

Experimental Study of the Effect of 2-Element Hybrid Copolymer Fibers and Nano-Silica Particles on Compressive, Tensile and Flexural Strengths of Metakaolin-Based Geopolymer Concrete

Amir Bahador Moradikhou^{*1}, *Mir Hamid Hosseini*², *Azam Mousavi Kashi*³, *Fereshteh Emami*⁴,
*Alireza Esparham*⁵

1, 5-MSc. Student of civil, structural, and geotechnics engineering department, Islamic Azad University, Science and Research branch, Tehran, Iran

2, 4-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

Abstract

In recent years, geopolymers, as a new class of green cement binders, have gained significant attention as an environmental-friendly alternative to ordinary Portland cement. In this paper, the effect of 2-element hybrid fibers and nano-silica particles on compressive, tensile and flexural strengths of metakaolin-based geopolymer concrete, were studied. First, initially tests were conducted to reach the optimum mixture designs. Then, fibers were added in various ratios with nano silica particles to the concrete mixtures and geopolymer specimens were prepared to study the behavior of geopolymer fibers reinforced metakaolin-based concrete. After curing, specimens were subjected to the indirect tensile and 3-point flexural strengths tests. The test results showed that using 2-element hybrid fibers and nano-silica particles increases the compressive, tensile and flexural strengths of geopolymer concrete.

Keyword: *Geopolymer, Fibers Reinforced Geopolymer Concrete, Hybrid Fibers, Metakaolin, Nano-Silica.*

¹ Corresponding author: Amirbahador.mk@gmail.com

مطالعه آزمایشگاهی نقش الیاف هیبریدی دوگانه کوپلیمری و نانوسیلیس بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

دریافت مقاله: ۱۳۹۸-۰۳-۰۴

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۰۸-۱۳

امیربهادر مرادی خو*

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، گروه مهندسی عمران، سازه و ژئوتکنیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
amirbahador.mk@gmail.com

میرحمید حسینی

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

اعظم موسوی کاشی

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

فرشته امامی

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

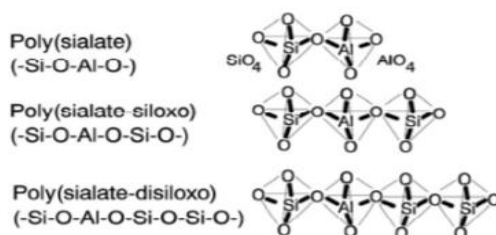
علیرضا اسپرهم

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

چکیده

بتن ژئوپلیمری در سال‌های اخیر به عنوان یک جایگزین سبب برای بتن پرتلند مطرح شده است که می‌تواند از اثرات منفی زیست محیطی تولید سیمان پرتلند بکاهد. در این مقاله اثر الیاف هیبریدی دوگانه کوپلیمری و نانوسیلیس بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. ابتدا آزمایش‌های اولیه به منظور رسیدن به طرح اختلاط بهینه انجام شد سپس به منظور بررسی رفتار بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه متاکائولن الیاف در نسبت‌های مختلف و همراه با نانوسیلیس به طرح اختلاط بتن اضافه و نمونه‌ها ساخته و عمل‌آوری شدند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای گرفته شد. نتایج نشان داد استفاده از الیاف هیبریدی و نانوسیلیس سبب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری می‌شود. کلمات کلیدی: ژئوپلیمر، بتن ژئوپلیمری الیافی، الیاف هیبریدی، متاکائولن، نانوسیلیس.

بتن به علت دارا بودن ویژگی‌های خاص مانند شکل‌پذیری، در دسترس بودن مصالح اولیه و ارزان بودن پرمصرف‌ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز، بعد از آب است. پیش بینی می‌شود که نیاز به مصرف بتن در آینده بیشتر شود و این افزایش تقاضا به معنی افزایش تقاضا برای تولید سیمان پرتلند، به عنوان ماده اصلی سازنده بتن است [۱]. اما فرآیند تولید سیمان پرتلند معایب عمده‌ای نیز به دنبال دارد. تولید سیمان پرتلند باعث رهاسازی مقادیر زیادی از دی‌اکسید کربن به محیط زیست می‌شود [۲]. به طوری که تولید ۱ تن سیمان پرتلند سبب تولید تقریباً ۱ تن دی‌اکسید کربن می‌شود [۳]. از سوی دیگر، 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 [۴]. همچنین فرآیند تولید سیمان پرتلند عامل تولید ۵ تا ۷ درصد از کل میزان انتشار جهانی گاز دی‌اکسید کربن است [۵]. از این رو نیاز به استفاده از یک 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. ژئوپلیمر برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ میلادی توسط Davidovits، به عنوان بایندهای جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی شد. وی همچنین استفاده از نام poly(sialate) را برای شناسایی شیمیایی ژئوپلیمرها پیشنهاد کرد که poly پیشوند پلیمری و sialate نیز عبارت اختصاری برای زنجیره silicon-oxo-aluminate است. در شکل شماره ۱ انواع مختلف poly(sialate) نشان داده شده است [۶-۹].



شکل ۱- ساختار شیمیایی poly(sialate) ها

ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از انجام واکنش ژئوپلیمریزاسیون بین منبع اولیه یا منبع آلومیناسیلیکاتی (Raw material) غنی از سیلیکا (SiO₂) و آلومینا (Al₂O₃) با یک محلول قلیایی فعال‌کننده حاصل می‌شوند [۱۰]. 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 [۱۲]. ترکیب شیمیایی مواد ژئوپلیمری (زنجیره‌های Si-O-Al) مشابه ترکیب شیمیایی زئولیت‌های طبیعی است ولی دارای ساختار آمورف هستند برخلاف زئولیت‌های طبیعی که ساختار کریستالی دارند [۱۱]. در واقع زئولیت‌های طبیعی، فراوان‌ترین آلومیناسیلیکات طبیعی موجود در پوسته زمین هستند. از نقطه نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن‌های ژئوپلیمری خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند که از جمله آنها می‌توان مقاومت فشاری، خمشی و کششی زیاد [۱۳-۱۵]، سخت‌شدن سریع [۱۶]، مقاومت در برابر آتش سوزی و حرارت‌های زیاد [۱۷-۱۹]، نفوذپذیری کم و مقاومت در برابر حمله نمک‌ها و اسیدها [۲۰، ۱۳] و خزش کم [۲۱] اشاره کرد.
 منبع اولیه ژئوپلیمریزاسیون 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. یکی از منابع اولیه ژئوپلیمریزاسیون متاکائولن است. متاکائولن از کلسینه کردن کائولن در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به دست

می‌آید. در این مقاله از متاکائولن به عنوان منبع ژئوپلیمریزاسیون استفاده شد. بتن در کنار مزایا دارای معایبی نیز هست که یکی از مهمترین آنها مقاومت کششی کم است که به همین دلیل دارای شکل‌پذیری کم و تردی زیاد می‌باشد. از این رو برای رفع این مشکل در چند دهه اخیر از رشته‌های الیاف که به صورت یکنواخت در حجم بتن پراکنده می‌شوند، استفاده می‌شود [۲۲]. استفاده از الیاف در مواد ماتریس شکننده دارای سابقه‌ای طولانی بوده و به ۳۵۰۰ سال قبل هنگامی که از آجر آفتاب پخته تقویت شده با نی که برای ساخت تپه مرتفع ۳۵ متری آکارکوف نزدیک بغداد استفاده شد، باز می‌گردد [۲۳]. همچنین از موی دم اسب نیز برای تقویت ملات بنایی و گچ استفاده شده است [۲۴]. 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 [۲۵]. امروزه از الیاف به صورت گسترده در انواع بتن جهت بهبود خواص بتن، استفاده می‌شود. این الیاف دارای طیف وسیعی از الیاف فلزی تا الیاف پلیمری هستند. الیاف پلیمری به دلیل داشتن خواص مطلوب و قیمت کم، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده‌اند. با پیشرفت در علم مهندسی پلیمر، امروزه تولید نسل جدید الیاف پلیمری مثل الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده یا الیاف پلی الفین، رواج یافته است. همچنین از الیاف هیبریدی یا دوگانه و چندگانه در بتن به منظور افزایش خواص مورد نظر بتن‌های الیافی، استفاده می‌شود. از سوی دیگر در سال‌های اخیر استفاده از نانوذرات مانند نانوسیلیس، به منظور بهبود خواص کامپوزیت‌ها رواج یافته است. نانوسیلیس شامل مجموعه‌ای از ذرات کوچک SiO_2 است که از طریق پیوندهای شیمیایی به یکدیگر متصل شده و ذرات بزرگتری را تشکیل می‌دهند. مزیت اصلی نانوسیلیس در مقایسه با سیلیس، سطح ویژه بالای این ماده است که باعث می‌شود در بستر مورد استفاده برهمکنش بیشتری از خود نشان دهد. این ماده کاربردهای متنوعی در صنعت دارد که یکی از موارد استفاده آن در بتن به عنوان پرکننده است. ناحیه تماس که به اسامی مختلفی مانند لایه مرزی یا منطقه انتقالی نامیده می‌شود، ناحیه مرزی است که بین خمیر سیمان و سطح سنگدانه یا الیاف و یا میلگرد پدید می‌آید که 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 نوع الیاف، نوع سیمان، نوع پوزولان مصرفی و غیره می‌باشد [۲۲]. استفاده از نانوذرات می‌تواند در پرکردن تخلخل‌های بسیار ریز خمیر سیمان و افزایش مقاومت‌های کششی و خمشی و به خصوص دوام بتن مؤثر باشد [۲۶-۲۸]. همچنین استفاده هم‌زمان از الیاف و نانوذرات می‌تواند سبب هم‌افزایی اثر و بهبود بیشتر خواص مکانیکی بتن شود. Nili و همکاران [۲۹] در آزمایش‌های خود تاثیر دوده سیلیس و الیاف فولادی را بر مقاومت ضربه‌ای و عملکرد بتن بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های این پژوهشگران نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی، مقاومت کششی و خمشی بتن را بهبود می‌دهد. همچنین با افزودن الیاف فولادی به نمونه‌های حاوی دوده سیلیس، شکل‌پذیری و مقاومت ضربه‌ای بتن به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. Vandewalle [۳۰] آزمایش‌هایی روی بتن مسلح الیاف هیبریدی انجام داد. وی از ۳ نوع الیاف فولادی (الیاف بسیار کوتاه ۶ میلی‌متری و الیاف کوتاه به طول ۱۳ میلی‌متر و الیاف بلند با انتهای قلاب‌دار به طول ۳۵ میلی‌متر) استفاده کرد. میزان الیاف مصرفی در بتن از ۰ تا ۹۰ کیلوگرم در مترمکعب متغیر بوده که به صورت مجزا و یا مخلوطی از دو یا سه نوع الیاف، به بتن اضافه شده بودند. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری تغییر مکان بازشدگی دهانه ترک (Crack Mouth Opening Displacement) نشان داد که الیاف ۶ و ۱۳ میلی‌متری در مناطق با بازشدگی ترک‌های کوچک بسیار موثر هستند. از سوی دیگر الیاف بلند ۳۵ میلی‌متری شکل‌پذیری خوبی را در ترک‌های بزرگ و عریض تامین می‌کنند. Gao و همکاران [۳۱] در تحقیقات خود در مورد بتن ژئوپلیمری الیافی، از الیاف هیبریدی فولادی در دو اندازه ۶ و ۱۲ میلی‌متری استفاده کردند و نتیجه‌گیری کردند که 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 [۳۲] در تحقیق در مورد بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه سرباره، از ۳ نوع الیاف پلی پروپیلن، شیشه و فولاد با طول به

ترتیب ۱۳، ۱۵ و ۶۰ میلی‌متر و میزان ۰/۳، ۰/۳ و ۱/۶ درصد حجمی بتن، استفاده کردند. این محققین 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 نشان داد که استفاده از الیاف پلی پروپیلن سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن به میزان تقریباً ۶ و ۱۰۸ درصد، نسبت به نمونه فاقد الیاف شده است. همچنین هیبرید نمودن الیاف سبب بهبود قابل ملاحظه مقاومت‌ها شده است به طوری که هیبرید الیاف فولادی و پلی پروپیلن، سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی به میزان بیش از ۳۰ و ۲۰۰ درصد به ترتیب شده است. Alberti و دیگران [۳۳] خواص بتن بتن الیافی مسلح شده با الیاف پلی الفین و الیاف فولادی، را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند استفاده از الیاف پلی الفین موجب بهبود مقاومت‌های مکانیکی و دستیابی به شکل پذیری مناسب می‌شود. Han و دیگران [۳۴] تاثیر الیاف پلی الفین بر خواص بتن حاوی دوده سیلیس را مورد مطالعه قرار دادند. 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) ارائه کردند. Deng و دیگران [۳۵] نیز تاثیر الیاف ماکرو پلی الفین را بر خواص بتن مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهشگران اثرات مثبت الیاف پلی الفین بر رفتار انتشار ترک بتن، با افزایش درصد استفاده از الیاف را مشاهده کردند. Celik و دیگران [۳۶] در پژوهششان نقش الیاف مختلف را بر مقاومت حرارتی بتن ژئوپلیمری مطالعه کردند. این پژوهشگران از الیاف پلی الفین، بازالت، پلی امید و PVA با طول به ترتیب ۱۰، ۱۲، ۱۰ و ۸ میلی‌متری به صورت غیر هیبریدی، استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد استفاده از الیاف پلی الفین در درصد بهینه سبب افزایش ۴/۷ درصدی مقاومت فشاری، ۲۵ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد می‌شود. Momin و همکاران [۳۷] در پژوهشی در مورد بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه متاکائولن، نتیجه‌گیری کردند که استفاده از الیاف فلزی به میزان ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی متاکائولن، سبب افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود. همچنین با افزایش درصد الیاف میزان بهبود مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد به طوری که در حالت استفاده از ۲ درصد الیاف، مقاومت کششی تقریباً ۵۰ درصد نسبت به نمونه فاقد الیاف، افزایش می‌یابد. Zhao و همکاران [۳۸] نیز در پژوهشی تاثیر الیاف پلیمری پلی اکتال کوتاه (۳، ۶ و ۹ میلی‌متری) را بر خواص مکانیکی کامپوزیت ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن مورد مطالعه قرار داده و نتیجه‌گیری کردند استفاده از این الیاف در درصد بهینه (۰/۷۵) موجب افزایش ۲۴ درصدی مقاومت فشاری و ۵۰ درصدی مقاومت خمشی می‌شود.

در این مقاله از الیاف هیبریدی دوگانه کوپلیمری (پلی الفین) به میزان ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب معادل با ۰/۱۶، ۰/۲۱ و ۰/۲۶ درصد حجمی بتن، در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن استفاده شد. همچنین برای تقویت ناحیه تماس از نانوسیلیس استفاده شد. در ابتدا آزمایش‌های اولیه به منظور دستیابی به طرح اختلاط انجام شد سپس به منظور بررسی رفتار بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه متاکائولن، این الیاف در نسبت‌های مختلف و همراه با نانوسیلیس به طرح اختلاط بتن اضافه شد و نمونه‌ها ساخته و عمل آوری شدند. سپس از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای گرفته شد تا مواردی شامل: اثر نانوسیلیس و اثر الیاف هیبریدی و نانوسیلیس بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی و درصد بهینه الیاف، سنجش شوند.

۲- روش آزمایشگاهی

۲-۱- مواد

منبع اصلی ژئوپلیمریزاسیون در این تحقیق متاکائولن است. متاکائولن با نسبت SiO_2 به Al_2O_3 برابر با ۱/۷۱ از کارخانجات اصفهان و نانوسیلیس مورد استفاده نیز با اندازه ذرات ۴۰ نانومتر، از کارخانجات همدان، خریداری شد. آنالیز XRF این مواد در جدول ۱ ارائه شده است. محلول فعال کننده قلیایی در این پژوهش ترکیب هیدروکسید

پتاسیم (KOH) با خلوص ۹۰ درصد و سیلیکات سدیم مایع با نسبت SiO_2 به Na_2O برابر با ۳، بود. آنالیز شیمیایی این دو ماده در جدول ۲ ارائه شده است. شن و ماسه مصرفی در این آزمایش از معادن اطراف اصفهان تهیه شد. شن مصرفی از نوع شن شکسته بود پس از تهیه، توسط الک استاندارد ASTM دانه‌بندی و از شن در دو اندازه ۱۰ و ۷ میلی‌متری استفاده شد. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C127 [۳۹] از شن مصرفی، گرفته شد. این آزمایش از ماسه مصرفی نیز مطابق با استاندارد ASTM C128 [۴۰]، به عمل آمد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین ضریب نرمی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C136 [۴۱]، ۳/۰۱ و مقدار رد شده از الک شماره ۲۰۰، ۰/۷۱ درصد بود. آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر اصفهان بود. از روان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی با وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، به منظور بالا بردن کارایی بتن استفاده شد. در این تحقیق از نسل جدید الیاف کولیمیری یا همان الیاف پلیمری اصلاح شده (پلی‌الفین)، استفاده شد. این الیاف به صورت هیبریدی دوگانه و در دو اندازه ۶ و ۱۲ میلی‌متری ترکیب شده بودند. وزن مخصوص الیاف ۹۳۰ کیلوگرم در مترمکعب، مقاومت کششی ۵۷۰ مگاپاسکال بود. شکل ۲، الیاف و متاکائولن مصرفی در این مقاله را نشان می‌دهد.

جدول ۱- آنالیز XRF متاکائولن و نانوسیلیس

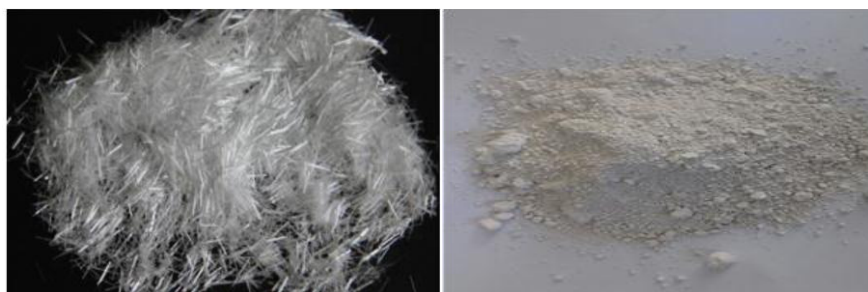
L.O.I	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Chemical analysis	Metakaolin
1.41	0.11	2.32	4.05	0.1	4.89	1.41	31.7	54	Result (%)	
TiO ₂	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	BaO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Chemical analysis	Nano-silica
0.01	0.04	0.02	0.05	0.04	0.41	0.05	1.2	98.16	Result (%)	

جدول ۲- آنالیز شیمیایی محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید پتاسیم

NaOH			Na ₂ SiO ₃ solution		
Chemical analysis	Result	Unit	Chemical analysis	Result	Unit
KOH	90.7	%	SiO ₂	29.50	%
K ₂ CO ₃	0.3	%	Na ₂ O	9.55	%
KCl	0.006	%	Water	60.95	%
Fe	2	ppm			
NaOH	1.2	%			
Appearance	White flake		Appearance	Clear liquid	

جدول ۳- آزمون وزن مخصوص و جذب آب شن و ماسه

جذب آب (%)	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (gr/cm ³)	ماده
1.3	2.62	شن
3.2	2.59	ماسه



شکل ۲- تصویر الیاف و متاکائولن مصرفی

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

در ابتدا به منظور تعیین میزان عیار متاکائولن و میزان محلول فعال‌کننده قلیایی، چندین طرح اختلاط تنظیم و آزمایش شد. پس از این مرحله طرح اختلاط اصلی بتن انتخاب شد. لازم به است در مورد آب اضافه در طرح اختلاط، ۳ نمونه بتن ساخته شد که یکی بدون آب اضافه بود و نمونه‌های دیگر با ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در مترمکعب آب اضافه در ترکیب خود ساخته شدند (جدول ۴). از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۲۸ روزه گرفته شد.

جدول ۴ - طرح‌های اختلاط بتن

نام طرح	متاکائولن	KOH	سیلیکات سدیم	شن	ماسه	آب اضافه	مقیاس
M	350	140	210	840	840	0	kg/m ³
M30	350	140	210	840	840	30	kg/m ³
M60	350	140	210	840	840	60	kg/m ³

بعد از مشخص شدن نتایج مرحله قبل، طرح M به عنوان طرح نهایی اختلاط بتن برای ساخت نمونه‌های الیافی، انتخاب شد. طرح‌های اختلاط بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است در مورد میزان نانوسیلیس در طرح اختلاط، پس از انجام آزمایش‌های اولیه و نتایج تحقیقات قبلی مشخص شد که استفاده از نانوسیلیس به میزان ۲ درصد وزنی متاکائولن، سبب دستیابی به بیشترین بهبود در مقاومت کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می‌شود. در نتیجه در این پژوهش از نانوسیلیس به میزان ۲ درصد وزنی متاکائولن به منظور بررسی اثر همزمان نانوسیلیس و الیاف مصرفی، استفاده شد.

جدول ۵ - طرح‌های اختلاط بتن

نام طرح	متاکائولن	نانوسیلیس	الیاف	KOH	سیلیکات سدیم	شن	ماسه	آب اضافه	مقیاس
M	350	0	0	140	210	840	840	30	kg/m ³
MNS2	343	7	0	140	210	840	840	30	kg/m ³
M2-1.5	343	7	1.5	140	210	840	840	30	kg/m ³
M2-2	343	7	2	140	210	840	840	30	kg/m ³
M2-2.5	343	7	2.5	140	210	840	840	30	kg/m ³

- طرح M نمونه شاهد است و MNS2 همان طرح M (شاهد) است که به منظور بررسی اثر نانوسیلیس بر مقاومت کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری، به میزان ۲ درصد وزنی متاکائولن، نانوسیلیس به آن اضافه شده است همچنین میزان نانوسیلیس در طرح‌های بتن الیافی ۲ درصد وزنی متاکائولن است.
 - غلظت محلول KOH ۱۲ مول، نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول KOH در تمامی طرح‌ها برابر با ۱/۵ و نسبت وزنی محلول قلیایی به متاکائولن ۱ است.
 - نسبت شن به ماسه برابر ۱ و نسبت شن ۷ به ۱۰ میلی‌متری برابر با ۱، نسبت متاکائولن به سنگدانه ۲۱ درصد و نسبت سنگدانه به وزن کل بتن ۷۵ درصد است.
- برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا یک روز قبل از آزمایش محلول KOH با غلظت ۱۲ مولار ساخته شد. سپس محلول فعال‌کننده قلیایی شامل محلول KOH و سیلیکات سدیم مایع، مطابق با طرح اختلاط ترکیب شدند و به محلول بدست آمده ۲۴ ساعت زمان داده شد تا خنک شود. در روز آزمایش ابتدا مواد خشک شامل: متاکائولن، شن، ماسه و الیاف به مدت ۲ دقیقه به صورت خشک در میکسر پرتابی بتن، میکس شدند. سپس محلول فعال‌کننده قلیایی و آب اضافه مطابق با طرح‌های اختلاط به مخلوط اضافه شد و بتن به مدت ۳ دقیقه میکس شد. پس از

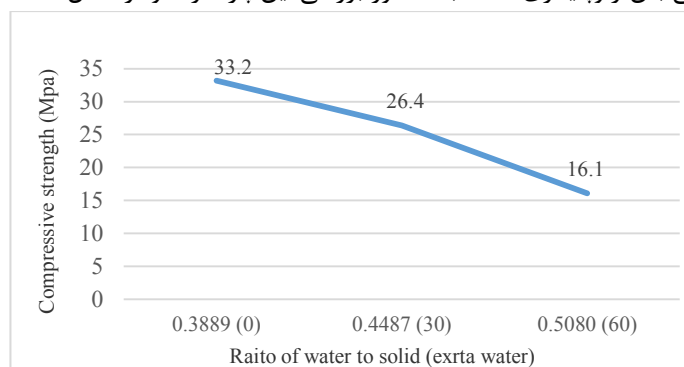
پایان مرحله میکس بتن، نمونه‌های بتن قالب‌بندی و متراکم شدند. برای متراکم کردن نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز ویبره، ویبره شدند. نمونه‌ها در آون و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت کیورینگ شدند. پس از پایان کیورینگ نمونه‌ها از آون خارج و در دمای محیط نگهداری شدند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری، کششی و خمشی و ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد. لازم به ذکر است ابعاد نمونه‌های فشاری ۱۰×۱۰×۱۰، خمشی ۱۰×۱۰×۵۰ و ابعاد نمونه‌های کششی ۲۰×۱۰ سانتی‌متر و به صورت سیلندری بود.

۳-۲- آزمایش‌های بتن

آزمایش‌های بتن شامل: آزمون مقاومت فشاری بر اساس BS1881: Part116 [۴۲]، آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلین) بتن بر اساس ASTM C496 [۴۳] و آزمایش خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM C1018 [۴۴]، بود.

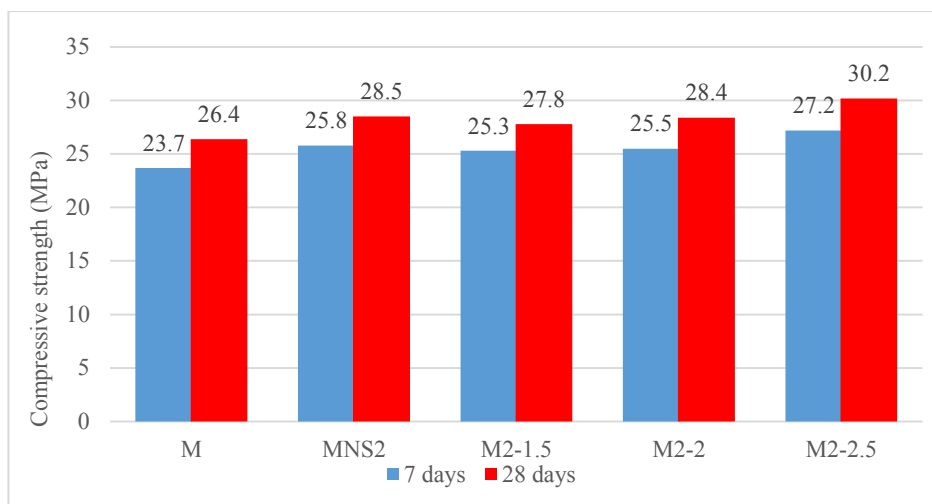
۳- نتایج و بحث

افزودن آب اضافه به بتن موجب کاهش قابل ملاحظه مقاومت فشاری بتن می‌شود به طوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه در طرح‌هایی که ۰، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در مترمکعب آب اضافه داشتند به ترتیب برابر با ۳۳/۲، ۲۶/۴ و ۱۶/۱ مگاپاسکال سنجش شد. این موضوع نشان‌دهنده میزان تاثیر پارامتر نسبت آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون شامل: متاکائولن، مواد خشک موجود در محلول KOH و مواد خشک موجود در محلول سیلیکات سدیم، بر مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری است. به منظور بررسی این پارامتر نمودار شکل ۳ تنظیم شد.



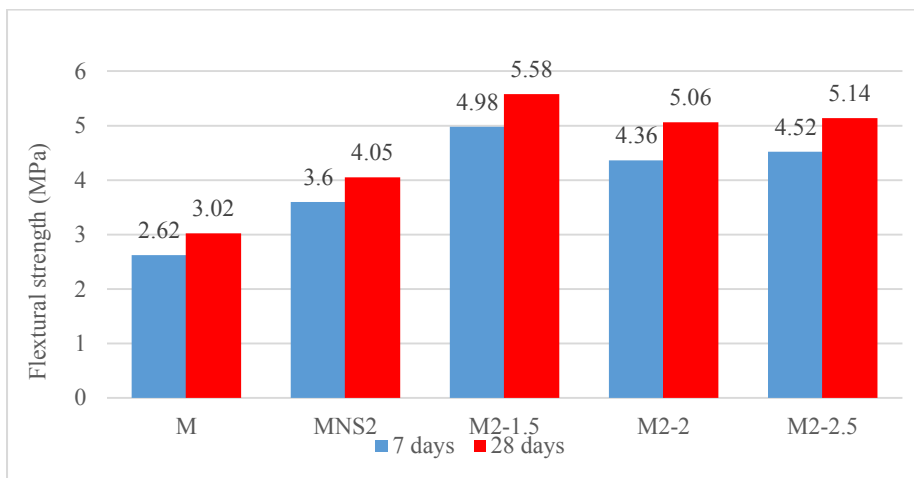
شکل ۳- تاثیر نسبت آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

نسبت آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون برای طرح‌های با آب اضافه به میزان ۰، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در مترمکعب، به ترتیب برابر ۰/۳۸۸۹، ۰/۴۴۸۷ و ۰/۵۰۸۰ است. با اضافه کردن آب به مخلوط بتن به میزان ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در مترمکعب مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب به میزان تقریباً ۲۰ و ۵۱ درصد کاهش یافته است که این میزان قابل توجهی است. این موضوع در تحقیقات قبلی ما [۴۵] نیز دیده شد. همچنین Hardjito و همکاران [۱۳] نیز در جریان تحقیقات خود نتایج مشابهی گرفتند. از طرف دیگر، اگرچه در حالتی که آب‌اضافه به طرح اختلاط اضافه نمی‌شود مقاومت فشاری بالاتری ارائه می‌کند. اما این طرح اختلاط دارای مشکلات اجرایی است و بتن کارایی پایینی دارد. در نتیجه میزان آب اضافه ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب انتخاب شد که بتن با حداقل کاهش مقاومت فشاری، کارایی مناسب را داشته باشد. نتایج بخش دوم که به منظور بررسی نقش الیاف و نانوسیلیس بر مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن در شکل‌های ۴-۶ ارائه شده است.



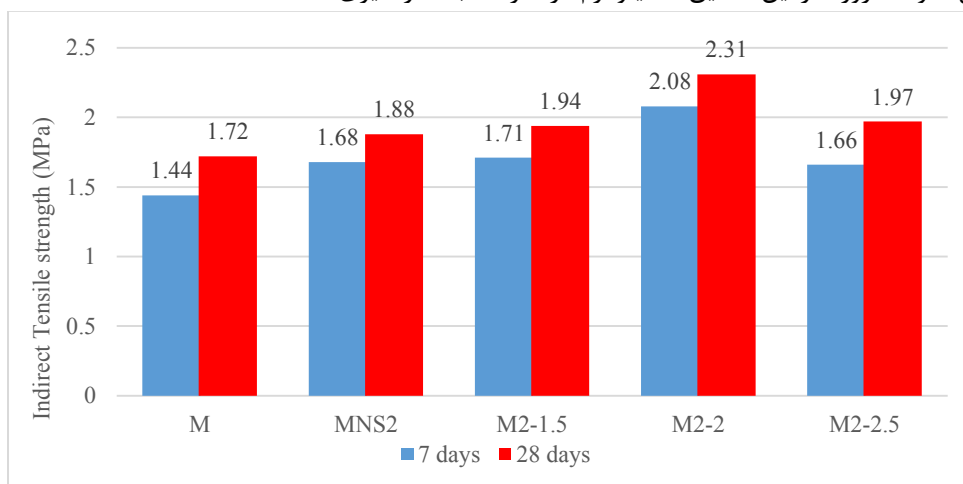
شکل ۴- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه طرح های بتن ژئوپلیمری الیافی و نمونه های شاهد

با توجه به نتایج شکل ۴، کمترین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه مربوط به نمونه شاهد و بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه طرح M2-2.5 بود. افزودن ۲ درصد نانو سیلیس سبب افزایش تقریباً ۹ درصدی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری شد. با افزودن الیاف به میزان ۱/۵ کیلوگرم در مترمکعب مقاومت فشاری اندکی نسبت به طرح MNS2 کاهش یافت اما کماکان مقاومت فشاری این نمونه نسبت به نمونه شاهد، بیشتر است. با افزایش میزان الیاف به ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافت. به طوری که در طرح M2-2.5، بیشترین مقاومت فشاری سنجش شد. مقاومت فشاری این نمونه تقریباً ۱۴ درصد نسبت به نمونه شاهد، افزایش یافت که می‌تواند به هم افزایی اثر الیاف هیبریدی و نانوسیلیس در تقویت ناحیه تماس و بهبود و تراکم ریز ساختار ماتریس ژئوپلیمری، مربوط باشد. با توجه به شکل ۵ و بررسی مقاومت خمشی نمونه‌ها مشاهده می‌شود، مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه نمونه شاهد (M) که در ترکیب خود الیاف و نانوسیلیس ندارد به ترتیب برابر با ۲/۶۲ و ۳/۰۲ مگاپاسکال بود. طرح MNS2 که در ترکیب خود الیاف ندارد اما به میزان ۲ درصد وزنی متاکائولن، نانوسیلیس دارد مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه برابر با ۳/۶ و ۴/۰۵ مگاپاسکال را ارائه داد. بیشترین مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به طرح M2-1.5 که حاوی ۲ درصد نانوسیلیس و ۱/۵ کیلوگرم در مترمکعب الیاف است و کمترین مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به طرح شاهد است. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن ۲ درصد نانوسیلیس سبب افزایش مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن به میزان تقریباً ۳۷ و ۳۵ درصد شده است. همچنین اضافه کردن الیاف هیبریدی و نانوسیلیس به صورت همزمان، موجب افزایش قابل ملاحظه مقاومت خمشی نمونه های بتن ژئوپلیمری الیافی نسبت به نمونه شاهد شده است. استفاده از ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب از الیاف و ۲ درصد نانوسیلیس سبب افزایش مقاومت خمشی ۷ روزه به ترتیب تقریباً به میزان ۹۰، ۶۶ و ۷۳ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است. این افزایش در مقاومت خمشی ۲۸ روزه تقریباً به میزان ۸۵، ۶۸ و ۷۱ درصد است. این موضوع ممکن است مربوط به هم‌افزایی اثر الیاف در بهبود مقاومت خمشی و اثر نانوسیلیس در تقویت ناحیه تماس، باشد. میزان بهینه الیاف هیبریدی در مقاومت خمشی ۱/۵ کیلوگرم در مترمکعب سنجش شد.



شکل ۵- مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه طرح های بتن ژئوپلیمری الیافی و نمونه های شاهد

نتایج مربوط به آزمایش مقاومت کششی در شکل ۶ ارائه شده است. مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه شاهد (M) که در ترکیب خود الیاف و نانوسیلیس ندارد به ترتیب برابر با ۱/۱۴ و ۱/۷۲ مگاپاسکال بود. مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه های طرح MNS2 که بدون الیاف و حاوی ۲ درصد نانوسیلیس است به ترتیب برابر با ۱/۶۸ و ۱/۸۸ مگاپاسکال اندازه گیری شد. بیشترین مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به طرح M2-2 است که دارای ۲ درصد نانوسیلیس و ۲ کیلوگرم در مترمکعب الیاف هیبریدی و کمترین مقاومت مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به نمونه شاهد است. نتایج شکل ۷ نشان داد که همانند مقاومت خمشی، استفاده از الیاف و نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت کششی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می شود. اضافه کردن نانوسیلیس به میزان ۲ درصد به طرح اختلاط بتن سبب افزایش مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری به میزان ۱۷ و ۱۰ درصد نسبت به نمونه شاهد، شده است. مقاومت کششی ۷ روزه نمونه های بتن ژئوپلیمری الیافی که در طرح اختلاط خود میزان ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب الیاف هیبریدی و ۲ درصد نانوسیلیس دارند، به ترتیب تقریباً ۲۰، ۴۴ و ۱۶ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. این افزایش در مقاومت کششی ۲۸ روزه به ترتیب تقریباً ۱۳، ۳۵ و ۱۵ درصد نسبت به نمونه شاهد بود. افزایش مقاومت کششی نیز همانند مقاومت خمشی می تواند مربوط به هم افزایی اثر الیاف در بهبود مقاومت کششی و اثر نانوسیلیس در تقویت ناحیه تماس باشد. درصد بهینه الیاف برای بیشترین تاثیر گذاری بر مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه در این تحقیق ۲ کیلوگرم در مترمکعب اندازه گیری شد.



شکل ۶- مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه طرح های بتن ژئوپلیمری الیافی و شاهد

در خصوص جمع‌بندی این نتایج می‌توان گفت که استفاده از نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می‌شود. این مساله می‌تواند مربوط به نقش شیمیایی و همچنین اثر فیزیکی نانوسیلیس در پر کردن حفره‌های ریز و میکرو ترک‌های بتن و تقویت ناحیه تماس باشد که موجب افزایش مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شده است [۲۶-۲۸]. از سوی دیگر، اثر نانوسیلیس در افزایش مقاومت خمشی بیشتر از اثر گذاری این ماده در افزایش مقاومت کششی و فشاری است. قنبری و همکاران [۴۶] نیز در جریان تحقیقات خود بر روی خمیر سیمان ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، نتایج نشان داد که افزودن نانوسیلیس به میزان ۶ درصد، موجب افزایش استحکام فشاری به میزان ۳۴ درصد و خمشی به میزان ۸۰ درصد می‌شود. صدر ممتازی و همکاران [۲۲] نیز در تحقیقات خود در بتن گزارش کردند که استفاده از نانوسیلیس تا ۴ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن می‌شود. اما افزایش در مقاومت خمشی و کششی نسبت به مقاومت فشاری بیشتر است.

استفاده از الیاف و نانوسیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی شد. نتایج داد تاثیر الیاف پلی الفین هیبریدی در افزایش مقاومت فشاری کمتر از تاثیر این الیاف در مقاومت کششی و خمشی است. در واقع در خصوص الیاف می‌توان گفت که 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 الیاف، اندازه الیاف، میزان الیاف مصرفی و غیره است. افزودن الیاف پلیمری مانند پلی پروپیلن یا پلی الفین، سبب تقویت و بهبود ماتریس خمیر سیمان ژئوپلیمر، جلوگیری از انتشار میکرو ترک‌ها و تغییر الگوی انتشار ترک‌ها می‌شود [۴۷]. در حالت کلی ساختار ژئوپلیمرها شامل: ژل شکل گرفته ژئوپلیمری، ذرات باقی‌مانده و واکنش نداده‌ی منبع ژئوپلیمریزاسیون و حفره‌ها و خلل و فرج مختلف است [۴۷-۴۹]. این الیاف می‌توانند از طریق محصور کردن ماتریس ژئوپلیمر با دو سر خود، یک اثر پل مانند روی ترک‌ها و سوراخ‌ها داشته باشند که موجب افزایش سختی و مقاومت ماتریس ژئوپلیمر می‌شود [۴۷]. در نتیجه بتن ژئوپلیمری الیافی مقاومت کششی و خمشی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون الیاف را ارائه می‌دهد. همچنین استفاده همزمان از نانوسیلیس و الیاف به علت هم‌افزایی اثر نانوسیلیس و الیاف، باعث تقویت مقاومت خمشی و کششی بتن می‌شود. پس از اعمال بار به بتن و در لحظه ترک خوردگی، تمام بار به ناگهان به الیاف منتقل می‌شود. سپس با افزایش بار روی بتن، الیاف تنش اضافی را از طریق چسبندگی به ناحیه تماس، به ماتریس بتن منتقل می‌کند [۲۲]. در نتیجه با تقویت ناحیه تماس توسط نانوسیلیس الیاف موجود نیز می‌توانند عملکرد بهتری ارائه کنند. در خصوص درصد الیاف نیز تحقیقات مختلفی توسط پژوهشگران انجام شده است و درصدهای بهینه مختلفی برای انواع مختلف ارائه شده است. در خصوص الیاف پلیمری استفاده از این الیاف در درصد های بیش از درصد بهینه، به علت پدیده جمع‌شدگی الیاف موجب کاهش مقاومت خمشی و کششی نسبت به درصد بهینه می‌شود [۲۲]. Zhang و همکاران [۴۷] با افزودن الیاف پلی پروپیلن به میزان ۰/۲۵ درصد حجمی، شاهد افزایش مقاومت خمشی بتن ژئوپلیمری به میزان ۵۴ درصد بودند. صدر ممتازی و همکاران [۲۲] نیز با افزودن الیاف پلی پروپیلن به میزان ۰/۲ درصد حجمی و نانوسیلیس، شاهد افزایش مقاومت کششی و خمشی به میزان تقریباً ۵۷ و ۲۸ درصد بودند. همچنین آنها درصد بهینه این الیاف را ۰/۲ درصد حجمی گزارش کرده‌اند. Celik و دیگران [۳۶] نیز درصد بهینه الیاف را برای افزایش مقاومت فشاری ۰/۸ و برای مقاومت خمشی ۱/۲ درصد حجمی بتن گزارش کردند.

۴- نتیجه‌گیری

۱- نسبت آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون از نسبت‌های تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن است. میزان بهینه این نسبت در این مقاله ۰/۳۸۸۹ اندازه‌گیری شد و با افزایش این نسبت مقاومت فشاری به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۲- اضافه کردن نانوسیلیس به میزان ۲ درصد وزنی متاکائولن و به صورت جایگزینی در ترکیب بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، سبب افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۸ و ۹ درصد، مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۱۷ و ۱۰ درصد و همچنین سبب افزایش مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۳۷ و ۳۵ درصد، نسبت به نمونه بدون نانوسیلیس می‌شود. اگرچه نانوسیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن می‌شود اما در مقاومت خمشی تاثیرگذاری بیشتری دارد.

۳- اضافه کردن ۲ درصد نانوسیلیس و الیاف هیبریدی در اندازه‌های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب، سبب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن به میزان ۵، ۷ و ۱۴ درصد، نسبت به نمونه شاهد می‌شود. میزان بهینه استفاده از این الیاف برای تقویت مقاومت خمشی ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب است. اما می‌توان گفت الیاف تاثیر قابل ملاحظه ای در افزایش مقاومت فشاری ندارد.

۴- اضافه کردن ۲ درصد نانوسیلیس و الیاف هیبریدی در اندازه‌های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب، سبب افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن به میزان ۸۵، ۶۸ و ۷۱ درصد، نسبت به نمونه شاهد می‌شود. میزان بهینه استفاده از این الیاف برای تقویت مقاومت خمشی ۱/۵ کیلوگرم در مترمکعب است.

۵- اضافه کردن ۲ درصد نانوسیلیس و الیاف دوگانه کویلیمری در اندازه‌های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب، سبب افزایش مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن به میزان ۱۳، ۳۵ و ۱۵ درصد، نسبت به نمونه شاهد می‌شود. میزان بهینه استفاده از این الیاف برای تقویت مقاومت کششی ۲ کیلوگرم در مترمکعب است.

قدردانی

این تحقیق در آزمایشگاه شرکت دانش بنیان اکسیر صنعت سیمان سبز انجام گرفته است و بدین وسیله از زحمات مدیریت و همکاران شرکت تقدیر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] Malhotra VM. (1999). Making concrete 'greener' with fly ash. *ACI Concrete International*, 21:61-66.
- [2] Davidovits J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World resource review*, 6:263-278.
- [3] Malhotra VM. (2006). Reducing CO2 Emissions. *ACI Concrete International*, 28:42-45.
- [4] McCaffrey R. (2002). Climate Change and the Cement Industry. *Global Cement and Lime Magazine, (Environmental Special Issue):15-19.*
- [5] Alzeer M, MacKenzie K. (2013). Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (*phormium tenax*). *Applied Clay Science*, 75-76:148-152.
- [6] Barbosa VFF, MacKenzie KJD, Thaumaturgo C. (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2:309-317.
- [7] Davidovits J. (1993). Geopolymer cements to minimise carbon-dioxide greenhouse-warming. *Ceramic Transactions*, 37:165-182.
- [8] Davidovits J. (1987). Ancient and modern concretes: what is the real difference?, *Concrete International*, 9:23-29.
- [9] van Jaarsveld JGS, van Deventer JSJ, Lukey GC. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89:63-73.
- [10] DeSilva P, Sagoe-Crenstil K, Sirivivatnanon V. (2007). Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 37:512-518.
- [11] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JSJ. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42:2917-2933.
- [12] Xu H, van Deventer JSJ. (2000). The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59:247-266.

- [13] Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. (2004). On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, 101:467-472.
- [14] Duxson P, Provis JL, Lukey GC, van Deventer JSJ. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*, 37:1590-1597.
- [15] Amnadnua K, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C. (2013). Strength, water permeability, and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash. *Materials & Design*, 51:894-901.
- [16] Lee WKW, van Deventer JSJ. (2002). The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211:115-126.
- [17] Cheng TW, Chiu JP. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16:205-210.
- [18] Sakkas K, Pnias D, Nomikos PP, Sofianos AI. (2014). Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43:148-156.
- [19] Sarker PK, 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.
- [20] Palomo A, Blanco-Varela MT, Granizo ML, Puertas F, Vazquez T, Grutzeck MW. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 29:997-1004.
- [21] Zhang M, Guo H, El-Korchi T, Zhang G, Tao M. (2013). Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 47:1468-1478.
- [22] صدر ممتازی، ع، کهنی خشکیجاری، ر. و لطفی عمران، ر.، (۱۳۹۴)، خواص مهندسی و دوام بتن خود تراکم حاوی ذرات نانو سیلیس با رویکرد دستیابی به درصدهای بهینه الیاف، مجله علمی پژوهشی تحقیقات بتن، ۸ (۲): ۳۴-۱۹.
- [23] Naaman AE, Wongtanakitcharoen T, Hauser G. (2005). Influence of Different Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete. *ACI Materials Journal*, 102:49-58.
- [24] ACI Committee 544, *Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete*, ACI Materials Journal, 1996.
- [25] Soroushian P. (1986). Secondary reinforcement adding cellulose fibers. *ACI Concrete International*: 28-38.
- [26] Qing Y, Zenan Z, Deyu K, Rongshen C. (2007). Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*, 21:539-545.
- [27] Collepardi M, Ogoumah Olagot J, Troli R, Simonelli F, Collepardi S. (2007). Combination of silica fume, Fly Ash and Amorphous Nano Silicain Super plasticized High Performance Concretes, *Enco*. In: *Engineering Concrete*. Ponzano Veneto, Italy.
- [28] Li G. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 34:1043-1049.
- [29] Nili M, Afroughsabet V. (2010). Combined Effect of Silica Fume and Steel Fibers on the Impact Resistance and Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 37:879-886.
- [30] Vandewalle L. (2008). Hybrid Fiber Reinforced Concrete. In: *Int'l Conference Concrete: Construction's Sustainable Option*. Dundee, UK, 11-22.
- [31] Gao X, Yu QL, Yu R, Brouwers HJH. (2017). Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer composites. *Materials and Structures*, 50:165.

- [32] Asrani NP, Murali G, Parthiban K, Surya K, Prakash A, Rathika K, Chandru U. (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 MG, Enfedaque A, Gálvez JC, Cánovas MF, Osorio IR. (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] Celik A, Yilmaz K, Canpolat O, Al-mashhadani MM, Aygörmmez 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.
- [37] Momin AK, and Sawant RM. (2017). Evaluation of Split Tensile Strength of Fibre Reinforced Metakaolin Based Geopolymer Concrete. *Journal of Geotechnical Studies 2 (2):1-9*.
- [38] Zhao W, Wang Y, Wang x, and Wu D. (2016). Fabrication, mechanical performance and tribological behaviors of polyacetal-fiber-reinforced metakaolin-based geopolymeric composites. *Ceramics International 42 (5):6329-6341*.
- [39] ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [40] ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [41] ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [42] British Standards Institution, Testing Concrete: Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cubes, BS1881: Part116: 1983, London.
- [43] ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [44] ASTM C1018-97, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) (Withdrawn 2006), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.
- [45] مرادی خو، ا. و اسپرهم، ع. (۱۳۹۷). مطالعه آزمایشگاهی نقش محلول‌های قلیایی مختلف و کیورینگ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه کوره آهن‌گدازی، کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران.
- [46] قنبری، م، هادیان، ع. و نوربخش، ا. (۱۳۹۶). اثر افزودن نانو سیلیس بر خواص ژئوپلیمر های پایه متاکائولن، مجله علمی پژوهشی علم و مهندسی سرامیک، ۶ (۱): ۹۵-۸۵.
- [47] 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*, 16:49-52.
- [48] Hua-jun Z, Xiao Y, Zu-hua Z. (2007). Optimum activated temperature of kaolin. *JOURNAL OF CENTRAL SOUTH UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*, 14:131-134.
- [49] 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*, 41:2787-2794.