



## مطالعه آزمایشگاهی نقش الیاف هیبریدی چهارگانه کopolymerی و نانوسیلیس بر مقاومت های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

امیربهادر مرادی خوا، میرحمید حسینی<sup>۲</sup>، اعظم موسوی کاشی<sup>۳</sup>، فرشته امامی<sup>۴</sup> و علیرضا اسپرهم<sup>۵</sup>.

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.

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

آدرس پست الکترونیکی مولف رابط: [Mirhamid.hosseini@gmail.com](mailto:Mirhamid.hosseini@gmail.com)

### خلاصه

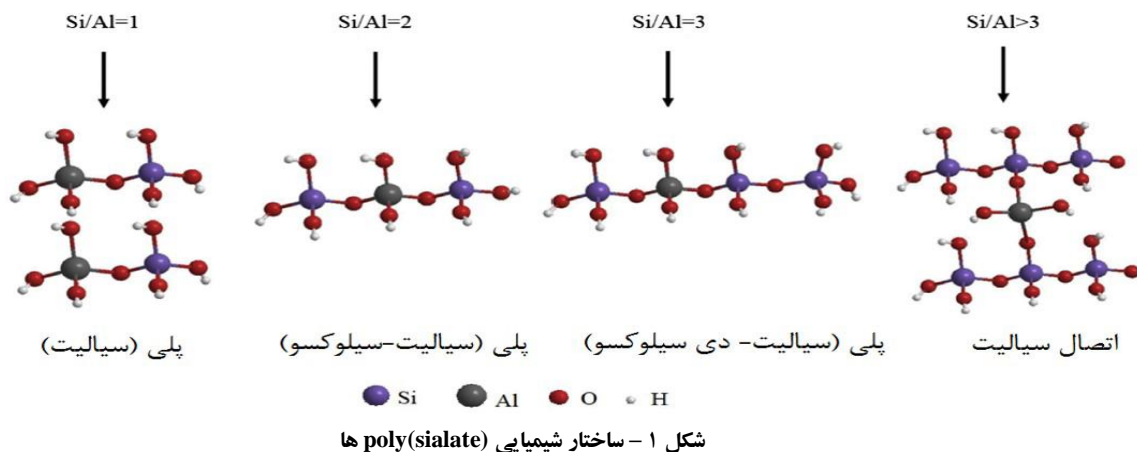
بتن ژئوپلیمری در سال های اخیر به عنوان یک جایگزین سبز برای بتن پرتلند مطرح شده است. در این مقاله اثر الیاف هیبریدی چهارگانه کopolymerی و نانوسیلیس بر مقاومت های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. ابتدا آزمایش های اولیه به منظور رسیدن به طرح اختلاط بهینه انجام شد سپس به منظور بررسی رفتار بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه متاکائولن الیاف در نسبت های مختلف و همراه با نانوسیلیس به طرح اختلاط بتن اضافه و نمونه ها ساخته و عمل آوری شدند. از نمونه ها آزمون مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه ای گرفته شد.

کلمات کلیدی: ژئوپلیمر، بتن ژئوپلیمری الیافی، الیاف هیبریدی، متاکائولن، نانوسیلیس.

### ۱. مقدمه

تغییرات اقلیمی ناشی از پدیده گرمایش جهانی به یکی از جدی ترین نگرانی های محیط زیستی در سراسر جهان تبدیل شده است. علت اصلی پدیده گرمایش جهانی انتشار گازهای گلخانه ای است و در میان گازهای گلخانه ای دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) با میزان انتشار ۶۵ درصد، بیشترین نقش را در پدیده گرمایش جهانی دارد [1,2]. فرایند تولید سیمان پرتلند معمولی (OPC) بعنوان یکی از منابع انتشار گاز  $CO_2$  و گرمایش جهانی شناخته می شود [3,4]. زیرا برای تولید ۱ تن OPC تقریباً ۱ تن  $CO_2$  تولید می شود [5,6]. همچنین تولید OPC عامل انتشار ۷ تا ۱۰ درصد از انتشار جهانی  $CO_2$  است [3,7,8]. از این رو نیاز به استفاده از جایگزین برای OPC ضروری به نظر می رسد. در سال های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط زیست، به عنوان جایگزینی برای OPC مطرح شده است که می تواند منجر به کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید OPC

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]. وی همچنین استفاده از نام poly(sialate) را برای شناسایی شیمیایی ژئوپلیمرها پیشنهاد کرد که poly پیشوند پلیمری و sialate نیز مخفف زنجیره silicon-oxo-aluminate است [11-14]. در شکل شماره ۱ انواع مختلف poly(sialate) نشان داده شده است.



ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیر آلی هستند که از ترکیب منبع اولیه ژئوپلیمرزاسیون (Raw material) غنی از سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) و آلومینا ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) با یک محلول قلیایی فعال کننده حاصل می شوند [15]. ژئوپلیمرزاسیون واکنش سریع شیمیایی در شرایط قلیایی بین میترالهای Si و Al است که باعث تشکیل زنجیره‌های سه بعدی پلیمری Si-O-Al-O می شود [16]. Raw material بسته به خواص مورد نیاز، هزینه و در دسترس بودن می تواند طبیعی مانند زئولیت، صنعتی مانند متاکائولن و یا ضایعاتی مانند فلی اش یا سرباره کوره آهن گدازی باشد. یکی از انواع Raw material متاکائولن است. متاکائولن از کلسینه کردن کائولن در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد به دست می آید. در این مقاله از متاکائولن به عنوان Raw material استفاده شد. از نقطه نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن های ژئوپلیمری خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بالاتری نسبت به بتن های معمولی دارند که از جمله آنها می توان مقاومت فشاری، خمشی و کششی بالا [17-19]، مقاومت در آتش سوزی و حرارت بالا [20-23]، نفوذپذیری کم و مقاومت در برابر حمله نمک ها و اسیدها [17,24] و خزش پایین [25] اشاره کرد.

بتن در کنار مزایا دارای معایبی نیز هست که یکی از مهمترین آنها مقاومت کششی پایین است لذا به همین دلیل دارای شکل پذیری کم و تردی زیاد می باشد. از این رو برای رفع این مشکل در چند دهه اخیر از رشته های الیاف که به صورت یکنواخت در حجم بتن پراکنده می شوند، استفاده می شود [26]. استفاده از الیاف در مواد ماتریس شکننده دارای سابقه ای 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، بر می گردد [27]. همچنین از موی دم اسب نیز برای تقویت ملات بنایی و گچ استفاده شده است [28]. استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی به عنوان یک گام موثر در جلوگیری از انتشار ریز ترک ها و ترک ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می شود [29]. نانوسیلیس شامل مجموعه ای از ذرات کوچک  $\text{SiO}_2$  است که از طریق پیوندهای شیمیایی به یکدیگر متصل شده و ذرات بزرگ تری را تشکیل می دهند. مزیت اصلی نانوسیلیس در مقایسه با سیلیس، سطح ویژه بالای این ماده است که باعث می شود در بستر مورد استفاده، برهمکنش بیشتری از خود نشان دهد. نانوسیلیس کاربردهای متنوعی در صنعت دارد که یکی از موارد استفاده آن در بتن به عنوان پوزولان و پرکننده است. ناحیه تماس که به اسامی مختلفی مانند لایه مرزی یا منطقه انتقالی نامیده می شود، ناحیه مرزی است که بین خمیر سیمان و سطح سنگدانه، الیاف و یا میلگرد پدید می آید و نقش مهمی در نفوذپذیری، دوام و مقاومت بتن دارد. ناحیه تماس دارای میکرو ساختاری متفاوت باخمیر سیمان بوده و دارای تخلخل و ریزترک های بیشتری است. ضخامت ناحیه تماس تابع نوع الیاف، نوع سیمان، نوع پوزولان مصرفی و غیره می باشد [26]. استفاده از نانو ذرات می تواند در پر کردن تخلخل های بسیار ریز خمیر سیمان، تقویت ناحیه تماس و افزایش مقاومت های کششی و خمشی و به خصوص دوام بتن مؤثر باشد [30-32]. Nili و همکاران [33] در آزمایش های خود تاثیر نرمة سیلیس (Silica

(fume) و الیاف فلزی را بر مقاومت ضربه‌ای و عملکرد بتن بررسی کردند. نتایج آزمایشات نشان داد که افزودن الیاف فولادی، مقاومت کششی و خمشی بتن را بهبود می‌دهد. همچنین با افزودن الیاف فولادی به نمونه‌های حاوی نرمه سیلیس، شکل پذیری و مقاومت ضربه‌ای بتن بطور چشمگیری افزایش می‌یابد. Vandewalle [34] نیز آزمایش‌هایی بر روی بتن مسلح شده با 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. در انجام آزمایش‌ها از تیرهایی به طول ۵۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر و عرض و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. میزان الیاف مصرفی در بتن از ۰ تا ۹۰ کیلوگرم در مترمکعب متغیر بوده و این الیاف 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 میلی‌متر در مناطق با بازشدگی ترک‌های کوچک بسیار موثر هستند. در حالی که الیاف بلند ۳۵ میلی‌متری شکل‌پذیری خوبی را در ترک‌های بزرگ و عریض تامین می‌کنند. Gao و همکاران [35] در تحقیقات خود در مورد بتن ژئوپلیمری الیافی، از الیاف هیبریدی فلزی 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.

امروزه از الیاف به صورت گسترده‌ای جهت بهبود خواص در انواع بتن استفاده می‌شود. این الیاف دارای طیف وسیعی از الیاف فلزی تا الیاف پلیمری هستند. همچنین در سال‌های اخیر استفاده از الیاف هیبریدی یا دوگانه و چندگانه در بتن به منظور افزایش خواص مورد نظر بتن‌های الیافی، استفاده می‌شود. در این مقاله از الیاف هیبریدی چهارگانه با نام تجاری کورتا در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن استفاده شد. همچنین برای تقویت ناحیه تماس از نانوسیلیس که از محصولات فناوری نانو است، استفاده شد. در ابتدا به منظور دستیابی به طرح اختلاط بهینه، آزمایش‌های اولیه انجام شد. پس از رسیدن به طرح اختلاط نهایی بتن به منظور بررسی مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه متاکائولن، الیاف در نسبت‌های مختلف، همراه با نانوسیلیس به طرح اختلاط بتن اضافه شد و نمونه‌ها ساخته و عمل‌آوری شدند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای گرفته شد و اثر الیاف هیبریدی و نانوسیلیس بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه متاکائولن و همچنین درصد بهینه الیاف مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲. مواد

منبع اولیه ژئوپلیمریزاسیون در این تحقیق متاکائولن است. متاکائولن با نسبت  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Al}_2\text{O}_3$  برابر با ۱/۷۱ از شرکت دانش بنیان زیست‌فناور خریداری شد و آنالیز XRF آن در جدول شماره ۱ ارائه و در شکل ۲ تصویر الیاف و متاکائولن مصرفی نمایش داده شده است.

جدول ۱- آنالیز XRF متاکائولن

L.O.I	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ZrO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
1.41	0.11	2.32	4.05	0.1	4.89	1.41	31.7	54



شکل ۲- تصویر متاکائولن و الیاف چهارگانه مصرفی در این مقاله

الیاف مورد استفاده در این مقاله، الیاف کورتا بلند چهارگانه (KORRTA Blend) بود که شامل الیاف مش شبکه ای ماکرو و میکرو، الیاف پیچیده شده، الیاف تک رشته ای با مدول و مقاومت بالا و از جنس پلی الین و پلی پروپیلن اصلاح شده نانویی بود. اندازه الیاف بین ۱۹ و ۳۹ میلی متر و وزن مخصوص الیاف ۹۱۰ تا ۹۴۰ کیلوگرم در مترمکعب و مقاومت کششی ۵۷۰ تا ۹۰۰ مگاپاسکال بود. الیاف از شرکت نانونخ سیرجان و به صورت نسخه پیچی شده برای افزایش مقاومت کششی و خمشی تهیه شد. هیدروکسید سدیم (NaOH) صنعتی مایع با خلوص ۹۸ درصد و غلظت ۵۰ درصد معادل با ۱۸/۷۵ مولار با وزن مخصوص ۱/۵ از شرکت شیمی پارس اصفهان خریداری شد. محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Na}_2\text{O}$  برابر با ۳ از شرکت نفیس سیلیکات اصفهان خریداری شد که آنالیز آن در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سیلیکات سدیم

عنوان	نتیجه	واحد
$\text{Na}_2\text{O}$	9.55	%
$\text{SiO}_2$	29.50	%
ریشو مدل	3.09	-
خلوص سیلیکات سدیم	39.05	%
میزان آب	60.95	%

شن و ماسه مصرفی در این تحقیق از نوع شن شکسته بود که از معادن شرکت تیراژ بتن در اطراف اصفهان تهیه شد سپس توسط الک استاندارد ASTM دانه بندی شد و از شن در دو اندازه ۷ و ۱۰ میلی متری استفاده شد. ضریب نرمی ماسه  $3/2913$  اندازه گیری شد. همچنین در این تحقیق ضریب SE یا ارزش ماسه ای ماسه مورد مصرف نیز  $73$  اندازه گیری شد. آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر اصفهان بود. از روان کننده پلی کربوکسیلاتی که از کلینیک تخصصی بتن خریداری شده بود، به منظور کاهش آب اضافه به طرح اختلاط و بالا بردن کارایی بتن استفاده شد. نانو سیلیس مورد استفاده در این تحقیق نیز از شرکت دانش بنیان نانو ایرانیان خریداری شد. آنالیز XRF نانو سیلیس در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- آنالیز XRF نانو سیلیس

$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{MnO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{BaO}$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$
0.01	0.01	0.04	0.02	0.05	0.04	0.41	0.05	1.2	98.16

### ۳. روش آزمایشگاهی

در ابتدا آزمایش های اولیه روی طرح های اختلاط انجام گرفت. در بخش اول با هدف دستیابی به نسبت وزنی بهینه محلول سیلیکات سدیم به محلول NaOH، ۴ طرح اختلاط تنظیم شد. طرح های اختلاط بخش اول در جدول شماره ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴- طرح های اختلاط بخش اول

نام طرح	م تا کائولن	NaOH	سیلیکات سدیم	شن	ماسه	روان کننده	آب اضافه	مقیاس	R: نسبت سیلیکات NaOH سدیم به
MR1.5	350	140	210	840	840	14	40	$\text{kg/m}^3$	1.5
MR2	350	117	233	840	840	14	40	$\text{kg/m}^3$	2
MR2.5	350	100	250	840	840	14	40	$\text{kg/m}^3$	2.5
MR3	350	87.5	262.5	840	840	14	40	$\text{kg/m}^3$	3

در این طرح های اختلاط:

- نسبت وزنی محلول قلیایی به متاکائولن ۱ است.
- نسبت شن ۷ به ۱۰ میلی متری برابر ۵۰ درصد است.
- میزان روان کننده ۴ درصد وزنی متاکائولن است.
- نسبت شن به ماسه برابر ۱ است.
- نسبت متاکائولن به سنگدانه ۲۱ درصد است.
- نسبت سنگدانه به وزن کل بتن ۷۵ درصد است.

ابتدا یک روز قبل از آزمایش محلول های قلیایی شامل NaOH و محلول سیلیکات سدیم مطابق با طرح های اختلاط، مخلوط شدند و به محلول های به دست آمده یک روز زمان داده شد تا سرد شوند. در روز آزمایش ابتدا مواد خشک شامل: متاکائولن، شن و ماسه به مدت ۲ دقیقه به صورت خشک در میکسر پرتابی بتن، میکس شدند. سپس محلول قلیایی و روان کننده و آب اضافه مطابق با طرح های اختلاط به مخلوط اضافه شد و بتن به مدت ۳ دقیقه میکس شد. سپس نمونه های بتن مطابق با استانداردهای ASTM قالب بندی و متراکم شدند. برای متراکم کردن از میز و بیره استفاده شد و نمونه ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز و بیره، و بیره شدند. در این مرحله با انجام آزمایشات اولیه و نتایج سایر مقالات از میان طرح های کیورینگ، طرح کیورینگ خشک در آون و در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد و مدت ۲۴ ساعت انتخاب شد. پس از پایان کیورینگ نمونه ها از آون خارج شدند تا به منظور دستیابی به طرح اختلاط بهینه، از آنها آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه گرفته شود. نتایج این آزمون در بخش نتایج و بحث ارائه خواهد شد. در بخش دوم از تحقیق بعد از انجام آزمایش های اولیه، طرح MR1.5 به عنوان طرح نهایی اختلاط بتن برای انجام آزمایش های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری الیافی انتخاب شد. همچنین به منظور بررسی اثر نانوسیلیس و الیاف بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن، نانوسیلیس به میزان ۲ درصد وزنی متاکائولن به بتن اضافه شد. در این بخش ۵ طرح اختلاط انتخاب شد که این طرح ها در جدول شماره ۵ ارائه شده است.

جدول ۵ - طرح های اختلاط بخش دوم

مقیاس	آب اضافه	روان کننده	ماسه	شن	سیلیکات سدیم	NaOH	الیاف	نانوسیلیس	متاکائولن	نام طرح
kg/m <sup>3</sup>	40	14	840	840	210	140	0	0	350	MR1.5 (شاهد)
kg/m <sup>3</sup>	40	14	840	840	210	140	0	7	343	MN2
kg/m <sup>3</sup>	40	14	840	840	210	140	1.5	7	343	M4-1.5
kg/m <sup>3</sup>	40	14	840	840	210	140	2	7	343	M4-2
kg/m <sup>3</sup>	40	14	840	840	210	140	2.5	7	343	M4-2.5

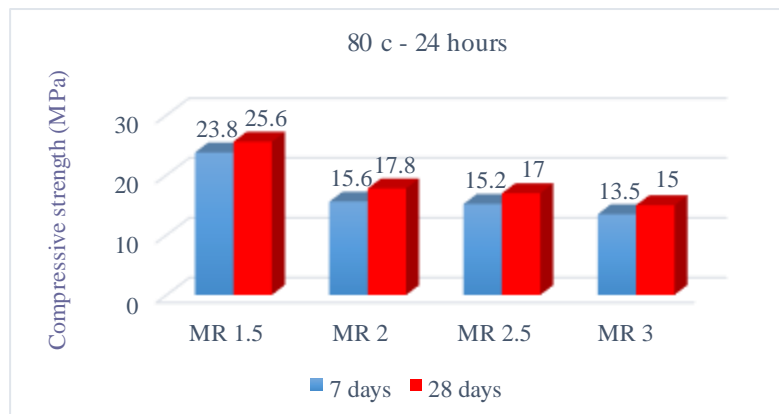
در این طرح های اختلاط:

- MNS2 همان طرح MR 1.5 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.
- میزان الیاف در طرح های M4-1.5، M4-2، M4-2.5 به ترتیب ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب است.
- میزان نانوسیلیس در طرح های بتن الیافی ۲ درصد وزنی متاکائولن و میزان روان کننده ۴ درصد وزنی متاکائولن است.
- نسبت وزنی محلول قلیایی به متاکائولن ۱ و نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول NaOH در تمامی طرح ها برابر با ۱/۵ است.
- نسبت شن به ماسه برابر ۱ و شن مصرفی شامل: ۵۰ درصد شن ۱۰ میلی متری و ۵۰ درصد شن ۷ میلی متری است.
- نسبت متاکائولن به سنگدانه ۲۱ درصد و نسبت سنگدانه به وزن کل بتن ۷۵ درصد است.

در این بخش از آزمایش ابتدا مواد خشک شامل: شن، ماسه، متاکائولن، نانوسیلیس و الیاف مطابق با طرح های اختلاط در میکسر بتن پرتابی ریخته و به منظور توزیع یکنواخت، ۳ دقیقه به صورت خشک میکس شدند. سپس محلول قلیایی فعال کننده که از روز قبل مطابق با طرح اختلاط آماده شده بود، به میکسر اضافه شد و بتن به مدت ۳ دقیقه میکس شد. بعد از اتمام میکس، نمونه های فشاری، کششی و خمشی بتن مطابق با استانداردهای ASTM قالب بندی شدند. نمونه ها با استفاده از میز و بیره و به مدت ۱۰ ثانیه متراکم شدند و در آون و در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد عمل آوری شدند. لازم به ذکر است که ابعاد نمونه های فشاری ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر، نمونه های خمشی ۴۰×۱۰×۱۰ سانتی متر و نمونه های کششی نیز ۲۰×۱۰ سانتی متر و به صورت سیلندری بود. آزمون مقاومت فشاری ASTM C 116 و آزمایش خمش، تست خمش سه نقطه ای تیر ساده (بار مرکز) بود که مطابق استاندارد ASTM C 293 انجام شد و از تست کشش غیرمستقیم برزیلین مطابق با استاندارد ASTM C 496 برای تعیین مقاومت کششی بتن استفاده شد. از نمونه ها مقاومت فشاری، کششی و خمشی ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد که نتایج این تست ها در بخش نتایج و بحث ارائه خواهد شد.

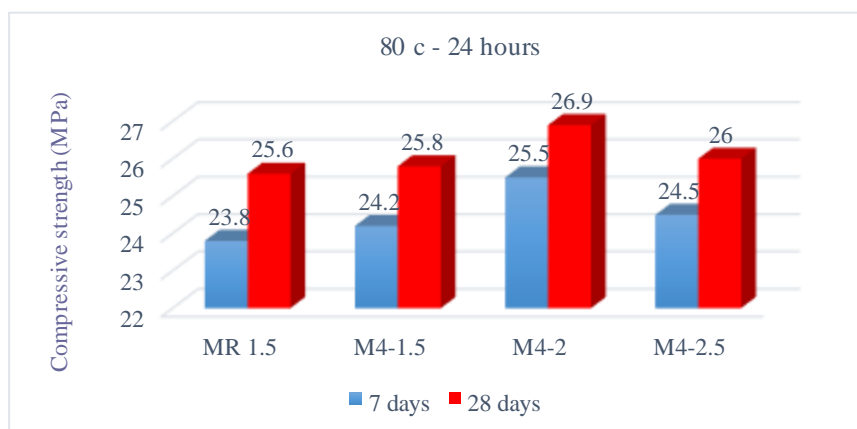
#### ۴. نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از بخش اول که به منظور بهینه یابی نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم و بررسی انجام شده بود در نمودار ۱ ارائه گردیده است. همان طور که نتایج نمودار شماره ۱ نشان می دهد بیشترین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه مربوط به طرح MR 1.5 و به میزان ۲۳/۸ و ۲۵/۶ مگاپاسکال است که در آن نسبت وزنی سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۱/۵ است. با افزایش این نسبت مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ کاهش می یابد به طوری که با افزایش این نسبت به ۳ (طرح MR 3)، کمترین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه سنجش شد. دلیل این کاهش مقاومت می تواند مربوط به وجود مقادیر بیش از اندازه  $SiO_4$  با افزایش نسبت وزنی سیلیکات سدیم به NaOH باشد. Petrus و همکاران [36] نیز در جریان تحقیقات



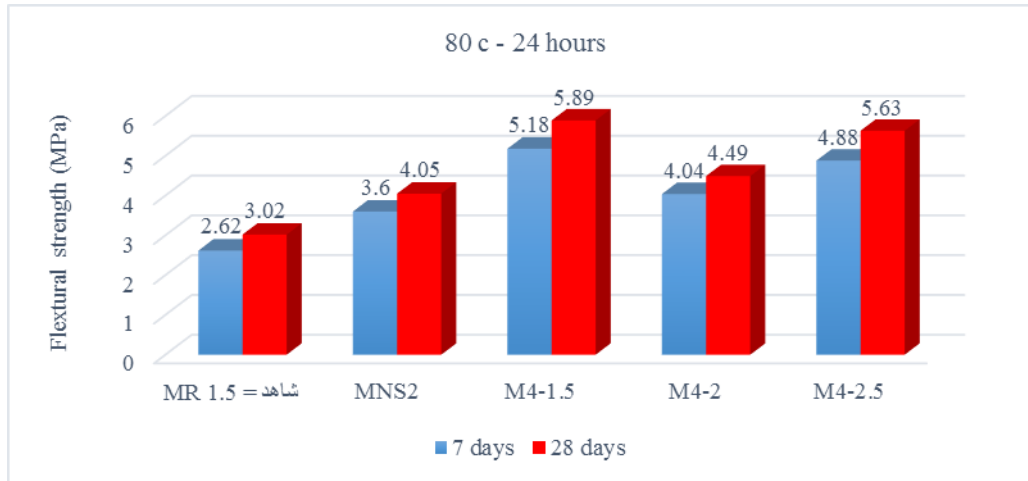
نمودار ۱ - نتایج آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه های MR1.5 تا MR3

خود در بتن ژئوپلیمری، از سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم ۱۲ مولار به عنوان محلول فعال کننده قلیایی استفاده کردند. این پژوهشگران نسبت بهینه سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم را ۱/۵ اعلام کردند. در تحقیق قبلی ما [37] نیز در رابطه با نقش محلول های قلیایی مختلف بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره، از هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم به عنوان یکی از محلول های قلیایی استفاده شد و نسبت بهینه سیلیکات سدیم به هیدروکسید پتاسیم مشابه با این تحقیق ۱/۵ اندازه گیری شد. با توجه به این نتایج طرح MR 1.5 برای ساختن نمونه های بتن الیافی انتخاب شد. نتایج بخش مربوط به بررسی نقش الیاف در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن در نمودار ۲ ارائه شده است. همانطور که نتایج نمودار ۲ نشان می دهد بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح M4-2 با ارائه مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۲۴/۲ و ۲۶/۹ مگاپاسکال است. کمترین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نیز مربوط به طرح MR 1.5 (نمونه شاهد) است. همانطور که نتایج نشان می دهد استفاده از این الیاف تاثیر قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری ندارد و در درصد بهینه الیاف، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه شاهد را به ترتیب ۷ و ۵ درصد افزایش داده است.



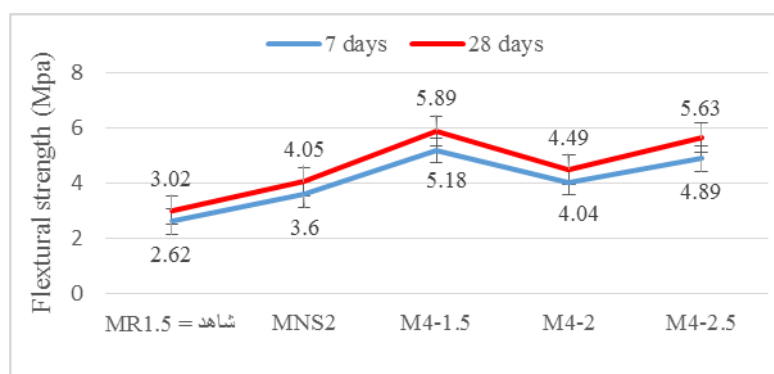
نمودار ۲ - تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری

نتایج بخش مربوط به بررسی نقش الیاف و نانوسیلیس در مقاومت خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، در نمودار شماره ۳ ارائه شده است.



نمودار ۳ - مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه نمونه های بتن ژئوپلیمری الیافی و نمونه شاهد

با اضافه کردن ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب الیاف چهارگانه و ۲ درصد نانوسیلیس به بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن مقاومت خمشی ۷ روزه نمونه ها به ترتیب برابر با ۵/۱۸، ۴/۰۴ و ۴/۸۸ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۵/۸۹، ۴/۴۹ و ۵/۶۳ مگاپاسکال اندازه گیری شد. مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه نمونه شاهد (MR 1.5) 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 به ترتیب برابر با ۳/۶ و ۴/۰۵ مگاپاسکال را ارائه داد. بیشترین مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به طرح M4-1.5 که حاوی ۲ درصد نانوسیلیس و ۱/۵ کیلوگرم در مترمکعب الیاف چهارگانه بود، است و کمترین مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به طرح شاهد است. به منظور بررسی بهتر و مقایسه طرح ها نمودار ۴ تنظیم شد. همانطور که نمودار شماره ۴ نشان می دهد، 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. این موضوع می تواند مربوط به نقش شیمیایی و همچنین اثر فیزیکی نانوسیلیس در پر کردن حفره های ریز و میکرو ترک های بتن و تقویت ناحیه تماس باشد که موجب افزایش مقاومت خمشی این نمونه ها نسبت به نمونه های بی الیاف شده است [30-32].



نمودار ۴ - مقایسه مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه نمونه ها

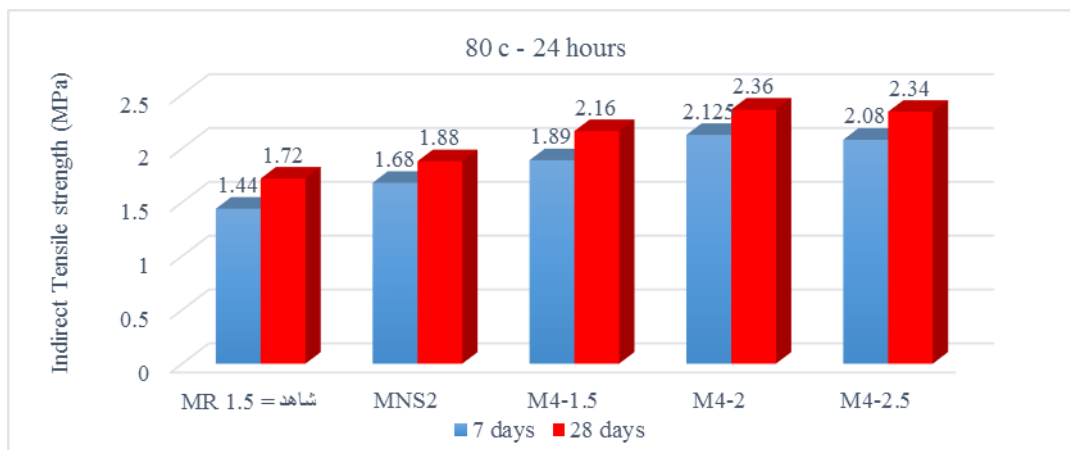
همچنین اضافه کردن الیاف و نانوسیلیس به صورت همزمان، موجب افزایش قابل ملاحظه مقاومت خمشی نمونه های بتن ژئوپلیمری الیافی نسبت به نمونه شاهد شده است. استفاده از ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب از الیاف هیبریدی چهارگانه و ۲ درصد نانوسیلیس سبب افزایش مقاومت خمشی ۷ روزه به ترتیب تقریباً به میزان ۹۷، ۵۵ و ۸۶ درصد، نسبت به نمونه شاهد شده است. این افزایش در مقاومت خمشی ۲۸ روزه تقریباً به میزان ۹۵، ۴۸ و ۸۷ درصد است. این موضوع می تواند مربوط به هم افزایی اثر الیاف در بهبود مقاومت خمشی و اثر نانوسیلیس در تقویت ناحیه تماس باشد. میزان بهینه الیاف

در مقاومت خمشی ۱/۵ کیلوگرم در مترمکعب سنجش شد. در رابطه با مود شکست خمشی نیز همان گونه که در شکل ۳ قابل مشاهده است، نمونه های بتن ژئوپلیمری الیافی عملکرد بهتری نسبت به نمونه شاهد داشته اند. نمونه شاهد کاملا جدا شد اما نمونه های الیافی با وجود شکست جداشدگی ندارند.



شکل ۳ - مود شکست نمونه های خمشی الیافی و شاهد

نتایج مربوط به آزمایش مقاومت کششی در نمودار ۵ ارائه شده است. همان طور که نتایج این نمودار نشان می دهد، با اضافه کردن ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب الیاف هیبریدی چهارگانه و ۲ درصد نانوسیلیس به بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن مقاومت کششی ۷ روزه نمونه ها به ترتیب برابر با ۱/۸۹، ۲/۱۲۵ و ۲/۰۸ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۲/۱۶، ۲/۳۶ و ۲/۳۴ مگاپاسکال اندازه گیری شد. مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه شاهد (MR 1.5) 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 M4-2 به میزان ۲/۱۲۵ و ۲/۳۶ مگاپاسکال بود که دارای ۲ درصد نانوسیلیس و ۲ کیلوگرم در مترمکعب الیاف هیبریدی چهارگانه است و کمترین مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به نمونه شاهد است.



نمودار ۵ - مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه طرح های بتن ژئوپلیمری الیافی و نمونه های شاهد

نتایج نمودار شماره ۵ نشان داد که 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. همانند مقاومت خمشی، استفاده همزمان از الیاف و نانوسیلیس باعث افزایش قابل توجه مقاومت کششی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می شود. 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 چهارگانه و ۲ درصد نانو سیلیس دارند به ترتیب تقریباً ۳۱، ۴۷ و ۴۴ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. این افزایش برای مقاومت کششی ۲۸ روزه به ترتیب تقریباً ۲۶، ۳۸ و ۳۶ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. 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 میزان تاثیر گذاری بر مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه در این پژوهش ۲ کیلوگرم در مترمکعب اندازه گیری شد. در رابطه با مود شکست نمونه های کششی نیز همان طور که در شکل شماره ۴ قابل مشاهده است مشابه با نمونه های خمشی، نمونه های کششی بتن ژئوپلیمر الیافی عملکرد بهتری نسبت به نمونه شاهد ارائه کرده اند. نمونه شاهد کاملا جدا شد اما نمونه های الیافی با وجود شکست جداشدگی ندارند.



شکل ۴ - مود شکست نمونه های کششی

در خصوص جمع بندی این نتایج می توان گفت که استفاده از نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت خمشی و کششی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می شود و این افزایش در خصوص مقاومت خمشی بیشتر است. این مساله می تواند مربوط به نقش شیمیایی و همچنین اثر فیزیکی نانوسیلیس در پر کردن حفره های ریز و میکرو ترک های بتن و تقویت ناحیه تماس باشد که موجب افزایش مقاومت های خمشی و کششی این نمونه ها نسبت به نمونه شاهد شده است [30-32]. قنبری و همکاران [38] نیز در جریان تحقیقات خود بر روی ژئوپلیمر بر پایه متاکائولن گزارش کردند که افزودن نانو سیلیس سبب افزایش مقاومت های فشاری و خمشی می شود و این افزایش در مقاومت خمشی بیشتر است بطوری که افزودن نانوسیلیس سبب افزایش این مقاومت تا تقریباً ۸۰ درصد می شود. صدرممتازی و همکاران [26] نیز در تحقیقات خود در مورد بتن گزارش کردند که استفاده از نانوسیلیس تا ۴ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن می شود. در خصوص الیاف می توان گفت اضافه کردن الیاف تاثیر قابل ملاحظه ای در افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری ندارد. از سوی دیگر اضافه کردن الیاف در حالت عمومی سبب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن و در نتیجه افزایش شکل پذیری می شود. میزان این افزایش تابع پارامترهایی مانند نوع و جنس الیاف، اندازه الیاف، میزان الیاف مصرفی و غیره است. افزودن الیاف پلیمری مانند PP سبب تقویت و بهبود ماتریس خمیر سیمان ژئوپلیمر، جلوگیری از انتشار میکرو ترک ها و تغییر الگوی انتشار ترک ها می شود [39]. در حالت کلی ساختار ژئوپلیمرها شامل: ژل شکل گرفته ژئوپلیمری، ذرات باقیمانده و واکنش نداده ی منبع ژئوپلیمریزاسیون و حفره ها و خلل و فرج مختلف است [39-42]. الیاف می توانند از طریق محصور کردن ماتریس ژئوپلیمر با دو سر خود، یک اثر پل مانند روی ترک ها و سوراخ ها داشته باشند که موجب افزایش سختی و مقاومت ماتریس ژئوپلیمر می شود [39]. در نتیجه نمونه های بتن ژئوپلیمری الیافی مقاومت کششی و خمشی بالاتری را نسبت به نمونه بی الیاف ارائه می دهند. همچنین استفاده همزمان از نانوسیلیس و الیاف به علت هم افزایی اثر نانوسیلیس و الیاف، سبب تقویت مقاومت خمشی و کششی بتن می شود. پس از اعمال بار به بتن و در لحظه ترک خوردگی، تمام بار به ناگهان به الیاف منتقل می شود. در ادامه با افزایش بار روی بتن، الیاف تنش اضافی را از طریق چسبندگی به ناحیه تماس، به ماتریس بتن منتقل می کنند [26]. در نتیجه با تقویت ناحیه تماس توسط نانوسیلیس الیاف نیز می توانند عملکرد بهتری ارائه کنند. در خصوص درصد الیاف نیز تحقیقات مختلفی توسط پژوهشگران انجام شده است و درصد های 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 جمع شدگی الیاف، موجب کاهش مقاومت خمشی و کششی نسبت به درصد بهینه می شود [26]. Zhang و همکاران [39] با افزودن الیاف PP به میزان ۰/۲۵ درصد حجمی، شاهد افزایش مقاومت خمشی بتن ژئوپلیمری به میزان ۵۴ درصد بوده اند. صدر ممتازی و همکاران [26] نیز با افزودن الیاف PP به میزان ۰/۲ درصد حجمی و نانوسیلیس شاهد افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن به میزان تقریباً ۵۷ و ۲۸ درصد بوده اند. همچنین آنها درصد بهینه این الیاف را ۰/۲ درصد حجمی گزارش کرده اند.



# سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف - تیر ۱۳۹۸



## ۵. نتیجه گیری

- نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به NaOH یکی از پارامترهای تاثیرگذار در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن است. میزان بهینه این پارامتر در این تحقیق ۱/۵ اندازه گیری شد. با افزایش این نسبت به ۳ مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه تقریباً ۴۳ و ۴۱ درصد کاهش می یابد.
- اضافه کردن نانوسیلیس به میزان ۲ درصد وزنی متاکائولن در ترکیب بتن ژئوپلیمری، سبب افزایش مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۱۷ و ۱۰ درصد و همچنین افزایش مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۳۷ و ۳۵ درصد نسبت به نمونه بدون نانوسیلیس می شود.
- اضافه کردن الیاف هیبریدی چهارگانه تاثیر قابل ملاحظه ای بر افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن ندارد و در درصد بهینه الیاف، افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه تقریباً ۷ و ۵ درصد است.
- اضافه کردن ۲ درصد نانوسیلیس و الیاف هیبریدی چهارگانه به میزان ۱/۵، ۲ و ۲/۵، سبب افزایش مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن به میزان ۲۶، ۳۸ و ۳۶ درصد نسبت به نمونه شاهد می شود. میزان بهینه این الیاف برای افزایش مقاومت کششی ۲ کیلوگرم در مترمکعب است.
- اضافه کردن ۲ درصد نانوسیلیس و الیاف هیبریدی چهارگانه به میزان ۱/۵، ۲ و ۲/۵، سبب افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن به میزان ۹۸، ۴۸ و ۸۷ درصد نسبت به نمونه شاهد می شود. میزان بهینه این الیاف برای افزایش مقاومت خمشی ۱/۵ کیلوگرم در مترمکعب است.

## ۶. مراجع

1. Phummiphana, I., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Arulrajah, A., Shen, S.L. and Chindapasirt, P., (2018), "High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material," J. Hazard. Mater, **341**, pp 257–267.
2. McCaffrey, R., (2002), "Climate change and the cement industry," Global. Cem. Lime Mag, pp 15–9.
3. Andrejkovičová, S., Sudagar, A., Rocha, J., Patinha, C., Hajjaji, W., Ferreira da Silva, E., Velosa, A., and Rocha, F., (2016), "The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers," Appl. Clay Sci, **126**, pp 141–152.
4. Neupane, K., Chalmers, D. and Kidd, P., (2018), "High-Strength Geopolymer Concrete- Properties, Advantages and Challenges," Advances in Materials, **7** (2), pp 15-25.
5. Assi, L.N., Deaver, E. and Ziehl, P., (2018), "Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete," Constr. Build. Mater, **167**, pp 372–380.
6. Davidovits, J., (2013), "Geopolymer Cement Geopolymer Cement," a review.
7. Meyer, C., (2009), "The greening of the concrete industry," Cem. Concr. Compos, **31** (8), pp 601-605.
8. Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. and Jullien, A., (2010), "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation," J. Clean. Prod, **18**, pp 478–485.
9. Bashir, I., Kapoor, K. and Sood, H., (2017), "An Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete," International Journal of Latest Research in Science and Technology, **6** (3), pp 33-36.
10. Ekinci, E., Türkmen, I., Kantarci, F. and 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-Butadiene Latex additives at different ratios," Constr. Build. Mater, **201**, pp 257–267.
11. Davidovits, J., (1988a), "Soft Mineralurgy and Geopolymers," Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.



12. Davidovits, J., (1988b), "Geopolymer Chemistry and Properties," Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
13. Davidovits, J., (1991), "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials," J. Therm. Anal, **37**, pp 1633-1656.
14. Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C., (2002), "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers," Chem. Eng. J, **89** (1-3), pp 63-73.
15. De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K. and Sirivivatnanon, V., (2007), "Kinetics of geopolymerization: role of  $Al_2O_3$  and  $SiO_2$ ," Cem. Concr, **37** (4), pp 512-518.
16. Davidovits, J., (1999), "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology," Geopolymer '99 International Conference, France.
17. Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V., (2004), "On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," ACI Materials Journal, 101(6), pp 467-472.
18. Amnadnua, K., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., (2013), "Strength, water permeability: and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash," Mater. Des, 51, pp 894-901.
19. Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J., (2007), "The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of Green Concrete," Cement and Concrete Research, 37(12), pp 1590-1597.
20. Lee, W.K.W. and van Deventer, J.S.J., (2002), "The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers," Colloids Surf, A 2111, pp 15-126.
21. Cheng, T.W. and Chiu, J.P., (2003), "Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag," Miner.Eng, 16 (3), pp 205-210.
22. Sakkas, K., Pnias, D., Nomikos, P. P. and Sofianos, A.I., (2014), "Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings", Tunnell .Underground Space Technol, **43**, pp 148-156.
23. Sarker, P.K., Kelly, S. and Yao, Z., (2014), "Effect of fire exposure on cracking: spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete," Mater. Des, **63**, pp 584-592.
24. Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., Vazquez, T. and Grutzeck, M.W., (1999), "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin," Cem. Concr. Res, **27** (7), pp 997-1000.
25. Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G. and Tao, M., (2013), "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer," Constr. Build. Mater, **47**, pp 1468-1478.
۲۶. 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، سال هشتم، شماره دوم، صفحه ۱۹-۳۴.
27. Naaman, A.E., Wongtanakitcharoen, T. and Hauser, G., (2005), "Influence of Different Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete," ACI Materials Journal, **102** (1), pp 49-58.
28. ACI Committee 544, (1996), "Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete," ACI Materials Journal.
29. Soroushian p., (1986), "Secondary reinforcement adding cellulose fibers," ACI Concrete International, pp 28-38.
30. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and Rongshen, K., (2007), "Influence of nano- $SiO_2$  addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume," Construction and Building Materials, **21**, pp 539-545.



سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در  
مهندسی سازه و مدیریت ساخت  
دانشگاه صنعتی شریف - تیر ۱۳۹۸



31. Colleparadi, M., Ogoumah Olagot, J., Troli, R., Simonelli, F. and Colleparadi, S., (2007), "Combination of silica fume, Fly Ash and Amorphous Nano Silicain Super plasticized High Performance Concretes, Enco," Engineering Concrete, Ponzano Veneto, Italy.
32. Li, G., (2004), "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>," Cement and Concrete Research, **34**, pp 1043-1049.
33. Nili, M. and 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**, pp 879-886.
34. Vandewalle, L., (2008), "Hybrid Fiber Reinforced Concrete, Proceedings," Int'l Conference Concrete: Construction's Sustainable Option, Dundee, UK, pp 11-22.
35. Gao, X., Yu, Q.L., Yu, R. and Brouwers, H.J.H., (2017), "Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer composites," Materials and Structures, **50**, pp 165.
36. Petrus, H., Hulu, J., Dalton S.P., Malinda, E. and Prakosa, R.A., (2016), "Effect of Bentonite Addition on Geopolymer Concrete from Geothermal Silica," Materials Science Forum, **841**, pp 7-15.
۳۷. مرادی خو، ا. و اسپرهم، ع.، (۱۳۹۷) "مطالعه آزمایشگاهی نقش محلول های قلیایی مختلف و کیورینگ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه کوره آهن گدازی"، کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران.
۳۸. 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، دوره ششم، شماره یکم، صفحه ۸۵-۹۵.
39. Zhang, Z., Yao, X., Zhu, H., Hua, S. and Chen, Y., (2009), "Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer," Cent. South Univ. Technol, **16**, pp 49-52.
40. Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and Van Deventer, J.S.J., (2007), "Geopolymer technology: the current state of the art," Journal of Material Sci, **42**, pp 2917-2933.
41. Zhang, Y., Sun, W. and Li, Z., (2006), "Impact behavior and microstructure characteristics of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer boards prepared by extrusion technique," Journal of Mater Sci, **41**, pp 2787-2794.
42. Zhu, H., Yao, X. and Zhang, Z., (2007), "Optimum activated temperature of kaolin," Cent South Univ Technol, **14**(S2), pp 131-134.