

The effect of polypropylene fibers on the compressive strength of metakaolin-based geopolymer

*Hamidreza Ahmadi¹, Morteza mahmoodan¹, danial shiraly²

1- Department of Materials Engineering, Islamic Azad University, Saveh branch, Saveh, Iran

2- Materials Science Engineering Faculty, Islamic Azad University, Saveh Branch, Saveh, Iran

Citation: Ahmadi H, Mahmoodan M, Shiraly D. The effect of polypropylene fibers on the compressive strength of metakaolin-based geopolymer, Metallurgical Engineering, 2024; 27(2): 89-100 <https://doi.org/10.22076/me.2024.2007974.1383>

 <https://doi.org/10.22076/me.2024.2007974.1383>

ABSTRACT

In this research, the compressive strength caused by the effect of polypropylene fibers on metakaolin-based geopolymer cement was investigated. Phase identification and morphology of phases in this research was done by XRD diffraction pattern test and field electron microscope FE-SEM. Also, DTA-TG and FTIR tests were performed to investigate the thermal behavior and types of bonds formed. The results showed that the strength increased with the increase in the storage time of the samples from 7 to 28 days. Also, the addition of polypropylene fibers increased the compressive strength compared to the sample without fibers; By adding 3% of 4 and 8 mm fibers, the compressive strength of 28 days improved by 46%. The XRD results showed that the main phases remaining after the geopolymerization process in all samples are quartz and pyrophyllite minerals. FTIR results showed that in Geopolymeric samples peak 1030.63 cm^{-1} has shifted to higher frequencies $1422.97\text{-}1528.71\text{ cm}^{-1}$ which indicates the progress of the geopolymerization process. SEM images showed that the pull-out mechanism is more dominant than other mechanisms. The results show that 3% volume of fibers has created the highest compressive strength.

Keywords: geopolymerization, compressive strength, polypropylene fibers, geopolymer samples.

Received: August 1, 2023

Accepted: June 12, 2024

■ ■
***Corresponding Author:**

Hamidreza Ahmadi, PhD

Address: Department of Materials Engineering, Islamic Azad University, Saveh branch, Saveh, Iran.

Tel: +98 (9125077945)

E-mail: ahmadi.hamidreza@gmail.com

اثر الیاف پلی پروپیلن بر استحکام فشاری ژئوپلیمر پایه متاکائولن

*حمیدرضا احمدی^۱، مرتضی محمودان^۱، دانیال شبرالی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران

۲- دانشجوی فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران

چکیده

در این پژوهش، استحکام فشاری ناشی از اثر الیاف پلی پروپیلن بر سیمان ژئوپلیمر پایه متاکائولن مورد بررسی قرار گرفت. شناسایی فازی و مورفولوژی فازها در این تحقیق توسط آزمون الگوی پراش اشعه ایکس XRD و میکروسکوپ الکترونی میدانی FE-SEM، صورت گرفت. همچنین از آزمونهای DTA-TG و FTIR جهت بررسی رفتار حرارتی و انواع پیوندهای تشکیل شده انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش مدت زمان نگهداری نمونه ها از ۷ تا ۲۸ روز، استحکام افزایش یافت. همچنین افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش استحکام فشاری نسبت به نمونه بدون الیاف شد؛ بطوریکه با افزودن ۳٪ الیاف ۴ و ۸ میلی متری استحکام فشاری ۲۸ روز، ۴۶٪ بهبود یافت. نتایج XRD نشان داد که فازهای اصلی باقی مانده پس از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون در تمامی نمونه ها، مینرال های کوارتز و پیروفیلیت، تشکیل می دهند. نتایج FTIR نشان دادند که در نمونه های ژئوپلیمری پیک $1030/63 \text{ cm}^{-1}$ به طرف فرکانس های بالاتر یعنی $1422/97 \text{ cm}^{-1}$ - $1528/71$ تغییر مکان داده است که نشان دهنده پیشرفت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون است. تصاویر SEM نشان داد که مکانیزم بیرون زدن نسبت به دیگر سازو و کارها غالب تر است. نتایج حاصل بیانگر این موضوع است که استفاده از ۳٪ حجمی الیاف، بالاترین استحکام فشاری را ایجاد کرده است.

واژه های کلیدی: ژئوپلیمریزاسیون، استحکام فشاری، الیاف پلی پروپیلن، نمونه های ژئوپلیمری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰ | پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳

۱. مقدمه

ژئوپلیمرها^۱ گروهی از پلیمرهای معدنی هستند که عمدتاً ریز ساختاری آمورف یا نیمه بلورین در مقیاس نانو داشته و معمولاً در دمای محیط یا دماهای حداکثر ۱۲۰ درجه سانتی گراد از طریق پلیمریزاسیون^۲ مونومرهای آلومینو سیلیکاتی در محلول های قلیایی تولید می شوند [۱]. منابع آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده در سنتز ژئوپلیمرها شامل کائولین^۳، متاکائولین^۴، خاکستر بادی^۵، سرباره های متالورژیکی و کانی های آلومینوسیلیکاتی می باشند. به طور معمول، سیلیکات سدیم و یا پتاسیم به عنوان محلول های فعال کننده به تنهایی یا همراه با هیدروکسید سدیم یا پتاسیم در این ترکیبات مورد استفاده قرار می گیرند [۲، ۱]. مزیت ژئوپلیمرها نسبت به پلیمرهای آلی، مقاومت بالاتر در برابر حرارت و آتش است. بنابراین می توان از ژئوپلیمرها به عنوان جایگزین پلیمرهای آلی در مواردی که نیاز

به مقاومت بالا در برابر آتش و حرارت باشد استفاده کرد. مزیت ژئوپلیمرها نسبت به سیمان های معدنی، افزایش استحکام در مدت زمان کمتر و استحکام فشاری بالاتر و نیز مقاومت به خوردگی بیشتر است. در حقیقت ژئوپلیمرها یک جایگزین ارزان قیمت، برای انواع سیمان و برخی از انواع پلاستیک ها هستند زیرا مواد مورد استفاده برای تولید آن ها نسبت به سیمان های مرسوم و پلیمرهای آلی، ارزان تر بوده و به وفور یافت می شوند. همچنین محدوده دمایی تولید آن ها به مراتب پایین تر از سیمان های مرسوم و پلاستیک ها است. به علاوه، به دلیل پایین بودن دمای تولید ژئوپلیمرها، از نشر آلاینده هایی نظیر ناشی از کوره های پخت سیمان و تولید آلاینده های ناشی از سوختن پلاستیک ها جلوگیری می شود [۲]. سیمان های ژئوپلیمری کاربردهای گوناگونی داشته و توانایی جایگزینی با سیمان پورتلند را دارند. ژئوپلیمرها می توانند مشابه سیمان پورتلند، برای بهبود خواص مکانیکی با سنگ دانه های ریز و

- 1- Geopolymer
- 2- Polymerization
- 3- Kaolin
- 4- MetaKaolin
- 5- Fly Ash

* نویسنده مسئول:

دکتر حمیدرضا احمدی

نشانی: گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران

تلفن: (۰۹۱۲۵۰۷۷۹۴۵) +۹۸

پست الکترونیکی: ahmadi.hamidreza@gmail.com

کانال‌هایی را در بتن ایجاد می‌کنند. بدین ترتیب مایعات و بخار آب امکان خروج از داخل بتن را پیدا می‌کنند و فشار داخلی کاهش می‌یابد. هر چه نسبت آب به سیمان کمتر باشد بتن کارآمدتر است. این نسبت را می‌توان با استفاده از روان کننده‌های مناسب به حداقل رساند. اسلامپ پارامتر مهمی برای تخمین کارآمدی بتن می‌باشد. با استفاده از الیاف پلی پروپیلن مقادیر اسلامپ را می‌توان کاهش داد [۶].

یکی از روش‌های مفید و اقتصادی برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی و کنترل ترک‌های سطحی، استفاده از الیاف پلی پروپیلن در بتن است. بررسی‌های فنی، نشان دهنده فعالیت‌های متنوع در زمینه کاربرد الیاف پلی پروپیلن در بتن و شاتکریت می‌باشد. از جمله کارهای صورت گرفته در زمینه کاربرد الیاف مذکور در شاتکریت، نشان دهنده آن است که میزان اتلاف (ریزش) شاتکریت حاوی الیاف، ناشی از پاشیدن آن روی مش، به میزان حداقل ۳۰ درصد حجمی کاهش یافته است. همچنین مطالعه روی کنترل ترک‌های سطحی نیز نشان دهنده آن است که ترک‌ها به میزان ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده‌اند. در خصوص رفتار بتن حاوی الیاف به عنوان پوشش تونل‌ها، نتایج نشان دهنده آن است که مقاومت کششی این بتن در شرایط استفاده از الیاف پلی پروپیلن، ۲۳ درصد افزایش و جذب آب آن به میزان ۱۰ درصد تقلیل یافته است [۹-۷].

در تحقیقی دیگر، به بررسی تأثیر استفاده از الیاف مختلف از جمله الیاف پلی پروپیلن در کنترل ترک بتن پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که پس از به کارگیری این نوع الیاف، شکست و ترک خوردگی به ۰/۱ درصد کاهش پیدا کرده است. در تحقیق دیگری به این نکته پی بردند که در نمونه مکعبی بتن حاوی پلی پروپیلن تا ۲۸ روز، استحکام کششی کاهش پیدا میکند اما از آن به بعد مقاومت کششی روندی افزایشی از خود نشان می‌دهد. با توجه به تصویر برداری الکترونی صورت گرفته در تحقیق یاد شده مشخص شد که علت این موضوع به پر شدن ریز ترک‌ها به وسیله الیاف پلی پروپیلن مرتبط بوده و این عمل موجب افزایش پیوستگی ساختار بتن شده است. بررسی تأثیر این الیاف بر رفتار ملات جهت سبک‌سازی دیوارهای پیش ساخته نیز مورد بررسی محققین قرار گرفته است [۱۲-۱۰]. در پژوهشی دیگر با استفاده از الیاف پلی پروپیلن در بتن، رشد ترک‌ها پس از شکست، کنترل شده و به ۰/۲ درصد رسیده و از سوی دیگر عرض ترک‌ها به میزان ۱۵ درصد کم می‌شود. همچنین نشان داده شده است که با استفاده از رشته‌های پلی پروپیلن خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری بهبود قابل توجهی می‌یابد [۱۲، ۱۳]. مطالعات نشان داد که هر چند نقش الیاف پلی پروپیلن بر خواص مکانیکی سیمان ژئوپلیمری پایه متاکائولن مورد بررسی قرار گرفته است ولی همچنان تحقیقات زیادی بر خواص ریزساختاری آن، صورت نگرفته است؛ که در این پژوهش به بررسی دقیق‌تر نقش الیاف پلی پروپیلن بر خواص ریزساختاری سیمان ژئوپلیمری پایه متاکائولن نیز پرداخته خواهد شد.

۲. مواد و روش تحقیق

هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن بر ریزساختار و مقاومت فشاری سیمان‌های ژئوپلیمری پایه متاکائولنی و یافتن درصد بهینه الیاف پلی پروپیلن می‌باشد. مواد اولیه مصرفی در این پژوهش عبارتند از: کائولن KCC فرآوری شده خراسان، سود پرک، محلول سیلیکات سدیم و الیاف پلی پروپیلن که در ادامه مشخصات هر یک ارائه شده است. در این تحقیق برای تامین منبع آلومینوسیلیکاتی از کائولن خراسان با کد KCC استفاده گردید. ترکیبات شیمیایی این خاک در جدول ۱ آمده است.

درشت و دیگر مصالح مخلوط شده و به صورت ملات یا بتن به کار روند. این بتن در مقایسه با بتن سیمانی، استحکام کششی و فشاری بیشتر، سرعت سخت شونده‌گی بالاتر، تخلخل و نفوذ پذیری کمتر، مقاومت فوق‌العاده در برابر حریق و خوردگی شیمیایی دارد. ژئوپلیمر، فرآورده‌های ضایعاتی از جمله باطله‌های معدن‌کاری را به محصول مفید تبدیل می‌کند. این گونه بتن‌ها جهت کاهش مصرف سیمان و کاهش آلودگی محیط زیست در سازه‌ها بکار می‌روند. میزان دی اکسید کربن تولید شده در فرایند ژئوپلیمری، ۸۰٪ کمتر از فرایند تولید سیمان پورتلند است. فرایند تولید سیمان ژئوپلیمری، شامل یک مرحله فعال‌سازی حرارتی و سپس فعال سازی قلیایی می‌باشد. مصالح اولیه آن در تمام جهان وجود دارد، به طوری که هر منبع آلومینا سیلیکاتی که قابلیت انحلال در محیط‌های شدید قلیایی را داشته باشد، می‌تواند به عنوان منبع تهیه این سیمان‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۴، ۳].

بتن الیافی در حقیقت نوعی کامپوزیت است که با به کارگیری الیاف تقویت کننده داخل مخلوط بتن، مقاومت کششی و فشاری آن، فوق‌العاده افزایش می‌یابد. این ترکیب کامپوزیتی، یکپارچگی و پیوستگی مناسبی داشته و امکان استفاده از بتن به عنوان یک ماده شکل پذیر جهت تولید سطوح مقاوم پرانحنا را فراهم می‌آورد. بتن الیافی از قابلیت جذب انرژی بالایی نیز برخوردار است و تحت اثر بارهای ضربه‌ای به راحتی از هم پاشیده نمی‌شود. ضخامت نهایی بتن الیافی علاوه بر تحمل در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی ضریب اطمینان بسیار بالایی در اجرا ایجاد می‌کند. درسازه‌های زیرزمینی که در معرض آب و رطوبت و خوردگی بیشتر قرار دارند اهمیت بالاتری دارد. علاوه بر این موارد بتن‌های الیافی در برابر بارهای دینامیکی مانند زلزله، و ضربه به دلیل خصوصیات جذب انرژی مناسب، عملکرد بسیار مناسب تری از خودشان نشان می‌دهند [۴]. بکارگیری بتن غیر مسلح به علت تردی آن به غیر از سازه‌های وزنی عملاً کاربرد چندانی ندارد. این ایراد عمده بتن، در عمل با مسلح کردن آن بوسیله میلگردهای فولادی یا آرماتور برطرف می‌گردد. اما از آنجا که آرماتور منحصراً بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد تصور اینکه مقطع بتن یک مقطع ایزوتروپ و هموزن است چندان صحیح نخواهد بود. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپی و نیز کاهش ضعف شکنندگی و تردی جسم بتن تا حد ممکن در چند دهه اخیر از رشته‌های نازک و نسبتاً دراز که در تمام حجم بتن بطور همگن و درهم پراکنده می‌گردد استفاده می‌شود. الیاف شیشه، پلی پروپیلن، پلی وینیل، فولاد و بعضاً کربن در بتن و در ملات‌های سیمانی مورد استفاده است [۵، ۶].

الیاف پلی پروپیلن به عنوان افزودنی، جهت مسلح نمودن انواع بتن و مخلوط‌های سیمانی و گچی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصرف الیاف پلی پروپیلن، باعث افزایش مقاومت خمشی، کششی، برشی و سایشی در بتن الیافی می‌شود. الیاف پلی پروپیلن هنگام مخلوط شدن با بتن، باعث ته‌نشین شدن و افزایش وزن بتن نمی‌شود و محیط قلیایی بتن را از بین نمی‌برد. الیاف پلی پروپیلن با برش‌های طولی ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر، جهت مصارف بتن و با برش طولی ۶ میلی‌متری جهت ملات‌های گچی و نازک تولید می‌شوند. همچنین از الیاف پلی پروپیلن، بصورت بی‌رنگ و یا رنگی در پوشش‌های دیواری و رنگ‌های نیمه جامد، بعنوان تزئینات داخلی ساختمان استفاده می‌شود. این الیاف باعث کاهش شکنندگی و افزایش مقاومت در برابر حرارت خواهند شد. همچنین در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند و در نتیجه به هنگام آتش سوزی

جدول ۱: آنالیز شیمیایی کائولن KCC فرآوری شده خراسان

L.O.I	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Sr	Zr
۵/۷۵	۰/۲۲۵	۰/۲۷۱	۲۶/۳۵	۶۴/۰۵۱	۰/۱۱۷	۰/۴۰۳	۱/۶۵۱	۰/۲۸۵	۰/۳۸۷	۰/۴۲۴	۰/۳۰۱	۰/۰۲۵

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در این پژوهش

مشخصه	مقدار	واحد
نوع جنس	۱۰۰٪	PP
رنگ ظاهری	سفید	-
وزن مخصوص	۰/۹۱	g/cm ³
قطر	۲۵-۲۳	میکرون
مقاومت کششی	۴۰۰	Mpa
محدوده ذوب	۱۶۵	°C
مقاومت در برابر اسیدها و قلیاها	بالا	-
مقاومت در برابر نمک	بالا	-
طول الیاف	۴،۸۰۱۲	میلی متر
درصد ازدیاد طول	۸۰	درصد

برای بررسی فازی نمونه ها از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD)^۷ مدل PHILIPS-PW با تابش اشعه Cu-K_α و بررسی ریزساختار نمونه ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی (FESEM)^۸ مدل MIRA\\ (TESCAN) استفاده شدند. از طیف سنجی تبدیل فوریه (FTIR)^۹ مدل Germany, Burker, vertex برای بررسی پیوندها به کار برده شد. استحکام فشاری با توجه به استاندارد ASTM C 109-90 و با استفاده از جک ۲۰۰ تن آسیا صنعت مدل SGT ساخت کشور ایران اندازه گیری شد. دستگاه Germany STA 409 pc Nietzsche برای تعیین دمای مناسب کلسیناسیون خاک کائولن، با سرعت ۱۰ °C/min به کار گرفته شد.

۳. نتایج و بحث

دمای کلسیناسیون کائولن

برای تعیین دمای مناسب کلسیناسیون کائولن آنالیز حرارتی هم زمان (DTA-TG) با توجه به استاندارد مرجع DIN51006 و DIN51007 انجام شد. نتایج حاصل از آنالیز حرارتی هم زمان (DTA-TG) کائولن شکل ۱ آورده شده است.

با توجه به شکل ۱ دو پیک گرماگیر و گرمازا به ترتیب در دمای ۵۴۶/۷ °C و ۱۰۰۲/۴ °C مشاهده می شود. Brown و همکارانش بیان کردند در محدوده ۴۵۰ °C تا ۸۰۰ °C گروه های هیدروکسیل کانی های رسی و آب های بین لایه ای رس های دولایه و سه لایه خارج می شوند [۱۴، ۱۳]. در مینرال هالوئیزیت گروه هیدروکسیل نیز در محدوده دمایی تقریبی ۴۵۰ °C تا ۶۵۰ °C از ساختار بیرون می آید [۱۵]. در گسترده دمایی ۴۵۰ تا ۵۸۰ درجه سانتی گراد نیز خروج گروه های هیدروکسیل کائولنیت

کائولن KCC، پس از آسیاب، از الک مش ۲۰۰ عبور داده شد. برای تعیین دمای مناسب کلسیناسیون تحت آنالیز حرارتی هم زمان (DTA-TG) قرار گرفت.

به منظور فعال سازی منبع آلومینوسیلیکاتی، از محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم به ترتیب با نسبت ۲/۵ به ۱، استفاده شد. در این تحقیق از سود گرانوله خالص محصول شرکت امرتات ایران با خلوص ۹۸٪ استفاده و غلظت ۸ مولار آن تهیه شد. محلول سیلیکات سدیم از تولیدات کارخانه لیاسیلیس با نسبت SiO₂ به Na₂O برابر ۳ می باشد. الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در این پروژه محصول شرکت شیمی بهینه با مشخصات درج شده در جدول ۲ آورده شده است.

نسبت جامد به مایع (S/L) نمونه های تهیه شده در این پژوهش برابر ۱/۲ در نظر گرفته شد. برای ساخت نمونه بدون الیاف، کائولن کلسینه شده به آرامی به محلول فعال کننده اضافه شده به مدت ۱۵ دقیقه برای همگن سازی بیشتر، توسط همزن مخلوط شدند. سپس خمیر حاصل پیش از گیرش، به سرعت درون قالب ریخته شد. در ساخت نمونه های الیاف دار از الیاف با ۳،۱ و ۵ درصد حجمی و طول های ۸،۴ و ۱۲ میلی متر مورد استفاده قرار گرفتند. لازم به ذکر است که الیاف پلی پروپیلن ابتدا با قسمت جامد مخلوط شد. برای حصول اطمینان از ایجاد مخلوط همگن و یکنواخت، الیاف را به همراه کائولن کلسینه شده توسط مخلوط کن همزده شدند سپس مخلوط مربوطه به محلول قلیایی اضافه شد. در این تحقیق، از قالب برنجی با ابعاد ۵۰×۵۰×۵ میلی متری برای ساخت نمونه های استحکام فشاری استفاده شد. پس از گیرش کامل از قالب خارج و سپس به مدت ۲۴ ساعت درون خشک کن و در دمای حدود ۷۰ درجه حرارت خشک شدند. مشخصات نمونه های ژئوپلیمری تهیه شده در این پژوهش در جدول ۳ آمده است.

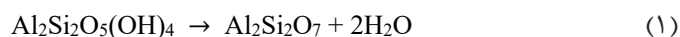
7- X-Ray Diffraction

8- Field-Emission Scanning Electron Microscope

9- Fourier Transform Infrared

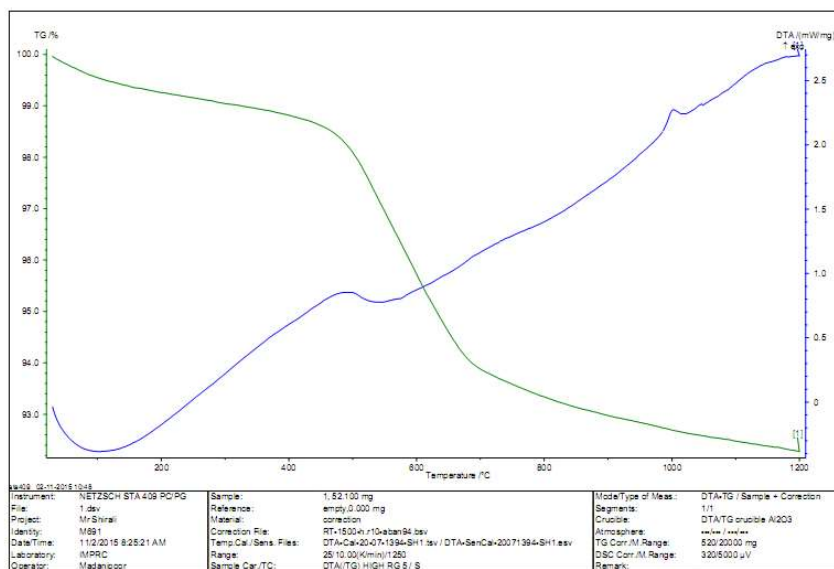
با توجه به اینکه خروج آب گروه هیدروکسیل نیاز به انرژی بیشتری دارد کائولن مورد استفاده با سرعت حرارت دهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ به مدت ۱۰ ساعت در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۸۵۰ کلسینه شد. الگوی پراش اشعه ایکس کائولن خراسان KCC نشان می دهد که کانی های اصلی آن متشکل از کائولینیت، پیروفیلیت و کوارتز است. پیک ۱۰۰ مینرال کائولینیت (ICSD collection code: 030285) در زاویه $2\theta = 12/386$ می باشد. مشاهده می شود که پیک ۱۰۰ مینرال کائولینیت در نمونه کلسینه شده حذف شده است. این امر نشان دهنده حذف کانی کائولینیت و به احتمال زیاد بیانگر تبدیل کانی کائولینیت به متاکائولن طبق واکنش ۱ می باشد [۱۸ و ۱۹].

و تشکیل متاکائولن رخ خواهد داد. بنابراین به نظر می آید که پیک گرماگیر $546/7^{\circ}\text{C}$ مربوط به خروج آب گروه های هیدروکسیل از کانی رسی باشد. همچنین پیک گرمازا مشاهده شده در دمای $1002/4$ درجه سانتی گراد ممکن است مربوط به تشکیل فاز مولایت باشد. با تشکیل مولایت، واکنش پذیری و فعالیت متاکائولن کاهش پیدا میکند [۱۶]. تبدیل مینرال کائولینیت و دیکیت به متاکائولن طبق واکنش ۱ است [۱۷]:

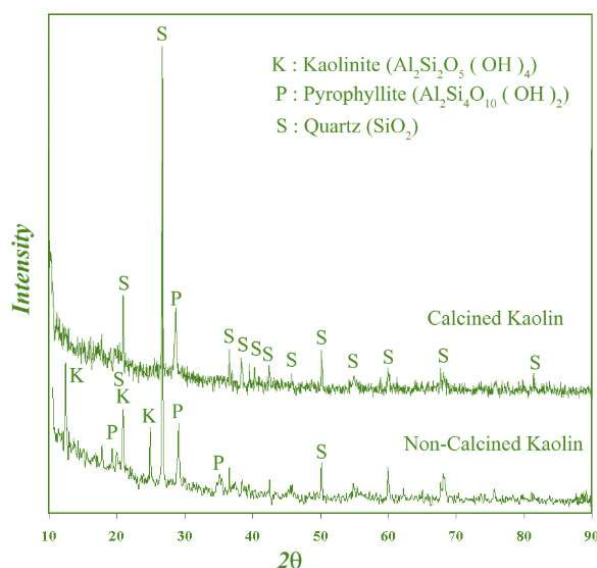


جدول ۳: مشخصات نمونه های ژئوپلیمری تهیه شده در پژوهش

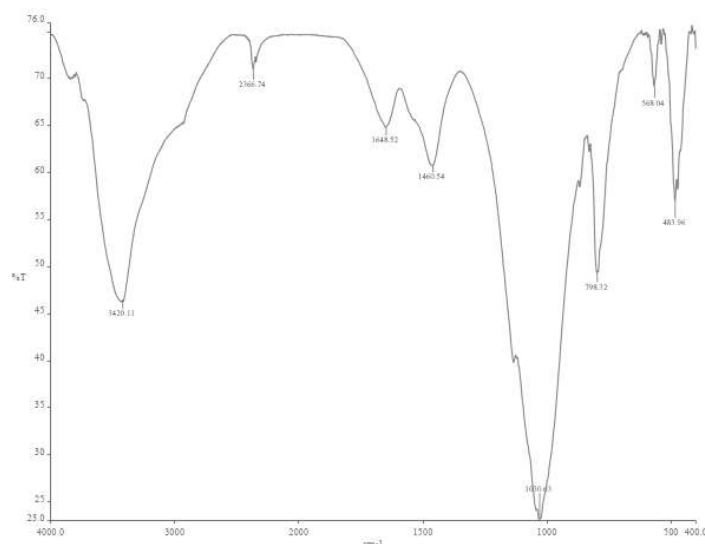
کد نمونه	مقدار متاکائولن (gr)	مقدار محلول (gr)	مقدار PP (gr)	مقدار PP (درصد حجمی)	طول الیاف PP (mm)
Np 0	۱۹۲	۱۶۰	۰	۰	۰
Np1-4	۱۹۲	۱۶۰	۱/۱۲	۱	۴
Np1-8	۱۹۲	۱۶۰	۱/۱۲	۱	۸
Np1-12	۱۹۲	۱۶۰	۱/۱۲	۱	۱۲
Np3-4	۱۹۲	۱۶۰	۳/۳	۳	۴
Np3-8	۱۹۲	۱۶۰	۳/۳	۳	۸
Np3-12	۱۹۲	۱۶۰	۳/۳	۳	۱۲
Np5-4	۱۹۲	۱۶۰	۵/۶	۵	۴
Np5-8	۱۹۲	۱۶۰	۵/۶	۵	۸
Np5-12	۱۹۲	۱۶۰	۵/۶	۵	۱۲



شکل ۱: آنالیز حرارتی همزمان (DTA-TG) حاصل از کائولن kcc با سرعت حرارت دهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.



شکل ۲: الگوی پراش اشعه ایکس کائولن کلسینه شده و کلسینه نشده.



شکل ۳: نمودار FTIR کلسینه شده.

عامل مهم در استحکام فشاری، واکنش پذیری مواد منبع است. مواد با واکنش پذیری بالاتر به راحتی حل شده و پس از آن در ژئوپلیمریزاسیون شرکت می کنند که منجر به انحلال سریعتر و درجه بالاتر ژئوپلیمریزاسیون می شود. ژو و ون دونتر [۲۰] اشاره کردند که، برای سنتز یک ژئوپلیمر با مقاومت فشاری بالا، مواد منبع با واکنش پذیری بالای معمولاً مورد نیاز است. به طور کلی، مواد کلسینه شده دارای واکنش پذیری بالاتری هستند، چرا که بیشتر فازهای کریستالی در مواد منبع پس از کلسیناسیون و در دمای بالا ساختارشان فرو می ریزد و آمورف می شوند. از طرف دیگر واکنش پذیری مواد منبع هم چنین توسط اندازه ذرات تحت تاثیر قرار می گیرد. ذرات ریزتر یک سطح خاص بزرگتر (کل مساحت سطح بر واحد جرم) دارند که باعث یک واکنش سریع تر بین ذرات جامد و محلول می شود. فاکتور موثر دیگر روی استحکام مقدار و خصوصیات فازهای واکنش نکرده (مثل اندازه و شکل) در محلول نهایی

پیکی که در عدد موج های ۳۴۲۰/۱۱ و ۱۶۴۸/۵۲ نمودار FTIR کائولن کلسینه شده (شکل ۳) دیده می شود مربوط به ارتعاشات کششی OH- است [۴۷ و ۴۸] که مؤید وجود گروه هیدروکسیل در ساختار کائولن کلسینه شده است. بنابراین با توجه به حذف پیک مینرال کائولینیت و حضور کانی پیروفیلیت (شکل ۲) و حضور پیک گروه هیدروکسیل (شکل ۳)، به نظر می آید که پیک گروه هیدروکسیل مربوط به کانی پیروفیلیت باشد و فرایند کلسیناسیون با هدف تبدیل کانی کائولینیت به متاکائولن به خوبی انجام شده است.

نتایج استحکام فشاری

این آزمون به منظور مشخص نمودن استحکام نمونه ها در مقابل نیروی فشاری انجام گرفت. جدول ۴ نشان دهنده نتایج این آزمون برای همه نمونه ها است.

الیاف PP اثر منفی بر یکپارچگی ساختار ژئوپلیمر می‌گذارد. همچنین مشاهده می‌شود که برای درصدی ثابت، با افزایش طول الیاف، استحکام فشاری کاهش می‌یابد (بجز نمونه ۵٪ الیاف). توزیع الیاف در ژئوپلیمر عامل بسیار مهمی برای مشاهده اثر الیاف در زمینه است بطوری‌که توزیع ضعیف آن باعث ایجاد عیوبی در زمینه می‌شود و اثر تقویتی آن را کاهش می‌دهد، حتی ممکن است نسبت نامناسب الیاف به زمینه باعث ایجاد منشأ ترک و در نهایت رشد ترک باشد. سازوکار الیاف PP در ژئوپلیمر به سه صورت می‌تواند ایفای نقش کند [۲۲] که عبارتند از بهبود ساختار اصلی، جلوگیری از رشد میکرو ترک‌ها و تغییر گسترش ترک. الیاف PP می‌تواند با مکانیزم پل زنی و با درگیر کردن دو سر خود در ساختار ژئوپلیمر بر حفره‌ها و عیوب مضر، مانع گسترش آن‌ها شود. وقتی ژئوپلیمر تحت تأثیر نیروهای داخلی و خارجی قرار می‌گیرد این الیاف می‌توانند بطور الاستیک تغییر شکل دهند و باعث افزایش استحکام شوند. اثر این پدیده در نمودار ۵ بصورت افزایش استحکام فشاری تا ۳٪ کاملاً مشهود است.

ژئوپلیمری است که به صورت ناخالصی در ریز ساختار ظاهر می‌شود [۲۱]. نتایج حاصل از آزمایش استحکام فشاری در جدول ۴ و شکل ۴ نشان می‌دهد با افزایش مدت زمان نگهداری نمونه‌ها از ۷ تا ۲۸ روز استحکام فشاری افزایش می‌یابد که ممکن است مربوط به این باشد که یون‌های Al^{3+} و Si^{4+} بیشتر در محلول قلیایی تجزیه شده‌اند و باعث پیشرفت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون شده‌اند.

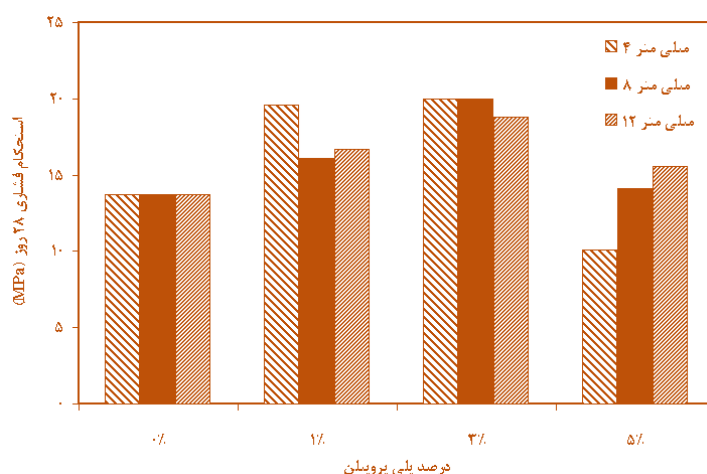
نمودار ۵ تغییرات استحکام فشاری ۲۸ روز را نسبت به درصد الیاف و طول آن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش استحکام فشاری نسبت به نمونه بدون الیاف شده است (بجز الیاف ۴ میلی متری نمونه ۵٪). بطوری‌که با افزودن ۳٪ الیاف ۴ و ۸ میلی متری استحکام فشاری ۲۸ روز، ۴۶٪ افزایش می‌یابد. اما در همان نمونه با افزودن مقدار ۲ درصد الیاف بیشتر، مقاومت فشاری ۲۸ روز از مقدار ۲۰ مگاپاسکال به ۱۴/۱ مگاپاسکال رسیده است که نسبت به نمونه حاوی ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن حدود ۲۹/۵ درصد دچار کاهش استحکام فشاری شده است. به نظر می‌آید مقادیر بیش از حد

جدول ۴: استحکام فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری الیاف‌دار

کد نمونه	استحکام فشاری ۷ روز (Mpa)	استحکام فشاری ۱۴ روز (Mpa)	استحکام فشاری ۲۸ روز (Mpa)
np1-4	۹/۸	۱۲/۵	۱۹/۶
np1-8	۹/۸	۱۳/۳	۱۶/۰۷
np1-12	۱۰/۹۷	۹/۸	۱۶/۷
np3-4	۶/۲	۱۰/۵	۲۰
np3-8	۶/۲	۷/۸	۲۰
np3-12	۵/۸	۹/۰۱	۱۸/۸
np5-4	۷/۰۵	۶/۶	۱۰/۱
np5-8	۶/۶	۱۱/۷	۱۴/۱
np5-12	۶/۶	۱۰/۱	۱۵/۶
شاهد بدون الیاف	۷/۴	۱۰/۵	۱۳/۷



شکل ۴: نمودار میله‌ای کلی تغییرات استحکام فشاری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نمونه‌های ژئوپلیمری با درصد حجمی و طول‌های متفاوت



شکل ۵: نمودار تغییرات استحکام فشاری ۲۸ روز با درصدهای مختلف حجمی بر حسب طول الیاف

در نمونه ۳٪ می شود. از طرف دیگر طول بیشتر، تغییر شکل الیاف را محدود می کند. با توجه به نتایج حاصل از استحکام فشاری می توان نتیجه گرفت که مقدار ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن با طول ۴ میلی متر می تواند به عنوان مقادیر بهینه در نظر گرفته شود.

پراش اشعه ایکس

در شکل ۶ الگوی پراش نمونه های ژئوپلیمری آورده شده است که مشابه یکدیگرند. مینرال های کوارتز و پیروفلیت فازهای اصلی باقی مانده این ساختارها را پس از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون در تمامی نمونه ها تشکیل می دهند. به نظر می آید که این دو مینرال در فرآیند مذکور شرکت نکرده اند. همچنین با توجه به الگوی پراش نمونه ها مشخص شد که حضور الیاف پلی پروپیلن موجب تشکیل فاز جدیدی نشده است.

تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

طیف سنجی FTIR نمونه های کائولن کلسینه شده و ژئوپلیمری در شکل ۷ آورده شده است. در طیف IR کائولن کلسینه شده پیک های $483/96$ ، $3420/11$ CM^{-1} ، $1648/52$ ، $1460/54$ ، $1030/63$ ، $798/32$ ، $568/04$ دیده می شوند. پیک های $1648/52$ و $3420/11$ CM^{-1} نشان دهنده ارتعاشات کششی گروه های OH در مولکول آب است که مؤید وجود آب در کائولن می باشد. پیک نامتقارن و پهنی که در عدد موج $1030/63$ دیده می شود مربوط به ارتعاشات کششی T-O در ساختار متاکائولن آمورف است که T نماد عناصر Al و Si می باشد. پیک مشاهده شده در $798/32$ CM^{-1} نیز نشان دهنده ارتعاشات کششی Al-O در تتراهدral AlO_4 متاکائولن است. مطابق با نظر Fernandez-Palomo و Jimenez پیک $798/32$ CM^{-1} نشان دهنده حضور کوارتز در کائولن کلسینه شده می باشد [۲۶].

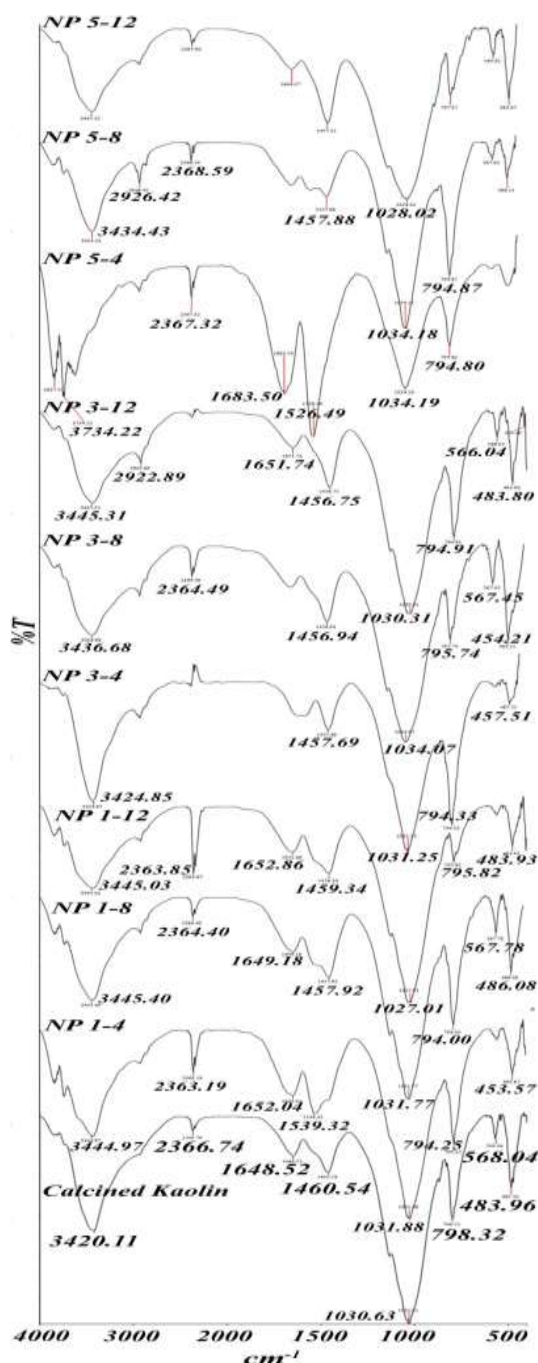
در فرکانس پایین پیکی در $483/96$ CM^{-1} و $568/04$ دیده می شود که در اثر ارتعاشات Al-O-Si آلومیناسیلیکات ها ایجاد شده است. فعال سازی قلیایی کائولن کلسینه شده موجب ایجاد پیک هایی در محدوده $1642/84 - 1683/50$ CM^{-1} و $3424/85 - 3445/42$ CM^{-1} می شود که مربوط به ارتعاشات خمشی و کششی OH می باشد. حضور این پیک ها نشان دهنده وجود مولکول های آب در سطح و یا در خلل

F. Puertas و همکارانش بیان کردند که با افزایش مقدار الیاف کارپذیری کم می شود که همین امر بر تراکم ساختار ژئوپلیمر اثر منفی می گذارد و موجب کاهش استحکام فشاری و خمشی می شود [۲۳]. بنابراین بنا بر دلایل مذکور ما شاهد کاهش استحکام فشاری در نمونه ۵٪ نسبت به نمونه ۳٪ می باشیم. در اثر افزایش طول الیاف، حفره های بیشتری در ژئوپلیمر ایجاد می شود و شکل گیری ترکها تسهیل می شود بدیهی است که خود، منشأ تولید میکرو ترک در طول های بالاتر شود [۲۴و۲۵]. پس به نظر می آید طول الیاف که زیاد می شود بدلیل آگلومره شدن الیاف و کاهش کارپذیری، مخلوط شدن بخوبی صورت نمی گیرد و بدلیل عدم تراکم پذیری مناسب و تشکیل حفره هایی در آن استحکام فشاری کاهش می یابد. بنابراین ملاحظه می شود، مقدار ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن می تواند به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته شود.

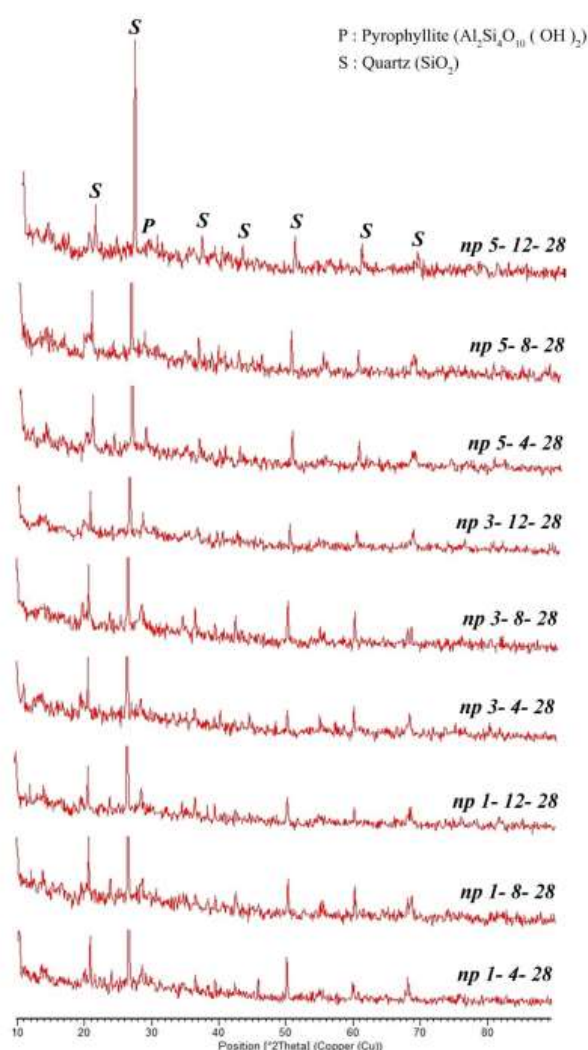
در جدول ۴ با ثابت نگه داشتن طول و بررسی تغییرات حجمی به این موضوع دست می یابیم که ۳٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن بالاترین استحکام را دارد. برای مثال نمونه های np3-4 و np3-8 ۲۸ روزه تنها با اضافه کردن ۲٪ الیاف pp شاهد ۲۰٪ افزایش استحکام هستیم که نسبت به نمونه بدن الیاف ۳۲٪/۵ بهبود یافته است و نمونه های ۷ روزه و ۱۴ روزه به دلیل تکمیل نشدن فرایند ژئوپلیمریزاسیون هنوز استحکام بالایی ندارند. علت این افزایش استحکام با افزودن الیاف، همان مکانیزم پل زنی است که مانع رشد و گسترش ترک می شود. در واقع در کامپوزیت سیمان ژئوپلیمری، با توجه به واکنش میان الیاف و اجزای سیمان، پس از تشکیل ترک الیاف همانند پل عمل می کنند و مانع رشد و گسترش میکرو ترک ها در زمینه می گردند [۶]. افزایش بیشتر پلی پروپیلن تا ۵٪ بدلیل آگلومره شدن و عدم هماهنگی مناسب، در فصل مشترک الیاف و زمینه تخلخل هایی پدید می آید [۲۵] که می تواند بر روی استحکام فشاری و استحکام خمشی اثر منفی گذاشته و شاهد روند کاهشی آن در نمودار از ۳ به ۵٪ باشیم. نکته دیگر که قابل بحث و بررسی می باشد، طول الیاف pp می باشد. با افزایش طول الیاف و آگلومره شدن آن و کاهش کارپذیری، مخلوط شدن بخوبی صورت نمی گیرد و بدلیل عدم تراکم پذیری مناسب و تشکیل حفره هایی در نمونه، شکل گیری ترک ها تسهیل می شود و بدیهی است که خود، منشأ تولید میکرو ترک در طول های بالاتر می شود و موجب کاهش استحکام فشاری

می‌شود که مربوط به ارتعاشات خمشی و کششی OH می‌باشد. حضور این پیک‌ها نشان‌دهنده وجود مولکول‌های آب در سطح و یا در خلل و فرج ساختار ژئوپلیمر می‌باشد. ارتعاشات محدوده عدد موج CM^{-1} ۲۳۶۲-۲۹۲۶ مربوط به ارتعاشات H-O-H است. پیک‌هایی که در محدوده CM^{-1} ۷۹۴-۷۹۷/۳۷ مشاهده می‌شود مربوط به ارتعاشات متقارن Si-O-Si و Al-O-Si در شبکه ژئوپلیمری می‌باشد. پیک‌های دیده شده در محدوده CM^{-1} ۴۵۳/۵۷-۴۸۶/۱۱ نیز می‌توانند مربوط به Al-O باشند.

و فرج‌های ساختار ژئوپلیمر می‌باشد. ارتعاشات محدوده عدد موج CM^{-1} ۲۳۶۲-۲۹۲۶ مربوط به ارتعاشات H-O-H است. پیک‌هایی که در محدوده CM^{-1} ۷۹۴-۷۹۷/۳۷ مشاهده می‌شود مربوط به ارتعاشات متقارن Si-O-Si و Al-O-Si در شبکه ژئوپلیمری می‌باشد. پیک‌های دیده شده در محدوده CM^{-1} ۴۵۳/۵۷-۴۸۶/۱۱ نیز می‌توانند مربوط به Al-O باشند.



شکل ۷: طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه‌های ژئوپلیمری الیاف‌دار



شکل ۸: الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های ژئوپلیمری الیاف‌دار با زمان ماندگاری ۲۸ روز

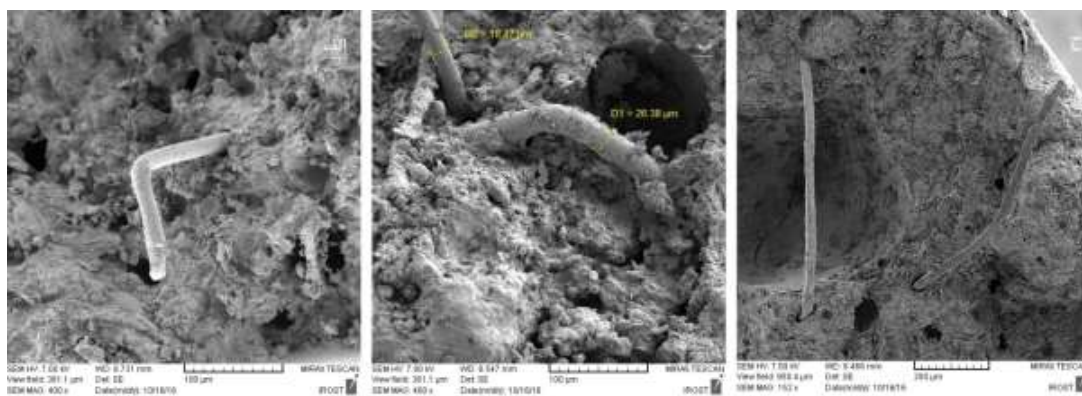
پلی پروپیلن، ممکن است دچار تغییر شکل و یا افزایش طول شود؛ و یا ممکن است گسسته شود و یا بیرون بزند^{۱۰}. اگر اتصال الیاف و زمینه مناسب باشد و اصطکاک کافی در فصل مشترک بین آن دو وجود داشته باشد، الیاف تا گسستگی و شکسته شدن در برابر تنش کششی مقاومت می‌کند. اما اگر زبری سطوح، کم و اصطکاک و اتصال در فصل مشترک ضعیف باشد فرآیند بیرون زدن الیاف رخ می‌دهد، بدون اینکه مقاومت قابل توجهی در برابر تنش اعمالی صورت پذیرد [۲۵]. الیاف پلی پروپیلن توانسته با استفاده از مکانیزم پل زنی و با درگیر کردن دو سر الیاف در زمینه ژئوپلیمری و تغییر شکل الاستیکی تأثیر بسزایی را در برابر تنش کششی به نمایش گذارد. با این وجود به نظر می‌آید که سازوکار پل زنی تنها مکانیزم تقویت کننده زمینه نیست. با توجه به شکل‌های ۸ الی ۱۰ به نظر می‌آید که الیاف از نمونه بیرون زده‌اند.

باند قوی $1030/63 \text{ CM}^{-1}$ در کائولن کلسینه شده ناشی از ارتعاشات کششی Si-O است و پیک $1460/54 \text{ CM}^{-1}$ از ارتعاشات Al-OH نشأت می‌گیرد. در نمونه های ژئوپلیمری پیک $1030/63 \text{ CM}^{-1}$ بطرف فرکانس‌های بالاتر یعنی $1422/97 - 1528/71 \text{ CM}^{-1}$ تغییر مکان داده است که احتمالاً مربوط به جانشینی جزئی تتراهدرال AlO_4 بجای تتراهدرال SiO_4 است. به عبارت دیگر این تغییر مکان عدد موج ناشی از تغییراتی در ساختار مبنی بر قرار گرفتن یون Al^{3+} در ساختار تتراهدرال SiO_4 و تشکیل پیوند Si-O-Al است. همچنین این جانشینی منجر به افزایش اکسیژن غیر پل زن در سیلیکات‌ها می‌شود. این تغییرات در ساختار نمونه‌های ژئوپلیمری نشان از پیشرفت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون دارد.

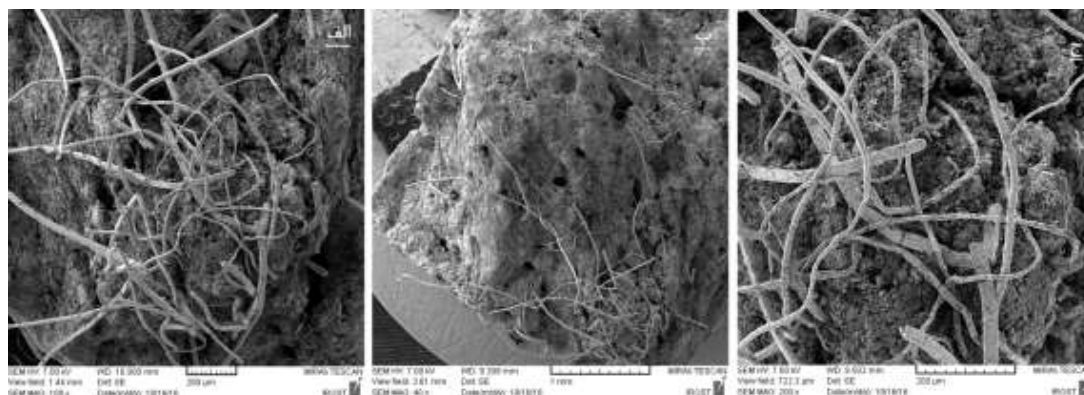
بررسی ریزساختار نمونه‌های ژئوپلیمر

الیاف پلی پروپیلن در اثر اعمال نیروی کششی به کامپوزیت ژئوپلیمر-

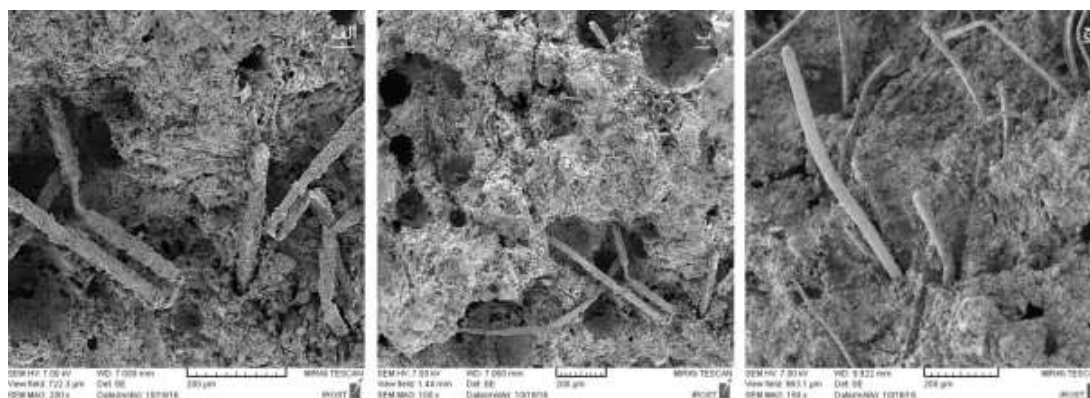
10- Pull out



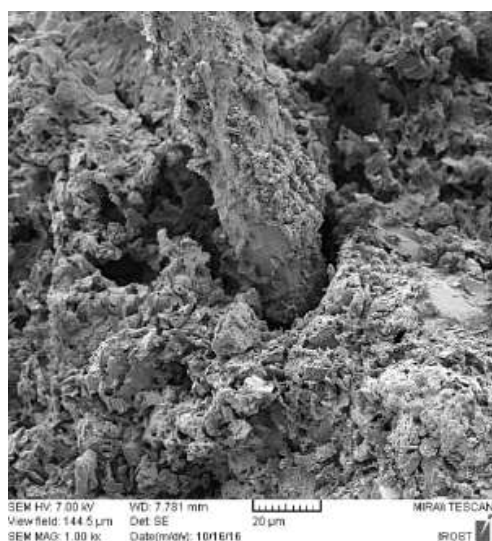
شکل ۸: نمونه‌های دارای ۱٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن (الف) Np1-4 (ب) Np1-8 (ج) Np1-12.



شکل ۹: نمونه‌های دارای ۳٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن (الف) Np3-4 (ب) Np3-8 (ج) Np3-12.



شکل ۱۰: نمونه‌های دارای ۵٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن (الف) Np5-4 (ب) Np5-8 (ج) Np5-12.



شکل ۱۱: فاصله بین الیاف پلی پروپیلن و زمینه در نمونه Np5-4.

شکل ۱۲: فاصله بین الیاف پلی پروپیلن و زمینه در نمونه Np5-4.

افزایش می‌یابد، که ناشی از تجزیه بیشتر یون‌های Al^{3+} Si^{4+} در محلول قلیایی می‌باشد که باعث پیشرفت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون شده است.

(۲) افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش استحکام فشاری نسبت به نمونه بدون الیاف شده است بطوری که با افزودن ۳٪ الیاف ۴ و ۸ میلی‌متری استحکام فشاری ۲۸ روز، ۴۶٪ افزایش می‌یابد.

(۳) نتایج پراش اشعه ایکس نشان داد که مینرال‌های کوارتز و پیروفیلیت فازهای اصلی باقی‌مانده این ساختارها را پس از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون در تمامی نمونه‌ها تشکیل می‌دهند.

(۴) نتایج طیف سنجی FTIR نشان داد که در نمونه‌های ژئوپلیمری پیک $1030/63 \text{ CM}^{-1}$ بطرف فرکانس‌های بالاتر یعنی $1528/71 \text{ CM}^{-1}$ - $1422/97$ تغییر مکان داده است که نشان‌دهنده پیشرفت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون است.

(۵) نتایج نشان داد که مقدار ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن با طول ۴ میلی‌متر می‌تواند به عنوان مقادیر بهینه در نظر گرفته شود.

(۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM نشان داد که مکانیزم بیرون‌زدن نسبت به دیگر سازوکارها غالب‌تر است.

Refahi و همکارانش ضعیف بودن فصل مشترک الیاف پلی پروپیلن و زمینه ژئوپلیمر پایه متاکائولنی را مورد بررسی قرار دادند [۲۵]. Navid Ranjbar و همکارانش نیز این نکته را در مورد فصل مشترک الیاف پلی پروپیلن و زمینه ژئوپلیمر پایه خاکستر بادی بیان کرده‌اند. این اتصال ضعیف از آبریز بودن و سطح صاف داشتن الیاف پلی پروپیلن به همراه پیوند غیر قطبی C-C آن نشأت می‌گیرد که موجب کاهش پتانسیل واکنش‌پذیری با زمینه ژئوپلیمری می‌گردد. در چنین شرایطی مکانیزم بیرون‌زدن نسبت به دیگر سازوکارها غالب‌تر است. فاصله بین الیاف و زمینه نشان از ضعیف بودن چسبندگی الیاف و زمینه است [۲۹]. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ گویای وجود فاصله و عدم چسبندگی بین الیاف و زمینه می‌باشد.

در نمونه‌های حاوی ۵٪ پلی پروپیلن تجمعی از الیاف مشاهده می‌شود که در هم تنیده شده‌اند و بصورت یکنواخت در زمینه توزیع نشده‌اند و باعث کارپذیری نامناسب شده است که نتیجه آن کاهش استحکام فشاری است.

۴. نتیجه گیری

(۱) با افزایش مدت زمان نگهداری نمونه‌ها از ۷ تا ۲۸ روز استحکام فشاری

References

- Davidovits et al, "Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materials", Journal of Thermal Analysis, 1 (37) (1991), 1633-56.
- Chakkor, O., Altan, M.F. & Canpolat, O. Elevated Temperature, Freezing-Thawing and Mechanical Properties of Limestone, Marble, and Basalt Powders Reinforced Metakaolin-Red Mud-Based Geopolymer Mortars. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng 46, 3241-3258 (2022).
- Kuqo, T. Koddenberg, C. Mai, Use of dry mixing-spraying process for the production of geopolymer-bonded wood and seagrass fibreboards, Compos. Part B Eng. 248 (2023) Part B Eng. 248 (2023)
۴. رزمی خدیجه، رضایی بهرام، صدری عبدالله «استفاده از بتن ژئوپلیمر به جای بتن های پرلند در پروژه های عمرانی» اولین کنفرانس بین المللی بتن های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب، گیلان، ایران، بهمن ۱۳۸۹.
5. R.A. Sa Ribeiro, M.G. Sa Ribeiro, W.M. Kriven "A Review of Particle- and Fiber Reinforced Metakaolin-Based Geopolymer Composites" J. Ceram. Sci. Technol. 307-322 (2017).
6. victor CLi, shuxin wang and chynthia Wu, 200L "tensile strain hardening of PV-ECC". ACI material journal.
۷. کیوانی، عبد الله "بتن الیافی و کاربرد آن در سازه های بتنی"، کارگاه های تخصصی بتن. بتن های ویژه، مهر ماه ۸۴.
8. Furkan Sahin, Mucteba Uysal, Orhan Canpolat, Turgay Cosgun, Heydar Dehghanpour "The effect of polyvinyl fibers on metakaolin-based geopolymer mortars" with different aggregate filling, Construction and Building Materials 300 (2021) 124257.
۹. حبیبی، سیما، نیلفروش زاده، حسین، قربانی شبستری، سیاوش "بررسی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر روی استحکام و مقاومت حرارتی بتن" مجله علمی پژوهشی علوم و تکنولوژی نساجی، سال چهارم، شماره ۲، بهار و تابستان ۱۳۸۸.
10. Zhong and Yao; "Effect of polypropylene fibers on the long-term tensile strength of concrete"; Journal of Wuhan University of Technology Mater. Sci. Ed., Vol. 22 No.1, pp.62-73, 2007.
11. Hau and Zhou; "Application study of polypropylene fiber reinforced concrete railway tunnel lining structure within hard rock mass using wet-sprayed technique"; Trans Tech Publications, Vol. 22 No. 1, pp.76-80, 2009.
12. S. Kurtz and P. Balaguru; "Postcrack creep of polymeric fiber-reinforced concrete in flexure"; Journal of Cement and Concrete Research, Elsevier Science, Vol. 22, No.1, pp. 183-190, 2000.
13. Yao, "Flexural strength and behavior of polypropylene fiber reinforced concrete beams"; Journal of Wuhan University of Technology Mater. Sci. Ed., Vol.17 No.2, pp.251-260, 2000
14. Wu et al. ; "Performance characteristics of subdenier monofilament polypropylene fiber reinforced mortars"; Journal of Applied Polymer Science., Vol. 94, pp. 2251-2256, 2004.
15. A.E. Richardson; "Bond characteristics of structural polypropylene fibers in concrete with regard to post-crack strength and durable design"; Journal of Structural Survey, Vol. 23, No.3, pp. 210-230, 2005.
16. Zainab A. Mohammed, Layth A. Al-Jaberi, Arshad N. Shubber "EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBER ON PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE BASED METAKOLIN" Journal of Engineering and Sustainable Development, Vol. 25, No. 02, March 2021.
17. Haddaji, H. Majdoubi, S. Mansouri, Y. Tamraoui, M. El bouchti, B. Manoun, M. Oumam, H. Hannache, Effect of synthetic fibers on the properties of geopolymers based on non-heat treated phosphate mine tailing, Mater.Chem. Phys. 260 (2021) 124147
18. D. Junger, M. Liebscher, J. Zhao, V. Mechtcherine, Joule heating as a smart approach in enhancing early strength development of mineral-impregnated carbon-fibre composites (MCF) made with geopolymer, Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 153 (2022).
19. E. JOUSSEIN, S. PETIT, J. CHURCHMAN, B. THENG, D. RIGHI AND B. DELVAUX "Halloysite clay minerals-a review" Clay Minerals (2005) 40, 383-426.
20. Yunsheng, Z., Wei, S., and Zongjin, L., "Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement." Applied Clay Science, 2010, 47, 271.
21. Journal of the American Ceramic Society - 2021 - Hajimohammadi - Chemo-mechanical properties of carbon fiber reinforced.pdf, (n.d.).
22. Kardelen Kaya, Sezen Soyer-Uzun "Evolution of Structural Characteristics and Compressive Strength in Red Mud-Metakaolin Based Geopolymer Systems" Accepted Manuscript, 2016.
23. W. Hajjaji, S. Andrejkovicova, C. Zanelli, M. Alshaaer, M. Dondi, J.A. Labrincha, F. Rocha "Composition and technological properties of geopolymers based on metakaolin and red mud" Materials and Design 52 (2013) 648-654.
24. N. Balgourinejad, M. Haghighifar, R. Madandoust, S. Charkhtab, Experimental study on mechanical properties, microstructural of lightweight concrete incorporating polypropylene fibers and metakaolin at high temperatures, J. Mater. Res. Technol. 18 (2022) 5238-5256,
25. Xu H, van Deventer JSJ. Effect of source materials on geopolymerization. Ind Eng Chem Res 2003;42(8):1698-706.
26. ZHANG Zu-hua, YAO Xiao, ZHU Hua-jun, HUA Su-dong, CHEN Yue "Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer" J. Cent. South Univ. Technol. (2009) 16: 0049-0052.
27. N. Ali, O. Canpolat, Y. Aygörmec, M.M. Al-Mashhadani, Evaluation of the 12-24 mm basalt fibers and boron waste on reinforced metakaolin-based geopolymer, Constr. Build. Mater. 251 (2020).
28. M. Li, R. Luo, L. Qin, H. Liu, P. Duan, W. Jing, Z. Zhang, X. Liu, High temperature properties of graphene oxide modified metakaolin based geopolymer paste, Cem. Concr. Compos. 125 (2022),
29. Navid Ranjbar, Mehdi Mehrali, Arash Behnia, Alireza Javadi Pordsari, Mohammad Mehrali, U. Johnson Alengaram, Mohd Zamin Jumaat "A Comprehensive Study of the Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer" PLoS One. January 25, 2016.
30. Y.M. Liew, H. Kamarudin, A.M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. Khairul Nizar, C.M. Ruzaidi, C.Y. Heah "Optimization of solids-to-liquid and alkali activator ratios of calcined kaolin geopolymeric powder" Construction and Building Materials 37 (2012) 440-451.
31. A. Refahi, J. Aghazadeh Mohandesi, E. Gohari Behjat Abadi "Fatigue behavior of geopolymer mortar reinforced by polypropylene fibers under constant loading amplitude and variable block loading" J. Appl. Environ. Biol. Sci., 5(10S)477-489, 2015.