسید

سدیم هیدروکسید یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH که ماده‌ای جامد و سفید رنگ با دمای ذوب 318°C و چگالی $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ۲/۱۳ است. در این پژوهش از محلول سود ۴ و ۸ مولار برای ساخت ملات‌های ژئوپلیمری استفاده شده است. جدول ۱ مشخصات هیدروکسید سدیم را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات هیدروکسید سدیم

درصد خلوص	حلالیت	انحلال پذیری در آب	اسیدی	دمای ذوب	دمای جوش	چگالی	جرم مولی	فرمول شیمیایی
۹۹-۹۸٪	در آب، اتانول و متانول محلول است	20°C	۱۳	318°C	1388°C	1.32g/cm^3	$39.997\frac{\text{g}}{\text{mol}}$	هیدروکسید سدیم (NaOH)

۲-۲- سدیم سیلیکات (آب شیشه)

سدیم سیلیکات نوعی سیلیکات قلیایی حل شدنی و مایعی شفاف و بی رنگ است که در مواد شوینده، پاک کننده‌های صنعتی، چسب، سیمان سازی، رنگ، کاغذ، قالب ریخته‌گری، سرامیک و کنترل خوردگی در لوله‌های آب کاربرد دارد [۲۴، ۲۵]. جدول ۲ مشخصات سیلیکات سدیم را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات سیلیکات سدیم

انحلال - پذیری	ضریب شکست	حلالیت در آب	نقطه ذوب	دانسیته	وزن مولکولی	فرمول شیمیایی	مشخصات
نامحلول در الکل	۱/۵۲	$160.6\text{g}/100\text{mol}$ (80°C)	$22/2\text{g}/100\text{mol}$ (20°C)	1.089g/cm^3	261g/cm^3	122.06g/mol	محلول سیلیکات سدیم

۲-۳- سرباره کوره آهن‌گدازی

سرباره فولاد سازی، محصول جانبی صنعت تولید آهن خالص و فولاد است. در این پژوهش از سرباره به عنوان ماده اولیه حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی استفاده شده است که خواص مکانیکی مناسبی از جمله واکنش‌پذیری بالایی را داراست. مشخصات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سرباره در جدول شماره ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۳: مشخصات فیزیکی پودر سرباره کوره آهن‌گدازی

درصد باقی روی الک نمره ۳۰	درصد باقی روی الک نمره ۵۰	درصد فاز آمورف	نرمی بلین gr/cm^2	نمونه
۲۷	۱۴	۸۷	۳۵۰۰	سرباره پودر شده

جدول ۴: آنالیز شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی

SO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	نمونه
۰/۶۰	۱/۱۰	۰/۵۰	۱۳/۰۰	۶/۶	۳۸/۱۰	۰/۶۰	۳۶/۰	سرباره (%)

۴-۲- متاکائولن

متاکائولن یک سیلیکات آلومینیوم آمورف به رنگ سفید و دارای خواص پوزولانی است. متاکائولن از کلسینه شدن کائولن در درجه حرارت بالا حاصل می شود. حرارت دادن ساختار کریستالی آن را از بین می برد و آن را تبدیل به یک سیلیکات آلومینیوم آمورف می کند. در این پژوهش از متاکائولن به عنوان ماده اولیه حاوی آلومینوسیلیکات استفاده شد. مشخصات فیزیکی پودر متاکائولن در جدول شماره ۵ آمده است. با استفاده از آنالیز XRF متاکائولن ترکیب شیمیایی آن در جدول شماره ۶ آمده است.

جدول ۵: مشخصات فیزیکی پودر متاکائولن مصرف شده

نرمی بلین (gr/cm^3)	وزن مخصوص (gr/cm^3)	آزمایش فیزیکی
۶۸۵۶	۲/۷	پودر متاکائولن

جدول ۶: آنالیز شیمیایی متاکائولن مصرف شده

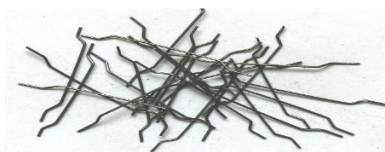
MgO	Fe_2O_3	Na_2O	CaO	Al_2O_3	SiO_2	نمونه
۰/۸۹	۰/۳۸	۰/۱۰	۰/۰۹	۴۲/۸	۵۵/۹	متاکائولن (%)

۵-۲- الیاف

در پژوهش حاضر برای بررسی اثر الیاف در ملات ژئوپلیمری حاوی متاکائولن و میکا از الیاف فولادی با درصد حجمی ۱٪ استفاده شده است. الیاف فولادی مصرفی از نوع کوتاه و با طول تقریبی ۲۵ تا ۶۰ میلی متر است. مشخصات الیاف فولادی مصرفی در جدول ۷ ارائه شده است. تصویر الیاف فولادی کوتاه مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است. شکل ۱ نمای واضحی از شکل مستقیم و ابعاد الیاف را نشان می دهد که به صورت یکنواخت در ملات ژئوپلیمری توزیع شده اند تا مقاومت در برابر ترک و خواص مکانیکی را بهبود بخشند.

جدول ۷: مشخصات الیاف فولادی مصرف شده

نوع	الیاف فلزی
قطر (mm)	۰/۵-۱
طول (mm)	۲۵-۶۰
نسبت طول به قطر (%)	۵۰-۶۰
الانگیشن (%)	کمتر از ۳٪
رویه محافظ	روکش مس، گالوانیزه
مقاومت کششی (MPa)	۱۰۰۰-۱۲۰۰
مقاومت خمشی (MPa)	۱۸۰-۲۱۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۰۰-۲۱۰
وزن مخصوص (چگالی) Kg/m^3	۷۸۵۰
درصد ازدیاد طول (%)	۳-۵
جنس مواد سازنده	فولادهای پر کربن و آلیاژی
شکل ظاهری	مستقیم با سطح صاف
سطح مقطع	گرد



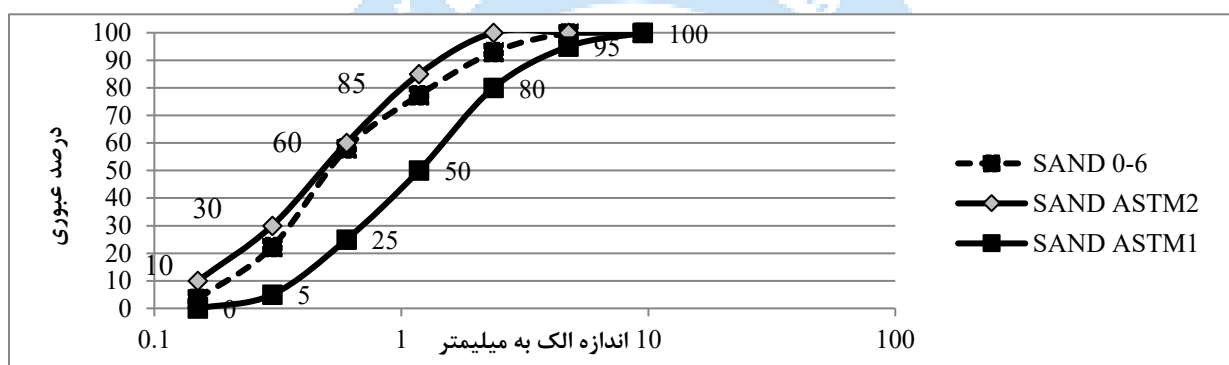
شکل ۱: الیاف فولادی کوتاه

۶-۲- ماسه

ماسه مصرفی با بزرگترین اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر در جدول ۸ مشاهده می‌شود. دانه‌بندی ماسه در نمودار شکل ۲ و جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۸: مشخصات فیزیکی ماسه مصرف شده

آزمایش فیزیکی	ماسه (۴/۷۵mm)
وزن مخصوص (در حالت اشباع با سطح خشک SSD)	2611 Kg/m^3
جذب آب (%)	۲/۴ %



شکل ۲: نمودار دانه‌بندی ماسه مصرف شده بر اساس ASTM C۳۳ [۲۶]

جدول ۹: دانه‌بندی ماسه مصرفی

ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۹۷	۹۲/۹۶	۷۷/۳۵	۵۸	۲۲/۳۲	۳/۴۴
اندازه الک	۱۹mm	۱۲/۵mm	۹/۵mm	۴/۷۵mm	۲/۳۶mm	۱/۱۸mm	۶۰۰µm	۳۰۰µm	۱۵۰µm

۷-۲- فوق روان کننده

با هدف کاهش تنش جاری شدن و افزایش ویسکوزیته خمیری در مخلوط ملات ژئوپلیمری، به ویژه در طرح‌های حاوی متاکائولن و میکا از فوق روان کننده استفاده شده است. در این پژوهش، برای دستیابی به کارایی و روانی مطلوب و کمک به توزیع بهتر ذرات در مخلوط ملات ژئوپلیمری بر پایه سرباره حاوی متاکائولن و میکا از فوق روان کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر با نام تجاری FARCO PLAST P10N محصول شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است. بر اساس توصیه شرکت سازنده و دیتاشیت محصول، مقدار مصرف فوق روان کننده در بازه ۰/۸ تا ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی (شامل سرباره کوره آهن‌گدازی، متاکائولن و میکا) تعیین شده است. این مقدار با توجه به نیاز به اسلامپ ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر و حفظ کارایی ملات در شرایط آزمایشگاهی و کارگاهی بهینه‌سازی شده است. برای اطمینان از صحت مقدار مصرف، آزمایش‌های اولیه در کارگاه انجام شده و نتایج با دیتاشیت شرکت سازنده مطابقت داده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده در جدول ۱۰ ارائه شده و جزئیات مقدار مصرف آن برای هر طرح اختلاط در جدول ۱۲ درج گردیده است.

جدول ۱۰: مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده مصرفی^۱

کلراید (PPM)	وزن مخصوص Kg/Lit	حالت فیزیکی	رنگ	طبیعت یونی	ترکیب شیمیایی
حداکثر ۵۰۰	1.1 ± 0.2 در 20°C	مایع	سبز تیره	آنیونی	کوپلیمرهای اصلاح شده پلی-کربوکسیلیک اسید

۸-۲- میکا

میکا گروهی از ورق های سیلیکات کانی با داشتن درجه کاملی از رخ است. این کانی از یک سیلیکات آبدار آلومینیوم به همراه پتاسیم یا سدیم در اشکال گوناگون تشکیل شده است. ترکیبات سنگ میکا از اکسیژن، سیلیسیم، آلومینیوم، پتاسیم و مقداری ناخالصی دیگر است. میکاها حدود ۴٪ از کانی ها را تشکیل می دهند. داشتن مقاومت الکتریکی و حرارتی بالا از ویژگی های مهم میکاست. رنگدانه های میکا طبیعی و یا مصنوعی هستند. بیشتر رنگ های پودر میکای طبیعی سفید، زرد و خاکستری است. پودر میکای طبیعی از سنگی به نام مسکوویت به دست می آید. مسکوویت یک ماده معدنی سیلیکات و سرشار از پتاسیم و آلومینیوم است که شکل عجیبی دارد و بیشتر در ورقه های نازک، شفاف و تا حدودی براق ایجاد می شود. مسکوویت با وجود نازک و ظریف بودن یک ماده بادوام به شمار می آید که برای ایجاد پودر میکا ضروری است. مسکوویت با یک فرآیند آسیاب طولانی به پودر میکا تبدیل می شود. فرآیند سنگ زنی، این سنگ کریستالی را به پودر بسیار ریز تبدیل می کند که کاربردهای مختلفی دارد. قیمت میکای پودر شده نسبت به سنگ آن به دلیل سپری کردن مراحل فرآوری در کارخانه گران تر است. مشخصات فوق روان کننده در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱: مشخصات فیزیکی پودر متاکائولن مصرف شده^۲

نمونه	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	S	LOI	MnO	P ₂ O ₅
میکا (%)	۴۷/۳۴٪	۳۴/۶۰٪	۲/۴۴٪	<۰/۰۱٪	۰/۷۹٪	<۰/۰۱٪	<۰/۰۱٪	۴/۶۱٪	۰/۰۹٪	۰/۱۵٪

۳- ساخت نمونه های آزمایشگاهی

در این پژوهش ۲۰ طرح مختلف از ملات ژئوپلیمری حاوی متاکائولن، میکا و الیاف فولادی ساخته شده است. طرح شاهد فاقد مواد افزودنی (الیاف، متاکائولن و میکا) است. سایر طرح های اختلاط به دو گروه حاوی و فاقد الیاف تقسیم شده اند. نمونه های آزمایشگاهی بر اساس غلظت مولاریته هیدروکسید سدیم به دو گروه تقسیم گردید. گروه اول (گروه A) با غلظت هیدروکسید سدیم ۴ مولار و گروه دوم (گروه B) با غلظت ۸ مولار. جزئیات مربوط به نمونه های آزمایشگاهی در جدول ۱۲ آمده است. در نام گذاری طرح های اختلاط حروف (MP) به معنای حضور پودر متاکائولن، حروف (SS) به معنای سدیم سیلیکات، حروف (SH) به معنای سدیم هیدروکسید و حروف (BS) به معنای مواد چسباننده جامد است. حرف (M) حضور میکا و حرف (S) حضور الیاف فلزی را بیان می کند.

جدول ۱۲: جزئیات طرح اختلاط نمونه های آزمایشگاهی

No.	Name	Slag Kg/m ³	Mica	Metakaolin Powder	NaOH molarity	Fiber Steel (v) %	Kg/m ³ Na ₂ SiO ₃	NaOH Kg/m ³	Sand Kg/m ³	SS+SH/BS	SS/SH	SP (%)	Concrete Slump (mm)
۱	CtrlA	۷۰۰	۰	۰	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۰	-

^۱ <https://shimisakhteman.net>^۲ <https://aryapowder.ir>

۲	M5A	۶۶۵	۵	۰	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۰/۸	۱۱۰
۳	M10A	۶۳۰	۱۰	۰	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۰	۱۲۰
۴	M15A	۵۹۵	۱۵	۰	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۲	۱۳۰
۵	MP5A	۶۶۵	۰	۵	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۰/۸	۱۱۰
۶	MP10A	۶۳۰	۰	۱۰	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۰	۱۲۰
۷	MP15A	۵۹۵	۰	۱۵	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۲	۱۳۰
۸	M5 MP5A	۶۳۰	۵	۵	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۰	۱۲۰
۹	M5 MP10A	۵۹۵	۵	۱۰	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۲	۱۳۰
۱۰	M10 MP5A	۵۹۵	۱۰	۱۵	۴	۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۲	۱۳۰
۱۱	CtrlB	۷۰۰	۰	۰	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۰	-
۱۲	M5B	۶۶۵	۵	۰	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۰/۸	۱۱۰
۱۳	M10B	۶۳۰	۱۰	۰	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۰	۱۲۰
۱۴	M15B	۵۹۵	۱۵	۰	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۲	۱۳۰
۱۵	MP5B	۶۶۵	۰	۵	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۰/۸	۱۱۰
۱۶	MP10B	۶۳۰	۰	۱۰	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۰	۱۲۰
۱۷	MP15B	۵۹۵	۰	۱۵	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۲	۱۳۰
۱۸	M5 MP5B	۶۳۰	۵	۵	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۰	۱۲۰
۱۹	M5 MP10B	۵۹۵	۵	۱۰	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۵	۱۴۰
۲۰	M10 MP5B	۵۹۵	۱۰	۵	۸	۱	۲۵۰	۱۰۰	۱۱۷۲	۰/۵	۲/۵	۱/۵	۱۴۰

در جدول ۱۲ طرح اختلاط، وزن ماسه مورد استفاده با توجه به واکنش پذیری بالای سرباره کوره آهنگدازی و میزان ریزی آن از طرف دیگر 1172 Kg/m^3 در نظر گرفته شد. طرح‌های ساخته شده در دو دسته حاوی الیاف و بدون الیافاند. همچنین از درصدهای ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ از متاکائولن و میکا به عنوان جایگزین سرباره استفاده شده است. در طرح اختلاط استفاده شده از سرباره نیز با ثابت نگه داشتن مقدار سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری مطلوبی بدست آمد. در نهایت نمونه ۱ در مولار ۴ و نمونه ۱۱ در مولار ۸ انتخاب شد. طرح اختلاط نهایی در جدول ۱۲ آمده است. دلایل انتخاب این طرح اختلاط از بین تمام نمونه‌های طرح اختلاط به عوامل زیر بستگی داشت:

۱- تخلخل ۲- افزایش حجم پس از گیرش اولیه ملات ۳- میزان چسبندگی ۴- زمان گیرش در مقایسه با سایر طرح اختلاط‌های ملات. برای مثال در نمونه طرح شماره ۹ و ۱۰، تخلخل نمونه‌ها به صورت محسوسی با بقیه طرح اختلاط‌های سرباره، تفاوت فاحشی داشت. بطور کلی در بتن ژئوپلیمر معیار چشمی و مقایسه طرح اختلاط‌ها با هم تأثیر چشمگیری دارد که علت آن تشکیل نشدن پیوندهای ژئوپلیمراسیون در طرح اختلاط‌های معیوب به دلیل رئولوژی نامناسب است. در جدول ۱۳ مقدار اجزای تشکیل دهنده برای یک متر مکعب بتن ژئوپلیمری ارائه شده است.

جدول ۱۳: مقدار اجزای تشکیل دهنده برای یک متر مکعب بتن ژئوپلیمری (Kg/m^3)

آب	سدیم هیدروکسید	سدیم سیلیکات	سرباره	شن
۴۶/۰۲	۱۸۲/۳۳	۳۰۶/۵۵	۵۵۹/۴۰	۱۸۵۶/۱۳

۳-۱- روش اجرای طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

ابتدا طبق طرح اختلاط نهایی مصالح اندازه‌گیری شد. سپس ماسه درون میکسر ریخته شد و بعد از مخلوط شدن به مدت ۱ دقیقه سرباره به میکسر اضافه گردید. بعد از ۲ دقیقه که سنگدانه و سرباره به خوبی مخلوط شدند محلول سود (سدیم هیدروکسید) و آب شیشه (سدیم سیلیکات) را با هم مخلوط و به میکسر ملات افزوده شد. ۲ تا ۳ دقیقه فرصت داده شد تا ملات با یکدیگر به خوبی ترکیب شوند و در نهایت آب به آن اضافه گردید. بعد از ۱-۲ دقیقه مخلوط همگن و یکنواختی بدست آمد. ملات بدست آمده را در سه مرحله درون قالب-

های روغن کاری شده ریخته و هر بار با چکش مخصوص کوبش انجام شد. با توجه به نوع قالب‌های استفاده شده با چند آزمون و خطای اولیه در ملات تازه تخلخل زیادی مشاهده گردید که علت آن چسبندگی بالای ملات و دیواره قالب تخمین زده شد. نمونه‌ها به مدت ۱ دقیقه روی دستگاه ویبره قرار داده شد تا حباب‌های هوای محسوس در داخل و اطراف قالب تا حد ممکن خارج شود. در انتها قالب‌ها طبق شرایط عمل‌آوری یکسان در گرم‌خانه قرار داده شد.

۴- انجام آزمایشات

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری به منظور ارزیابی کیفیت مکانیکی ملات ژئوپلیمری انجام شد. این آزمایش بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ISIRI 1608-1 (روش آزمون مقاومت فشاری ملات سیمان هیدرولیکی) روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گرفت. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای یکسان در گرم‌خانه عمل‌آوری شده و سپس از قالب‌ها خارج شده و تا زمان انجام آزمایش در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. شکل ۳ شکست نمونه مکعبی در آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ۳: شکست نمونه مکعبی در آزمایش مقاومت فشاری

۴-۲- آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ISIRI ۱۱۵۶۲ (روش آزمون مقاومت خمشی بتن با استفاده از تیر ساده با بارگذاری سه نقطه‌ای) روی نمونه‌هایی با ابعاد $40 \times 40 \times 160$ میلی‌متر انجام شد. نمونه‌ها در دو لایه قالب‌گیری و هر لایه با استفاده از میز لرزان متراکم گردید. تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای این آزمایش ۲۰ نمونه بود که در سن ۲۸ روزه تحت بارگذاری با نرخ 0.2 مگاپاسکال بر ثانیه شکسته شدند. این آزمایش با روش بارگذاری مرکزی انجام گرفت و شکل ۴ شکست ملات ژئوپلیمری تحت آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۴: شکست ملات ژئوپلیمری تحت آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

۳-۴- ضریب طاقت خمشی نمونه های حرارت دیده و حرارت ندیده

ضریب طاقت خمشی به عنوان معیاری برای ارزیابی انرژی جذب شده توسط نمونه تحت بار خمشی، مطابق با استاندارد ملی ایران ISIRI ۱۵۶۱۱ و با استفاده از روش های عددی محاسبه شد. این پارامتر برای نمونه های گروه B (حاوی الیاف) در دو حالت حرارت دیده و حرارت ندیده تعیین گردید. سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی با استفاده از روش ذوزنقه ای (Trapezoidal Rule) و روابط (۱) و (۲) محاسبه شد:

$$E = \int_0^{\delta_f} P(\delta) d\delta \quad (1)$$

$$E = \frac{\Delta\delta}{2} [P_1 + 2(P_2 + P_3 + \dots + P_{n-1}) + P_n] \quad (2)$$

که در آن:

E : سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی (KN·mm)، $P(\delta)$: نیروی اعمالی در تابع جابجایی (KN) و δ_f : جابجایی نهایی در لحظه شکست کامل نمونه (mm). به دلیل نبود استاندارد ملی خاص برای محاسبه طاقت خمشی در ملات های ژئوپلیمری حاوی الیاف، از استاندارد ASTM ۱۶۰۹ [۲۷] به عنوان مرجع تکمیلی استفاده شد.

که در آن:

$\Delta\delta$: فاصله بین نقاط جابجایی (mm).

$P_1, P_2, \dots, P_n$: مقادیر نیرو در نقاط مختلف (KN).

۴-۴- آزمایش کشش مستقیم به روش برزلی

آزمایش کشش مستقیم به منظور ارزیابی مقاومت کششی ملات ژئوپلیمری انجام شد. به دلیل نبود استاندارد ملی معادل برای آزمایش کشش مستقیم با استفاده از نمونه های بریکت، این آزمایش بر اساس استاندارد بین المللی AASHTO ۱۳۲ [۲۸] انجام گرفت. نمونه های بریکت با طول تقریبی ۷۶ میلی متر و ضخامت ۲۵ میلی متر پس از عمل آوری ۲۸ روزه تحت نیروی کشش مستقیم تا لحظه شکست قرار گرفتند. شکل ۵ نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه و بارگذاری را نشان می دهد.



شکل ۵: آزمایش کشش مستقیم به روش برزلی

۴-۵- آزمایش جذب آب اولیه و نهایی

آزمایش جذب آب به عنوان شاخصی برای ارزیابی دوام ملات ژئوپلیمری بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ISIRI ۱۵۹۱۴ روی نمونه‌های مکعبی انجام شد. نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز در حوضچه آب در دمای اتاق عمل‌آوری شدند. آزمایش در دو حالت جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی (۷۲ ساعت) انجام گرفت. شکل ۶ قرارگیری نمونه‌ها در اون برای آزمایش جذب آب را نشان می‌دهد.



شکل ۶: قرارگیری نمونه‌ها در اون برای آزمایش جذب آب

۴-۶- آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی به منظور بررسی مقاومت ملات در برابر نفوذ یون کلراید انجام شد. به دلیل نبود استاندارد ملی معادل، این آزمایش بر اساس استاندارد بین‌المللی ASTM C ۱۲۰۲ [۲۹] (روش آزمون نشانگر الکتریکی توانایی بتن در مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید) انجام گرفت. نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه از آب خارج شده، سطوح آن‌ها خشک گردید و

مقاومت الکتریکی با استفاده از دستگاه اهم متر، صفحات مسی و خمیر تازه سیمان اندازه گیری شد. بر اساس استاندارد ACI ۲۲۲ [۳۰]، بتن هایی با مقاومت ویژه بیش از $20 \text{ K}\Omega.\text{cm}$ در برابر نفوذ یون کلر به شدت مقاوم هستند. رابطه مقاومت الکتریکی بتن با آهنگ خوردگی بر اساس پیشنهاد ACI ۲۲۲ [۳۰] در جدول ۱۴ آمده است. شکل ۷ نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه و بارگذاری را نشان می دهد.



شکل ۷: نمونه مکعبی تحت آزمایش مقاومت الکتریکی

جدول ۱۴: تأثیر مقاومت الکتریکی بتن بر آهنگ خوردگی آرمانور (ACI 222) [۳۰]

ناچیز	متوسط تا کم	زیاد	خیلی زیاد	آهنگ خوردگی
>20	۱۰ تا ۲۰	۵ تا ۱۰	<5	مقاومت ویژه الکتریکی ($\text{K}\Omega.\text{cm}$)

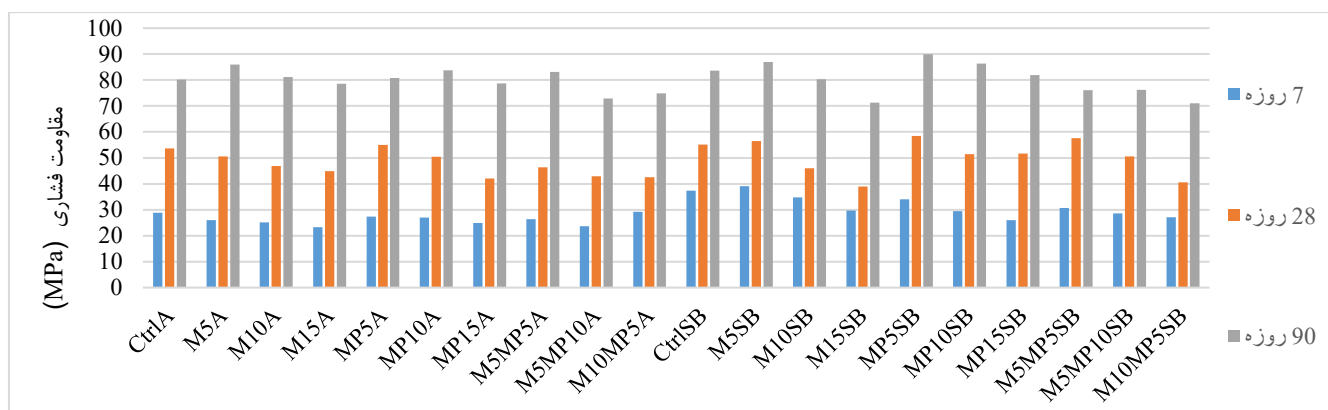
۷-۴- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تحلیل ریزساختار ملات ژئوپلیمری انجام شد. به دلیل نبود استاندارد ملی خاص برای این آزمون، روش استاندارد بین المللی ASTM C1۷۲۳ [۳۱] به کار گرفته شد. نمونه های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی متر از طرح M۱۰MP۵B (حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن) قبل و بعد از قرارگیری در دمای 600°C مورد بررسی قرار گرفتند. تصاویر SEM و آنالیز EDS برای شناسایی ترکیب شیمیایی و تغییرات ساختاری ناشی از حرارت استفاده شدند.

۵- بحث و بررسی نتایج

۵-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

برای انجام این آزمایش از نمونه های مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی متر استفاده شد. این آزمایش برای همه نمونه ها پس از عمل آوری تا سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایش برای سنین مختلف عمل آوری در شکل ۸ ارائه می شود.



شکل ۸: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ روزه

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری پس از عمل‌آوری تا سن ۷ روز برای طرح شاهد و سایر طرح‌های حاوی میکا و متاکائولن در حالت با و بدون الیاف، در شکل ۸ مشاهده می‌شود. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در نمونه‌های گروه A جایگزینی متاکائولن و میکا در تمام درصدهای وزنی با سرباره باعث کاهش مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری می‌شود؛ بطوری که افزایش درصد جایگزینی برای هر دو ماده سبب کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه می‌گردد. افزایش غلظت مولارسته هیدروکسید سدیم در مخلوط ملات ژئوپلیمری باعث بهبود مقاومت فشاری در سنین اولیه (۷ روزه) برای تمامی نمونه‌ها شده است. در این بین بیشترین اثر گذاری ناشی از افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، به طرح با جایگزینی ۵٪ میکا تعلق داشت؛ بطوری که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از مولار ۴ به ۸ سبب افزایش ۵۰٪ مقاومت فشاری ۷ روزه برای این طرح شده است. برای نمونه‌های حاوی پودر متاکائولن افزایش غلظت هیدروکسید سدیم در مقایسه با طرح‌های حاوی میکا اثرگذاری کمتری بر بهبود مقاومت فشاری ۷ روزه مشاهده شد؛ بطوری که میزان افزایش مقاومت برای طرح‌های با جایگزینی پودر متاکائولن به ۱۲/۵٪ رسید؛ در حالی که این عدد برای نمونه‌های با جایگزینی میکا ۳۸/۶٪ بود.

با توجه به شکل ۸ بررسی نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز نشان داد که در طرح‌های گروه A (فاقد الیاف) فقط در جایگزینی ۵٪ پودر متاکائولن با سرباره، مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد اندکی بهبود یافت و در سایر طرح‌ها نتایج ضعیف‌تری نسبت به نمونه شاهد دیده شد. در گروه B نمونه‌های M۵ و MP۵ با جایگزینی ۵٪ میکا و پودر متاکائولن، نتایج بهتری نسبت به طرح شاهد (به ترتیب ۲/۵٪ و ۶٪) کسب نمودند. در میان نمونه‌های حاوی ترکیب میکا و پودر متاکائولن، بهترین عملکرد به طرح با جایگزینی ۱۰٪ و حاوی مقادیر مساوی از این دو ماده مربوط می‌شود. این طرح ۴/۴٪ مقاومت فشاری بالاتری نسبت به طرح شاهد گروه خود نتیجه داد. افزایش غلظت هیدروکسید سدیم و الیاف فولادی بیشترین تأثیر را بر طرح با جایگزینی ۱۰٪ ترکیب میکا و پودر متاکائولن با نسبت مساوی گذاشت؛ بطوری که باعث رشد ۲۴٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای این طرح گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۸ افزایش سن عمل‌آوری تا ۹۰ روز باعث بهبود مقاومت فشاری در تعدادی از نمونه‌ها با جایگزینی میکا و پودر متاکائولن نسبت به طرح شاهد شد. برای مثال در گروه A (فاقد الیاف) طرح با جایگزینی ۵٪ میکا ۷/۲٪ مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به نمونه شاهد نتیجه داد. همچنین در میان طرح‌ها با جایگزینی پودر متاکائولن در جایگزینی ۱۰٪ این ماده، مقاومت فشاری ۴/۴٪ نسبت به طرح شاهد افزایش یافت.

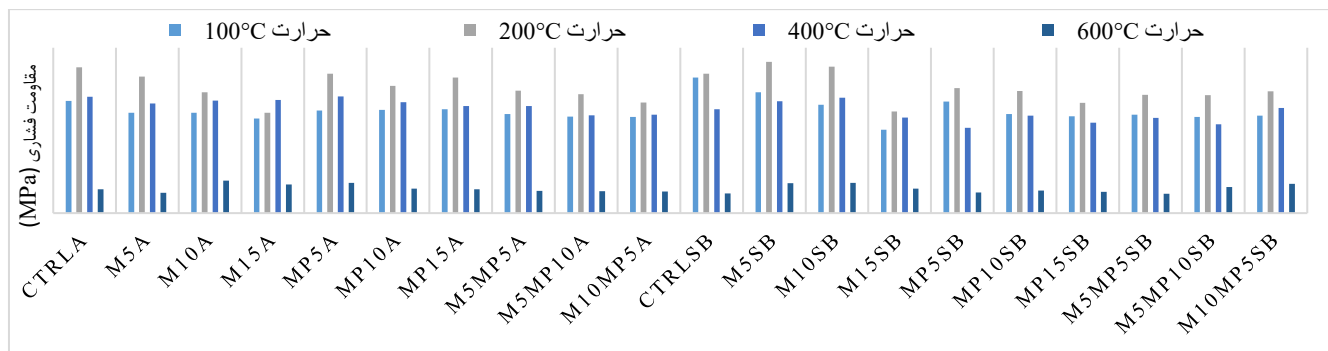
در میان طرح‌های حاوی ترکیب میکا و پودر متاکائولن نیز بهترین نتیجه را طرح M۵ MP۵A کسب کرد؛ بطوری که نسبت به نمونه شاهد A (فاقد الیاف) ۳/۶٪ افزایش مقاومت فشاری نتیجه داده است. در گروه B (حاوی الیاف) نیز طرح‌های M۵، MP۵ و MP۱۰ نسبت به سایر طرح‌ها عملکرد بهتری داشت و در سن ۹۰ روز نسبت به طرح شاهد گروه خود مقاومت بالاتری کسب نمود. در حالت کلی بررسی نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در سنین مختلف نشان داد که جایگزینی میکا و پودر متاکائولن با سرباره در درصدهای وزنی مختلف اثر مستقیمی بر نتایج مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری دارد؛ بطوری که در تمام سنین برای طرح‌های با جایگزینی این مواد بصورت انفرادی، جایگزینی ۵٪ این مواد باعث دستیابی به بهترین عملکرد شد. با افزایش درصد جایگزینی این مواد در بیشتر نمونه‌ها مقاومت فشاری کاهش یافت. غلظت محلول هیدروکسید سدیم نیز از دیگر پارامترهای موثر بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری به شمار می‌آید این

موضوع در نتایج مربوط به مقاومت فشاری در سن ۷ روز قابل توجه بود؛ بطوری که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۴ به ۸ مول باعث شد مقاومت فشاری ۷ روزه ۲۲٪ افزایش یابد؛ اما این مقدار برای سن ۹۰ روز ۶٪ بدست آمد. افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم سبب افزایش روند کسب مقاومت فشاری زودرس به دلیل میزان انحلال و در نتیجه تسریع روند ژئوپلیمریزاسیون می شود. به همین دلیل در سنین پایین (۷ روز) این پارامتر اثرگذاری بیشتری بر بهبود مقاومت فشاری از خود نشان می دهد.

بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان داد که درصد جایگزینی میکا و متاکائولن با سرپاره بر عملکرد مکانیکی در گروه های A (فاقد الیاف) و B (حاوی الیاف) تأثیر شگرفی داشت. در گروه A مقاومت فشاری در ۷ روز با افزایش درصد میکا از ۰٪ (۲۸/۸ مگاپاسکال در CtrlA) به ۵٪ (۲۶ مگاپاسکال، کاهش ۹/۷٪)، ۱۰٪ (۲۵/۲ مگاپاسکال، کاهش ۱۲/۵٪) و ۱۵٪ (۲۳/۳ مگاپاسکال، کاهش ۱۹/۱٪) به صورت خطی کاهش یافت. این کاهش به دلیل واکنش پذیری پایین میکا در سنین اولیه و اختلال در تشکیل شبکه ژئوپلیمری به واسطه جایگزینی بیش از حد سرپاره است که در استحکام زود هنگام نقش اصلی را دارد. متاکائولن در ۵٪ (۲۷/۴ مگاپاسکال، کاهش ۴/۹٪) افت ملایم تری را نشان داد، زیرا خاصیت پوزولانی آن به انحلال بهتر سیلیکات ها کمک می کند، اما در ۱۵٪ (۲۴/۹ مگاپاسکال، کاهش ۱۳/۵٪) کاهش شدیدتر بود که احتمالاً به انباشت ذرات واکنش ناپذیر و تضعیف ماتریس مربوط می شود. ترکیب میکا و متاکائولن در M۱۰MP۵A (۲۹/۲ مگاپاسکال، افزایش ۱/۴٪) به دلیل هم افزایی نسبی این دو ماده اندکی بهبود می یابد، اما در درصدهای بالاتر (مثل M۵MP۱۰A با ۲۳/۷ مگاپاسکال) کاهش مشاهده شد، زیرا تعادل شیمیایی مختل می شود. نمونه طرح MP۵A در ۲۸ روز با ۵۵ مگاپاسکال (۲/۴٪ افزایش نسبت به ۵۳/۷ مگاپاسکال شاهد) به دلیل تکمیل تدریجی واکنش های پوزولانی متاکائولن و تقویت ماتریس برتری یافت، اما میکا در ۱۵٪ (۴۴/۹ مگاپاسکال، کاهش ۱۶/۴٪) و متاکائولن در ۱۵٪ (۴۲/۱ مگاپاسکال، کاهش ۲۱/۶٪) کاهش نشان داد که این موضوع به پراکندگی ضعیف تر و کاهش چگالی ساختار نسبت به سرپاره برمی گردد. نمونه M۵A (۸۶ مگاپاسکال، ۷/۲٪ افزایش) در سن ۹۰ روز به دلیل مشارکت کامل میکا در ژئوپلیمریزاسیون دیر هنگام و نمونه MP۱۰A (۸۳/۸ مگاپاسکال، ۴/۵٪ افزایش) به دلیل تعادل بهینه متاکائولن در تشکیل ژل سیلیکاتی بهبود یافت، اما در ۱۵٪ (مثل ۷۸/۶ مگاپاسکال در M۱۵A) کاهش رخ داد، زیرا تجمع مواد جایگزین ساختار را شکننده تر می کند. بر عکس در گروه B الیاف مقاومت را تقویت کرده است. نمونه M۵B (۳۹/۱ مگاپاسکال، ۴/۵٪ افزایش نسبت به ۳۷/۴ مگاپاسکال CtrlB) در سن ۷ روز به دلیل ترکیب اثر چقرمگی الیاف و واکنش پذیری میکا با حضور هیدروکسید سدیم بهبود یافت، اما در ۱۵٪ میکا (۲۹/۷ مگاپاسکال، کاهش ۲۰/۶٪) و متاکائولن (۲۶ مگاپاسکال، کاهش ۳۰/۵٪) کاهش شدید مشاهده شد، زیرا جایگزینی زیاد سرپاره با موادی با انحلال کمتر، ماتریس را ضعیف می کند. نمونه MP۵B (۵۸/۴ مگاپاسکال، ۶٪ افزایش) در ۲۸ روز به سبب واکنش پوزولانی متاکائولن و توزیع تنش توسط الیاف بهترین نتیجه را داشت، اما در ۱۵٪ میکا (۳۹ مگاپاسکال، کاهش ۲۹/۲٪) به دلیل افت چگالی و پیوستگی کاهش دیده شد. نمونه MP۵B (۸۹/۹ مگاپاسکال، ۷/۵٪ افزایش) در سن ۹۰ روز و نمونه M۵B (۸۷ مگاپاسکال، ۴٪ افزایش) به دلیل تکمیل ژئوپلیمریزاسیون و اثر تقویتی الیاف از شاهد پیشی گرفت، اما در ۱۵٪ (مثل ۷۱/۱ مگاپاسکال در M۱۰MP۵B) کاهش یافت، زیرا درصد بالای جایگزینی تعادل ساختاری را به هم می زند و ترک های میکروسکوپی را افزایش می دهد. به طور کلی، جایگزینی ۵٪ بهینه است، زیرا تعادل بین واکنش پذیری و پراکندگی را حفظ می کند، در حالی که درصدهای بالاتر با کاهش انحلال سرپاره و تضعیف ماتریس مقاومت را پایین می آورند. همچنین الیاف و زمان عمل آوری طولانی به دلیل حضور متاکائولن اثرات مثبت را تقویت می کند.

۲-۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری حرارتی (۲۸ روزه)

آزمایش مقاومت فشاری حرارتی جهت بررسی جایگزینی پودر متاکائولن و میکا با سرپاره (با و بدون الیاف) در درصدهای مختلف وزنی پس از قرار گرفتن در معرض حرارت بر روی نمونه ها در سن ۲۸ روز انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه های حرارت دیده در دماهای ۱۰۰°C، ۲۰۰°C، ۴۰۰°C و ۶۰۰°C در شکل ۹ آمده است. (نمونه های گروه A با غلظت مولار یته هیدروکسید سدیم ۴ مولار و نمونه های گروه B با غلظت مولار ۸ است).



شکل ۹: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حرارت دیده

طبق نتایج بیشترین مقاومت فشاری بدست آمده به نمونه‌های شاهد در هر دو گروه A (فاقد الیاف) و گروه B (حاوی الیاف) مربوط است. در هر دو گروه A (فاقد الیاف) و گروه B (حاوی الیاف) که در دمای 100°C قرار گرفته بودند، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش داشت. در نمونه‌های ساخته شده با محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۴ مول در گروه A (فاقد الیاف) طرح MP15 با جایگزینی ۱۵٪ پودر متاکائولن پس از قرارگرفتن در دمای 100°C کاهش مقاومت ۱۸/۷٪ را نشان داد که کمترین میزان افت مقاومت در میان تمامی نمونه‌هاست. بررسی نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در حالت حرارت ندیده نشان داد که در جایگزینی ۱۵٪ پودر متاکائولن با غلظت ۴ مولار هیدروکسید سدیم، بیشترین کاهش مقاومت نسبت به نمونه طرح شاهد گروه A (فاقد الیاف) اتفاق می‌افتد. زیرا در جایگزینی ۱۵٪ پودر متاکائولن بیشترین مقدار جایگزینی (مقادیر بیشتری از آلومینا و سیلیکای ماده پایه) ترکیب پودر متاکائولن و سرباره در مخلوط ملات ژئوپلیمری به صورت حل نشده باقی می‌ماند که باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌شود. با افزایش دما تا 100°C ، فرآیند ژئوپلیمریزاسیون افزایش یافت و با تکمیل این فرآیند و شرکت نمودن مقادیر بیشتری از آلومینا و سیلیکا در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون رشد مقاومت فشاری مشاهده شد. افزایش مقاومت پس از قرارگرفتن تحت دمای 100°C برای نمونه‌های گروه B (حاوی الیاف) با جایگزینی میکا نیز اتفاق افتاد. در این بین پس از طرح شاهد بیش‌ترین افزایش مقاومت پس از قرارگیری در دمای 100°C به طرح با جایگزینی ۱۰٪ میکا بوده تعلق داشت که نسبت به حالت حرارت ندیده ۶/۸٪ افزایش مقاومت نتیجه داده است.

کاهش مقاومت ژئوپلیمرها در دمای 100°C به دلیل از دست دادن رطوبت و هیدروکسیلاسیون ژل آلومینوسیلیکاتی است که به تغییرات ساختاری و در نهایت کاهش مقاومت منجر می‌شود که در تمام نمونه‌ها یکسان نیست و به ساختار میکروسکوپی و ترکیب دقیق هر نمونه بستگی دارد.

نمونه‌های با میکروساختار فشرده‌تر و مقاومت بالاتر بیشتر تحت تأثیر هیدراتاسیون قرار گرفتند، زیرا فضای کمتری برای جبران تغییرات حجمی داشتند. در مقابل نمونه‌هایی با مقاومت کمتر و فضای داخلی بیشتر می‌توانند تغییرات حجمی بیشتری را تحمل کنند و حتی در برخی موارد با ادامه حرارت دیدن به دلیل اثرات سینترینگ مقاومت بیشتری کسب کنند.

ژئوپلیمرها معمولاً در دمای 100°C رطوبت موجود در ماتریکس خود را از دست می‌دهند. این رطوبت ناشی از آب آزاد یا آب ترکیبی موجود در ساختار ژئوپلیمر است. از دست دادن رطوبت باعث می‌شود که ساختار ژئوپلیمر دچار تغییراتی شود و به کاهش مقاومت مکانیکی آن منجر گردد که این کاهش در همه نمونه‌ها یکسان نیست و به ترکیب دقیق ژئوپلیمر و نوع مواد اولیه مورد استفاده بستگی دارد.

برای مثال ژئوپلیمرهای حاوی پیش‌ماده‌های آلومینوسیلیکاتی مختلف رفتار حرارتی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. ترکیب ژئوپلیمر و میزان آب موجود در ماتریکس آن نقش مهمی در میزان کاهش مقاومت ایفا می‌کند. نمونه‌هایی که دارای میکروساختار فشرده‌تری هستند، مقاومت حرارتی بیشتری داشتند. با از دست دادن رطوبت و تغییرات ساختاری در ماتریکس ژئوپلیمری در کاهش مقاومت این مواد در دمای بالا نقش مهمی دارند. ترکیب ژئوپلیمر مانند نوع پیش‌ماده آلومینوسیلیکاتی در رفتار حرارتی و مقاومت آن در برابر از دست دادن رطوبت تأثیر بسزایی دارد. تغییرات در فرمولاسیون می‌تواند به خواص حرارتی و مکانیکی متفاوتی منجر شود که این خواص تعیین می‌کند هر نمونه چگونه به دماهای بالا پاسخ می‌دهد. برای مثال پیش‌ماده‌های آلومینوسیلیکاتی مختلف ساختار میکروسکوپی متفاوتی دارند که می‌تواند بر توانایی ژئوپلیمر در حفظ رطوبت و تحمل تغییرات دما تأثیر بگذارد. نمونه‌های با ساختار میکروسکوپی متراکم‌تر به دلیل

نگه داشتن رطوبت بهتر مقاومت حرارتی بیشتری داشته باشند، در حالی که نمونه‌های با ساختار بازتر رطوبت خود را سریع از دست داده در نتیجه مقاومت کمتری نشان می‌دهند.

طبق نتایج شکل ۹ در میان نمونه‌های گروه A (فاقد الیاف) طرح شاهد بیش‌ترین مقاومت فشاری را پس از قرارگرفتن در دمای 200°C نشان داده است. در طرح‌های با جایگزینی میکا افزایش درصد جایگزینی این ماده باعث افت مقاومت فشاری نمونه حرارت دیده تحت دمای 200°C شده است. مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های حرارت دیده تحت دمای 200°C با نتایج مقاومت فشاری در حالت عادی نشان داد که قرارگیری در معرض دمای 200°C باعث بهبود مقاومت فشاری گشته است؛ به طوری که طرح با جایگزینی ۱۵٪ پودر متاکائولن با غلظت ۴ مول نسبت به حالت حرارت ندیده ۵۵/۸٪ افزایش مقاومت نتیجه داده است. در میان طرح‌های با غلظت ۸ مول نیز جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ میکا باعث شده تا مقاومت فشاری نمونه پس از قرارگرفتن در دمای 200°C به ترتیب ۲۹/۵٪ و ۴۴/۴٪ افزایش یابد.

در دمای 200°C همه نمونه‌های ژئوپلیمری افزایشی هماهنگ در مقاومت فشاری از خود بروز می‌دهند، اما این افزایش در فرمولاسیون‌های مختلف به یک اندازه نیست و در نمونه‌های حاوی متاکائولن و میکا تفاوت‌های قابل توجهی دیده می‌شود. نمونه‌هایی که دارای ۱۵٪ متاکائولن (MP۱۵A) و ۱۰٪ میکا (M۵MP۱۰B) هستند، عملکرد برتری نسبت به سایر فرمولاسیون‌ها از خود نشان می‌دهند. این یافته نشان می‌دهد که نوع و درصد مواد افزودنی نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها ایفا می‌کند. در این دما تغییرات شیمیایی و فیزیکی رخ داده نقش اساسی دارند. واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون با سرعت بیشتری پیش می‌روند و به تشکیل مقادیر بیشتری از ساختارهای سیلیکات-کلسیم-هیدرات (C-S-H) منجر می‌شوند. این فرآیند نه تنها تراکم ماده را افزایش می‌دهد بلکه تخلخل را نیز کاهش می‌دهد که در نتیجه مقاومت فشاری مصالح افزایش می‌یابد.

وجود C-S-H از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا رفتاری مشابه محصولات هیدراتاسیون سیمان سنتی دارد و به طور چشمگیری خواص مکانیکی ماتریس ژئوپلیمری را بهبود می‌بخشد. این موضوع نشان می‌دهد که C-S-H به عنوان یک جزء کلیدی در ارتقای عملکرد مواد ژئوپلیمری نقش دارد.

بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۹ نشان می‌دهد که در نمونه‌های گروه A (فاقد الیاف) طرح شاهد و طرح MP۵ نسبت به سایر طرح‌ها پس از قرارگرفتن در دمای 400°C مقاومت فشاری بالاتری نسبت به سایر طرح‌ها نتیجه داده‌اند. در میان طرح‌های با غلظت ۸ مول گروه B (حاوی الیاف) جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ میکا باعث شد تا پس از قرارگرفتن در دمای 400°C نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۷/۷٪ و ۱۱/۴٪ مقاومت فشاری بالاتری به دست آید. دلیل این امر رطوبت موجود در بتن است که از عوامل تعیین کننده مقاومت در برابر آتش محسوب می‌شود. میزان رطوبت به زمان خشک شدن و رطوبت نسبی محیط اطراف بستگی دارد. حفره‌های موجود در بتن باعث خشک شدن سریع آن شده و بخار ناشی از حرارت تبخیر می‌گردد و به عنوان یک مانع از ایجاد فشار بخار در هنگام حرارت بالا جلوگیری می‌کند. با افزودن الیاف حفرات افزایش می‌یابد و به انتقال رطوبت کمک می‌کند و مقاومت در برابر حرارت را نیز افزایش می‌دهد. بررسی نتایج و مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های حرارت دیده تحت دمای 400°C با نتایج مربوط به حالت حرارت ندیده نشان داد که قرارگرفتن نمونه‌های با غلظت ۴ مول تحت دمای 400°C باعث شد تا مقاومت فشاری آنها نسبت به حالت حرارت ندیده کاهش یابد. بیشترین کاهش مقاومت در نمونه‌هایی با جایگزینی ۱۵٪ (متاکائولن و میکا) به نمونه طرح‌های M۵MP۱۰A و M۱۰MP۱۵A تعلق داشت. در میان طرح‌های گروه B (حاوی الیاف) نیز نمونه‌های با جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد پودر متاکائولن پس از قرارگرفتن تحت دمای 400°C به ترتیب ۱۳/۹٪ و ۱۸/۷٪ کاهش مقاومت فشاری را نتیجه دادند. با قرار گرفتن در معرض حرارت، آب آزاد و ترکیبی درون بتن تبخیر می‌شود و بر منافذ فشار می‌آورد که باعث ایجاد تنش داخلی در بتن می‌گردد. در طی فرآیند حرارت دیدن فشارهای داخلی افزایش می‌یابد که سبب پوسته پوسته شدن بتن می‌شود. به این ترتیب حرارت موجود راحت به هسته بتن می‌رسد و تنش‌های داخلی مرتب افزایش می‌یابد که به کاهش مقاومت و استحکام بتن منجر می‌شود. همه طرح‌های با جایگزینی پودر متاکائولن با غلظت ۸ مول پس از قرارگرفتن تحت دمای 400°C کاهش مقاومت داشته‌اند. بیشترین مقدار افت مقاومت در نمونه با جایگزینی ۵٪ پودر متاکائولن اتفاق افتاده است. در میان نمونه‌های با غلظت ۴ مول گروه A (فاقد الیاف) و حرارت دیده تحت دمای 600°C جایگزینی ۱۰٪ و ۱۵٪ میکا با سرباره در مخلوط ملات ژئوپلیمری باعث شد که مقاومت حرارتی نسبت به نمونه شاهد افزایش یابد؛ بطوری که به ترتیب ۳۴/۹٪ و ۱۹/۵٪ مقاومت فشاری بالاتری

نسبت به شاهد گروه خود نتیجه دادند. در گروه A (فاقد الیاف) از میان طرح‌های اختلاط، نمونه‌های با جایگزینی پودر متاکائولن نسبت به نمونه شاهد پس از قرارگرفتن در دمای 600°C مقاومت فشاری بالاتری نتیجه دادند. بهترین عملکرد در جایگزینی ۵٪ پودر متاکائولن بدست آمد به طوری که نسبت به شاهد ۲۶/۵٪ مقاومت بالاتری را نتیجه داده است. در نمونه‌های با غلظت ۸ مولار هیدروکسید سدیم، استفاده از میکا و پودر متاکائولن به صورت انفرادی به عنوان جایگزین بخشی از سرباره، باعث شده تا مقاومت فشاری پس از قرارگرفتن در دمای 600°C نسبت به نمونه شاهد افزایش یابد. مقاومت فشاری پس از قرارگرفتن تحت حرارت 600°C طرح‌های با جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ میکا نسبت به شاهد، ۵۱٪ و ۵۳٪ بالاتر بدست آمده است. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که نمونه‌های ملات ژئوپلیمری حاوی متاکائولن و میکا تحت دمای 600°C مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های شاهد نشان دادند. این یافته با نتایج Kozhukhova و همکاران (۲۰۲۲) که افزودن متاکائولن و میکا را در بهبود عملکرد حرارتی ژئوپلیمرها تأیید کرده اند، همخوانی دارد [۱۹]. در غلظت ۸ مول هیدروکسید سدیم جایگزینی ۱۵٪ ترکیب میکا و پودر متاکائولن با نسبت ۱۰٪ میکا و ۵٪ پودر متاکائولن باعث شد مقاومت حرارتی تحت دمای 600°C نسبت به نمونه شاهد ۴۷/۷٪ افزایش یابد. با توجه به نتایج شکل ۹ مقاومت فشاری طرح‌های شاهد گروه A و B (حاوی الیاف و فاقد الیاف) تحت اثر دمای 600°C به ترتیب ۷۸/۴٪ و ۸۲/۶٪ کاهش یافته است. در میان نمونه‌های با غلظت ۴ مول هیدروکسید سدیم کمترین میزان کاهش مقاومت فشاری تحت اثر دمای 600°C به نمونه با جایگزینی ۱۰٪ میکا مربوط است. در این گروه و در میان طرح‌های حاوی پودر متاکائولن کمترین میزان افت مقاومت فشاری در جایگزینی ۱۵٪ پودر متاکائولن به دست آمد. در میان نمونه‌های گروه (حاوی الیاف) عملکرد طرح‌های $M10MP\delta B$ از نظر میزان کاهش مقاومت فشاری تحت دمای 600°C نسبت به سایر طرح‌ها مطلوب بوده است؛ بطوری که با ۶۸/۳٪ افت مقاومت کمترین میزان کاهش را نتیجه داد. در میان طرح‌های گروه (حاوی الیاف) نمونه‌های با جایگزینی ۱۰٪ و ۱۵٪ میکا نیز در مقایسه با سایر طرح‌های حاوی میکا و پودر متاکائولن پس از قرارگیری تحت دمای 600°C عملکرد مطلوبی را نتیجه دادند که این موضوع نشان دهنده اثر مستقیم میکا در جایگزین شدن ۱۰٪ و ۱۵٪ بر بهبود مقاومت حرارتی در دماهای بالا 600°C است. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در نمونه‌های ملات ژئوپلیمری حاوی متاکائولن و میکا تحت دمای 600°C مقاومت فشاری کاهش یافته است. این یافته با نتایج Kljajević و همکاران (۲۰۲۲) که نشان دهنده کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری با غلظت بالای هیدروکسید سدیم تحت دمای 600°C است، همخوانی دارد [۱۸].

کاهش مقاومت نمونه‌های ژئوپلیمری در دماهای بالا (400°C و 600°C) تحت تأثیر عوامل متعددی مانند تغییرات شیمیایی و ساختاری در ماتریس ماده قرار دارد. همه نمونه‌ها در دماهای بالاتر کاهش مقاومت نشان می‌دهند، اما نمونه‌های حاوی الیاف فولادی به دلیل توانایی این الیاف در ایجاد پل بین ترک‌ها و مقاومت در برابر تنش‌های حرارتی، کاهش کمتری را تجربه می‌کنند که این موضوع به بهبود ثبات کلی ماده در شرایط گرمایی کمک می‌کند. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که نمونه‌های ملات ژئوپلیمری حاوی الیاف فولادی تحت دمای 600°C مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف نشان دادند. این یافته با نتایج Kaya (۲۰۲۲) که افزودن الیاف فولادی را در بهبود مقاومت حرارتی تأیید کرده است، همخوانی دارد [۲۰]. با این حال، کاهش مقاومت صرفاً به دلیل تخریب کامل ساختار ژئوپلیمر نیست، بلکه ناشی از تغییرات محلی در ماتریس است. مانند تجزیه ساختارهای C-S-H (سیلیکات-کلسیم-هیدرات) و تشکیل تخلخل‌های جدید که به از دست دادن یکپارچگی مکانیکی ماده با افزایش دما منجر می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که نمونه‌های ملات ژئوپلیمری تحت دمای 600°C مقاومت فشاری کاهش یافته است. این یافته با نتایج He و همکاران (۲۰۲۰) که نشان دهنده تخریب ساختار C-S-H تحت دماهای بالا است، همخوانی دارد. همچنین حضور الیاف فولادی باعث کاهش تنش‌های داخلی و جلوگیری از ایجاد ترک‌های ریز شده است [۴]. در مجموع اگرچه استفاده از الیاف فولادی تا حدی از اثرات منفی دماهای بالا جلوگیری می‌کند، تغییرات ذاتی در ماتریس ژئوپلیمر در کاهش مقاومت مشاهده شده نقش کلیدی ایفا می‌کند و این موضوع نشان می‌دهد که طراحی دقیق مواد و بهینه‌سازی ترکیب ماتریس می‌تواند به کاهش اثرات نامطلوب دماهای بالا کمک کند.

نتایج شکل ۹ اثر تقویت‌کنندگی الیاف فولادی را در دماهای مختلف بیان می‌کند. به‌طورکلی این اثر در دماهای بالاتر (به ویژه 600°C) بیشتر به چشم می‌آید. الیاف فولادی به دلیل توانایی پر کردن ترک‌ها و انتقال تنش‌ها به‌ویژه در دماهای بالا به افزایش مقاومت حرارتی و چقرمگی مکانیکی نمونه‌ها کمک می‌کنند. بهبود مقاومت حرارتی به دلیل توانایی الیاف فولادی در مقابله با تنش‌های حرارتی و کاهش ترک خوردگی ناشی از انبساط حرارتی است. علاوه بر این وجود الیاف فولادی به دلیل افزایش چقرمگی مکانیکی به مقاومت بیشتر

نمونه‌ها در برابر فشار و تنش‌های ناشی از تغییرات دمایی کمک می‌کند. بنابراین اثر تقویت‌کنندگی الیاف فولادی نه تنها به بهبود مقاومت حرارتی بلکه به افزایش چقرمگی مکانیکی نمونه‌ها نیز وابسته است.

تفاوت عملکرد میکا و متاکائولن در بهبود مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری ریشه در تفاوت‌های ساختار شیمیایی و خواص فیزیکی این دو ماده دارد. متاکائولن که از کلسینه کردن کائولینیت در دماهای بالا تولید می‌شود، یک ماده پوزولانی است و به‌طور موثر با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و ساختارهای کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) را تشکیل می‌دهد. این ساختارها در افزایش مقاومت و دوام ژئوپلیمر نقش کلیدی ایفا می‌کنند. به همین دلیل نمونه‌های حاوی متاکائولن معمولاً مقاومت فشاری بالاتری نشان می‌دهند. از سوی دیگر میکا یک ماده معدنی ورقه‌ای است که حاوی سیلیکات‌های آبدار آلومینیوم و پتاسیم است و به دلیل ساختار ورقه‌ای خود، بیشتر به عنوان ماده پرکننده عمل می‌کند. این ویژگی می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کمک کند، اما میکا به اندازه متاکائولن در تولید C-S-H مؤثر نیست.

طبق نتایج شکل ۹ این تفاوت‌ها در تمام دماها قابل مشاهده است، اما در دماهای بالاتر بیشتر بروز می‌کند. در دماهای پایین‌تر، متاکائولن به دلیل تولید بیشتر C-S-H موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری می‌شود، در حالی که میکا عمدتاً نقش پرکننده را ایفا می‌کند. با این حال در دماهای بالاتر میکا به دلیل ساختار مقاوم به حرارت خود می‌تواند به بهبود مقاومت کمک کند، اگرچه این اثر به‌طور کلی کمتر از تأثیر متاکائولن است. بنابراین انتخاب این دو ماده باید بر اساس شرایط دمایی و نیازهای مکانیکی پروژه صورت گیرد.

جدول ۱۵: درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری در دماهای مختلف نسبت به حالت حرارت‌نדיده (۲۸ روزه)

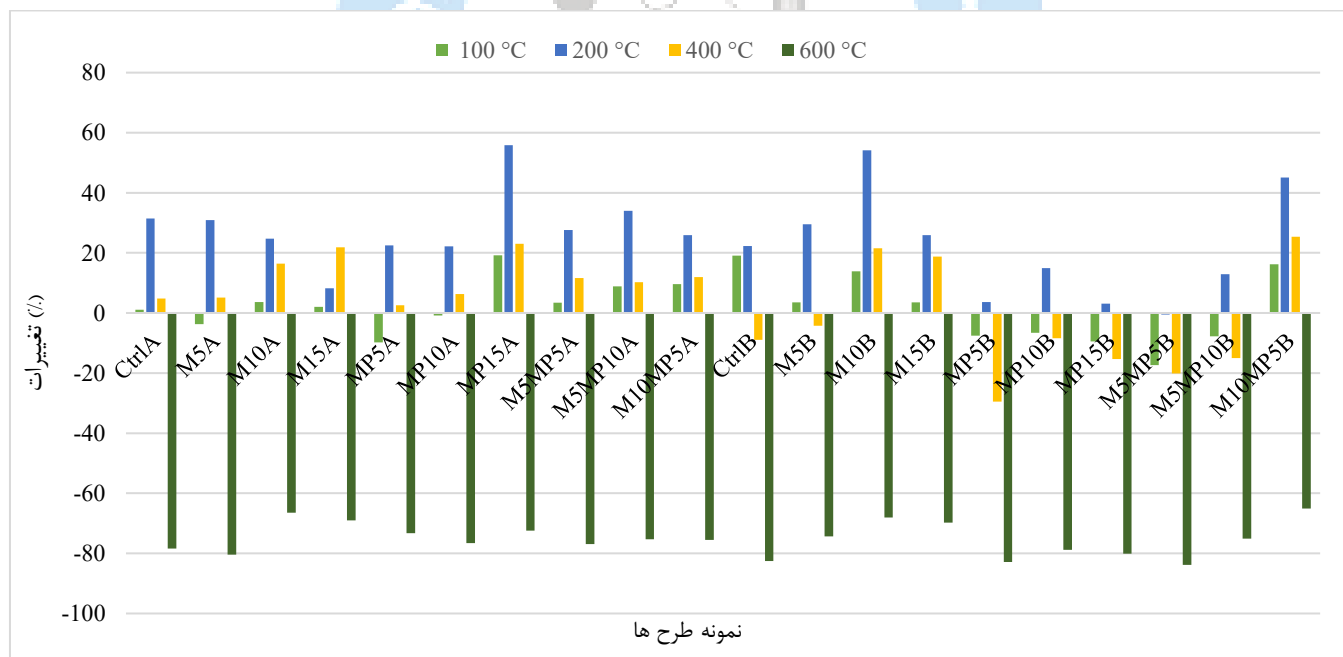
No.	نمونه طرح	حرارت نديده (MPa)	۱۰۰°C (MPa)	تغییر (%)	۲۰۰°C (MPa)	تغییر (%)	۴۰۰°C (MPa)	تغییر (%)	۶۰۰°C (MPa)	تغییر (%)
۱	CtrlA	۵۳/۷	۵۴/۳	۱/۱۲٪	۷۰/۶	۳۱/۴۷٪	۵۶/۳	۴/۸۴٪	۱۱/۶	-۷۸/۴۰٪
۲	M۵A	۵۰/۵	۴۸/۶	-۳/۷۶٪	۶۶/۱	۳۰/۸۹٪	۶۶/۱	۵/۱۵٪	۹/۹	-۸۰/۴۰٪
۳	M۱۰A	۴۶/۸	۴۸/۵	۳/۶۳٪	۵۸/۴	۲۴/۷۹٪	۵۸/۴	۱۶/۴۵٪	۱۵/۷	-۶۶/۴۵٪
۴	M۱۵A	۴۴/۹	۴۵/۸	۲/۰۰٪	۴۸/۶	۸/۲۴٪	۵۴/۷	۲۱/۸۳٪	۱۳/۹	-۶۹/۰۴٪
۵	MP۵A	۵۵/۰	۴۹/۶	-۹/۸۲٪	۶۷/۴	۲۲/۵۵٪	۵۶/۴	۲/۵۵٪	۱۴/۷	-۷۳/۲۷٪
۶	MP۱۰A	۵۰/۴	۵۰/۰	-۰/۷۹٪	۶۱/۶	۲۲/۲۲٪	۵۳/۶	۶/۳۵٪	۱۱/۸	-۷۶/۵۹٪
۷	MP۱۵A	۴۲/۱	۵۰/۲	۱۹/۲۴٪	۶۵/۶	۵۵/۸۲٪	۵۱/۸	۲۳/۰۴٪	۱۱/۶	-۷۲/۴۵٪
۸	M۵ MP۵A	۴۶/۴	۴۸/۰	۳/۴۵٪	۵۹/۲	۲۷/۵۹٪	۵۱/۸	۱۱/۶۴٪	۱۰/۷	-۷۶/۹۴٪
۹	M۵ MP۱۰A	۴۲/۹	۴۶/۷	۸/۸۶٪	۵۷/۵	۳۴/۰۳٪	۴۷/۳	۱۰/۲۶٪	۱۰/۶	-۷۵/۲۹٪
۱۰	M۱۰ MP۵A	۴۲/۵	۴۶/۶	۹/۶۵٪	۵۳/۵	۲۵/۸۸٪	۴۷/۶	۱۲/۰۰٪	۱۰/۴	-۷۵/۵۳٪
۱۱	CtrlB	۵۵/۱	۶۵/۶	۱۹/۰۶٪	۶۷/۴	۲۲/۳۲٪	۵۰/۲	-۸/۸۹٪	۹/۶	-۸۲/۵۸٪
۱۲	M۵B	۵۶/۵	۵۸/۵	۳/۵۴٪	۷۳/۲	۲۹/۵۶٪	۵۴/۱	-۴/۲۵٪	۱۴/۵	-۷۴/۳۴٪
۱۳	M۱۰B	۴۶/۰	۵۲/۴	۱۳/۹۱٪	۷۰/۹	۵۴/۱۳٪	۵۵/۹	۲۱/۵۲٪	۱۴/۷	-۶۸/۰۴٪
۱۴	M۱۵B	۳۹/۰	۴۰/۴	۳/۵۹٪	۴۹/۱	۲۵/۹۰٪	۴۶/۳	۱۸/۷۲٪	۱۱/۸	-۶۹/۷۴٪
۱۵	MP۵B	۵۸/۴	۵۴/۰	-۷/۵۳٪	۶۰/۵	۳/۶۰٪	۴۱/۲	-۲۹/۴۵٪	۱۰/۰	-۸۲/۸۸٪
۱۶	MP۱۰B	۵۱/۴	۴۸/۰	-۶/۶۱٪	۵۹/۱	۱۴/۹۸٪	۴۷/۱	-۸/۳۷٪	۱۰/۹	-۷۸/۷۹٪
۱۷	MP۱۵B	۵۱/۷	۴۶/۸	-۹/۴۸٪	۵۳/۳	۳/۰۹٪	۴۳/۸	-۱۵/۲۸٪	۱۰/۳	-۸۰/۰۸٪
۱۸	M۵ MP۵B	۵۷/۶	۴۷/۶	-۱۷/۳۶٪	۵۷/۳	-۰/۵۲٪	۴۶/۰	-۲۰/۱۴٪	۹/۳	-۸۳/۸۵٪

۱۹	M5 MP10B	۵۰/۵	۴۶/۶	-۷/۷۲٪	۵۷/۰	۱۲/۷۷٪	۴۲/۹	-۱۵/۰۵٪	۱۲/۶	-۷۵/۰۵٪
۲۰	M10 MP5B	۴۰/۶	۴۷/۲	۱۶/۲۶٪	۵۸/۹	۴۵/۰۷٪	۵۰/۹	۲۵/۳۷٪	۱۴/۲	-۶۵/۰۲٪

با توجه به جدول ۱۵ و شکل ۱۰ درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری در دماهای 100°C ، 200°C ، 400°C و 600°C نسبت به حالت مقاومت فشاری حرارت‌نדיده (۲۸ روز) محاسبه شده است. این جدول تغییرات مقاومت فشاری را به صورت دقیق برای هر نمونه نشان می‌دهد و به تحلیل رفتار حرارتی ملات ژئوپلیمری کمک می‌کند. نتایج نشان داد که در دمای 100°C برخی نمونه طرح‌ها مانند (MP15A) و (CtrlB) به ترتیب ۱۹/۲۴٪ و ۱۹/۰۶٪ افزایش مقاومت فشاری را تجربه کردند که به تکمیل واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون و کاهش رطوبت آزاد نسبت داده می‌شود. با این حال نمونه‌هایی مانند نمونه طرح M5MP5B کاهش ۱۷/۳۶٪ را نشان دادند که به دلیل تخلخل بالاتر ناشی از ترکیب نامتعادل مواد است.

در دمای 200°C اکثر نمونه‌ها افزایش مقاومت فشاری را تجربه کردند. به ویژه نمونه‌های MP15A (حاوی ۱۵٪ متاکائولن) و M10B (حاوی ۱۰٪ میکا و الیاف) به ترتیب با ۵۵/۸۲٪ و ۵۴/۱۳٪ افزایش مقاومت فشاری، بهترین عملکرد را نشان دادند. این بهبود به تشکیل ساختارهای متراکم‌تر C-S-H و ادامه واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون مربوط است.

در دمای 400°C نمونه‌های گروه A عمدتاً افزایش مقاومت داشتند مانند نمونه طرح (M10MP5B) با ۲۵/۳۷٪، اما نمونه‌های گروه B مانند نمونه طرح (MP5B) کاهش ۲۹/۴۵٪ را تجربه کردند، که به دلیل شروع ترک‌های حرارتی و تضعیف پیوندهای ماتریس است. در دمای 600°C تمامی نمونه‌ها کاهش شدید مقاومت فشاری بین (۶۵/۰۲٪ تا ۸۳/۸۵٪) را نشان دادند که به تخریب ساختارهای C-S-H، خروج بخار آب و افزایش تخلخل نسبت داده می‌شود. نمونه طرح (M10MP5B) با کاهش ۶۵/۰۲٪ کمترین افت را داشت که به حضور الیاف و تعادل بهینه مواد نسبت داده می‌شود.



شکل ۱۰: تغییرات (٪) مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری در دماهای 100°C ، 200°C ، 400°C و 600°C نسبت به حالت حرارت‌نדיده (۲۸ روز)

در حالی که پژوهش حاضر روی خواص مکانیکی و دوام ملات ژئوپلیمری تا دمای 600°C تمرکز دارد، رفتار بتن ژئوپلیمری در دماهای بالاتر نیز قابل توجه است. با توجه به جدول ۱۶ مطالعات اخیر نشان می‌دهند [۳۲] که بتن ژئوپلیمری به دلیل شبکه آلومینوسیلیکاتی پایدار دماهای بین 1000°C تا 1200°C را تحمل می‌کند و مقاومت فشاری قابل توجهی را حفظ کند. در پژوهش Tahwia و همکاران (۲۰۲۳) مقاومت فشاری باقی‌مانده بتن ژئوپلیمری با عملکرد بالا بین ۲۷٪ تا ۳۲٪ پس از قرار گرفتن در دمای 800°C گزارش شده است.

[۳۳]. این عملکرد برتر در مقایسه با بتن سنتی که معمولاً در دمای بالای 800°C مقاومت خود را کاملاً از دست می‌دهد [۳۴]. نشان‌دهنده پتانسیل بالای مواد ژئوپلیمری برای کاربردهای نیازمند مقاومت در دماهای بالا است. ژئوپلیمرها می‌توانند تا دمای 1200°C مقاومت نسبی داشته باشند، به‌ویژه در فرمولاسیون‌های حاوی سرباره یا خاکستر بادی [۳۵]. با این حال، رفتار نهایی بتن به نوع سنگدانه‌ها نیز بستگی دارد که نیاز به تحقیقات بیشتر دارد.

جدول ۱۶: مقایسه‌ای از رفتار ملات و بتن ژئوپلیمری در دماهای مختلف

دما ($^{\circ}\text{C}$)	رفتار ملات ژئوپلیمری (بر اساس پژوهش حاضر)	رفتار بتن ژئوپلیمری (بر اساس مطالعات)
100°C	کاهش رطوبت، حفظ مقاومت نسبی	تبخیر آب آزاد، حفظ مقاومت نسبی
200°C	افزایش مقاومت فشاری در برخی نمونه‌ها	بهبود مقاومت به دلیل تشکیل ساختارهای متراکم
400°C	کاهش مقاومت در برخی نمونه‌ها	شروع تخریب سنگدانه‌ها، کاهش مقاومت
600°C	کاهش شدید مقاومت، تخریب ساختارها	کاهش قابل توجه مقاومت، اما بهتر از بتن سنتی
800°C	-	حفظ ۲۷٪-۳۲٪ قدرت فشاری در برخی فرمولاسیون‌ها [۳۳]
1000°C - 1200°C	-	حفظ مقاومت نسبی، مناسب برای کاربردهای حرارتی [۳۲]

۱-۲-۵- رابطه عددی بین دما و مقاومت فشاری

برای ارائه یک رابطه عددی بین دما و مقاومت فشاری از داده‌های آزمایشی موجود در مقاله استفاده خواهد شد. برای محاسبه رابطه عددی بعد از مرتب کردن داده‌ها یک تحلیل رگرسیونی غیرخطی انجام شد. مقاومت فشاری در دمای 28°C (حالت حرارت ندیده) به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. نتایج مقاومت فشاری برای نمونه‌های مختلف در دماهای 100°C ، 200°C ، 400°C و 600°C در جدول ۱۷ آمده است.

جدول ۱۷: داده‌های آزمایشی برای رابطه بین دما و مقاومت فشاری

دمای حرارت		دما $^{\circ}\text{C}$				
		28°C	100°C	200°C	400°C	600°C
NO.	نمونه طرح	مقاومت فشاری (MPa)				
۱	CtrlA	۲۸/۸	۵۴/۳	۷۰/۶	۵۶/۳	۱۱/۶
۲	M۵A	۲۶	۴۸/۶	۶۶/۱	۵۳/۱	۹/۹
۳	M۱۰A	۵۲/۲	۴۸/۵	۵۸/۴	۵۴/۴	۱۵/۷
۴	M۱۵A	۲۳/۳	۴۵/۸	۴۸/۶	۵۴/۷	۱۳/۹
۵	MP۵A	۲۷/۴	۴۹/۶	۶۷/۴	۵۶/۴	۱۴/۷
۶	MP۱۰A	۲۷	۵۰	۶۱/۶	۵۳/۶	۱۱/۸
۷	MP۱۵A	۲۴/۹	۵۰/۲	۵۶/۶	۵۱/۸	۱۱/۶
۸	M۵ MP۵A	۲۶/۴	۴۸	۵۹/۲	۵۱/۸	۱۰/۷
۹	M۵ MP۱۰A	۲۳/۷	۴۶/۷	۵۷/۵	۴۷/۳	۱۰/۶
۱۰	M۱۰ MP۵A	۲۹/۲	۴۶/۶	۵۵/۳	۴۷/۶	۱۰/۴
۱۱	CtrlB	۳۷/۴	۵۶/۶	۶۷/۴	۵۰/۲	۹/۶
۱۲	M۵B	۳۹/۱	۵۸/۵	۷۳/۲	۵۴/۱	۱۴/۵
۱۳	M۱۰B	۳۴/۸	۵۲/۴	۷۰/۹	۵۵/۹	۱۴/۷
۱۴	M۱۵B	۲۹/۷	۴۰/۴	۴۹/۱	۴۶/۳	۱۱/۸
۱۵	MP۵B	۳۴	۵۴	۶۰/۵	۴۱/۲	۱۰
۱۶	MP۱۰B	۲۹/۴	۴۸	۵۹/۱	۴۷/۱	۱۰/۹
۱۷	MP۱۵B	۲۶	۴۶/۸	۵۳/۳	۴۳/۸	۱۰/۳
۱۸	M۵ MP۵B	۳۰/۷	۴۷/۶	۵۷/۳	۴۶	۹/۳
۱۹	M۵ MP۱۰B	۲۸/۶	۴۶/۶	۵۷	۴۲/۹	۱۲/۶

۲۰	M10 MPδB	۲۷/۱	۴۷/۲	۵۸/۹	۵۰/۹	۱۴/۲
----	----------	------	------	------	------	------

با توجه به نتایج آزمایشی و رفتار غیرخطی مقاومت فشاری نسبت به دما، یک مدل غیرخطی مانند معادله نمایی یا چندجمله‌ای پیشنهاد می‌شود. در رابطه (۳)، از مدل چندجمله‌ای درجه دوم استفاده شده است:

$$f(T) = aT^2 + bT + c \quad (3)$$

که در آن: $f(T)$: مقاومت فشاری (MPa)، T : دما (°C) و (a, b, c) : ضرایبی که باید بر اساس داده‌های آزمایشی محاسبه شوند.

جدول ۱۸: نتایج رگرسیون برای هر نمونه گروه A (فاقد الیاف)

شماره طرح	نمونه	ضرایب a، b و c	معادله
۱	CtrlA	$a = -0.00013, b = 0.098, c = 28.8$	$f(T) = -0.00013T^2 + 0.098T + 28.8$
۲	MδA	$a = -0.00014, b = 0.092, c = 26.0$	$f(T) = -0.00014T^2 + 0.092T + 26.0$
۳	M10A	$a = -0.00015, b = 0.087, c = 25.2$	$f(T) = -0.00015T^2 + 0.087T + 25.2$
۴	M1δA	$a = -0.00016, b = 0.082, c = 23.3$	$f(T) = -0.00016T^2 + 0.082T + 23.3$
۵	MPδA	$a = -0.00012, b = 0.094, c = 27.4$	$f(T) = -0.00012T^2 + 0.094T + 27.4$
۶	MP10A	$a = -0.00013, b = 0.089, c = 29.2$	$f(T) = -0.00013T^2 + 0.089T + 29.2$
۷	MP1δA	$a = -0.00012, b = 0.093, c = 27.0$	$f(T) = -0.00012T^2 + 0.093T + 27.0$
۸	Mδ MPδA	$a = -0.00013, b = 0.090, c = 26.4$	$f(T) = -0.00013T^2 + 0.090T + 26.4$
۹	Mδ MP10A	$a = -0.00014, b = 0.086, c = 23.7$	$f(T) = -0.00014T^2 + 0.086T + 23.7$
۱۰	M10 MPδA	$a = -0.00012, b = 0.093, c = 29.2$	$f(T) = -0.00012T^2 + 0.093T + 29.2$

جدول ۱۹: نتایج رگرسیون برای هر نمونه گروه B (حاوی الیاف)

شماره طرح	نمونه	ضرایب a، b و c	معادله
۱۱	CtrlB	$a = -0.00011, b = 0.096, c = 37.4$	$f(T) = -0.00011T^2 + 0.096T + 37.4$
۱۲	MδB	$a = -0.00012, b = 0.090, c = 39.1$	$f(T) = -0.00012T^2 + 0.090T + 39.1$
۱۳	M10B	$a = -0.00013, b = 0.085, c = 34.8$	$f(T) = -0.00013T^2 + 0.085T + 34.8$
۱۴	M1δB	$a = -0.00014, b = 0.080, c = 34.7$	$f(T) = -0.00014T^2 + 0.080T + 34.7$

۱۵	MP δ B	$a=-0.00011, b=0.093, c=29/7$	$f(T) = -0.00011T^r + 0.093T + 29/7$
۱۶	MP۱۰B	$a=-0.00012, b=0.088, c=34/0$	$f(T) = -0.00012T^r + 0.088T + 34/0$
۱۷	MP۱۵B	$a=-0.00013, b=0.084, c=29/4$	$f(T) = -0.00013T^r + 0.084T + 29/4$
۱۸	M δ MP δ B	$a=-0.00011, b=0.091, c=30/7$	$f(T) = -0.00011T^r + 0.091T + 30/7$
۱۹	M δ MP۱۰B	$a=-0.00012, b=0.086, c=28/6$	$f(T) = -0.00012T^r + 0.086T + 28/6$
۲۰	M۱۰ MP δ B	$a=-0.00011, b=0.092, c=27/1$	$f(T) = -0.00011T^r + 0.092T + 27/1$

در بررسی جدول ۱۸ و ۱۹ رفتار مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری مشاهده می‌شود که گروه A (فاقد الیاف) و گروه B (حاوی الیاف) واکنش‌های متفاوتی در دماهای مختلف از خود نشان می‌دهند. در گروه A مقاومت فشاری در دماهای پایین (مانند 100°C) کاهش می‌یابد، اما در دماهای متوسط (200°C) بهبود چشمگیری دارد. در دماهای بالا (600°C)، کاهش قابل توجهی در مقاومت فشاری مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حساسیت این گروه به تخریب حرارتی است. گروه B که حاوی الیاف فولادی است، عملکرد بهتری در دماهای بالا از خود نشان می‌دهد. وجود الیاف فولادی نقش مؤثری در کاهش سرعت افت مقاومت فشاری در دماهای بالا ایفا می‌کند و در دماهای متوسط (200°C) بهبود مقاومت فشاری در مقایسه با گروه A قابل توجه است. این موضوع به دلیل توانایی الیاف فولادی در جلوگیری از گسترش ترک‌ها و تحمل تنش‌های حرارتی است.

تفاوت عملکرد بین متاکائولن و میکا در دماهای مختلف مشاهده می‌شود. میکا در دماهای بالا (600°C) عملکرد بهتری نسبت به متاکائولن دارد که می‌توان آن را به ساختار ورقه‌ای و مقاومت حرارتی ذاتی میکا نسبت داد. از سوی دیگر متاکائولن در دماهای پایین (100°C) تأثیر منفی بر مقاومت فشاری دارد که احتمالاً به دلیل واکنش‌های شیمیایی متفاوت و تشکیل محصولات ثانویه در این دماها است.

علاوه بر این غلظت محلول فعال‌کننده نیز تأثیر عمده‌ای بر مقاومت فشاری دارد. افزایش غلظت محلول فعال‌کننده (از ۴ مولار به ۸ مولار) به بهبود مقاومت فشاری در دماهای پایین و متوسط منجر می‌شود که ناشی از تسریع فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و تشکیل شبکه‌های سیلیکاتی و آلومینوسیلیکاتی پایدار است. با این حال در دماهای بالا (600°C) تأثیر افزایش غلظت محلول فعال‌کننده کاهش می‌یابد، زیرا در این دماها تغییرات ساختاری و تجزیه مواد اصلی نقش غالب را ایفا می‌کنند. بنابراین تنظیم غلظت محلول فعال‌کننده و انتخاب مواد اولیه بر اساس دمای کاربرد می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد ژئوپلیمرها کمک کند.

جدول ۲۰: میزان رطوبت نمونه‌ها گروه (A) و (B) در دماهای 100°C ، 200°C ، 400°C و 600°C

توضیحات	میزان رطوبت تقریبی (% وزنی)	دما ($^{\circ}\text{C}$)
رطوبت اولیه شامل آب آزاد و پیوندشده	۷/۰٪	حرارت ندیده (۲۸ روز)
تبخیر آب آزاد، کاهش ۵۰٪-۶۰٪ رطوبت اولیه	۳/۵-۴/۰٪	100°C
تبخیر آب پیوندشده، کاهش به ۲۰٪-۳۰٪ رطوبت اولیه	۱/۵-۲/۰٪	200°C
خروج تقریباً کامل آب آزاد و پیوندشده	۰/۵-۱/۰٪	400°C
رطوبت ناچیز به دلیل تخریب ساختارهای هیدراته	۰/۵٪>	600°C

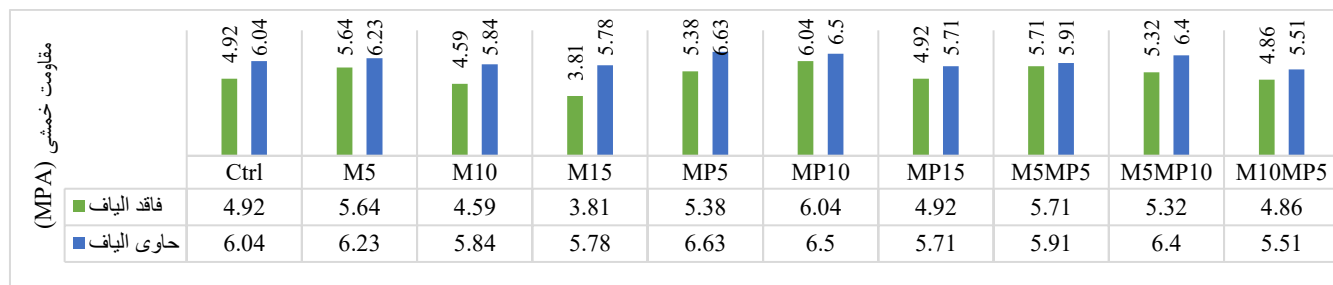
بررسی میزان رطوبت نمونه‌های ژئوپلیمری در دماهای مختلف نشان‌دهنده کاهش قابل توجه رطوبت با افزایش دما است. با توجه به جدول ۲۰ میزان رطوبت تقریبی نمونه‌ها در حالت حرارت ندیده (۲۸ روز) حدود ۰.۷٪ وزنی است. در دمای 100°C رطوبت به ۰.۳۵٪-۰.۴۰٪ کاهش می‌یابد که به تبخیر آب آزاد نسبت داده می‌شود. در دمای 200°C با شروع خروج آب پیوند شده رطوبت به ۰.۱۵٪-۰.۲۰٪ می‌رسد. در دمای 400°C واکنش‌های دهیدراسیون (خروج آب پیوند شده) در ساختارهای کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-S-H) و آلومینوسیلیکات‌های ژئوپلیمری تکمیل می‌شود. در دمای 400°C تقریباً تمام آب پیوند شده خارج و رطوبت به ۰.۰۵٪-۰.۱۰٪ کاهش می‌یابد. حضور الیاف فلزی و میکا به حفظ ساختار کمک می‌کند، اما تأثیر ناچیزی بر رطوبت باقی‌مانده دارد. در دمای 400°C تحقیقات نشان می‌دهد [۳۶-۳۹] که اکثر آب آزاد و متصل فیزیکی تبخیر شده است و فرآیند دهیدروکسیلاسیون در حال انجام است. با این حال، میزان رطوبت باقی‌مانده کمتر از ۰.۵٪ و بیشتر به صورت آب متصل شیمیایی است که در حال آزادسازی است.

در دمای 600°C تخریب ساختارهای هیدراته مانند (C-S-H) و تبدیل آن‌ها به فازهای غیرهیدراته (مانند کلسیم‌سیلیکات) رخ می‌دهد. رطوبت باقی‌مانده به کمتر از ۰.۵٪ وزنی می‌رسد؛ زیرا تمام آب موجود (آزاد و پیوندشده) تبخیر شده و تنها رطوبت محبوس در منافذ میکروسکوپی باقی می‌ماند. این کاهش رطوبت با افت شدید مقاومت فشاری در دمای 600°C (جدول ۱۵ و شکل ۱۰) همخوانی دارد؛ زیرا تخریب ساختارهای هیدراته و افزایش تخلخل به ضعف مکانیکی منجر می‌شود. در دمای 600°C به دلیل ادامه فرآیندهای حرارتی تقریباً تمام رطوبت (شامل آب متصل شیمیایی) از ساختار خارج شده است و میزان رطوبت باقی‌مانده عملاً صفر است. این نتیجه با مشاهدات SEM در مقاله (حفره‌های ناشی از خروج بخار آب) و مطالعات مرتبط [۴۰-۴۳] همخوانی دارد.

۳-۵- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی برای همه نمونه‌های آزمایشگاهی پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز انجام شده است. برای انجام این آزمایش از نمونه‌های مکعب مستطیلی با مقطع 40×40 میلی‌متر و طول ۱۶۰ میلی‌متر استفاده شد. نتایج بدست آمده در شکل ۱۱ ارائه شده است. (نمونه‌های گروه A (فاقد الیاف) با غلظت مولاریته هیدروکسید سدیم ۴ مولار و نمونه‌های گروه B (حاوی الیاف) با غلظت مولاریته هیدروکسید سدیم ۸ مولار است). در گروه A مقاومت خمشی شاهد (Ctrl) $4/92$ مگاپاسکال است که با جایگزینی ۵٪ میکا (M5) به $5/64$ مگاپاسکال (افزایش ۱۴٪/۶) می‌رسد. این بهبود به دلیل تقویت پیوندهای ژئوپلیمری توسط میکا و انحلال بهینه سیلیکات‌ها در غلظت ۴ مولار است، اما با افزایش به ۱۰٪ ($4/59$ مگاپاسکال، $6/7$ ٪ کاهش) و ۱۵٪ ($3/81$ مگاپاسکال، $22/6$ ٪ کاهش)، کاهش رخ می‌دهد، زیرا جایگزینی بیش از حد سرباره - که چگالی و انسجام ماتریس را تأمین می‌کند - با میکا ساختار را شکننده‌تر می‌کند متاکائولن در ۵٪ (MP5) به $5/38$ مگاپاسکال (۹٪/۳ افزایش) و در ۱۰٪ ($MP10$) به $6/04$ مگاپاسکال (۲۲٪/۸ افزایش) می‌رسد، که به خاصیت پوزولانی بالای آن و تشکیل ژل سیلیکاتی متراکم‌تر مرتبط است، اما در ۱۵٪ ($4/92$ مگاپاسکال) به سطح شاهد بازمی‌گردد، زیرا انباشت ذرات واکنش‌ناپذیر تعادل ماتریس را مختل می‌کند. ترکیب ۵٪ میکا و ۵٪ متاکائولن (M5MP5) با $5/71$ مگاپاسکال (۱۶٪/۱ افزایش) هم‌افزایی این دو ماده را نشان می‌دهد که میکا پیوندها را تقویت می‌کند و متاکائولن چگالی را بهبود می‌بخشد، ولی در ترکیب‌های نامتعادل مثل $M5MP10$ ($5/32$ مگاپاسکال) و $M10MP5$ ($4/86$ مگاپاسکال) کاهش دیده می‌شود، زیرا درصد بالای جایگزینی پیوستگی را کاهش می‌دهد. در گروه B شاهد (Ctrl) با $6/04$ مگاپاسکال به دلیل حضور الیاف و غلظت ۸ مولار هیدروکسید سدیم مقاومت بالاتری نسبت به گروه A دارد؛ جایگزینی ۵٪ میکا (M5) به $6/23$ مگاپاسکال (۳٪/۱ افزایش) می‌رسد، که به دلیل تقویت محدود میکا در کنار الیاف است، اما در ۱۰٪ ($5/84$ مگاپاسکال، $3/3$ ٪ کاهش) و ۱۵٪ ($5/78$ مگاپاسکال، $4/3$ ٪ کاهش) افت می‌کند، زیرا کاهش سرباره و غلظت بالای هیدروکسید سدیم نمی‌تواند اثر منفی جایگزینی زیاد را جبران کند. متاکائولن در ۵٪ (MP5) به $6/63$ مگاپاسکال (۹٪/۸ افزایش) می‌رسد که نتیجه ترکیب چقرمگی الیاف و واکنش‌پذیری بالای متاکائولن با هیدروکسید سدیم ۸ مولار است، اما در ۱۰٪ ($6/5$ مگاپاسکال، $7/6$ ٪ افزایش) و ۱۵٪ ($5/71$ مگاپاسکال، $5/5$ ٪ کاهش) کاهش می‌یابد، زیرا درصدهای بالاتر تعادل ساختاری را به هم می‌زنند. در طرح‌های ترکیبی $M5MP5$ ($5/91$ مگاپاسکال، $2/2$ ٪ کاهش) عملکرد ضعیفی دارد، اما در نمونه طرح $M5MP10$ ($6/4$ مگاپاسکال، 6 ٪ افزایش) به دلیل تعادل بهتر و تقویت توسط الیاف بهبود می‌یابد، در حالی که نمونه طرح $M10MP5$ ($5/51$ مگاپاسکال، $8/8$ ٪ کاهش) به دلیل غلبه میکا و کاهش چگالی ضعیف‌تر است. به‌طور کلی افزایش مقاومت خمشی در ۵٪ تا ۱۰٪ جایگزینی به دلیل بهینه‌سازی واکنش‌های

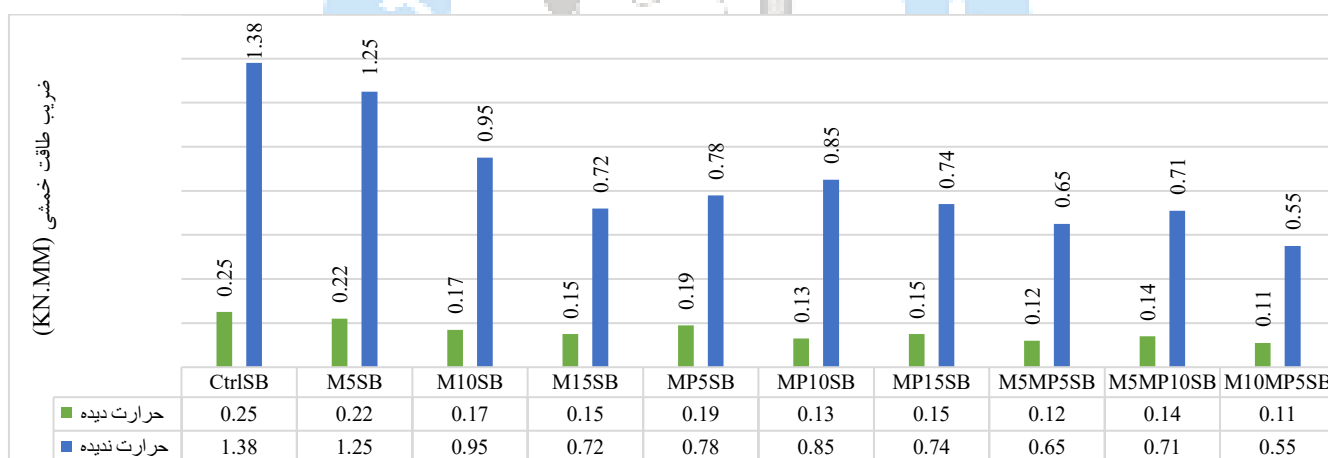
ژئوپلیمری، تقویت ماتریس توسط متاکائولن و چقرمگی الیاف در گروه B است، در حالی که کاهش در درصدهای بالاتر ناشی از افت چگالی، شکنندگی بیشتر و اختلال در پیوستگی ماتریس به واسطه کاهش سرباره است؛ غلظت بالاتر هیدروکسید سدیم نیز با تسریع ژئوپلیمریزاسیون این اثرات را تقویت می کند، اما در جایگزینی های زیاد کافی نیست.



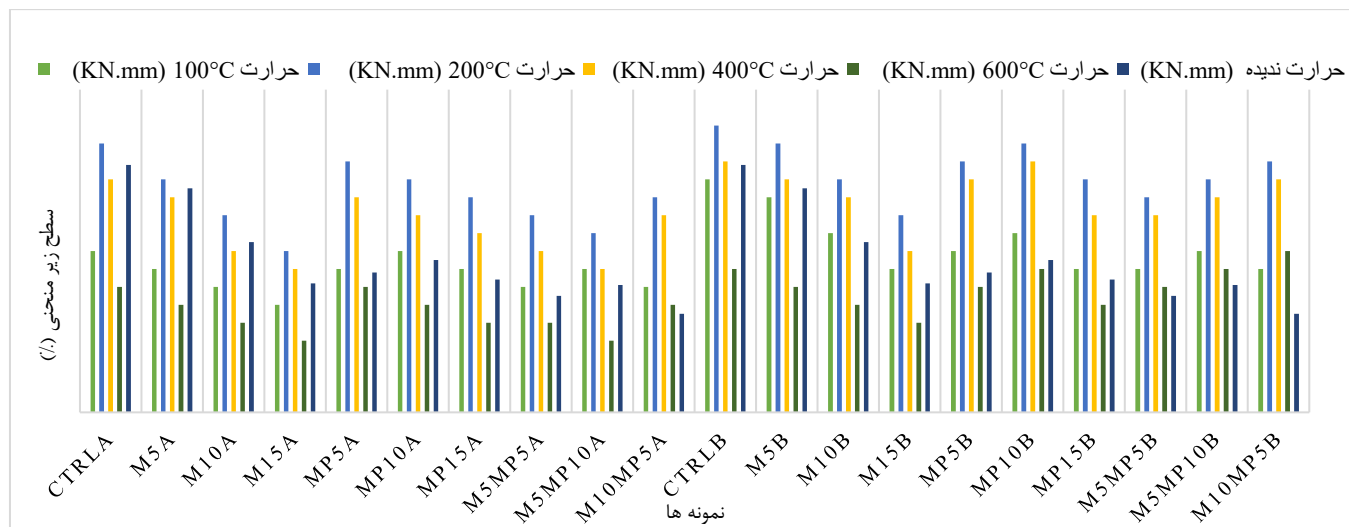
شکل ۱۱: نتایج آزمایش مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه

۴-۵- نتایج آزمایش ضریب طاق مقاومت خمشی نمونه های حرارت دیده و حرارت ندیده

نتایج مربوط به ضریب طاق خمشی نمونه ها در دو حالت حرارت دیده و حرارت ندیده در شکل ۱۲ آمده است. بررسی نتایج نشان می دهد که حرارت اثر چشم گیری بر کاهش طاق مقاومت خمشی نمونه ها دارد؛ بطوری که قرار گرفتن تحت اثر دمای 600°C باعث شده ضریب طاق خمشی $80/6\%$ کاهش یابد. در میان نمونه های حرارت ندیده بیشترین مقدار ضریب طاق خمشی به طرح با جایگزینی 5% میکا مربوط است. در نمونه های حاوی میکا به صورت انفرادی، افزایش درصد جایگزینی این ماده باعث کاهش طاق مقاومت خمشی شده است. در میان نمونه های حاوی متاکائولن بیشترین مقدار طاق خمشی در جایگزینی 10% متاکائولن به دست آمده است.



شکل ۱۲: نتایج ضریب طاق مقاومت خمشی نمونه های حرارت دیده و حرارت ندیده

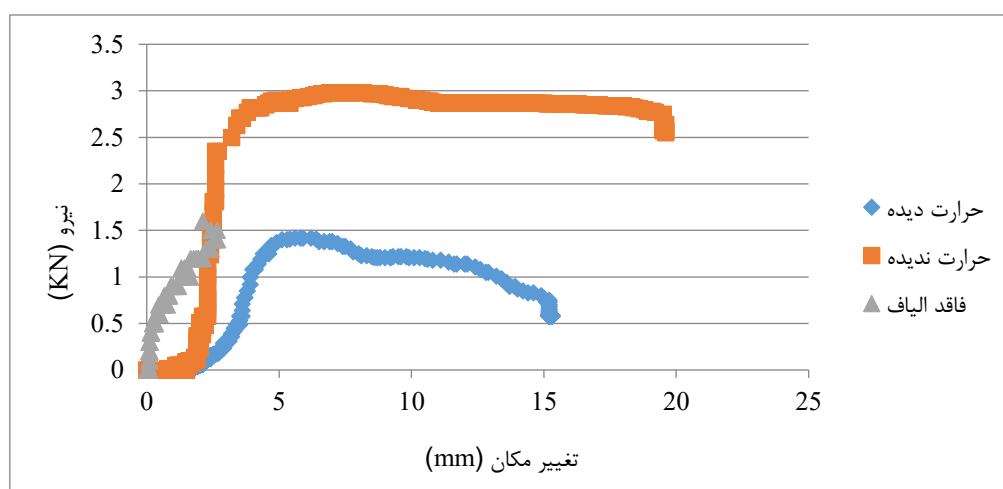


شکل ۱۳: سطح زیر منحنی برای نمونه‌های حرارت‌ندیده و حرارت‌دیده (۲۸ روزه)

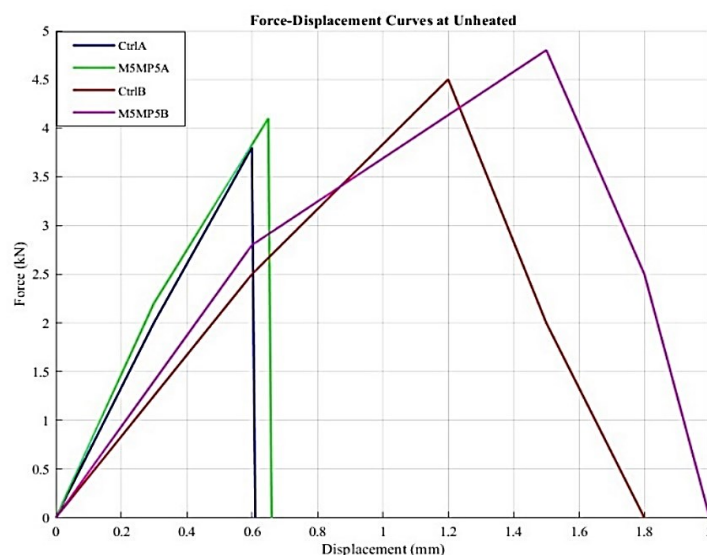
بررسی نتایج شکل ۱۳ نشان می‌دهد که قرارگیری نمونه‌های تحت حرارت‌های بالا (مانند 600°C) به کاهش چشمگیر سطح زیر منحنی منجر می‌شود که عمدتاً ناشی از خروج بخار آب و ایجاد تخلخل‌های جدید در ساختار است. در این شرایط حضور الیاف فولادی با درصد حجمی ۱٪ در بهبود سطح زیر منحنی و ضریب طاقت خمشی نقش کلیدی ایفا می‌کند، زیرا این الیاف با جلوگیری از گسترش ترک‌ها، مقاومت نمونه‌ها را حتی پس از ایجاد اولین ترک حفظ می‌کنند. از سوی دیگر مواد افزودنی نیز تأثیر متفاوتی دارند؛ میکا به دلیل ساختار ورقه‌ای و مقاومت حرارتی ذاتی‌اش، عملکرد بهتری در دماهای بالا نشان می‌دهد و سطح زیر منحنی را افزایش می‌دهد، در حالی که متاکائولن به دلیل تجزیه ساختارهای C-S-H در دماهای بالا، اثر منفی دارد. در نهایت نمونه $M10MP5B$ (حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن) در دمای 600°C عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد که این موضوع ناشی از ترکیب بهینه مواد افزودنی و تعادل بین خواص مکانیکی و حرارتی آن است. بنابراین طراحی دقیق ترکیب مواد و استفاده از تقویت‌کننده‌های مناسب می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و مکانیکی نمونه‌های ژئوپلیمری کمک کند.

سطح زیر منحنی نیروی تغییر مکان نمونه‌های ژئوپلیمری در سن ۲۸ روز به‌عنوان معیاری از طاقت خمشی و ظرفیت جذب انرژی تحت تأثیر دماهای مختلف (100°C ، 200°C ، 400°C و 600°C) و درصد جایگزینی میکا و متاکائولن با سرباره در گروه‌های A (فاقد الیاف، هیدروکسید سدیم ۴ مولار) و B (حاوی الیاف، هیدروکسید سدیم ۸ مولار) بررسی شد. در حالت حرارت‌ندیده، نمونه‌های شاهد (CtrlA) و CtrlB با $1/38 \text{ kN.mm}$ بالاترین طاقت را نشان می‌دهند؛ این عملکرد در گروه A به چگالی بالای ماتریس سرباره‌ای و در گروه B به هم‌افزایی سرباره، الیاف فولادی و غلظت بالای هیدروکسید سدیم نسبت داده می‌شود که چقرمگی را از طریق پل زدن ترک‌ها افزایش می‌دهد. جایگزینی ۵٪ میکا ($M5A$) و $1/25 \text{ kN.mm}$ ($M5B$)، کاهش ۹/۴٪ طاقت را اندکی کاهش می‌دهد، اما همچنان به دلیل تقویت پیوندهای ژئوپلیمری قابل توجه است، در حالی که افزایش به ۱۰٪ ($M10A$) و $0/95 \text{ kN.mm}$ ($M10B$)، کاهش ۳۱/۲٪ و ۱۵٪ ($M15A$) و $0/72 \text{ kN.mm}$ ($M15B$)، کاهش ۴۷/۸٪ افت چشمگیری ایجاد می‌کند؛ زیرا کاهش سرباره انسجام ماتریس را تضعیف کرده و شکنندگی را افزایش می‌دهد. متاکائولن در ۱۰٪ ($MP10A$) و $0/85 \text{ kN.mm}$ ($MP10B$)، کاهش ۳۸/۴٪ بهترین نتیجه را در هر دو گروه ارائه می‌دهد که به تشکیل ژل سیلیکاتی مترکم‌تر و توزیع مؤثرتر تنش‌ها توسط خاصیت پوزولانی آن مربوط است، اما در ۵٪ ($M5A$) و $0/74 \text{ kN.mm}$ ($M5B$)، به دلیل عدم تعادل در واکنش‌پذیری، عملکرد ضعیف‌تری دارد. طرح‌های ترکیبی، مانند $M10MP5A$ و $M10MP5B$ ($0/55 \text{ kN.mm}$)، کاهش ۶۰/۱٪، کمترین طاقت را نشان می‌دهند؛ زیرا ترکیب نامتوازن میکا و متاکائولن پیوستگی ماتریس را مختل می‌کند، اما در 200°C افزایش می‌یابد ($CtrlA$: $1/5$ ، $CtrlB$: $1/6 \text{ kN.mm}$)؛ که نتیجه تکمیل واکنش‌های ژئوپلیمری در دمای متوسط است. در 400°C ($CtrlA$: $1/3$ ، $CtrlB$: $1/4 \text{ kN.mm}$) به دلیل ظهور ترک‌های حرارتی کاهش تدریجی مقاومت آغاز می‌شود و در 600°C افت شدیدی رخ می‌دهد ($CtrlA$: $0/7$ ، $CtrlB$: $0/8$)، کاهش: ۴۹/۳٪ و ۴۲٪ که به تخریب

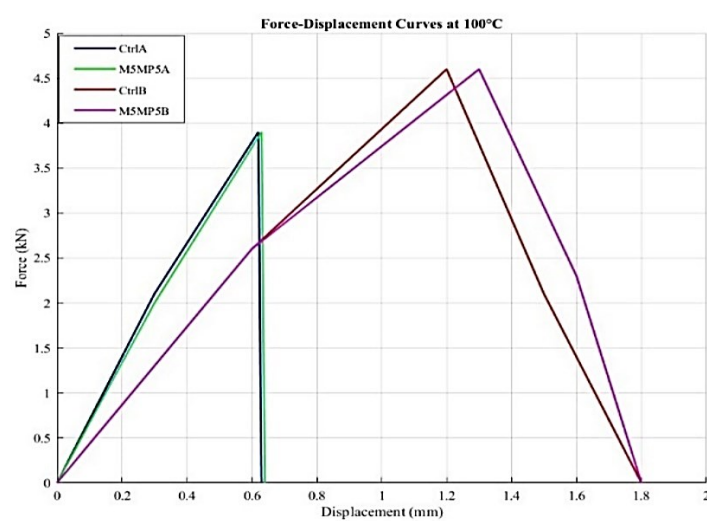
ساختار ژئوپلیمری، تضعیف پیوند الیاف-ماتریس و از دست رفتن رطوبت داخلی مرتبط است و رفتار را به سمت شکنندگی سوق می‌دهد. در میان نمونه‌های حرارت‌دیده در 600°C ، طرح $M10MP5B$ (0.9 kN.mm) بیشترین طاقت را حفظ می‌کند که نشان‌دهنده مقاومت نسبی متاکائولن و الیاف در برابر دمای بالاست، در حالی که در نمونه طرح $M10MP5A$ (0.6 kN.mm) ضعیف‌تر عمل می‌کند. به‌طور کلی در شرایط حرارت‌ندیده، جایگزینی 5% میکا و 10% متاکائولن به دلیل تعادل در تقویت ماتریس و چقرمگی (به‌ویژه با الیاف در گروه B) مطلوب است، اما افزایش درصد جایگزینی طاقت را کاهش می‌دهد؛ حرارت تا 200°C می‌تواند چقرمگی را بهبود بخشد، اما در 600°C ، تخریب ساختار و از دست رفتن انسجام، طاقت را به شدت کاهش می‌دهد و الیاف در گروه B این افت را تا حدی تعدیل می‌کنند. نمونه حاوی 5% میکا بیش‌ترین مقدار ضریب طاقت خمشی را نتیجه داد. منحنی نیروی تغییرمکان آن در شکل ۱۴ رسم شده است. بررسی منحنی نشان می‌دهد که قرارگیری در معرض دمای 600°C باعث کاهش چشم‌گیر سطح زیر منحنی و میزان جذب انرژی می‌شود. این منحنی به خوبی قابلیت پل‌زدن الیاف فولادی بر روی ریز ترک‌ها و در نتیجه بهبود رفتار ملات را بعد از ایجاد اولین ترک نشان می‌دهد، بطوری که حضور الیاف در مخلوط باعث شده که سطح زیر منحنی افزایش می‌یابد و شکست ترد در نمونه رخ نمی‌دهد.



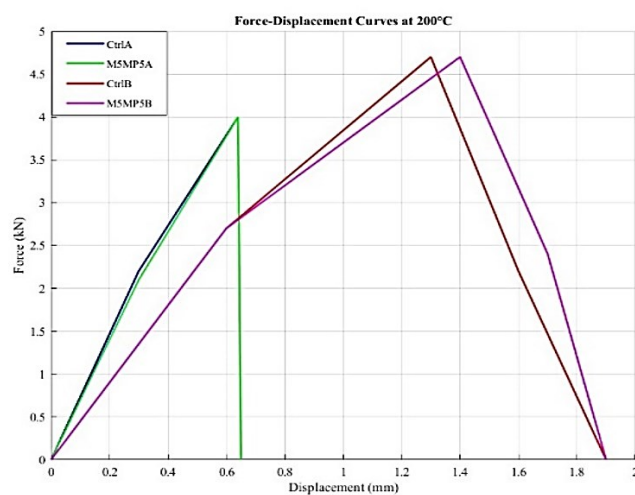
شکل ۱۴: منحنی نیرو-جاب‌جایی نمونه حاوی 1% الیاف فولادی و 5% میکا



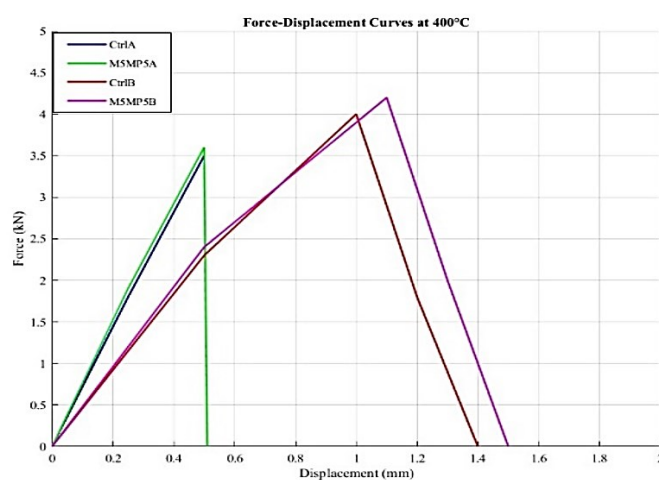
الف) منحنی نیرو-جاب‌جایی در حالت حرارت ندیده

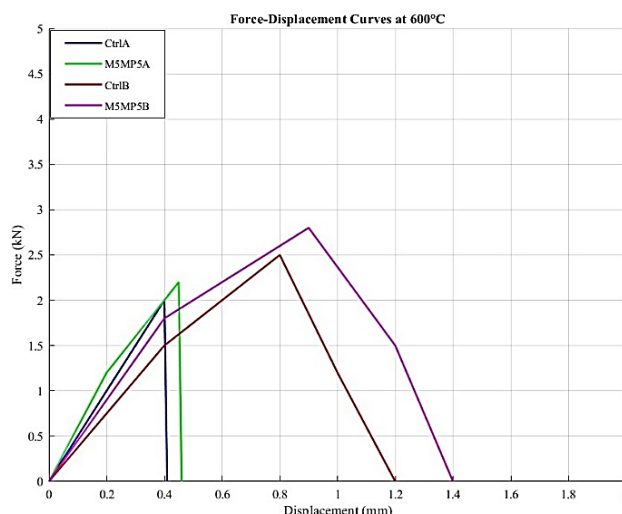


ب) منحنی نیرو-جاب‌جایی در دمای ۱۰۰°C



ج) منحنی نیرو-جاب‌جایی در دمای ۲۰۰°C



(د) منحنی نیرو-جابجایی در دمای 400°C (ه) منحنی نیرو-جابجایی در دمای 600°C

شکل ۱۵: منحنی های نیرو-جابجایی در حالت های حرارت دیده (100°C , 200°C , 400°C و 600°C) و حرارت ندیده

نمودارهای نیرو-جابجایی ارائه شده در شکل های ۱۵ (الف) تا ۱۵ (ه)، رفتار خمشی نمونه های ملات ژئوپلیمری (CtrlA, MSMP5A, CtrlB و MSMP5B) را در شرایط حرارت ندیده و دماهای 100°C , 200°C , 400°C و 600°C نشان می دهند. این نمودارها تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله ترکیب مواد (حضور میکا، متاکائولن و الیاف فولادی)، دما و رفتار مکانیکی (ترد یا چقرمه) تغییر می کنند. در شکل ۱۵ (الف) (حرارت ندیده)، نمونه های گروه A (فاقد الیاف) شامل CtrlA و MSMP5A به ترتیب اوج نیروی ۳/۸ و ۴/۱ کیلونیوتن و جابه جایی نهایی ۰/۶ و ۰/۶۵ میلی متر را نشان می دهند. افزایش اوج نیرو در MSMP5A نسبت به CtrlA به دلیل حضور ۵٪ میکا و ۵٪ متاکائولن است که واکنش پذیری ژئوپلیمری را بهبود بخشیده و ماتریس متراکم تری ایجاد می کند. در مقابل، نمونه های گروه B (حاوی ۱٪ الیاف فولادی) شامل CtrlB و MSMP5B اوج نیروی بالاتر (۴/۵ و ۴/۸ کیلونیوتن) و جابه جایی نهایی بیشتر (۱/۲ و ۱/۵ میلی متر) دارند. این افزایش به اثر پل زنی الیاف فولادی نسبت داده می شود که ترک ها را کنترل کرده و رفتار چقرمه ای را تقویت می کند. طاقت خمشی (سطح زیر منحنی) در CtrlB (۱/۳۸ $\text{kN}\cdot\text{mm}$) بالاتر از MSMP5B (۰/۶۵ $\text{kN}\cdot\text{mm}$) اوج است که نشان دهنده توزیع متفاوت تنش ها در ماتریس با ترکیب میکا و متاکائولن است.

در شکل ۱۵ (ب) دمای (100°C)، اوج نیرو برای CtrlA و MSMP5A به ترتیب به ۳/۹ و ۳/۹ کیلونیوتن و جابه جایی به ۰/۶۲ و ۰/۶۳ میلی متر افزایش می یابد (طاقت خمشی ۰/۹ و ۰/۸ $\text{kN}\cdot\text{mm}$). این بهبود اندک به تکمیل واکنش های ژئوپلیمریزاسیون در دمای پایین نسبت داده می شود که ساختار ماتریس را تقویت می کند. در گروه B، اوج نیروی CtrlB و MSMP5B (۴/۶ و ۴/۶ کیلونیوتن) و جابه جایی (۱/۲ و ۱/۳ میلی متر) نیز اندکی بهبود می یابد (طاقت خمشی ۱/۳ و ۰/۸ $\text{kN}\cdot\text{mm}$)، که نشان دهنده پایداری الیاف فولادی در این دما و تقویت چقرمگی است.

در شکل ۱۵ (ج) دمای (200°C)، اوج نیرو برای CtrlA و MSMP5A به ۴/۰ و ۴/۰ کیلونیوتن و جابه جایی به ۰/۶۴ و ۰/۶۴ میلی متر افزایش می یابد (طاقت خمشی ۱/۵ و ۱/۴ $\text{kN}\cdot\text{mm}$). این افزایش به دلیل حذف رطوبت آزاد و تشکیل فازهای کریستالی مقاوم تر در ماتریس ژئوپلیمری است. در گروه B، اوج نیروی CtrlB و MSMP5B به ۴/۷ و ۴/۷ کیلونیوتن و جابه جایی به ۱/۳ و ۱/۴ میلی متر می رسد (طاقت خمشی ۱/۶ و ۱/۲ $\text{kN}\cdot\text{mm}$)، که نشان دهنده هم افزایی بین ماتریس تقویت شده و الیاف در دمای متوسط است.

در شکل ۱۵ (د) دمای (400°C)، اوج نیرو برای CtrlA و MSMP5A به ۳/۵ و ۳/۶ کیلونیوتن و جابه جایی به ۰/۵ و ۰/۵ میلی متر کاهش می یابد (طاقت خمشی ۱/۳ و ۱/۲ $\text{kN}\cdot\text{mm}$). این کاهش به دلیل شروع تخریب ماتریس ژئوپلیمری، از جمله ترک خوردگی ناشی از تنش های حرارتی و تضعیف پیوندهای شیمیایی رخ می دهد. در گروه B، اوج نیروی CtrlB و MSMP5B به ۴/۰ و ۴/۲ کیلونیوتن و

جابه‌جایی به $1/0$ و $1/1$ میلی‌متر کاهش می‌یابد (طاقة خمشی $1/4$ و $1/1 \text{ kN}\cdot\text{mm}$)؛ اما حضور الیاف تا حدی افت چقرمگی را جبران می‌کند؛ زیرا الیاف همچنان ترک‌ها را پل می‌زنند.

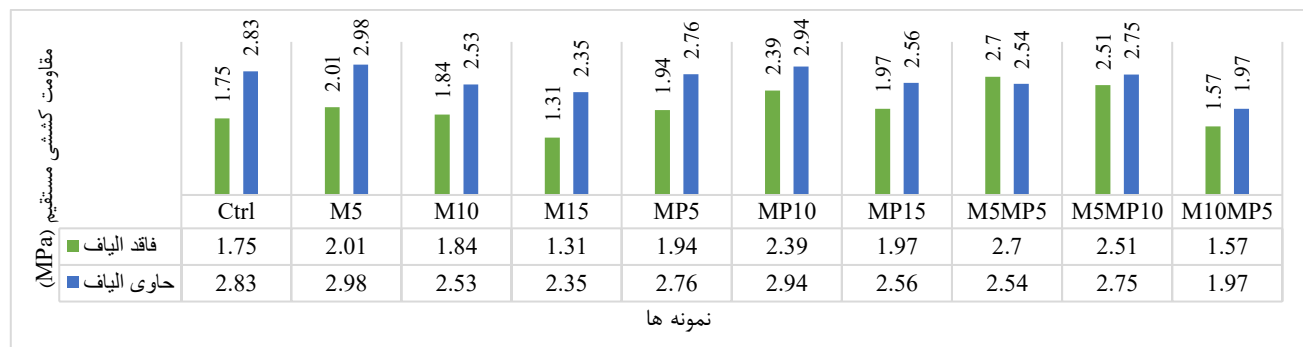
در شکل ۱۵ (ه) دمای (600°C) ، اوج نیرو برای CtrlA و M5MP5A به طور قابل توجهی به $2/0$ و $2/2$ کیلو نیوتن و جابه‌جایی به $0/4$ و $0/45$ میلی‌متر کاهش می‌یابد (طاقة خمشی $0/7$ و $0/7 \text{ kN}\cdot\text{mm}$). این افت شدید ($49/3\%$ برای CtrlA) به تخریب گسترده ماتریس ژئوپلیمری، از دست دادن پیوندهای هیدروژنی و تشکیل میکروتکرک‌ها در اثر دمای بالا نسبت داده می‌شود. در گروه B، اوج نیروی CtrlB و M5MP5B به $2/5$ و $2/8$ کیلو نیوتن و جابه‌جایی به $0/8$ و $0/9$ میلی‌متر کاهش می‌یابد (طاقة خمشی $0/8$ و $0/7 \text{ kN}\cdot\text{mm}$)؛ کاهش کمتر در گروه B به دلیل مقاومت حرارتی الیاف فولادی است که حتی در دمای 600°C ، توانایی پل زنی ترک‌ها را حفظ کرده و چقرمگی نسبی را بهبود می‌بخشد.

به طور کلی افزایش اوج نیرو و جابه‌جایی در دماهای پایین (100°C و 200°C) به تکمیل واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون و تقویت ماتریس مربوط است؛ در حالی که کاهش در دماهای بالاتر (400°C و 600°C) به تخریب حرارتی ماتریس و تضعیف پیوندها بازمی‌گردد. حضور الیاف فولادی در گروه B به طور قابل توجهی چقرمگی را در تمام دماها بهبود می‌بخشد، به‌ویژه در دماهای بالا که ماتریس تردتر می‌شود. این تحلیل نشان‌دهنده اهمیت ترکیب مواد و دما در تعیین رفتار خمشی ملات‌های ژئوپلیمری است.

۵-۵- نتایج آزمایش مقاومت کششی مستقیم

شکل ۱۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی مستقیم نمونه‌های بریکت ژئوپلیمری پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه، تأثیر جایگزینی میکا و متاکائولن با سرباره را در دو گروه A (فاقد الیاف، با هیدروکسید سدیم ۴ مولار) و B (حاوی الیاف، با هیدروکسید سدیم ۸ مولار) را نشان می‌دهد. در گروه A مقاومت کششی نمونه شاهد CtrlA (۱/۷۵) مگاپاسکال است که با جایگزینی ۵٪ میکا (M5A) به $2/01$ مگاپاسکال (افزایش $14/9\%$) و در 10% (M10A) به $1/84$ مگاپاسکال (افزایش $5/1\%$) بهبود می‌یابد؛ این افزایش به تقویت پیوندهای ژئوپلیمری توسط میکا و حفظ انسجام ماتریس در غلظت پایین هیدروکسید سدیم مرتبط است. با این حال در 15% (M15A: $1/31$) مگاپاسکال، کاهش $25/1\%$ مقاومت افت می‌کند، زیرا جایگزینی بیش از حد سرباره، چگالی ماتریس را کاهش داده شکنندگی را در برابر تنش‌های کششی افزایش می‌دهد. جایگزینی متاکائولن در 10% (MP10A: $2/39$) مگاپاسکال، افزایش $36/6\%$ بهترین نتیجه را به‌دست می‌دهد، که ناشی از خاصیت پوزولانی متاکائولن و تشکیل ژل سیلیکاتی متراکم است، در حالی که در 5% (MP5A: $1/94$) مگاپاسکال، افزایش $10/9\%$ و 15% (MP15A: $1/97$) مگاپاسکال، افزایش $12/6\%$ به دلیل تعادل ناکافی، رشد کمتری مشاهده می‌شود. طرح ترکیبی M5MP5A (۵٪ میکا + 5% متاکائولن) با $2/7$ مگاپاسکال (افزایش $54/3\%$) بالاترین مقاومت را ارائه می‌کند که به هم‌افزایی میکا در تقویت پیوندها و متاکائولن در افزایش چگالی و انسجام ماتریس مربوط است، اما ترکیب‌های نامتعادل مانند نمونه M5MP10A ($2/51$) مگاپاسکال و نمونه M10MP5A ($1/57$) مگاپاسکال، کاهش $10/3\%$ به دلیل اختلال در پیوستگی ضعیف عمل می‌کنند. در گروه B، اوج نیروی CtrlB (۱/۷۵) مگاپاسکال است که به اثر ترکیبی الیاف فولادی و غلظت بالاتر هیدروکسید سدیم (۸ مولار) وابسته است؛ جایگزینی ۵٪ میکا در نمونه طرح M5B: $2/98$ مگاپاسکال، افزایش $5/3\%$ اندکی بهبود می‌یابد، زیرا همراهی الیاف با میکا گسیختگی را به تأخیر می‌اندازد، اما در 10% (M10B: $2/53$) مگاپاسکال، کاهش $10/6\%$ و 15% (M15B: $2/35$) مگاپاسکال، کاهش 17% کاهش می‌یابد که به کاهش سرباره و تضعیف ماتریس مربوط می‌شود. به دلیل تقویت ماتریس توسط ژل سیلیکاتی و پشتیبانی الیاف، متاکائولن در 10% (MP10B: $2/94$) مگاپاسکال، افزایش $3/9\%$ بهینه است، اما در 5% (MP5B: $2/76$) مگاپاسکال، کاهش $2/5\%$ و 15% (MP15B: $2/56$) مگاپاسکال، کاهش $9/5\%$ کاهش می‌یابد. طرح‌های ترکیبی در گروه B مانند M5MP5B ($2/54$) مگاپاسکال، کاهش $10/2\%$ و M10MP5B ($1/97$) مگاپاسکال، کاهش $30/4\%$ به دلیل غلبه الیاف و تعادل کمتر مواد جایگزین از شاهد کمتر است. افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۴ به ۸ مولار مقاومت کششی گروه B را به‌طور کلی ارتقا می‌دهد (CtrlB: $2/83$ در مقابل CtrlA: $1/75$)، زیرا انحلال بهتر آلومینوسیلیکات‌ها و ژئوپلیمریزاسیون پیشرفته‌تر، ماتریس را متراکم‌تر می‌کند و الیاف با مهار ترک‌ها این اثر را تقویت می‌کنند. به‌طور کلی جایگزینی بهینه 5%

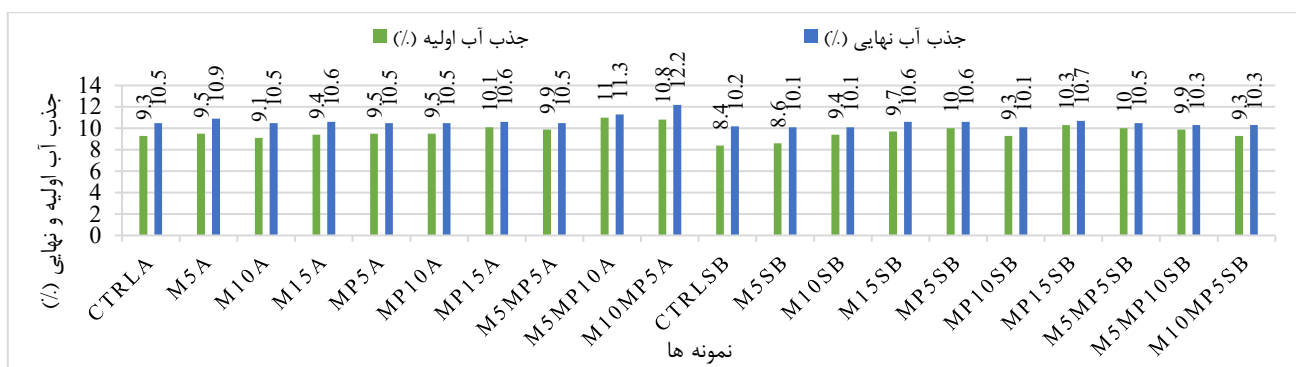
میکا و ۱۰٪ متاکائولن به دلیل تعادل در واکنش پذیری و استحکام ماتریس، مقاومت کششی را افزایش می دهد، در حالی که درصد های بالاتر با کاهش چگالی و انسجام، آن را تضعیف می کنند؛ ترکیب ۵٪/۵٪ در گروه A و غلظت بالاتر در گروه B بهترین نتایج را به ارمغان می آورد. شکل ۱۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی مستقیم را نشان می دهد



شکل ۱۵: نتایج آزمایش مقاومت کششی مستقیم

۶-۵- نتایج آزمایش جذب اولیه و نهایی

آزمایش جذب آب اولیه و نهایی نمونه های ژئوپلیمری پس از عمل آوری ۲۸ روزه، نشان دهنده تأثیر جایگزینی میکا و متاکائولن با سرباره بر نفوذپذیری ملات در گروه A (فاقد الیاف، هیدروکسید سدیم ۴ مولار) و گروه B (حاوی الیاف، هیدروکسید سدیم ۸ مولار) است. در جذب آب اولیه، نمونه شاهد گروه A (CtrlA) با ۹/۳٪ شروع می شود، اما با افزودن ۵٪ میکا (M5A: ۹/۵٪) افزایش اندکی (۲/۲٪) دارد که به دلیل تخلخل جزئی ناشی از افزودن میکا است، در حالی که با افزودن ۱۰٪ (M10A: ۹/۱٪) کاهش نسبی (۲/۲٪) را نشان می دهد که آن هم به سبب پراکندگی بهتر میکا در این سطح است؛ اما در ۱۵٪ (M15A: ۹/۴٪) دوباره جذب آب اولیه افزایش می یابد (۱/۱٪)، زیرا کاهش سرباره -منبع اصلی چگالی- تخلخل سطحی را بالا می برد. متاکائولن در گروه A جذب آب اولیه را افزایش می دهد (MP5A: ۹/۵٪، MP10A: ۹/۵٪، MP15A: ۱۰/۱٪)، که به خاصیت پوزولانی آن و تشکیل ژل سیلیکاتی مربوط می شود. ابتدا ذرات ریز متاکائولن تخلخل سطحی را زیاد می کند و سپس منافذ را مسدود می کند. طرح های ترکیبی در گروه A، مثل M5MP10A (۱۱٪) و M10MP5A (۸/۸٪)، بالاترین جذب آب اولیه را دارند (۱۸/۳٪ و ۱۶/۱٪ افزایش)؛ زیرا جایگزینی زیاد و ترکیب نامتعادل، ساختار را نفوذپذیرتر می کند. در گروه شاهد B (CtrlB) با ۸/۴٪ کمترین جذب آب اولیه را دارد که دلیل آن وجود الیاف و هیدروکسید سدیم ۸ مولار است. در جذب آب نهایی نمونه شاهد CtrlA (۱۰/۵٪) و M5A (۱۰/۹٪) افزایش جزئی (۳/۸٪) دارند که به منافذ ریز ناشی از میکا در غلظت ۴ مولار برمی گردد؛ اما ۱۰٪ و ۱۵٪ میکا (MP10A: ۱۰/۵٪ و MP15A: ۱۰/۶٪) و متاکائولن (M10A: ۱۰/۴٪ و M15A: ۱۰/۵٪) تغییر چندانی ندارند؛ زیرا غلظت پایین هیدروکسید سدیم اثر تخلخل را جبران نمی کند. بیشترین جذب آب نهایی در نمونه طرح M10MP5A (۱۲/۲٪) است (۱۶/۲٪ افزایش)، که به تخلخل بالای ناشی از ترکیب (میکا و متاکائولن) ۱۵٪ مربوط می شود، اما در گروه B، این مقدار (M10MP5B: ۱۰/۳٪) با افزایش غلظت به ۸ مولار کاهش می یابد، زیرا ژئوپلیمریزاسیون متراکم منافذ را مسدود می کند. CtrlB (۱۰/۲٪) و M5B (۱۰/۱٪) جذب آب نهایی کمتری دارند که به اثر الیاف در انباشتن فضاها و غلظت بالاتر هیدروکسید سدیم مرتبط است؛ اما ۱۵٪ جایگزینی (M15B: ۱۰/۶٪ و MP15B: ۱۰/۷٪) آن را افزایش می دهد. به طور کلی ۵٪ میکا از جذب آب اولیه کمی می کاهد، اما متاکائولن در درصد های بالاتر با افزایش تخلخل، نفوذپذیری را بالا می برند. هر چه میزان جایگزینی میکا و متاکائولن به نمونه طرح های گروه A افزایش یابد درصد جذب آب بالا می رود، در حالی که در گروه B الیاف و هیدروکسید سدیم ۸ مولار این اثر را تعدیل می کند و نفوذپذیری را کاهش می دهد. نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی در شکل ۱۶ آمده است.



شکل ۱۶: نتایج آزمایش جذب آب اولیه و نهایی ملات ژئوپلیمر حاوی میکا و پودر متاکائولن

۷-۵- رابطه کمی میان رطوبت و مقاومت حرارتی نمونه‌ها

بر اساس داده‌های موجود در مقاله و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده (مانند جذب آب اولیه و نهایی در شکل ۱۶) و مقایسه مقاومت فشاری پس از قرارگیری نمونه‌ها تحت دماهای مختلف در شکل ۹ می‌توان به یک رابطه عددی بین رطوبت و مقاومت حرارتی دست یافت. این رابطه نشان می‌دهد که میزان رطوبت موجود در نمونه‌ها و نحوه تبخیر آن در دماهای مختلف، بر مقاومت حرارتی و خواص مکانیکی تأثیر مستقیم دارد.

برای ارائه رابطه کمی بین رطوبت و مقاومت حرارتی از معادله خطی یا غیرخطی استفاده می‌کنیم. ابتدا رابطه (۴) را برای همه نمونه‌ها تعریف می‌کنیم:

$$f(W, T) = aT^2 + bT - cW + d$$

(۴)

که در آن:

$f(W, T)$: مقاومت حرارتی (MPa)، W : درصد رطوبت (%)، T : دما (°C) و a, b, c, d ضرایب بدست آمده از تحلیل رگرسیونی. با استفاده از داده‌های فوق، ضرایب a, b و c برای هر نمونه محاسبه می‌شوند.

جدول ۲۱: رابطه کمی بین رطوبت و مقاومت حرارتی نمونه‌های فاقد الیاف و حاوی الیاف

شماره طرح	نمونه	معادله رابطه کمی بین رطوبت و مقاومت حرارتی نمونه‌های فاقد الیاف و حاوی الیاف
۱	CtrlA	$f(W, T) = -0.0001T^2 + 0.098T - 0.3W + 28.8$
۲	M5A	$f(W, T) = -0.0001T^2 + 0.092T - 0.3W + 26.0$
۳	M10A	$f(W, T) = -0.0001T^2 + 0.087T - 0.1W + 25.2$
۴	M15A	$f(W, T) = -0.0001T^2 + 0.082T - 0.1W + 23.3$
۵	MP5A	$f(W, T) = -0.0001T^2 + 0.094T - 0.3W + 27.4$
۶	MP10A	$f(W, T) = -0.0001T^2 + 0.089T - 0.1W + 27.0$
۷	MP15A	$f(W, T) = -0.0001T^2 + 0.085T - 0.1W + 24.9$

۸	M _Δ MP _Δ A	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.090T - 0.1W + 26/4$
۹	M _Δ MP ₁₀ A	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.086T - 0.1W + 23/7$
۱۰	M ₁₀ MP _Δ A	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.093T - 0.1W + 29/2$
۱۱	CtrlB	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.096T - 0.2W + 37/4$
۱۲	M _Δ B	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.090T - 0.1W + 39/1$
۱۳	M ₁₀ B	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.085T - 0.1W + 34/8$
۱۴	M _{1Δ} B	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.080T - 0.1W + 34/7$
۱۵	MP _Δ B	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.093T - 0.1W + 29/7$
۱۶	MP ₁₀ B	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.088T - 0.1W + 34/0$
۱۷	MP _{1Δ} B	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.084T - 0.1W + 29/4$
۱۸	M _Δ MP _Δ B	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.091T - 0.1W + 30/7$
۱۹	M _Δ MP ₁₀ B	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.086T - 0.1W + 28/6$
۲۰	M ₁₀ MP _Δ B	$f(W,T) = - 0.0001T^r + 0.092T - 0.1W + 27/1$

با توجه به جدول ۲۱ تأثیر رطوبت، دما، مواد افزودنی و الیاف فولادی بر مقاومت حرارتی و فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری نشان می‌دهد که رطوبت در کاهش مقاومت حرارتی نقش منفی ایفا می‌کند؛ زیرا تبخیر آب در دماهای مختلف باعث ایجاد تنش‌های داخلی و تخریب ساختارهای C-S-H می‌شود. نمونه‌های حاوی میکا و الیاف فولادی به دلیل خواص مقاومت حرارتی میکا و توانایی الیاف فولادی در جلوگیری از گسترش ترک‌ها در برابر کاهش ناشی از رطوبت، مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهند. از سوی دیگر دما تا حدود ۲۰۰°C به دلیل تسریع واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون و تشکیل ساختارهای C-S-H باعث بهبود مقاومت فشاری می‌شود؛ اما در دماهای بالاتر (مانند ۴۰۰°C و ۶۰۰°C) به سبب تجزیه ساختارهای C-S-H و افزایش تخلخل کاهش چشمگیری در مقاومت مشاهده می‌شود. مواد افزودنی نیز نقش مهمی در بهبود عملکرد دارند. میکا به ویژه در دماهای بالا عملکرد بهتری نشان می‌دهد، در حالی که متاکائولن در دماهای پایین اثر مثبت‌تری دارد. ترکیب این دو ماده می‌تواند به بهبود مقاومت حرارتی کمک کند. علاوه بر این الیاف فولادی می‌تواند باعث کاهش سرعت افت مقاومت فشاری در دماهای بالا شود. نمونه‌های حاوی ترکیب میکا، متاکائولن و الیاف فولادی بهترین عملکرد را در شرایط دمایی سخت از خود نشان می‌دهند. بنابراین طراحی دقیق ترکیب مواد و مدیریت شرایط محیطی به بهینه‌سازی عملکرد ملات‌های ژئوپلیمری کمک می‌کند.

۸-۵- رابطه کمی میان رطوبت و مقاومت حرارتی نمونه‌ها

بر اساس داده‌های موجود در مقاله رابطه بین تخلخل (V) و مقاومت حرارتی $f(V, T)$ برای همه نمونه‌ها به صورت غیرخطی است. رابطه (۵) با استفاده از معادلات رگرسیونی و داده‌های آزمایشی محاسبه می‌شود. معادله بین تخلخل و مقاومت حرارتی به صورت رابطه (۵) در نظر گرفته شد:

$$f(V, T) = aT^2 + bT - cV + d \quad (5)$$

که در آن:

$f(V, T)$ مقاومت حرارتی (MPa)، V : درصد تخلخل (%)، T : دما ($^{\circ}\text{C}$) و a, b, c, d ضرایب بدست آمده از تحلیل رگرسیونی. با استفاده از داده‌های فوق، ضرایب a, b و c برای هر نمونه محاسبه می‌شوند. در جدول ۲۲ داده‌های تخلخل و مقاومت حرارتی برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است:

جدول ۲۲: داده‌های تخلخل و مقاومت حرارتی برای نمونه‌های حاوی الیاف و فاقد الیاف

نمونه	دما $^{\circ}\text{C}$	مقاومت حرارتی (MPa)	تخلخل (%)
CtrlA	۱۰۰	۵۴/۳	۵
M۵A	۶۰۰	۱۱/۶	۲۰
M۱۰A	۱۰۰	۴۸/۶	۶
M۱۵A	۶۰۰	۹/۹	۲۵
MP۵A	۱۰۰	۴۸/۵	۷
MP۱۰A	۶۰۰	۱۵/۷	۳۰
MP۱۵A	۱۰۰	۴۵/۸	۸
M۵ MP۵A	۶۰۰	۱۳/۹	۳۵
M۵ MP۱۰A	۱۰۰	۴۹/۶	۴
M۱۰ MP۵A	۶۰۰	۱۴/۷	۱۵
CtrlB	۱۰۰	۵۰	۵
M۵B	۶۰۰	۱۱/۸	۲۰
M۱۰B	۱۰۰	۵۰/۲	۶
M۱۵B	۶۰۰	۱۱/۶	۲۵
MP۵B	۱۰۰	۴۸	۷
MP۱۰B	۶۰۰	۱۰/۷	۳۰
MP۱۵B	۱۰۰	۴۶/۷	۸
M۵ MP۵B	۶۰۰	۱۰/۶	۳۵
M۵ MP۱۰B	۱۰۰	۴۶/۶	۶
M۱۰ MP۵B	۶۰۰	۱۰/۴	۲۵

جدول ۲۳: معادلات رابطه‌ای بین تخلخل و مقاومت حرارتی نمونه‌های حاوی الیاف و فاقد الیاف

شماره طرح	نمونه	معادله رابطه‌ای
۱	CtrlA	$f(V, T) = -0.0001T^2 + 0.98T - 0.3V + 28.8$
۲	M۵A	$f(V, T) = -0.0001T^2 + 0.92T - 0.3V + 26.0$

۳	M۱۰A	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 1VT - \cdot / 1V + 25/2$
۴	M۱۵A	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 12T - \cdot / 1V + 22/3$
۵	MP۵A	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 94T - \cdot / 2V + 27/4$
۶	MP۱۰A	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 91T - \cdot / 1V + 27/5$
۷	MP۱۵A	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 85T - \cdot / 1V + 24/9$
۸	M۵ MP۵A	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 90T - \cdot / 1V + 26/4$
۹	M۵ MP۱۰A	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 86T - \cdot / 1V + 23/7$
۱۰	M۱۰ MP۵A	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 93T - \cdot / 1V + 29/2$
۱۱	CtrlB	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 96T - \cdot / 2V + 37/4$
۱۲	M۵B	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 90T - \cdot / 1V + 39/1$
۱۳	M۱۰B	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 85T - \cdot / 1V + 34/8$
۱۴	M۱۵B	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 80T - \cdot / 1V + 34/7$
۱۵	MP۵B	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 93T - \cdot / 1V + 29/7$
۱۶	MP۱۰B	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 88T - \cdot / 1V + 34/5$
۱۷	MP۱۵B	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 84T - \cdot / 1V + 29/4$
۱۸	M۵ MP۵B	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 91T - \cdot / 1V + 30/7$
۱۹	M۵ MP۱۰B	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 86T - \cdot / 1V + 28/6$
۲۰	M۱۰ MP۵B	$f(V,T) = - \cdot / \cdot \cdot \cdot 1T^r + \cdot / \cdot \cdot \cdot 92T - \cdot / 1V + 27/1$

تحلیل داده‌های جدول ۲۳ نشان می‌دهد که تخلخل در کاهش مقاومت حرارتی نقش اساسی ایفا می‌کند. منفی بودن ضریب cV در تمام معادلات بیانگر اثر منفی تخلخل بر مقاومت حرارتی است، زیرا هرچه میزان تخلخل در ساختار بیشتر باشد، مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد.

۱-۸-۵- رفتار غیر خطی تخلخل و مقاومت حرارتی

رابطه بین تخلخل و مقاومت حرارتی به صورت غیرخطی است و این رفتار تحت تأثیر شرایط حرارتی و نوع مواد افزودنی قرار می‌گیرد. در دماهای پایین تأثیر تخلخل نسبتاً کم است؛ اما در دماهای بالا (مانند 600°C) به دلیل خروج بخار آب و تخریب ساختار C-S-H تخلخل در کاهش مقاومت حرارتی نقش عمده‌ای دارد.

اثر مواد افزودنی: میکا، متاکائولن و الیاف فولادی

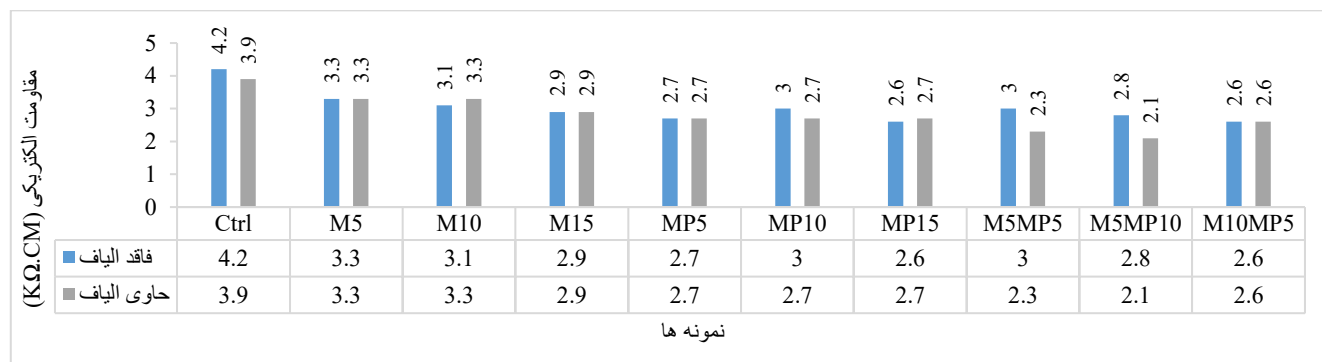
میکا در کاهش تخلخل و بهبود مقاومت حرارتی به‌ویژه در دماهای بالا (600°C) تأثیر مثبتی دارد. این امر به دلیل ساختار ورقه‌ای میکا و مقاومت حرارتی ذاتی آن است که از ایجاد تخلخل‌های جدید جلوگیری می‌کند. متاکائولن به دلیل تجزیه ساختارهای C-S-H و واکنش‌های شیمیایی مخرب در دماهای بالا نقش منفی دارد و میزان افزایش تخلخل را بالا می‌برد. الیاف فولادی در کاهش تأثیر منفی تخلخل بر مقاومت حرارتی نقش مهمی دارند. این الیاف با جلوگیری از گسترش ترک‌ها و افزایش ثبات ساختاری مانع ایجاد تخلخل‌های بیشتر می‌شوند. این موضوع در دماهای بالا به سبب تنش‌های داخلی و تخریب ساختاری شدید بسیار مؤثر است.

بررسی نتایج جدول ۲۳ نشان می‌دهد که افزایش تخلخل باعث کاهش مقاومت حرارتی می‌شود، البته این اثر به شرایط حرارتی و نوع مواد افزودنی بستگی دارد. استفاده از مواد افزودنی مانند میکا و الیاف فولادی به کاهش تخلخل و بهبود مقاومت حرارتی کمک می‌کند. بنابراین طراحی دقیق ترکیب مواد و مدیریت شرایط حرارتی در بهینه‌سازی عملکرد حرارتی نمونه‌های ژئوپلیمری مؤثر است. این یافته‌ها اهمیت استفاده از مواد افزودنی مناسب و تقویت‌کننده‌ها را در بهبود مقاومت حرارتی و کاهش تأثیرات منفی تخلخل بیان می‌کند.

۹-۵- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی در نمونه‌های مکعبی $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متری ژئوپلیمری پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه در گروه A (فاقد الیاف، هیدروکسید سدیم ۴ مولار) و گروه B (حاوی الیاف، هیدروکسید سدیم ۸ مولار) انجام شد. این آزمایش تأثیر جایگزینی میکا، متاکائولن و سرباره بر دوام و تراکم ساختار را بیان می‌کند. در گروه A، شاهد (CtrlA) با $4/2 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$ بالاترین مقاومت الکتریکی را دارد که به ساختار متراکم سرباره و تخلخل پایین آن مربوط است. سرباره با تشکیل ماتریس ژئوپلیمری منسجم، هدایت یونی را کاهش می‌دهد. جایگزینی ۵٪ میکا ($M5A:3/3$ ، $21/4\%$ کاهش)، ۱۰٪ ($M10A:3/1$ ، $26/3\%$ کاهش) و ۱۵٪ ($M15A:2/9$ ، 31% کاهش) مقاومت را به‌طور مداوم پایین می‌آورد، زیرا میکا با جایگزینی سرباره، تخلخل ریز را افزایش می‌دهد و مسیرهای هدایت یونی را بیشتر می‌کند که این موضوع سبب کاهش دوام در برابر نفوذ یون‌ها و خوردگی‌ها می‌شود. متاکائولن در گروه A کاهش مقاومت بیشتری را نشان می‌دهد. ($MP5A:2/7$ ، $35/7\%$ کاهش؛ $MP10A:3/0$ ، $28/6\%$ کاهش؛ $MP15A:2/6$ ، $38/1\%$ کاهش) که به خاصیت پوزولانی آن برمی‌گردد؛ اگرچه متاکائولن ژل سیلیکاتی تشکیل می‌دهد؛ اما در غلظت ۴ مولار منافذ ریز باقی‌مانده هدایت الکتریکی را افزایش می‌دهد. طرح‌های ترکیبی در گروه A، مانند $M5MP10A$ ($3/0$)، $M5MP10A$ ($2/8$) و $M10MP5A$ ($2/6$) نیز کاهش دارند ($28/6\%$ تا $38/1\%$) که به تخلخل ناشی از جایگزینی ترکیبی مرتبط می‌شود. در گروه B شاهد (CtrlB) با $3/9 \frac{\text{K}\Omega}{\text{cm}}$ به دلیل غلظت ۸ مولار و حضور الیاف، متراکم است، اما از CtrlA کمتر است، زیرا الیاف ممکن است منافذ میکروسکوپی ایجاد کنند؛ ۵٪ میکا ($M5B:3/3$ ، $15/4\%$ کاهش) و ۱۵٪ ($M15B:2/9$ ، $25/6\%$ کاهش) روند کاهشی مشابه گروه A را دارند، اما متاکائولن ($MP5B:2/7$ ، $MP10B:2/7$ ، $MP15B:2/7$) کاهش شدیدتر و یکنواخت‌تری نشان می‌دهد ($30/8\%$ کاهش) که به تخلخل بیشتر نسبت به میکا برمی‌گردد. کمترین مقاومت الکتریکی در گروه B در نمونه طرح $M5MP10B$ ($2/1$ ، $46/3\%$ کاهش) مشاهده می‌شود؛ زیرا ترکیب ۱۵٪ (5% میکا + 10% متاکائولن) با کاهش شدید سرباره و افزایش تخلخل، هدایت یونی را به حداکثر می‌رساند و حتی غلظت ۸ مولار و الیاف نمی‌تواند این اثر را جبران کنند. افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۴ به ۸ مولار در گروه B ماتریس را متراکم‌تر می‌کند (مثلاً $CtrlB: 3/9$ در مقابل $CtrlA: 4/2$)؛ اما در نمونه‌های با

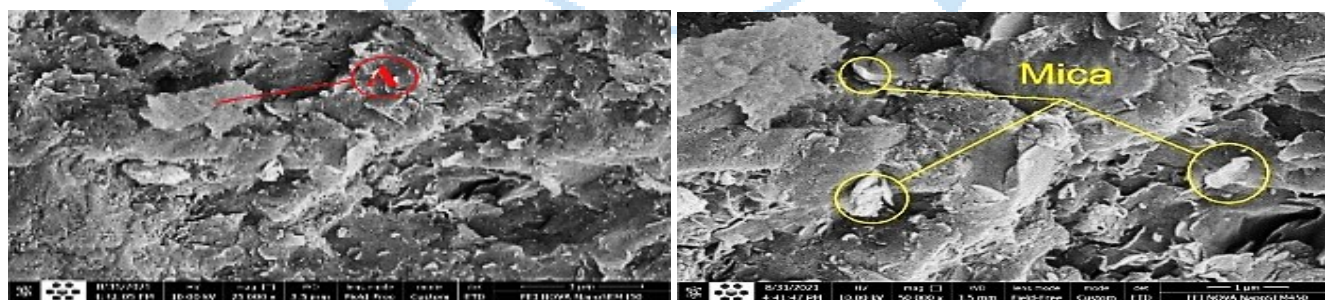
جایگزینی بالا، تخلخل غالب است. به طور کلی طرح شاهد B به دلیل تکیه بر سرباره بالاترین دوام الکتریکی را دارد. افزایش میکا و به ویژه متاکائولن با کاهش تراکم و افزایش منافذ، مقاومت الکتریکی را کاهش می دهد و این اثر در نمونه های ترکیبی با درصد بالا (مثل $M5MP10 \cdot B$) شدیدتر است. این امر حساسیت دوام به تعادل مواد و تأثیر محدود الیاف بر تراکم یونی را بیان می کند. شکل ۱۷ نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی را نشان می دهد.



شکل ۱۷: نتایج مربوط به آزمایش مقاومت الکتریکی

۵-۱۰- نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

این آزمایش از طریق نتایج تصویربرداری با دستگاه SEM (دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی) برای دو حالت حرارت دیده و حرارت ندیده انجام شد. در این بخش به بررسی ریزساختار ملات ژئوپلیمری حاوی میکا و پودر متاکائولن پرداخته می شود. مطابق شکل ۱۸ نمونه ساختار بسیار متراکمی داشته و در بخش های مختلف با وجود مقادیر بالای متاکائولن و میکا ساختار یکپارچه ای شکل گرفته است. ذرات ورقه ای میکا به صورت نیمه واکنش داده و پراکنده در ماتریس مشاهده شد که به کاهش تخلخل و بهبود تراکم کمک کرده اند. با توجه به تخلخل بسیار کم در اطراف این ذرات می توان واکنش و ترکیب مناسب میکا با خمیره را نتیجه گرفت. ذرات میکا پس از قرار گرفتن در دماهای بالا با ملات های ژئوپلیمری شروع به واکنش کردند. در دماهای بالای 600°C مقادیر بالای پودر متاکائولن غیرفعال در آن ها آزاد شده ساختارهای C-S-H را تشکیل دادند.

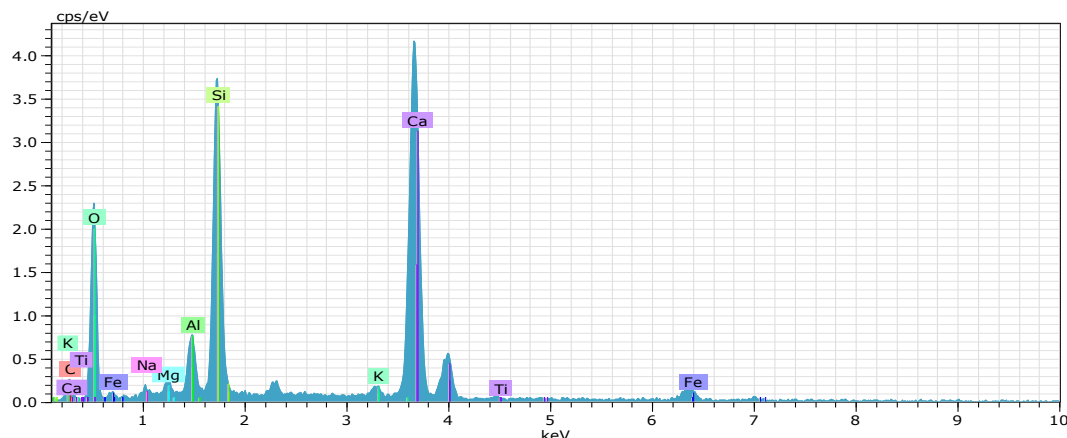


شکل ۱۹: ریزساختار طرح ۲۰ حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن

شکل ۱۸: ریزساختار طرح ۲۰ حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن

برای اطمینان از ساختار C-S-H، بخش A در شکل ۱۹ مورد آنالیز EDS قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۹ و جدول ۲۴ دیده می شود. متاکائولن به عنوان منبع سیلیس و آلومینیوم، در تشکیل فازهای ژئوپلیمری و کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-S-H) نقش مهمی داشت. حضور سرباره کوره آهن گدازی و الیاف فلزی کوتاه نیز چسبندگی و استحکام ساختار را افزایش دادند. در شکل ۲۰ و جدول ۲۴ آنالیز طیف EDS نمونه طرح شماره ۲۰ حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن قبل از دمای 600°C نشان داد که اکسیژن با $49/47$ درصد وزنی، کلسیم با $28/05$ درصد وزنی، و سیلیس با $10/46$ درصد وزنی عناصر اصلی هستند. این ترکیب شیمیایی تأیید می کند که فاز C-S-

H به عنوان بخش اساسی ساختار تشکیل شده است. آلومینیوم (۲/۴۵ درصد وزنی) و پتاسیم (۱/۲۹ درصد وزنی) از متاکائولن و میکا نشأت می گیرند، در حالی که آهن (۳/۰۹ درصد وزنی) از سرباره آمده است. نسبت کلسیم به سیلیس (حدود ۲/۶۸) نشان دهنده یک فاز C-S-H غنی از کلسیم است که با خواص مکانیکی و دوام خوب سازگار است.

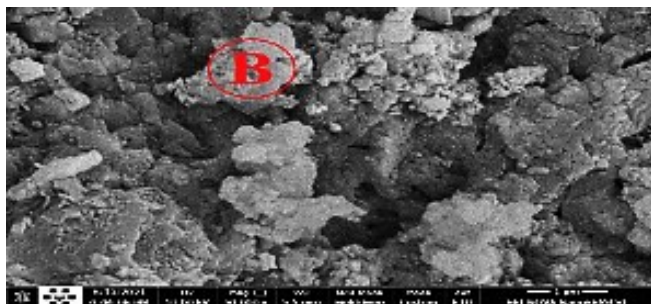


شکل ۲۰: آنالیز EDS طرح شماره ۲۰ حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن در حالت حرارت ندیده

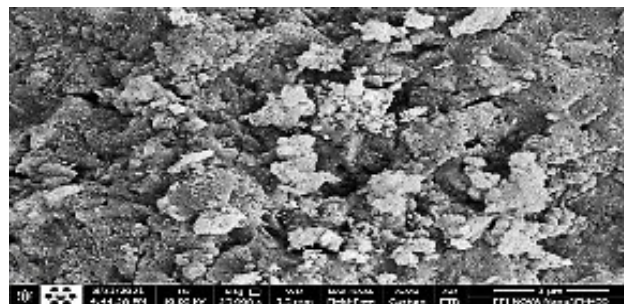
جدول ۲۴: نتایج آنالیز EDS طرح ۲۰ حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	49.47	48.29	62.88	8.51
Ca	20	K-series	28.05	27.38	14.23	0.90
Si	14	K-series	10.46	10.21	7.57	0.50
C	6	K-series	6.20	6.05	10.49	2.14
Fe	26	K-series	3.09	3.02	1.13	0.19
Al	13	K-series	2.45	2.39	1.85	0.18
K	19	K-series	1.29	1.26	0.67	0.10
Mg	12	K-series	0.69	0.67	0.57	0.09
Na	11	K-series	0.63	0.61	0.56	0.11
Ti	22	K-series	0.12	0.12	0.05	0.05
Total:			102.43	100.00	100.00	

شکل ۲۰ ریزساختار نمونه طرح ۲۰ را قبل از قرار گرفتن در دمای ۶۰۰°C با بزرگنمایی ۲۵kX نشان می دهد. در این نمونه مقادیر بسیاری ساختارهای C-S-H پس از قرار گرفتن در دمای بالا تشکیل شده که به حضور میکا در ملات ژئوپلیمری مربوط است. پس از قرار گرفتن نمونه در دمای ۶۰۰°C، تصاویر SEM حفره های کوچک و متصل به هم را نشان می دهد که نتیجه خروج بخار آب یا گازهای محبوس در طی فرآیند حرارتی هستند. با وجود این تخلخل ها، ساختار کلی یکپارچه باقی مانده و فازهای C-S-H و ژئوپلیمری بیشتری تشکیل شده اند. ریزساختار نمونه طرح ۲۰ حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن پس از قرار گرفتن در دمای ۶۰۰°C در شکل های ۲۱، ۲۲ و ۲۴ آمده است.

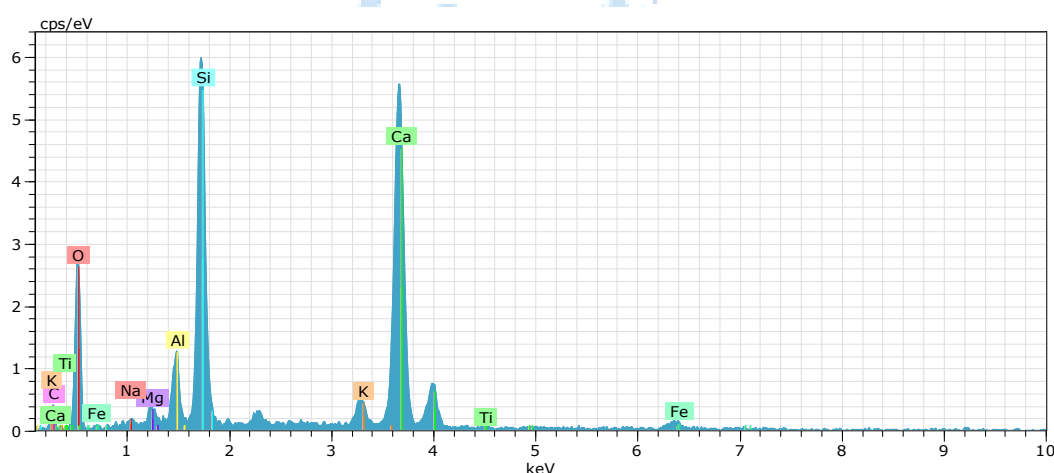


شکل ۲۲: ریزساختار نمونه طرح ۲۰



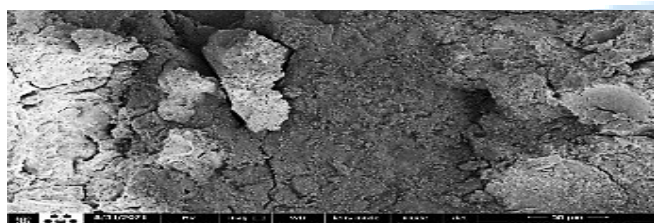
شکل ۲۱: ریزساختار نمونه طرح ۲۰

طیف‌سنجی پرتو ایکس پراکنده انرژی (EDS، EDX یا XEDS) یک تکنیک تحلیلی است که برای آنالیز عنصری یا خصوصیات شیمیایی یک نمونه استفاده می‌شود. این بررسی بر تعامل برخی از منابع تحریک اشعه ایکس و یک نمونه تکیه دارد. قابلیت‌های مشخصه آن به این دلیل است که هر عنصر یک ساختار اتمی منحصر به فردی دارد که اجازه می‌دهد مجموعه‌ای کم نظیر از قله‌ها در طیف اشعه ایکس آن وجود داشته باشد. برای تحریک انتشار پرتوهای X مشخصه‌ای از یک نمونه، یک پرتو پراثری از ذرات باردار مانند الکترون‌ها یا پروتون‌ها یا پرتوی از اشعه ایکس در نمونه مورد مطالعه متمرکز می‌شود. در حالت استراحت، یک اتم درون نمونه حاوی الکترون‌های حالت پایه (تحریک نشده) در سطوح انرژی گسسته یا لایه‌های الکترونی متصل به هسته است. پرتو الکترونی فرودی ممکن است یک الکترون را در یک پوسته داخلی تحریک کند و آن را از پوسته بیرون بیاورد و در جایی که الکترون بود یک حفره الکترونی ایجاد نماید. سپس یک الکترون از یک لایه بیرونی با انرژی بالاتر، حفره را پر می‌کند. تفاوت انرژی بین پوسته پراثری بالاتر و لایه انرژی پایین‌تر ممکن است به شکل پرتو ایکس آزاد شود. تعداد و انرژی پرتوهای ایکس ساطع شده از یک نمونه را می‌توان با یک طیف سنج پراکنده انرژی اندازه‌گیری کرد. از آن جا که انرژی پرتوهای X مشخصه تفاوت انرژی بین دو پوسته و ساختار اتمی عنصری است که از آن ساطع شده‌اند، این امکان اندازه‌گیری ترکیب عنصری نمونه را فراهم می‌کند. در شکل ۲۳ و جدول ۲۵ آنالیز EDS نمونه طرح ۲۰ حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن پس از قرار گرفتن نمونه در دمای 600°C نشان داد که مقدار اکسیژن به ۴۳/۸۶ درصد وزنی و مقدار کلسیم به ۲۵/۶۷ درصد وزنی کاهش پیدا کرد در حالی که مقدار سیلیس به ۱۲/۵۶ درصد وزنی افزایش یافت. این تغییرات نشان‌دهنده فعال‌سازی بیشتر متاکائولن و میکا در دمای بالا است که سیلیس و آلومینیوم بیشتری را آزاد کرده و نسبت کلسیم به سیلیس را به ۱/۹۸٪ کاهش داده است. کاهش آهن (به ۱/۱۲ درصد وزنی) و افزایش پتاسیم (به ۲/۱۸ درصد وزنی) نیز تأیید می‌کند که دمای بالا واکنش‌پذیری مواد را بهبود بخشیده است.

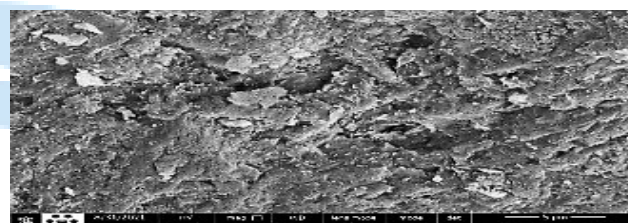
شکل ۲۳: آنالیز EDS طرح ۲۰ حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن پس از قرارگیری در دمای 600°C

جدول ۲۵: نتایج آنالیز EDS طرح ۲۰ حاوی ۱۰٪ میکا و ۵٪ متاکائولن پس از قرارگیری در دمای °C ۶۰۰

El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error (1 Sigma)
		[wt.%]	[wt.%]	[at.%]		[wt.%]
O	8	K-series	43.86	45.20	58.55	8.30
Ca	20	K-series	25.67	26.45	13.68	0.85
Si	14	K-series	12.56	12.95	9.56	0.61
C	6	K-series	7.40	7.63	13.17	2.69
Al	13	K-series	2.80	2.89	2.22	0.21
K	19	K-series	2.18	2.25	1.19	0.14
Fe	26	K-series	1.12	1.16	0.43	0.12
Mg	12	K-series	0.87	0.89	0.76	0.11
Na	11	K-series	0.39	0.40	0.36	0.09
Ti	22	K-series	0.18	0.18	0.08	0.06
Total:			97.03	100.00	100.00	



شکل ۲۵: ریزساختار نمونه طرح ۲۰



شکل ۲۴: ریزساختار نمونه طرح ۲۰

وجود تخلخل‌ها و کاهش برخی عناصر مثل آهن و کلسیم بر استحکام مکانیکی تأثیرگذار است. در شکل ۲۵ ناحیه اتصال بین سنگدانه و خمیره (ITZ) در برخی نقاط ضعف چسبندگی نشان داد که به حضور آب اضافی یا تنش‌های حرارتی مرتبط باشد. این موضوع نشان‌دهنده نیاز به بهینه‌سازی نسبت آب به مواد جامد یا شرایط فرآوری است. در مجموع این ملات با ترکیب میکا، متاکائولن، سرباره، و الیاف فلزی، پتانسیل بالایی برای کاربردهای ساختمانی به‌ویژه در محیط‌های با دمای بالا و خورنده دارد. با این حال برای اطمینان از عملکرد بلندمدت، بهینه‌سازی فرآیند تولید و ارزیابی دقیق‌تر خواص مکانیکی ضروری است.

۶- محدودیت‌های مطالعه و پیشنهادات برای تحقیقات آینده

این مطالعه رفتار ملات ژئوپلیمری را تا دمای °C ۶۰۰ بررسی کرده و نتایج نشان‌دهنده کاهش شدید مقاومت فشاری در این دما به دلیل تخریب ساختارهای هیدراته و افزایش تخلخل است. با این حال، برای اظهار نظر دقیق درباره کاربرد این ملات در سازه‌های مقاوم در برابر آتش، بررسی رفتار در دماهای بالاتر (مانند °C ۸۰۰ تا °C ۱۲۰۰) و تحت شرایط آتش‌سوزی واقعی (مانند نرخ افزایش دما و شوک حرارتی) ضروری است. مطالعات نشان می‌دهند که مواد ژئوپلیمری به دلیل شبکه آلومینوسیلیکاتی پایدار، پتانسیل بالایی برای مقاومت در دماهای بالا دارند [۳۲]. با این حال، رفتار بتن ژئوپلیمری (حاوی سنگدانه‌های درشت) و تأثیر نوع سنگدانه‌ها بر عملکرد حرارتی نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده آزمایش‌های مقاومت در برابر آتش تحت استانداردهای بین‌المللی مانند ASTM E119 یا ISO 834 [۴۵] انجام شود تا قابلیت کاربرد این مواد در سازه‌های مقاوم در برابر آتش ارزیابی گردد.

۷- نتیجه‌گیری

۱- تأثیر جایگزینی مواد بر مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین مختلف نشان می‌دهد که جایگزینی میکا، پودر متاکائولن، سرباره و الیاف فلزی در درصدهای وزنی مختلف، تأثیر مستقیمی بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری دارد. در تمام سنین، جایگزینی ۵٪ از این مواد (با و بدون الیاف فلزی) بهترین عملکرد را به همراه داشت. با افزایش درصد جایگزینی این مواد، در اکثر نمونه‌ها افت مقاومت فشاری مشاهده شد.

۲- تأثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

در نمونه‌های حاوی پودر متاکائولن، افزایش غلظت هیدروکسید سدیم در مقایسه با طرح‌های حاوی میکا، اثرگذاری کمتری بر بهبود مقاومت فشاری ۷ روزه دارد. به‌طوری که میزان افزایش مقاومت برای طرح‌های با جایگزینی پودر متاکائولن به‌طور متوسط ۱۲/۵٪ است، در حالی که این عدد برای نمونه‌های با جایگزینی میکا حدود ۳۸/۶٪ است.

۳- تأثیر سن عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

افزایش سن عمل‌آوری تا ۲۸ روز باعث شده است که نمونه‌های حاوی متاکائولن نتایج مطلوبی به دست آورند. بهترین نتیجه در میان طرح‌های فاقد الیاف به طرح با جایگزینی ۵٪ متاکائولن مربوط است. این نتایج نشان می‌دهد که متاکائولن در دوره زمانی طولانی‌تر، تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری دارد.

۴- تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری

نتایج نشان داد اگرچه با افزایش سن عمل‌آوری تا ۹۰ روز مقاومت فشاری افزایش یافت؛ اما مقاومت فشاری نمونه‌هایی با جایگزینی ۱۵٪ (میکا و پودر متاکائولن به جای سرباره) نسبت به طرح شاهد گروه A (فاقد الیاف) و B (حاوی الیاف) کاهش یافت. حضور الیاف فولادی تا حد زیادی اثر منفی جایگزینی ۱۵٪ (میکا و پودر متاکائولن به جای سرباره) را جبران کرده باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد گروه B (حاوی الیاف) شده است. به‌طوری که در جایگزینی ۱۵٪ (میکا و پودر متاکائولن به جای سرباره) و استفاده از ۱٪ الیاف فولادی، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد گروه B به میزان ۲۵/۵٪ افزایش یافته است.

۵- تأثیر حرارت بر مقاومت فشاری

۱- دمای ۱۰۰°C: قرارگیری در معرض دمای ۱۰۰°C باعث بهبود مقاومت فشاری شد. به‌طوری که طرح با جایگزینی ۱۵٪ پودر متاکائولن و با غلظت ۴ مول نسبت به حالت حرارت‌ندیده ۵۵/۸٪ افزایش مقاومت را نتیجه داد.

۲- دمای ۲۰۰°C: قرارگیری در معرض دمای ۲۰۰°C باعث بهبود مقاومت فشاری شده است. در طرح‌های با غلظت ۸ مول، جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ میکا باعث شد که مقاومت فشاری نمونه پس از قرارگیری تحت دمای ۲۰۰°C به ترتیب ۲۹/۵٪ و ۴۴/۴٪ افزایش یابد.

۳- دمای ۶۰۰°C: قرارگیری در معرض حرارت ۶۰۰°C باعث افت چشمگیر مقاومت در هر دو گروه طرح A (فاقد الیاف) و B (حاوی الیاف) شده است. با این حال در میان طرح‌های گروه B، نمونه‌های با جایگزینی ۱۰٪ و ۱۵٪ میکا در مقایسه با سایر طرح‌های حاوی میکا و پودر متاکائولن عملکرد مطلوبی نشان داده‌اند.

۶- تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت خمشی

۱- جایگزینی ۵٪ میکا در هر دو گروه A (فاقد الیاف) و B (حاوی الیاف) به ترتیب باعث افزایش ۱۴/۷٪ و ۳/۳٪ مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد شده است. با افزایش درصد جایگزینی این ماده، مقاومت خمشی ملات ژئوپلیمری کاهش یافت.

۲- در حالت کلی افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۴ به ۸ مول باعث افزایش مقاومت خمشی می‌شود.

۷- تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت کششی

- ۱- جایگزینی ۵٪ میکا باعث افزایش مقاومت کششی شد و با افزایش درصد جایگزینی میکا مقاومت کششی روندی نزولی یافت.
- ۲- در طرح‌های با جایگزینی پودر متاکائولن، بهترین نتیجه در جایگزینی ۱۰٪ این ماده بدست آمد.
- ۳- طبق نتایج آزمایش افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم از ۴ به ۸ مول باعث افزایش مقاومت کششی در تمام نمونه‌ها شده است.

۸- تأثیر حرارت بر ضریب طاقت خمشی

بررسی نتایج نشان می‌دهد که حرارت اثر چشم‌گیری بر کاهش طاقت خمشی نمونه‌ها دارد. به‌طوری که قرارگرفتن تحت اثر دمای 600°C باعث شده که ضریب طاقت خمشی به طور متوسط ۸۰/۶٪ کاهش یابد.

۹- تحلیل ریزساختاری

- ۱- بررسی تصاویر ریزساختار ملات ژئوپلیمری حاوی ترکیب پودر متاکائولن و میکا قبل از قرارگرفتن در معرض حرارت نشان می‌دهد که در آنالیز EDS مقدار بسیار بالایی کلسیم (Ca) وجود دارد. این امر به سبب استفاده همزمان از پودر متاکائولن و میکا است این موضوع تشکیل ساختارهای پایدار و سخت ژئوپلیمری Ca-(N)-A-S-H را بیان می‌کند.
- ۲- پس از قرارگرفتن در معرض حرارت، میزان ساختار C-S-H در ساختار نمونه افزایش یافت. این امر به دلیل واکنش‌های شیمیایی میکا و متاکائولن با خمیر در دماهای بالا است. حفره‌های ریز و متصل به هم ناشی از خروج بخار آب در طی حرارت دیدن مشاهده شد.

پیشنهاد آزمایش‌های آینده:

۱- انجام آزمایش‌های مقاومت در برابر آتش تحت استانداردهای ASTM E119 [۴۴] یا ISO 834 [۴۵].

۲- بررسی رفتار بتن ژئوپلیمری با سنگدانه‌های مختلف در دماهای بالای 600°C .

۳- ارزیابی اثرات شوک حرارتی و نرخ افزایش دما بر عملکرد ملات و بتن ژئوپلیمری.

تشکر و قدردانی

ما صمیمانه از سرکار خانم دکتر پروین تاجبخش، دانشیار دانشگاه پیام نور واحد رشت، به خاطر راهنمایی‌های ارزشمند، بازخوردهای روشنگرانه و حمایت‌های بی‌دریغشان در طول این پژوهش صمیمانه سپاسگزاریم. راهنمایی‌های سخاوتمندانه و مشارکت فکری ایشان نقش کلیدی در شکل‌گیری این تحقیق و ارتقای کیفیت آن داشته است. ما عمیقاً از تعهد ایشان قدردانی کرده و افتخار می‌کنیم که از نقش بی‌بدیلشان در این کار بهره‌مند شده‌ایم.

منابع

- [1] Okoye, F., Durgaprasad, J., and Singh, N., (2016). Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete. *Ceramics International*, 42(2), pp. 3000-3006. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.084>.

- [2] Islam, A., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Ghazali, N. B., Yusoff, S., & Bashar, I. I. (2017). Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 152, 964-977. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.092>.
- [3] Saghafi, M. H., Shariatmadar, H., and Kheyroddin, A., (2019). Experimental Evaluation of Mechanical Properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites. *Construction and Building Materials*, 208, pp. 46-62.
- [4] He, R., Dai, N., & Wang, Z. (2020). Thermal and mechanical properties of geopolymers exposed to high temperature: a literature review. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1), 7532703. <https://doi.org/10.1155/2020/7532703>.
- [5] Khoshkbijari, R. K., et al., (2020). Effects of Mica and Feldspar as partial cement replacement on the rheological, mechanical and thermal durability of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 263, pp. 120149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120149>.
- [6] Madani, H., and Hosseinbor, J., (2020). Investigation on The Mechanical Properties and Durability of Geopolymer Mixes Produced with Hybrid Utilization of Slag, Natural Pozzolan and Waste Soil. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(2), pp. 152-166. <https://doi.org/10.30478/jcsm.2021.272090.1191>.
- [7] Gencel, O., and Tanyildizi, H., (2020). Combined effects of microsilica, steel fiber and artificial lightweight aggregate on shrinkage and mechanical performance of high strength cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 262, pp. 120048. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120048>.
- [8] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag. *Journal of Structural Fire Engineering*, 11(2), 221-246. <https://doi.org/10.1108/JSFE-11-2018-0038>.
- [9] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2020). Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 173(1), 3-16. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00042>.
- [10] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). Using steel and polypropylene fibres to improve the performance of concrete sleepers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 173(9), 690-702. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00154>.
- [11] Nanditha, M., and Saikumar, S., (2021). Examine on mechanical properties of steel fiber strengthened concrete with silica fume. *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 3564-3567. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1081>.
- [12] Dalvand, A., and Ahmadi, M., (2021). Impact failure mechanism and mechanical characteristics of steel fiber reinforced self-compacting cementitious composites containing silica fume. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(3), pp. 736-748. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2020.12.016>.
- [13] Mohammadi Fatideh, M., and Ranjbar, M. M., (2021). Evaluation of setting time and compressive strength of geopolymer paste containing blast furnace slag and zeolite. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), pp. 177-187. <https://doi.org/10.22065/jsce.2019.161256.1740>.
- [14] Singh, G., (2021). Study on collective effect of silica fume and steel fiber on strength and durability properties of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 37, pp. 2256-2265. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.701>.
- [15] Moodi, F., et al., (2021). Durability of cementitious and geopolymer coating mortars against sulfuric acid attack. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9), pp. 3693-3708. <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18068.6757>.
- [16] Ahmed, D., & Kishar, E. (2021). Effect of elevated temperatures on the performance of metakaolin geopolymer pastes incorporated by cement kiln dust. *Egyptian Journal of Chemistry*, 64(4), 1911-1926. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.50848.3041>.
- [17] Toufigh, V., & Pachideh, G. (2022). Cementitious mortars containing pozzolana under elevated temperatures. *Structural Concrete*, 23(5), 3294-3312. <https://doi.org/10.1002/suco.202100567>.

- [18] Kljajević, L., Nenadović, M., Ivanović, M., Bučevac, D., Mirković, M., Mladenović Nikolić, N., & Nenadović, S. (2022). Heat treatment of geopolymer samples obtained by varying concentration of sodium hydroxide as constituent of alkali activator. *Gels*, 8(6), 333. <https://doi.org/10.3390/gels8060333>.
- [19] Kozhukhova, N., Kozhukhova, M., Teslya, A., & Nikulin, I. (2022). The effect of different modifying methods on physical, mechanical and thermal performance of cellular geopolymers as thermal insulation materials for building structures. *Buildings*, 12(2), 241. <https://doi.org/10.3390/buildings12020241>.
- [20] Kaya, M. (2022). Effect of steel fiber additive on high temperature resistance in geopolymer mortars. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(3), 1949-1967. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00798-2>.
- [21] Chen, X., et al., (2023). Effect of mica powder on the mechanical properties and durability of geopolymer concrete under high temperatures. *Construction and Building Materials*, 348, pp. 128769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131622>.
- [22] Mermerdaş, K., et al., (2020). Combined effects of microsilica, steel fibre and artificial lightweight aggregate on the shrinkage and mechanical performance of high strength cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 262, pp. 120048. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120048>.
- [23] Usman Kankia, M., Baloo, L., Danlami, N., Zawawi, N. A., Bello, A., & Muhammad, S. I. (2023). Microstructural Analysis and Compressive Strength of Fly Ash and Petroleum Sludge Ash Geopolymer Mortar under High Temperatures. *Sustainability*, 15(12), 9846. <https://doi.org/10.3390/su15129846>.
- [24] Rajini, B., and Rao, A. N., (2014). Mechanical properties of geopolymer concrete with fly ash and GGBS as source materials. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(9), pp. 15944-15953. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2014.0309023>.
- [25] Omer, S. A., Demirboga, R., and Khushefati, W. H., (2015). Relationship between compressive strength and UPV of GGBFS based geopolymer mortars exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 94, pp. 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.006>.
- [26] ASTM C33/C33M-18, (2023). *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM C1609/C1609M-05, (2019). *Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [28] AASHTO, T. (2009). "132- 87 Standard method of test for tensile strength of hydraulic cement mortars". American Association of State and Highway Transportation Officials.
- [29] ASTM, C1202-19, (2022). *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [30] ACI Committee 222, Corrosion of Metals in Concrete, (2019). *Protection of metals in concrete against corrosion*, American Concrete Institute.
- [31] ASTM C1723-16, (2025). *Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [32] Rihan, M. A. M., Onchiri, R. O., Gathimba, N., & Sabuni, B. (2024). Effect of elevated temperature on the mechanical properties of geopolymer concrete: a critical review. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 24. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00028-4>.
- [33] Tahwia, A. M., Abd Ellatief, M., Bassioni, G., Heniegal, A. M., & Abd Elrahman, M. (2023). Influence of high temperature exposure on compressive strength and microstructure of ultra-high performance geopolymer concrete with

- waste glass and ceramic. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5681-5697. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.177>.
- [34] Tanash, A. O., Bakar, B. A., Muthusamy, K., & Biajawi, M. I. A. (2023). Effect of elevated temperature on mechanical properties of normal strength concrete: An overview. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.053>.
- [35] Liu, Y., Hu, X., Du, Y., Nematollahi, B., & Shi, C. (2024). A review on high-temperature resistance of geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 111241. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111241>.
- [36] Tran, T. T., & Kwon, H. M. (2018). Influence of activator Na₂O concentration on residual strengths of alkali-activated slag mortar upon exposure to elevated temperatures. *Materials*, 11(8), 1296. <https://doi.org/10.3390/ma11081296>.
- [37] He, R., Dai, N., & Wang, Z. (2020). Thermal and mechanical properties of geopolymers exposed to high temperature: a literature review. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1), 7532703. <https://doi.org/10.1155/2020/7532703>.
- [38] Adjei, S., Elkatatny, S., & Ayranci, K. (2022). Effect of elevated temperature on the microstructure of metakaolin-based geopolymer. *ACS omega*, 7(12), 10268-10276. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06878>.
- [39] He, R., Dai, N., & Wang, Z. (2020). Thermal and mechanical properties of geopolymers exposed to high temperature: a literature review. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1), 7532703. <https://doi.org/10.1155/2020/7532703>.
- [40] Duxson, P., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. (2006). Thermal evolution of metakaolin geopolymers: Part 1—Physical evolution. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(52-54), pp. 5541-5555. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.09.019>.
- [41] Manohar, S., Haneefa, K. M., Rangarajan, S., and Santhanam, M. (2022). A Study on performance of clay based geopolymers at elevated temperatures, *The Indian Concrete Journal*, 96(5), pp. 17-28.
- [42] Saludung, A., Ogawa, Y., & Kawai, K. (2023). Microstructure and mechanical properties of epoxy resin-reinforced geopolymer exposed to high temperatures. *Materials Letters*, 331, 133473. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133473>.
- [43] Giannopoulou, I., Robert, P. M., Sakkas, K. M., Petrou, M. F., & Nicolaides, D. (2023). High temperature performance of geopolymers based on construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering*, 72, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106575>.
- [44] ASTM E119-20, (2022). Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [45] ISO (International Organization for Standardization). (2014). ISO 834: Fire-resistance tests: elements of building construction-part 1.1: general requirements for fire resistance testing.