

تأثیر الیاف پلیمری ساده و هیبریدی بر مقاومت‌های مکانیکی و مقاومت در برابر حرارت‌های زیاد بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

امیربهادر مرادی‌خو^{۱*}، میرحمید حسینی^۲، اعظم موسوی کاشی^۳، فرشته امامی^۲، علیرضا اسپرهم^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، گروه مهندسی عمران، سازه و ژئوتکنیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، سازه و ژئوتکنیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-زلزله، گروه مهندسی عمران، سازه و ژئوتکنیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

amirbahador.mk@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۸/۴/۱۲

چکیده

در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط زیست، به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است که می‌تواند منجر به کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند شود. بتن ژئوپلیمری الیافی به عنوان یک نوع از بتن‌های جدید با شکل‌پذیری بیشتر نسبت به بتن معمولی، شناخته می‌شود. در این پژوهش آزمایشگاهی، از دو نوع الیاف پلیمری شامل: الیاف پلی پروپیلن و الیاف هیبریدی چهارگانه پلی الفین، برای ساخت بتن ژئوپلیمری الیافی استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌های اولیه و انتخاب طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و فاقد الیاف ساخته و عمل‌آوری شد. سپس آزمون‌های جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلین) و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای از نمونه‌های بتن ژئوپلیمری گرفته شد. به منظور بررسی تأثیر الیاف بر مقاومت در برابر حرارت‌های بالا (۸۰۰-۲۰۰ درجه سانتی گراد) بتن ژئوپلیمری نیز آزمون‌های کاهش وزن و مقاومت فشاری بعد از مواجهه با دماهای بالا، از نمونه‌ها گرفته شد. نتایج نشان داد که الیاف سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی و کاهش جذب آب و وزن مخصوص نمونه‌ها در مقایسه با نمونه فاقد الیاف شده است اما استفاده از الیاف هیبریدی سبب بهبود قابل ملاحظه مقاومت‌های مکانیکی در مقایسه با الیاف ساده شد. همچنین استفاده از الیاف پلیمری اگرچه خطر کنده شدن لایه‌ای بتن را کاهش داد اما در مجموع، این الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت حرارتی بتن ژئوپلیمری ندارند.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری الیافی، الیاف هیبریدی، الیاف پلی الفین، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت در برابر دماهای بالا.

۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی ناشی از پدیده گرمایش جهانی به یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های محیط زیستی در سراسر جهان تبدیل شده است. علت اصلی پدیده گرمایش جهانی انتشار گازهای گلخانه‌ای است و در میان گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن با میزان انتشار ۶۵ درصد، بیشترین نقش را در پدیده گرمایش جهانی دارد [2,1]. فرآیند تولید سیمان پرتلند به عنوان یکی از منابع مهم انتشار گاز دی‌اکسید کربن و گرمایش جهانی شناخته می‌شود [4,3] زیرا برای تولید ۱ تن سیمان پرتلند تقریباً ۱ تن دی‌اکسید کربن تولید می‌شود [6,5]. همچنین تولید سیمان پرتلند عامل انتشار ۷ تا ۱۰ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن است [8,7,3]. از این رو نیاز به استفاده از جایگزین برای سیمان پرتلند ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط زیست، به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است که می‌تواند منجر به کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند شود [9]. ژئوپلیمر برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ میلادی توسط Davidovits شیمیدان برجسته فرانسوی، به عنوان بایندهای جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی، معرفی شد [10]. از نقطه نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن‌های ژئوپلیمری ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند که از جمله آنها می‌توان به مقاومت‌های مکانیکی بیشتر و سخت شدن سریع [11-14]، مقاومت در برابر آتش‌سوزی و حرارت بالا [15-17]، دوام بیشتر [18]، نفوذپذیری کمتر و مقاومت در برابر حمله نمک‌ها و اسیدها [19] و خزش کمتر [20,21]، اشاره کرد. ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از واکنش ژئوپلیمریزاسیون منبع آلومیناسیلیکاتی غنی از سیلیکا (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3)، با یک محلول فعال‌کننده قلیایی حاصل می‌شوند [22]. ژئوپلیمریزاسیون واکنش سریع شیمیایی در شرایط قلیایی بین عناصر معدنی Si و Al است که باعث تشکیل زنجیره‌های سه بعدی پلیمری Si-O-Al می‌شود [23,24]. منبع آلومیناسیلیکاتی بسته به خواص مورد نیاز، هزینه و در دسترس بودن می‌تواند طبیعی مانند زئولیت، صنعتی مانند متاکائولن و یا ضایعاتی مانند

خاکستر بادی یا سرباره کوره آهن‌گدازی باشد. متاکائولن یکی از انواع منابع آلومیناسیلیکاتی است که از کلسینه کردن کائولن در دمای ۶۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. در این مقاله از متاکائولن به عنوان منبع آلومیناسیلیکاتی استفاده شد. محلول فعال‌کننده قلیایی نیز به عنوان یکی از دو بخش اصلی ژئوپلیمرها نقش مهمی را در تجزیه و تشکیل ساختار کریستالی Si و Al ایفا می‌کند و معمولاً بر مبنای سدیم یا پتاسیم که از فلزات قلیایی حلال هستند، انتخاب می‌شود. رایج‌ترین محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده شده در ژئوپلیمریزاسیون، ترکیبی از محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) یا پتاسیم (KOH) با محلول سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) یا پتاسیم (K_2SiO_3) است [25]. در این مقاله از ترکیب محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم مایع، به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده شد.

بتن در کنار مزایا معایبی نیز دارد که یکی از مهمترین آنها، مقاومت کششی کم است در نتیجه بتن دارای شکل‌پذیری کم و تردی زیاد است. از این رو در چند دهه برای رفع این مشکل از رشته‌های الیاف که به صورت یکنواخت درحجم بتن پراکنده می‌شوند، استفاده می‌شود. استفاده از الیاف در مواد ماتریس شکننده دارای سابقه‌ای طولانی بوده و به ۳۵۰۰ سال قبل از میلاد هنگامی که از آجر آفتاب‌پخته تقویت شده با نی که برای ساخت تپه مرتفع ۳۵ متری آکارکوف نزدیک بغداد استفاده شد، بر می‌گردد [26]. همچنین از موی دم اسب نیز برای تقویت ملات بنایی و گچ استفاده شده است [27]. استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی، به عنوان یک گام موثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می‌شود [28]. امروزه از الیاف به صورت گسترده برای بهبود انواع خواص مانند: تقویت مقاومت فشاری، خمشی، کششی، ضربه‌ای، حرارتی و غیره، در انواع بتن استفاده می‌شود. این الیاف دارای طیف وسیعی از الیاف فلزی تا الیاف پلیمری هستند اما الیاف پلیمری مانند پلی‌پروپیلن، به دلیل اقتصادی بودن نسبت به الیاف فلزی، همواره مورد توجه پژوهشگران برای استفاده در انواع بتن، بوده است. یکی از انواع جدید الیاف پلیمری، الیاف پلی الفین است. این الیاف برای ساخت بتن‌های الاستو-پلاستیک استفاده می‌شود و سبب افزایش سختی خمشی، مقاومت ضربه‌ای و همچنین کاهش انتشار ترک و

هزینه بتن می‌شود [29]. از سوی دیگر، در سال‌های اخیر استفاده از الیاف هیبریدی دوگانه و چندگانه به منظور بهبود بیشتر خواص مورد نظر بتن‌های الیافی، رواج یافته است. بتن ژئوپلیمری الیافی به عنوان یک نوع از بتن‌های جدید با شکل‌پذیری بیشتر نسبت به بتن پرتلند [30]، مورد پژوهش مختلف قرار گرفته است.

Gao و همکاران [31] در پژوهش‌های خود در مورد بتن ژئوپلیمری الیافی، از الیاف هیبریدی فلزی در دو اندازه ۶ و ۱۲ میلی‌متری استفاده و نتیجه‌گیری کردند که الیاف ۶ میلی‌متری در مناطق با بازشدگی ترک‌های کوچک بسیار موثر هستند. در حالی که الیاف بلند شکل‌پذیری خوبی را در ترک‌های بزرگ و عریض تامین می‌کنند. همچنین استفاده از الیاف هیبریدی در درصد بهینه، سبب هم‌افزایی اثر الیاف و جلوگیری از ایجاد ترک‌ها در دو فاز ماکرو و میکرو می‌شود. Asrani و دیگران [32] در پژوهش در مورد بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه سرباره، از ۳ نوع الیاف پلی پروپیلن، شیشه و فولاد سه بعدی با طول به ترتیب ۱۳، ۱۵ و ۶۰ میلی‌متر و میزان ۰/۳، ۰/۳ و ۱/۶ درصد حجمی بتن، استفاده کردند. این پژوهشگران عملکرد بتن ژئوپلیمری را با استفاده از این الیاف به صورت تکی و هیبریدی از ۲ یا ۳ نوع الیاف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش این پژوهشگران نشان داد که استفاده از الیاف پلی پروپیلن (تکی) سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن به میزان تقریباً ۶ و ۱۰۸ درصد، نسبت به نمونه فاقد الیاف می‌شود. همچنین هیبرید نمودن الیاف سبب بهبود قابل ملاحظه مقاومت‌ها شده است به طوری که استفاده از الیاف فلزی و پلی پروپیلن، سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی به میزان بیش از ۳۰ و ۲۰۰ درصد، نسبت به نمونه فاقد الیاف شده است. Alberti و دیگران [33] خواص بتن بتن الیافی مسلح شده با الیاف پلی الفین و الیاف فولادی در نسبت کم، را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند استفاده از الیاف پلی الفین موجب بهبود مقاومت‌های مکانیکی و دستیابی به شکل‌پذیری و سختی خمشی مناسب می‌شود. Han و دیگران [34] تاثیر الیاف پلی الفین بر خواص بتن حاوی دوده سیلیس را مطالعه کردند. نتایج نشان داد استفاده از این الیاف سبب افزایش ۱۳ درصدی مقاومت خمشی و کاهش ۷۰ درصدی انتشار ترک‌ها شده است. همچنین نمونه‌های حاوی این الیاف مقاومت ضربه‌ای دو برابر بیشتر نسبت به

نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و ۱۴ برابر بیشتر نسبت به نمونه شاهد (فاقد الیاف) را ارائه کردند. Deng و دیگران [35] نیز تاثیر الیاف ماکرو پلی الفین را بر خواص بتن مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهشگران آثار مثبت الیاف پلی الفین را در جلوگیری از انتشار ترک در بتن با افزایش درصد استفاده از الیاف، مشاهده کردند. Celik و دیگران [29] در پژوهشی نقش الیاف مختلف بر مقاومت حرارتی بتن ژئوپلیمری را مطالعه کردند. این پژوهشگران از الیاف پلی الفین، بازالت، پلی آمید اصلاح شده و PVA با طول‌های به ترتیب ۱۰، ۱۲، ۱۰ و ۸ میلی‌متر و به صورت غیر هیبریدی، استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد استفاده از الیاف پلی الفین در درصد بهینه (۱/۲)، سبب افزایش ۴/۷ درصدی مقاومت فشاری، ۲۵ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد (بی الیاف) شده است. همچنین میزان کاهش مقاومت فشاری، خمشی و همچنین کاهش وزن نمونه‌های حاوی این الیاف در مقایسه با نمونه شاهد بعد از مواجهه با دماهای بالا (۳۰۰-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) میزان کمی بهبود یافته است و با افزایش درصد الیاف از ۰/۴ به ۱/۲، تاثیر اندکی در بهبود این مقادیر داشته است. در این پژوهش آزمایشگاهی، از دو نوع الیاف پلیمری شامل: الیاف پلی پروپیلن و الیاف هیبریدی چهارگانه پلی الفین، برای ساخت بتن ژئوپلیمری الیافی استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌های اولیه و انتخاب طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، نقش الیاف مصرفی بر جذب آب بتن و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی و همچنین مقاومت در برابر حرارت‌های بالا (۲۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد)، مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و فاقد الیاف، ساخته و عمل‌آوری شد. سپس آزمون‌های جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلین) و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای از نمونه‌های بتن ژئوپلیمری گرفته شد. به منظور بررسی نقش الیاف بر مقاومت حرارتی بتن ژئوپلیمری نیز آزمون‌های کاهش وزن و مقاومت فشاری بعد از مواجهه با دماهای بالا، از نمونه‌های بتن ژئوپلیمری گرفته شد. در پایان نتایج آزمایش‌های انجام شده جمع‌آوری، تحلیل و گزارش شدند.

شکل ۱. الیاف پلی پروپیلن (a) و چهارگانه پلی الفین (b)

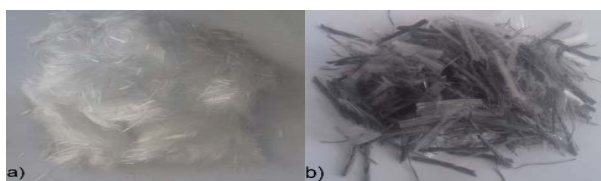


Fig. 1. Polypropylene (a) and 4-element polyolefin (b) fibers

جدول ۲- مشخصات الیاف

	polypropylene	4-element polyolefin
Length (mm)	6	10,19,38
Density (gr/cm ³)	0.91	0.91-0.95
Tensile strength (MPa)	400	570-900
Water absorbency	No	No
Alkaline and acid resistant	Excellent	Excellent
Melting point	160	160-170

Table 2. Properties of fibers

جدول ۳- آنالیز شیمیایی هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم مایع

NaOH			Na ₂ SiO ₃		
Chemical substance	Result	Unit	Chemical substance	Result	Unit
NaOH	98	%	SiO ₂	30.00	%
Na ₂ CO ₃	1	%	Na ₂ O	14.50	%
NaCl	200	ppm	Water	55.50	%
Fe	6	ppm	Model ratio	2.07	-
SiO ₂	15.7	ppm			

Table 3. Chemical analysis of NaOH and Na₂SiO₃ solutions

شن و ماسه مصرفی از معادن اطراف شهر اصفهان تهیه شد. شن مصرفی از نوع شن شکسته بود که پس از تهیه، توسط الک استاندارد ASTM دانه‌بندی شد. در این پژوهش، از شن در ۲ اندازه ۱۰ و ۷ میلی‌متری استفاده شد. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C127 [36] از شن مصرفی، گرفته شد. این آزمایش از ماسه نیز مطابق با استاندارد ASTM C128 [37]، به عمل آمد که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین ضریب نرمی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C136 [38]، ۳/۰۱، میزان رد شده از الک شماره ۲۰۰، ۰/۷۲ درصد و ارزش ماسه‌ای نیز بر اساس استاندارد ASTM D2419 [39]، ۷۳ اندازه‌گیری شد.

۲- روش آزمایشگاهی

۲-۱- مواد

منبع آلومیناسیلیکاتی استفاده شده در این پژوهش متاکائولن بود. مشخصات متاکائولن مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است. الیاف استفاده شده نیز شامل دو نوع الیاف بود. نوع اول، پلی پروپیلن ساده بود و نوع دوم، هیبریدی چهارگانه با نام تجاری کورتا که متشکل از الیاف مش شبکه‌ای ماکرو و میکرو، الیاف پیچیده شده و الیاف تک رشته‌ای با مدول و مقاومت بالا و از جنس پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن اصلاح شده نانویی بود. الیاف از شرکت نانونخ سیرجان تهیه شد. مشخصات الیاف در جدول (۲) و تصویر الیاف در شکل (۱) ارائه شده است. از هیدروکسید سدیم با خلوص ۹۸ درصد و محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت SiO₂ به Na₂O برابر با ۲، به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده شد. آنالیز شیمیایی این دو ماده در جدول (۳) نشان داده شده است. آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر اصفهان بود. از روان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی (SP) با وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، به منظور بالا بردن کارایی بتن استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات متاکائولن (فیزیکی و شیمیایی)

Content	Result	Unit
SiO ₂	54	%
Al ₂ O ₃	31.7	%
TiO ₂	1.41	%
Fe ₂ O ₃	4.89	%
ZrO ₂	0.1	%
K ₂ O	4.05	%
Na ₂ O	2.32	%
MnO	0.11	%
L.O.I	1.41	%
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	1.71	-
Specific Gravity	2.67	g/cm ³
Fineness	21400	cm ² /g

Table 1. Properties of Metakaolin (physical and chemical)

جدول ۴- وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه‌ها

Material	SSD Specific gravity (gr/cm ³)	Water absorption (%)
Coarse aggregates	2.62	1.3
Fine aggregates	2.59	3.2

Table 4. Specific gravity and Water absorption of aggregates

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

۲-۲-۱- مطالعه تاثیر الیاف بر مقاومت‌های مکانیکی بتن

ژئوپلیمری

در این بخش ۷ طرح اختلاط انتخاب شد که این طرح‌ها در جدول (۵) ارائه شده است. به منظور بهینه یابی میزان الیاف و بررسی میزان تاثیر درصدهای مختلف الیاف، الیاف مصرفی در اندازه‌های ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد حجمی بتن، به بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن اضافه شد. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا محلول فعال‌کننده قلیایی آماده شد. به همین منظور ابتدا محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مولار با محلول سیلیکات سدیم و روان کننده مطابق با طرح‌های اختلاط، مخلوط شد. به محلول به دست آمده ۲۴ ساعت زمان داده شد تا سرد شود. در روز آزمایش، ابتدا مواد خشک شامل: شن، ماسه، متاکائولن و الیاف مطابق با طرح‌های اختلاط در میکسر پرتابی بتن ریخته و به مدت ۳ دقیقه به منظور توزیع یکنواخت به صورت خشک، میکس شدند. سپس محلول فعال‌کننده قلیایی و آب اضافه به میکسر اضافه شد و مخلوط بتن به مدت ۲ دقیقه میکس شد. بعد از اتمام میکس، نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی بتن قالب‌بندی شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز ویبره، متراکم شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. پس از پایان عمل‌آوری، نمونه‌ها از آون خارج شده و در دمای محیط قرار گرفتند. از نمونه‌ها آزمون وزن مخصوص، جذب آب ۳ روزه، مقاومت فشاری، کششی و خمشی ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد. لازم به ذکر است ابعاد نمونه‌های فشاری ۱۰×۱۰×۱۰، خمشی ۱۰×۱۰×۴۰

سانتی‌متر بود. همچنین ابعاد نمونه‌های کششی نیز سیلندری ۲۰×۱۰ سانتی‌متر بود.

۲-۲-۲- مطالعه تاثیر الیاف بر مقاومت حرارتی بتن ژئوپلیمری

در بخش پایانی، تاثیر الیاف بر مقاومت حرارتی بتن ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا پس از مشخص شدن نتایج مراحل قبل، نمونه‌های فشاری بتن از طرح‌های Control، MP-0.2 و M4-0.2 آماده شد. مراحل ساخت و عمل‌آوری این نمونه‌ها دقیقاً مشابه با مراحل قبل بود. نمونه‌های ۲۸ روزه به منظور بررسی مقاومت حرارتی، در کوره و در معرض حرارت‌های ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. یک نمونه از هر کدام از طرح‌ها نیز به عنوان نمونه شاهد، در معرض دما قرار نگرفت. آهنگ افزایش دمای کوره با توجه به سایر مقالات، ۱ درجه سانتی‌گراد در دقیقه بود. پس از رسیدن دما به دمای مورد نظر، نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در آن دما نگه داشته شدند و سپس کوره خاموش شد تا دمای کوره به آرامی به دمای محیط باز گردد. در پایان نمونه‌ها از کوره خارج شدند و از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری و وزن گرفته شد تا درصد کاهش مقاومت فشاری و وزن در نمونه‌ها بعد از مواجهه با دماهای بالا، بررسی شود.

۲-۳- آزمایش‌های بتن

آزمون‌های انجام شده شامل: آزمون مقاومت فشاری بر اساس BS1881: Part116 [40]، آزمون کشش غیرمستقیم (برزیلین) بر اساس ASTM C496 [41]، آزمون مقاومت خمشی بر اساس ASTM C293 [42] و ASTM C1018 [43] و آزمون جذب آب و وزن مخصوص بر اساس ASTM C642 [44]، بود.

۳- نتایج

۳-۱- تاثیر الیاف بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری

۳-۱-۱- جذب آب و وزن مخصوص

نتایج آزمون جذب آب ۳ روزه و وزن مخصوص نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد در شکل‌های (۲ و ۳) ارائه شده است.

جدول ۵- طرح های اختلاط نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد

Mix ID	Metakaolin (Kg/m ³)	NaOH (Kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)	Coarse aggregates (Kg/m ³)	Fine aggregates (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	E. water (Kg/m ³)	Fiber content (%)
Control	350	140	210	840	840	14	40	0
MP-0.15	350	140	210	840	840	14	40	0.15
MP-0.2	350	140	210	840	840	14	40	0.2
MP-0.25	350	140	210	840	840	14	40	0.25
M4-0.15	350	140	210	840	840	14	40	0.15
M4-0.2	350	140	210	840	840	14	40	0.2
M4-0.25	350	140	210	840	840	14	40	0.25

Table 5. Mix design of fiber reinforced geopolymer concrete and control samples

مخصوص الیاف مورد استفاده به هم نزدیک و در محدوده ۰/۹۱-۰/۹۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب معادل با ۹۱۰-۹۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. در نتیجه علاوه بر اینکه باعث کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود، سبب نزدیک بودن نتایج این آزمون برای هر ۲ نوع الیاف شده است. در رابطه با مقایسه ۲ نوع الیاف نتایج نشان داد وزن مخصوص نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن اندکی کمتر از نمونه‌های حاوی الیاف چهارگانه است (۰/۱۳ درصد) که این موضوع می‌تواند مربوط به وزن مخصوص کمتر الیاف پلی پروپیلن نسبت به الیاف چهارگانه، باشد.

جذب آب نمونه شاهد، ۴/۳ درصد بود. استفاده از هر ۲ نوع الیاف سبب کاهش نسبی جذب آب نمونه‌ها، نسبت به نمونه شاهد شد و افزایش میزان الیاف سبب کاهش بیشتر جذب آب نمونه‌های الیافی شد. این موضوع می‌تواند مربوط به پراکنش تصادفی الیاف، کنترل میکرو ترک‌ها و پیشگیری از به وجود آمدن میکرو ترک‌های بعدی، باشد. این موضوع سبب بهبود میکرو ساختار و تراکم ماتریس بتن ژئوپلیمری الیافی می‌شود که نتیجه آن کاهش جذب آب نمونه‌ها است [45]. در رابطه با مقایسه ۲ نوع الیاف نتایج نشان داد مشابه با آزمون وزن مخصوص، جذب آب نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن در حالت بهینه، اندکی کمتر از نمونه‌های حاوی الیاف چهارگانه است (۰/۱ درصد) که این موضوع می‌تواند مربوط به اندازه کوتاه‌تر الیاف پلی پروپیلن نسبت به الیاف چهارگانه و در نتیجه آن ایجاد حباب‌های هوای کمتر در مجاورت الیاف، باشد.

۲-۱-۳- مقاومت فشاری

نتایج آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد در شکل ۴ ارائه شده است. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه شاهد ۲۳/۸ و ۲۵/۶ مگاپاسکال

شکل ۲. وزن مخصوص نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد

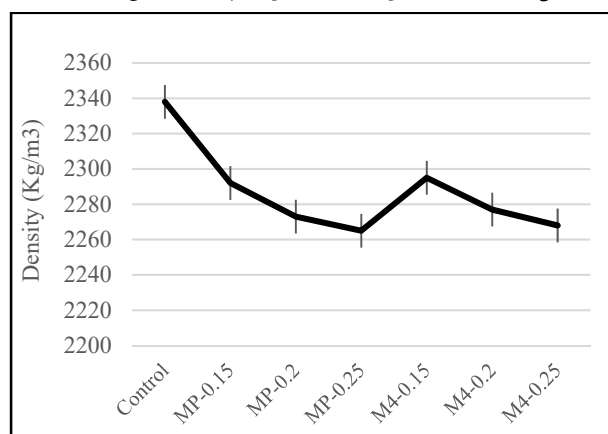


Fig. 2. Density of fiber reinforced geopolymer concrete and control samples

شکل ۳. جذب آب ۳ روزه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد

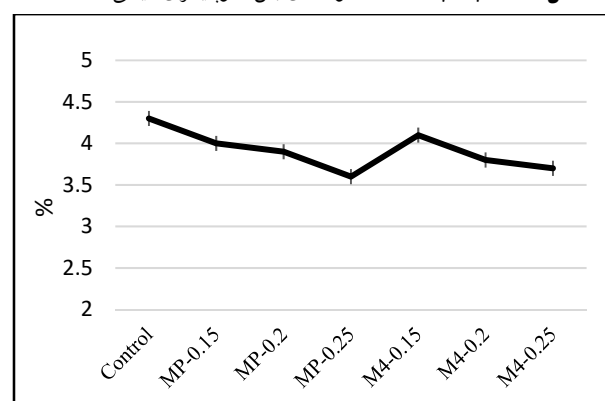


Fig. 3. 3-days water absorption of fiber reinforced geopolymer concrete and control samples

وزن مخصوص نمونه شاهد ۲۳۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شد. استفاده از الیاف سبب کاهش وزن مخصوص نمونه‌های الیافی شد و همچنین افزایش میزان الیاف سبب کاهش بیشتر وزن مخصوص نمونه‌ها شد به طوری که در نمونه‌های الیافی که حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف بودند تقریباً ۳ درصد کاهش وزن مخصوص، مشاهده شد. این موضوع می‌تواند مربوط به وزن مخصوص کمتر الیاف نسبت به بتن ژئوپلیمری باشد. وزن

می‌شود. در حالی که Asrani و دیگران [32] با استفاده از ۰/۳ درصد الیاف پلی پروپیلن، شاهد افزایش ۶ درصدی مقاومت فشاری بودند. اما الیاف هیبریدی در مقایسه با پلی پروپیلن، تاثیرگذاری بیشتری در بهبود مقاومت فشاری داشتند که می‌تواند مربوط به مقاومت کششی بیشتر این الیاف در مقایسه با الیاف پلی پروپیلن و اثر هیبریدی این الیاف باشد. درصد بهینه الیاف در بهبود مقاومت فشاری، ۰/۲ درصد حجمی بود و افزایش درصد الیاف به بیشتر از ۰/۲، سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی شد. این موضوع می‌تواند مرتبط با ناحیه تماس باشد.

ناحیه تماس که به اسامی مختلفی مانند لایه مرزی یا منطقه انتقالی نامیده می‌شود، ناحیه مرزی است که بین خمیر سیمان و سطح سنگدانه، الیاف و یا میلگرد پدید می‌آید و نقش مهمی در نفوذپذیری، دوام و مقاومت بتن دارد. ناحیه تماس دارای میکرو ساختاری متفاوت با خمیر سیمان بوده و دارای تخلخل و ریزترک‌های بیشتری است. ضخامت ناحیه تماس تابع پارامترهایی مانند: نوع الیاف، نوع سیمان، نوع پوزولان مصرفی و غیره می‌باشد. از سوی دیگر، الیاف استفاده شده در این مقاله، از جنس پلیمری هستند و در حالت کلی الیاف پلیمری به دلیل داشتن انعطاف بالا در صورت استفاده در درصد حجمی زیاد، باعث ایجاد پدیده گلوله‌شدگی الیاف و ایجاد حفره در ماتریس سیمان و در نتیجه آن ایجاد عیوب داخلی در ناحیه تماس و نهایتاً کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌شود [47,48]. در پایان این بخش با جمع‌بندی نتایج به دست آمده می‌توان گفت الیاف مورد استفاده، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نداشتند.

۳-۱-۳- مقاومت کششی و خمشی

نتایج آزمون مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد، در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. با توجه به شکل ۵، کمترین مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۱/۴۴ و ۱/۷۲ مگاپاسکال و مربوط به نمونه شاهد و بیشترین مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۲/۱۲ و ۲/۳۶ مگاپاسکال مربوط به نمونه M4-2 بود. اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن به میزان

اندازه‌گیری شد. اضافه کردن ۰/۱۵ درصد الیاف پلی پروپیلن، سبب کاهش ۳/۱۲ درصدی مقاومت فشاری بتن نسبت به نمونه شاهد شد. افزایش میزان الیاف به ۰/۲ درصد، سبب افزایش ۱/۲ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد و افزایش بیشتر الیاف به ۰/۲۵ درصد، سبب کاهش ۱/۵ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شد. اما در مورد الیاف چهارگانه نتایج با الیاف پلی پروپیلن تفاوت داشت. استفاده از الیاف چهارگانه به میزان ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد، سبب افزایش ۲/۳، ۶/۱ و ۳/۹ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شد. نتایج نشان داد الیاف پلی پروپیلن اثر منفی بر مقاومت فشاری دارند و فقط در درصد بهینه، سبب افزایش ۱/۲ درصدی مقاومت فشاری شد. این موضوع می‌تواند مربوط به مدول و مقاومت کششی کمتر این الیاف در مقایسه با الیاف هیبریدی چهارگانه باشد.

شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد

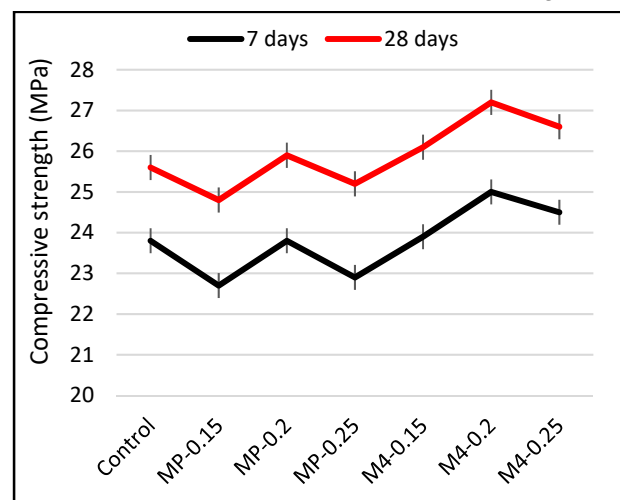


Fig. 4. Compressive strength of fiber reinforced geopolymer concrete and control samples

Noushini و همکاران [46] در پژوهشی در مورد بتن ژئوپلیمری الیافی، از الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۸، ۱۹ و ۵۱ میلی‌متر و به میزان ۰/۵ درصد حجمی، استفاده و نتیجه‌گیری کردند که استفاده از این الیاف به دلیل مدول و مقاومت کششی پایین و به وجود آمدن حباب‌های هوا اطراف الیاف، سبب کاهش ۱-۷ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد

۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد، سبب افزایش مقاومت خمشی به میزان ۳۰/۴ درصد شد. با افزایش بیشتر درصد الیاف به ۰/۲ درصد، مقاومت خمشی نمونه ۴۶ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود یافت. اما افزایش بیشتر ۰/۲۵ درصد، سبب کاهش اندک مقاومت خمشی نسبت به نمونه حاوی ۰/۲ درصد الیاف، شد. استفاده از الیاف چهارگانه به میزان ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد، سبب افزایش ۹۲/۳، ۷۵/۸ و ۸۶/۴ درصدی مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شد. میزان بهینه الیاف هیبریدی چهارگانه برای بیشترین تأثیرگذاری در بهبود مقاومت خمشی ۰/۱۵ درصد اندازه‌گیری شد و با افزایش درصد الیاف چهارگانه به ۰/۲۵، مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به درصد بهینه، کاهش نسبی یافت.

اضافه کردن الیاف در حالت عمومی سبب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن و در نتیجه افزایش شکل‌پذیری می‌شود. میزان افزایش تابع پارامترهایی مانند نوع و جنس، اندازه، میزان الیاف مصرفی و غیره است. افزودن الیاف پلیمری مانند پلی پروپیلن سبب تقویت و بهبود ماتریس خمیر سیمان ژئوپلیمر، جلوگیری از انتشار میکرو ترک‌ها و تغییر الگوی انتشار ترک‌ها می‌شود [49]. در حالت کلی ساختار ژئوپلیمرها شامل ژل شکل‌گرفته ژئوپلیمری، ذرات باقی‌مانده و واکنش‌نداده منبع آلومیناسیلیکاتی و حفره‌های مختلف است [49-52]. الیاف می‌توانند از طریق محصور کردن ماتریس ژئوپلیمر با دو سر خود، یک اثر پل مانند روی ترک‌ها و سوارخ‌ها داشته باشند که موجب افزایش سختی و مقاومت ماتریس ژئوپلیمر می‌شود [49]. در نتیجه نمونه‌های الیافی، مقاومت کششی و خمشی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون الیاف ارائه می‌دهند. در رابطه با عملکرد این الیاف با توجه به نتایج می‌توان گفت که هر ۲ نوع الیاف مصرفی نقش مثبتی در بهبود مقاومت کششی و خمشی داشتند اما عملکرد الیاف هیبریدی در مقایسه با الیاف پلی پروپیلن به طور قابل ملاحظه‌ای بهتر بود. این موضوع می‌تواند مربوط به دو علت باشد. نخست اینکه الیاف هیبریدی مصرفی به لحاظ مشخصات فنی، مدول و مقاومت کششی بیشتری نسبت به الیاف پلی پروپیلن دارند در نتیجه می‌توانند عملکرد بهتری ارائه کنند. دوم اینکه این الیاف در اندازه‌های کوتاه و بلند هیبرید شده بودند. هیبرید کردن الیاف به لحاظ ابعاد و جنس و نوع، سبب هم افزایی

۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد، سبب افزایش ۱۵/۱، ۲۳/۲ و ۱۹/۱ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شد. استفاده از الیاف چهارگانه به میزان ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد، سبب افزایش ۲۵/۵، ۳۷/۲ و ۳۶ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شد. اضافه کردن الیاف سبب بهبود مقاومت کششی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری نسبت به نمونه شاهد شد. با افزایش میزان الیاف از ۰/۱۵ به ۰/۲ درصد، هر ۲ نوع الیاف بهترین عملکرد را در بهبود مقاومت کششی نشان دادند در نتیجه ۰/۲ درصد، به عنوان درصد بهینه الیاف، در بهبود مقاومت کششی سنجش شد. با افزایش بیشتر میزان الیاف به ۰/۲۵ درصد، مقاومت کششی نسبت به درصد بهینه، اندکی کاهش یافت.

شکل ۵. مقاومت کششی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد

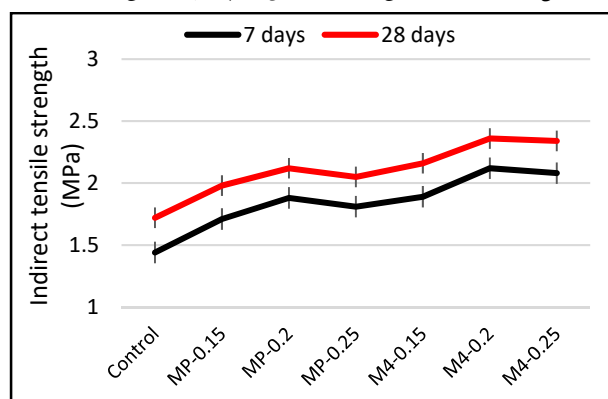


Fig. 5. Indirect tensile strength of fiber reinforced geopolymer concrete and control samples

شکل ۶. مقاومت خمشی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد

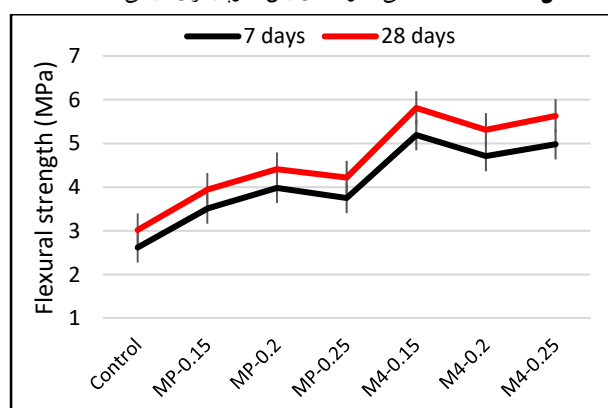


Fig. 6. Flexural strength of fiber reinforced geopolymer concrete and control samples

در رابطه با مقاومت خمشی نیز همان طور که شکل ۶ نشان می‌دهد، مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه نمونه شاهد ۲/۶۲ و ۳/۰۲ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. افزودن الیاف پلی پروپیلن به میزان

اثر الیاف می‌شود. اثر مثبت الیاف هیبریدی در محدود کردن ترک‌ها را می‌توان با ۲ مکانیسم بررسی کرد. ۱- الیاف کوتاه در کنترل کردن و پل زدن روی میکرو ترک‌ها بسیار موثر عمل می‌کنند زیرا در میزان مشابه مصرف الیاف، تعداد الیاف کوتاه در بتن به دلیل اندازه کوچک این الیاف، بیشتر است. اما هنگامی که میکرو ترک‌ها با یکدیگر ادغام شده و ترک‌های بزرگتری را تشکیل دهند، الیاف کوتاه به دلیل طول کم، اثرگذاری کمتری دارند. ۲- الیاف بلند بیشتر در کنترل کردن و پیشگیری از ماکرو ترک‌ها موثرند. همچنین الیاف بلند می‌توانند به عنوان مانع برای جلوگیری از چرخش الیاف کوتاه، استفاده شوند. بنابراین الیاف کوتاه با ترکیب شدن با الیاف بلند، می‌توانند عملکرد بهتری نشان دهند. در نتیجه ترکیب الیاف کوتاه و بلند سبب توقف روند ترک خوردن و مقاومت بیشتر در برابر بارگذاری، می‌شود [53,31].

۲-۳- تاثیر الیاف بر مقاومت حرارتی بتن ژئوپلیمری

نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و نمونه شاهد بعد از قرارگیری در دماهای بالا، در شکل ۷ ارائه و درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که نمونه شاهد (فاقد الیاف) در شرایط نرمال و عدم مواجهه با دمای بالا، مقاومت فشاری ۲۵/۶ مگاپاسکال را ارائه داد. با افزایش دما به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری این نمونه افزایش یافته و به ۲۹/۱ مگاپاسکال رسید. با افزایش بیشتر دما از ۲۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری این نمونه کاهش یافته و به ۲۲/۴ مگاپاسکال رسید. در واقع در این نمونه با مواجهه با دماهای بالا تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، به جای کاهش مقاومت فشاری، افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۳/۶ و ۶/۶ درصد، نسبت به نمونه شاهدش (که در دمای محیط است) مشاهده شد. این موضوع عموماً در ژئوپلیمرها دیده می‌شود که با افزایش دما تا ۲۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد، دیده می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل حل شدن و بسپارش (Polycondensation) آلومیناسیلیکات‌هایی باشد که تا کنون واکنش نداده‌اند که نتیجه آن ساختار متراکم‌تر و مقاومت فشاری بالاتر در این دما است [55,54]. در ادامه با

افزایش دما تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، اندکی کاهش مقاومت نسبت به نمونه شاهد دیده شد (۲ درصد). این موضوع نیز در اکثر موارد در ژئوپلیمرها دیده می‌شود. در واقع ژئوپلیمرها تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل توانایی حفظ ساختار مولکولی، پایدار هستند [54]. با افزایش دما تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری کاهش بیشتری می‌یابد به طوری که در این دما، مقاومت فشاری نمونه تقریباً ۱۳ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. این موضوع می‌تواند به شکل‌گیری و انتشار ترک‌ها به دلیل تفاوت در رفتار حرارتی سنگدانه‌ها و سیمان ژئوپلیمری در ناحیه تماس، که نتیجه آن کاهش مقاومت فشاری است، مربوط باشد [56]. در نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، بر خلاف نمونه بتن ژئوپلیمری فاقد الیاف، کاهش نسبی مقاومت فشاری دیده شد به طوری که این نمونه‌ها تقریباً ۸-۹ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه شاهد خود (که در دمای محیط قرار داشت) داشتند. دلیل این موضوع می‌تواند مربوط به الیاف مصرفی باشد. دمای ذوب الیاف پلیمری استفاده شده ۱۶۰-۱۷۰ درجه سانتی‌گراد است لذا با افزایش دما به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، بخش عمده‌ای از این الیاف ذوب شده و به بیرون نمونه هدایت می‌شوند. این موضوع باعث ایجاد میکرو کانال‌هایی در بتن می‌شود. در نتیجه به دلیل تخلخل اضافی به وجود آمده، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد [57]. با افزایش دما تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، روند خروج الیاف ادامه می‌یابد اما نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی تقریباً پایدار هستند. در ۶۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد روند کاهش مقاومت فشاری، اندکی افزایش می‌یابد و در حالت نهایی، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی تقریباً ۱۶-۱۷ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. در مقایسه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و فاقد الیاف می‌توان گفت اگرچه در دماهای پایین‌تر نمونه فاقد الیاف عملکرد مناسب‌تری داشت اما در نهایت و در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش مقاومت فشاری به هم نزدیک بوده و تفاوت محسوسی دیده نشد (۳ درصد اختلاف).

شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و نمونه شاهد بعد از مواجهه با دماهای بالا

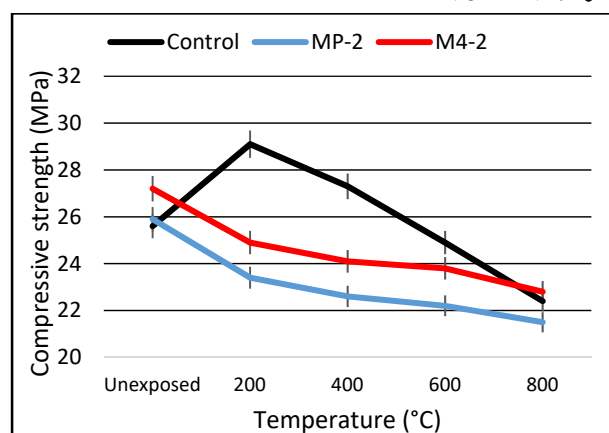


Fig. 7. Compressive strength of fiber reinforced geopolymer concrete and control samples after exposing high temperature

جدول ۶- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و نمونه شاهد بعد از مواجهه با دماهای بالا

	Compressive strength alteration (%)			
	200°C	400°C	600°C	800°C
Control	+13.67	+6.64	-2.73	-12.5
MP-2	-9.61	-12.73	-14.56	-17.1
M4-2	-8.26	-11.15	-12.39	-16.11

Table 6. Relative compressive strength of fiber reinforced geopolymer concrete and control samples after exposure to high temperatures

میزان کاهش وزن نمونه‌ها نیز در جدول ۷ ارائه شده است. در نمونه بتن ژئوپلیمری فاقد الیاف با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، تقریباً هیچ کاهش وزنی سنجش نشد (کمتر از درصد). با افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱/۳۲ درصد کاهش وزن در نمونه دیده شد. در واقع همان طور که در آزمون مقاومت فشاری نیز دیده شد، این نمونه تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً پایدار بود و شکستی در سیمان ژئوپلیمری رخ نداد در نتیجه کاهش وزن قابل توجهی نیز در این نمونه مشاهده نشد. در ادامه با افزایش دما تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان کاهش وزن بیشتر شده و تقریباً به ۹ درصد رسید. در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین کاهش وزن به میزان ۱۴/۴۶ درصد در نمونه دیده شد. دلیل این موضوع رشد ترک‌ها و کنده شدن‌های لایه‌ای و تکه‌ای بتن بود. در نمونه‌های الیافی با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش وزن به میزان تقریباً ۳ درصد در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (بر خلاف نمونه فاقد الیاف). این موضوع به دلیل ذوب الیاف مصرفی که در بخش کاهش مقاومت فشاری توضیح

داده شد، است. در ادامه با افزایش دما و در دمای بین ۲۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نمونه‌های الیافی تقریباً رشد محسوسی در روند کاهش وزن نداشتند. در حالت نهایی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های الیافی تقریباً ۹-۱۰ درصد کاهش وزن نسبت به نمونه شاهد داشتند. در واقع کاهش وزن در دماهای بین ۲۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، در نمونه‌های الیافی کمتر از نمونه فاقد الیاف بود. دلیل این موضوع می‌تواند به ذوب شدن الیاف مربوط باشد. همان طور که گفته شد با ذوب شدن الیاف میکرو کانال‌هایی در بتن بوجود می‌آید. ایجاد این میکرو کانال‌ها سبب کاهش فشار داخلی بتن شد. در نتیجه کنده شدن‌های لایه‌ای و تکه‌ای در این نمونه‌ها، نسبت به نمونه فاقد الیاف بسیار کمتر بود [57] و کاهش وزن کمتری در این نمونه‌ها نسبت به نمونه فاقد الیاف مشاهده شد. نتایج نشان داد الیاف چهارگانه در مقایسه با پلی پروپیلن، در این بخش نیز عملکرد بهتری داشتند ولی با توجه به نتایج به دست آمده از این بخش می‌توان گفت الیاف پلیمری مورد استفاده در این تحقیق، تاثیری محسوسی بر مقاومت بتن ژئوپلیمری در برابر دماهای زیاد نداشتند.

جدول ۷- کاهش وزن نمونه‌های بتن ژئوپلیمری الیافی و نمونه شاهد بعد از مواجهه با دماهای بالا

	Weight loss (%)			
	200°C	400°C	600°C	800°C
Control	0	-1.32	-8.61	-14.46
MP-2	-3.45	-3.94	-5.57	-10.05
M4-2	-3.12	-3.43	-5.35	-9.84

Table 7. Weight loss of fiber reinforced geopolymer concrete and control samples after exposure to high temperatures

۴- نتیجه‌گیری

۱- استفاده از الیاف پلی پروپیلن و هیبریدی چهارگانه، سبب کاهش وزن مخصوص و کاهش جذب آب نمونه بتن ژئوپلیمری به دلیل پراکنش تصادفی الیاف، بهبود میکروساختار و تراکم بیشتر ماتریس سیمان ژئوپلیمری، نسبت به نمونه فاقد الیاف شد. ۲- استفاده از الیاف پلی پروپیلن و هیبریدی چهارگانه، سبب افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری به دلیل مسلح کردن ماتریس سیمان و تقویت ناحیه تماس، شد. این افزایش مقاومت به دلیل مدول و مقاومت نسبتاً پایین الیاف در مقایسه با مثلاً الیاف فولادی، قابل توجه نبود به طوری که الیاف پلی پروپیلن و

فشاری می‌توان گفت که الیاف مصرفی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت بتن ژئوپلیمری در برابر دماهای زیاد ندارند.

۵- منابع

- [1] Phummiphan I., Horpibulsuk S., Rachan R., Arulrajah A., Shen S. L. & Chindaprasirt P. 2018 High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. *Journal of Hazardous Materials*, **341**, 257-267.
- [2] McCaffrey R. 2002 Climate Change and the Cement Industry. *Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)*, 15-9.
- [3] Andrejkovičová S., Sudagar A., Rocha J., Patinha C., Hajjaji W. & da Silva E. F. 2016 The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers. *Applied Clay Science*, **126**, 141-152.
- [4] Neupane K., Chalmers D. & Kidd P. 2018 High Strength Geopolymer Concrete Properties, Advantages and Challenges. *Advances in Materials*, **7**(2), 15-25.
- [5] Assi L. N, Eddie Deaver E. & Ziehl P. 2018 Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **167**, 372-380.
- [6] Davidovits J. 1993 Geopolymer cements to minimise carbon-dioxide greenhouse-warming. *Ceramic Transactions*, **37**, 165-182.
- [7] Meyer C. 2009 The greening of the concrete industry. *Cement & Concrete Composites*, **31**(8), 601-605.
- [8] Chen C., Habert G., Bouzidi Y. & Jullien A. 2010 Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production*, **18**, 478-485.
- [9] Bashir I., Kapoor K. & Sood H. 2017 An Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, **6**(3), 33-36.
- [10] Ekinici E., Türkmen İ., Kantarci F. & Karakoç M. B. 2019 The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-

هیبریدی چهارگانه در درصد بهینه (۰/۲) سبب افزایش ۱/۲ و ۶/۱ درصدی این مقاومت نسبت به نمونه فاقد الیاف شد. همچنین نتایج نشان داد استفاده از الیاف هیبریدی به دلیل هم افزایی اثر الیاف، سبب افزایش قابل ملاحظه اثر الیاف در بهبود مقاومت فشاری شده است. در مقایسه عملکرد الیاف نیز الیاف هیبریدی چهارگانه عملکرد بهتری در این بخش داشتند.

۳- استفاده از الیاف پلی پروپیلن و هیبریدی چهارگانه، به دلیل نقش الیاف در پل زدن روی دو طرف ترک‌ها و جلوگیری از انتشار ترک‌ها، سبب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری شد. الیاف پلی پروپیلن در درصد بهینه (۰/۲) سبب افزایش ۲۳/۲ درصدی مقاومت کششی و ۴۶ درصدی مقاومت خمشی شد. استفاده از الیاف هیبریدی چهارگانه سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت کششی و خمشی نمونه‌ها، هم نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن و هم نمونه‌های فاقد الیاف شد. این موضوع می‌تواند مربوط به متشکل بودن الیاف هیبریدی از الیاف کوتاه و بلند که و در نتیجه کنترل ترک‌ها در هر دو فاز میکرو و ماکرو و همچنین مقاومت کششی بیشتر این الیاف نسبت به الیاف پلی پروپیلن، باشد. استفاده از الیاف چهار گانه در درصد بهینه (۰/۲) برای مقاومت کششی و ۰/۱۵ برای مقاومت خمشی) سبب افزایش ۳۷/۲ درصدی مقاومت کششی و ۹۲/۳ درصدی مقاومت خمشی بتن ژئوپلیمری نسبت به نمونه فاقد الیاف شد. ۴- بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکاؤلن مقاومت حرارتی مناسبی در مواجهه با دماهای زیاد (تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) نشان داد. استفاده از الیاف پلی پروپیلن و هیبریدی چهارگانه در ترکیب بتن ژئوپلیمری، به دلیل پایین بودن دمای ذوب این الیاف (۱۶۰-۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) و خروج این الیاف از نمونه بعد از مواجهه با دمای بالا، سبب ایجاد میکرو کانال‌ها و ایجاد تخلخل در نمونه‌ها و در نتیجه آن کاهش نسبی مقاومت فشاری این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه فاقد الیاف شد. اما از سوی دیگر، ایجاد همین میکرو کانال‌ها در نمونه‌های الیافی، سبب کاهش فشار داخلی بتن و جلوگیری از کنده شدن‌های لایه‌ای و در نتیجه آن کاهش وزن کمتر نمونه‌های الیافی، نسبت به نمونه فاقد الیاف شد. با جمع‌بندی نتایج بدست آمده از مطالعه کاهش وزن و مقاومت

- stabilizer. *Construction and Building Materials*, **47**, 1468-1478.
- [21] Wallah S. E. Creep Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Civil Engineering Dimension*, **12**(2), 73-78.
- [22] DeSilva P., Sagoe-Crenstil K. & Sirivivatnanon V. 2007 Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*, **37**(4), 512-518.
- [23] Gao K., Lin K-L., Wang D., Hwang C-L., Anh Tuan B. L. & Shiu H-S. 2013 Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, **48**, 441-447.
- [24] Görhan G. & Kürklü G. 2014 The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites Part B: Engineering*, **58**, 371-377.
- [25] Hardjito D., Wallah S. E., Sumajouw D. M. J. & Rangan B. V. 2004 On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, **101**(6), 467-472.
- [26] Moradikhou A. B. Esparham A. & Jamshidi Avanaki M. 2019 Effect of Hybrid Fibers on Water absorption and Compressive, Tensile and Flexural Strengths of Geopolymer Concrete based on Blast Furnace Slag. *Journal of Civil Engineering and Material Application*, **4**(3), 193-231.
- [27] ACI Committee 544, Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 1996.
- [28] Soroushian P. 1986 Secondary reinforcement adding cellulose fibers. *ACI Concrete International*, 28-38.
- [29] Celik A., Yilmaz K., Canpolat O., Al-mashhadani M. M., Aygörmez Y. & Uysal M. 2018 High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, **187**, 1190-1203.
- [30] Al-Majidi M. H., Lampropoulos A. & Cundy A. B. 2017 Steel fibre reinforced geopolymer concrete with improved microstructure and enhanced fibre-matrix interfacial properties. *Construction and Building Materials*, **139**, 286-307.
- [31] Gao X., Yu Q. L., Yu R. & Brouwers H. J. H. 2017 Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction and Building Materials*, **201**, 257-267.
- [11] Karakoç M. B., Türkmen İ., Maras M. M., Kantarci F., Demirbog̃a R. & Uğur Toprak M. 2014 Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. *Construction and Building Materials*, **72**(Supplement C), 283-292.
- [12] Yaseri S., Hajiaghahi G., Mohammadi F., Mahdikhani M. & Farokhzad R. 2017 The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste. *Construction and Building Materials*. **157**(Supplement C), 534-545.
- [13] Karthik A., Sudalaimani K. & Vijaya Kumar C. T. 2017 Investigation on mechanical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self-curing bio-geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **157**(Supplement C), 338-349.
- [14] Bagheri A. & Nazari A. 2014 Compressive strength of high strength class C flyash-based geopolymers with reactive granulated blast furnace slag aggregates designed by Taguchi method. *Materials & Design*, **54**, 483-490.
- [15] Cheng T. W. & Chiu J. P. 2003 Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, **16**(3), 205-210.
- [16] Moradikhou A. B. Esparham A. & Jamshidi Avanaki M. 2020 Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **251**, 118965.
- [17] Sarker P. K., Kelly S. & Yao Z. 2014 Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials & Design*, **63**, 584-592.
- [18] Lee W. K. W. & van Deventer J. S. J. 2002 The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **211**(2), 115-126.
- [19] Palomo A., Blanco-Varela M. T., Granizo M. L., Puertas F., Vazquez T. & Grutzeck M. W. 1999 Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*, **29**(7), 997-1004.
- [20] Zhang M., Guo H., El-Korchi T., Zhang G. & Tao M. 2013 Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil

- of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.
- [44] ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [45] Ganesan N., Abraham R. & Deepa Raj S. 2015 Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **93**, 471-476.
- [46] Noushini A., Hastings M., Castel A. & Aslani F. 2018 Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, **186**, 454-475.
- [47] Zhang H., Wang L., Zheng K., Bakura T. J. & Totakhil P. G. 2018 Research on compressive impact dynamic behavior and constitutive model of polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, **187**, 584-595.
- [48] Sukontasukkul P., Pongsopha P., Chindaprasirt P. & Songpiriyakij S. 2018 Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer. *Construction and Building Materials*, **161**, 37-44.
- [49] Zhang Z-h., Yao X., Zhu H-j., Hua S-d. & Chen Y. 2009 Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer. *Journal of Central South University of Technology*, **16**(1), 49-52.
- [50] Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A. & van Deventer J. S. J. 2007 Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, **42**(9), 2917-2933.
- [51] Hua-jun Z., Xiao Y. & Zu-hua Z. 2007 Optimum activated temperature of kaolin. *JOURNAL OF CENTRAL SOUTH UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*, **14**, 131-134.
- [52] Yunsheng Z., Wei S. & Zongjin L. 2006 Impact behavior and microstructural characteristics of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer boards prepared by extrusion technique. *Journal of Materials Science*, **41**(10), 2787-2794.
- [53] Grünewald S. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete: Delft University Press; 2004.
- composites. *Materials and Structures*, **50**(2), 165-173.
- [32] Asrani N. P., Murali G., Parthiban K., Surya K., Prakash A. & Rathika K. 2019 A feasibility of enhancing the impact resistance of hybrid fibrous geopolymer composites: Experiments and modelling. *Construction and Building Materials*, **203**, 56-68.
- [33] Alberti M. G., Enfedaque A., Gálvez J. C., Cánovas M. F. & Osorio I. R. 2014 Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions. *Materials & Design*, **60**, 57-65.
- [34] Han T. Y., Lin W. T., Cheng A., Huang R. & Huang C. C. 2012 Influence of polyolefin fibers on the engineering properties of cement-based composites containing silica fume. *Materials & Design*, **37**, 569-576.
- [35] Deng Z., Shi F., Yin S. & Tuladhar R. 2016 Characterisation of macro polyolefin fibre reinforcement in concrete through round determinate panel test. *Construction and Building Materials*, **121**, 229-235.
- [36] ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [37] ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [38] ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [39] ASTM D2419-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [40] British Standards Institution, Testing Concrete: Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cubes, BS1881: Part116: 1983, London.
- [41] ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [42] ASTM C293 / C293M-16, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [43] ASTM C1018-97, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength

- [56] Kong D. L. Y., Sanjayan J. G. & Sagoe-Crentsil K. 2007 Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, **37**(12), 1583-1589.
- [57] Uysal M. 2012 Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures. *Construction and Building Materials*, **26**(1), 701-706.
- [54] Fang C., Xie J., Zhang B., Yuan B. & Wang C. 2018 Impact properties of geopolymeric concrete: a state-of-the-art review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. **284**, 012012.
- [55] Su H., Xu J. & Ren W. 2016 Mechanical properties of geopolymer concrete exposed to dynamic compression under elevated temperatures. *Ceramics International*, **42**(3), 3888-3898.

Effect of Simple and Hybrid Polymer Fibers on Mechanical Strengths and High-temperature Resistance of Metakaolin-based Geopolymer Concrete

Amir Bahador Mordikhou^{*1}, Mir Hamid Hosseini², Azam Mousavi Kashi³, Fereshteh Emami², Alireza Esparham¹

1-MSc. Student of civil, structural, and geotechnics engineering department, Islamic Azad University, Science and Research branch, Tehran, Iran

2-Assistant professor of civil, structural, and geotechnics engineering department, Islamic Azad University, Science and Research branch, Tehran, Iran

3-Assistant professor of materials engineering department, Islamic Azad University, Science and Research branch, Tehran, Iran

* amirbahador.mk@gmail.com

Abstract

Concrete due to its special feature, is the most widely consumed material in the world, after water. But the production process of ordinary Portland cement as a main component of conventional concrete, has major disadvantages such as high amount of CO₂ emission and high energy consumption. Therefore, it seems necessary to find an alternative to ordinary Portland cement. In recent years, geopolymer has been introduced as a novel green cementing agent and environment-friendly alternative to the Portland cement which can eliminate the extensive negative of ordinary Portland cement production process. According to the needed engineering characteristics perspective in civil engineering, the geopolymer concretes have better chemical and mechanical properties than the ordinary ones such as high compressive, flexural and tensile strength, rapid hardening, resistance against high heat and firing, low penetration, resistance against salts and acids attacks, and low creep. On the other hand, in terms of technical characteristics, concrete has some disadvantages, most notably low tensile strength and consequently low ductility. Therefore, the use of different fibers in the concrete mixture and the manufacture of fiber reinforced concrete is considered as an appropriate solution to eliminate these defects. Also, fiber reinforced geopolymer concrete is known as a novel type of concretes with higher ductility than ordinary concretes. In this experimental study, two types of polymer fibers, including simple polypropylene fibers and 4-element polyolefin hybrid fibers, were used to manufacture fiber reinforced geopolymer concrete specimens. In this regard, fiber reinforced and non-fiber geopolymer concrete specimens were made and cured in 80 °C for 24 hours. After curing, specimens were placed in the ambient condition and associated tests including: density, 3-days water absorption, 7-and 28-days compressive, Brazilian indirect tensile and three point flexural strengths, were performed to study effect of fibers on metakaolin-based geopolymer concrete mechanical properties. Also, to study effect of fibers on high-temperature resistance of metakaolin-based geopolymer concrete, specimens weight and compressive strength loss percentage after exposure to high temperatures up to 800 °C, were measured. The obtained results indicated that using fibers in geopolymer concrete mixture, result in increasing compressive, indirect tensile and flexural strengths and also decreasing in density and 3-days water absorption. Further, the use of hybrid fibers due to their ability to inhibit the cracking process from both micro and macro levels, significantly improved compressive, indirect tensile and flexural strengths compared to simple fibers. The optimum amount of 4-element polyolefin fibers for compressive, tensile and flexural strength improvement was measured 0.2%, 0.2% and 0.15% (by volume), respectively. Also, the optimum amount of polypropylene fibers for compressive, tensile and flexural strengths improvement was measured 0.2% (by volume). In term of high-temperature resistance, although the polymer fibers reduced the risk of the explosive sapling of geopolymer concrete specimens due to generation micro channels which were randomly distributed in concrete because of melting of fibers, resulting in less weight loss than non-fiber specimen, but on the other hand, the compressive strength loss of polymer fiber reinforced specimens were higher than non-fiber one. Overall, it can be concluded that these fibers did not have a significant effect on the high-temperature resistance of geopolymer concrete.

Keyword: fiber reinforced geopolymer concrete, hybrid fibers, polyolefin fibers, compressive strength, tensile strength, flexural strength, high-temperature resistance.