



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



## مطالعه آزمایشگاهی نقش الیاف هیبریدی دوگانه کولپلمری و نانوسیلیس بر مقاومت های مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

امیر بهادر مرادی خوا، میر حمید حسینی<sup>۱</sup>، اعظم موسوی کاشی<sup>۲</sup>، فرشته امامی<sup>۳</sup> و علیرضا اسپرهم<sup>۴</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.

۴- 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

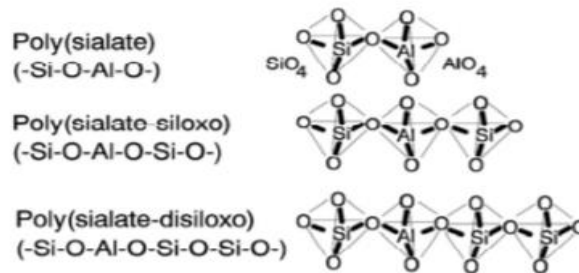
بتن ژئوپلیمری در سال های اخیر به عنوان یک جایگزین سبز برای بتن پرتلند مطرح شده است. در این مقاله اثر الیاف هیبریدی دوگانه کولپلمری و نانوسیلیس بر مقاومت های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. ابتدا آزمایش های اولیه به منظور رسیدن به طرح اختلاط بهینه انجام 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

بتن به علت دارا بودن ویژگی های خاص مانند شکل پذیری، در دسترس بودن مصالح اولیه و ارزان بودن پرمصرف ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز، بعد از آب است. پیش بینی می شود 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 [1]. اما فرآیند تولید سیمان پرتلند معایب عمده ای نیز به دنبال دارد. تولید سیمان پرتلند باعث رهاسازی مقادیر زیادی از دی اکسید کربن به محیط زیست می شود [2]. به طوری که تولید یک تن سیمان پرتلند سبب تولید تقریباً یک تن دی اکسید کربن می شود [3]. از سوی دیگر، 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 با میزان انتشار ۶۵ درصد، بیشترین نقش را در پدیده گرمایش جهانی دارد [4]. همچنین فرآیند تولید سیمان پرتلند عامل تولید ۵ تا ۷ درصد از کل میزان انتشار جهانی گاز دی اکسید کربن است [5]. از این رو نیاز به استفاده از یک جایگزین برای سیمان پرتلند ضروری به نظر می رسد. در سال های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و

دوستاندار 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 [6-9].



شکل ۱- ساختار شیمیایی poly(sialate) ها

ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی 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 [10]. منبع اولیه ژئوپلیمرزاسیون بسته به خواص مورد نیاز، هزینه و در دسترس بودن می تواند طبیعی مانند ژئولیت، صنعتی مانند متاکائولن و یا ضایعاتی مانند فلی اش یا سرباره باره کوره آهن گدازی باشد. ترکیب شیمیایی مواد ژئوپلیمری مشابه ژئولیت است ولی دارای ساختار آمورف هستند برخلاف ژئولیت که ساختار کریستالی دارد [11]. ژئوپلیمرزاسیون واکنش سریع شیمیایی در شرایط قلیایی بین مینرال های Si و Al است که باعث تشکیل زنجیره های سه بعدی پلیمری Si-O-Al می شود [12]. 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 [13-15]، سخت شدن سریع [16]، مقاومت در برابر آتش سوزی و حرارت های بالا [17-19]، نفوذپذیری کم و مقاومت در برابر حمله نمک ها و اسیدها [13,20] و خزش پایین [21] اشاره کرد.

یکی از منابع اولیه ژئوپلیمرزاسیون متاکائولن است. متاکائولن از کلسینه کردن کائولن در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد به دست می آید. در این مقاله از متاکائولن به عنوان منبع ژئوپلیمرزاسیون استفاده شده است. بتن در کنار مزایا دارای معایبی نیز هست که یکی از مهمترین آنها مقاومت کششی پایین است که 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 درحجم بتن پراکنده می شوند، استفاده می شود [22]. 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، باز می گردد [23]. همچنین از موی دم اسب نیز برای تقویت ملات بنایی و گچ استفاده شده است [24]. استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی به عنوان یک گام موثر در جلوگیری از انتشار ریزترک ها و ترک ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می شود [25]. 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. این ماده 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 یا الیاف و یا میلگرد پدید می آید که 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 [22]. استفاده از نانوذرات می تواند در پرکردن تخلخل های بسیار ریز خمیر سیمان و افزایش مقاومت های کششی و خمشی و به خصوص دوام بتن مؤثر باشد [26-28]. Nili و همکاران [29] در آزمایش های خود تاثیر نرمة سیلیس (Silica fumes) و الیاف فلزی را بر مقاومت ضربه ای و عملکرد بتن بررسی کردند. نتایج آزمایش های این پژوهشگران نشان می دهد

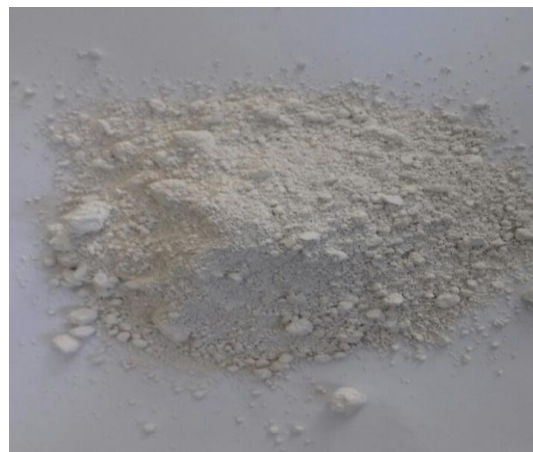
که افزودن الیاف فولادی، مقاومت کششی و خمشی بتن را بهبود می دهد. همچنین با افزودن الیاف فولادی به نمونه های حاوی نرهمه سیلیس، شکل پذیری و مقاومت ضربه ای بتن به طور چشمگیری افزایش می یابد. Vandewalle [30] آزمایش های روی بتن مسلح الیاف هیبریدی انجام داد. وی از ۳ نوع الیاف فولادی (الیاف بسیار کوتاه ۶ میلی متری و الیاف کوتاه به طول ۱۳ میلی متر و الیاف بلند با انتهای قلاب دار به طول ۳۵ میلی متر) استفاده کرد. در انجام آزمایش از تیرهای به طول ۵۵۰ تا ۶۰۰ میلی متر و عرض و ارتفاع ۱۵۰ میلی متر استفاده شد. میزان الیاف مصرفی در بتن از ۰ تا ۹۰ کیلو گرم در هر متر مکعب متغیر بوده که به صورت مجزا و یا مخلوطی از دو یا سه نوع الیاف، به بتن اضافه شده بودند. نتایج بدست آمده از اندازه گیری تغییر مکان بازشدگی دهانه ترک (Crack Mouth Opening Displacement) نشان داد که الیاف ۶ و ۱۳ میلی متری در مناطق با بازشدگی ترک های کوچک بسیار موثر هستند. از سوی دیگر الیاف بلند ۳۵ میلی متری شکل پذیری خوبی را در ترک های بزرگ و عریض تامین می کنند. Gao و همکاران [31] در تحقیقات خود در مورد بتن ژئوپلیمری الیافی، از الیاف هیبریدی فلزی در دو اندازه ۶ و ۱۲ میلی متری استفاده کردند و نتیجه گیری کردند که استفاده از الیاف هیبریدی در درصد بهینه، سبب هم افزایی اثر الیاف و جلوگیری از ایجاد ترک ها در دو فاز ماکرو و میکرو می شود. امروزه از الیاف به صورت گسترده در انواع بتن جهت بهبود خواص بتن استفاده می شود. این الیاف دارای طیف وسیعی از الیاف فلزی تا الیاف پلیمری هستند. همچنین در سال های اخیر استفاده از الیاف هیبریدی یا دوگانه و چندگانه در بتن به منظور افزایش خواص مورد نظر بتن های الیافی، استفاده می شود. در این مقاله از الیاف هیبریدی دوگانه کولپلیمری در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن استفاده شد. همچنین در این مقاله برای تقویت ناحیه تماس از نانوسیلیس که از محصولات فناوری نانو است، استفاده شده است. در ابتدا به منظور دستیابی به طرح اختلاط بهینه، چند پارامتر بتن ژئوپلیمری سنجیده شد و پس از رسیدن به طرح اختلاط نهایی بتن، به منظور بررسی رفتار بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه متاکائولن این الیاف در نسبت های مختلف و همراه با نانوسیلیس به طرح اختلاط بتن اضافه شد و نمونه ها ساخته و عمل آوری شدند. سپس از نمونه ها آزمون کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه ای گرفته شد تا مواردی شامل: اثر نانوسیلیس بر مقاومت کششی و خمشی، اثر الیاف هیبریدی و نانوسیلیس بر مقاومت کششی و خمشی و درصد بهینه الیاف در مقاومت کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه متاکائولن و حاوی نانوسیلیس، سنجش شوند.

## ۲. مواد

منبع اصلی 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 بنابیان زیست فناوری خریداری شد و آنالیز XRF آن در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همچنین تصویر متاکائولن مصرفی در شکل شماره ۱ ارائه 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 ۱ - تصویر متاکائولن مصرفی

محلول فعال کننده قلیایی در این پژوهش ترکیب هیدروکسید پتاسیم (KOH) و سیلیکات سدیم مایع بود. KOH با خلوص ۹۰ درصد از شرکت قطران شیمی خریداری شد. محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت به  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Na}_2\text{O}$  برابر با ۳، از شرکت نفیس سیلیکات اصفهان خریداری شد. آنالیز شیمیایی این دو ماده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید پتاسیم

NaOH			$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ solution		
Chemical analysis	Result	Unit	Chemical analysis	Result	Unit
KOH	90.7	%	$\text{SiO}_2$	29.50	%
$\text{K}_2\text{CO}_3$	0.3	%	$\text{Na}_2\text{O}$	9.55	%
KCl	0.006	%	Water	60.95	%
Fe	2	ppm			
NaOH	1.2	%			
Appearance	White flake		Appearance	Clear liquid	

شن و ماسه مصرفی در این آزمایش از معادن شرکت تیراژ بتن در اطراف اصفهان تهیه شد. شن مصرفی از نوع شن شکسته بود که پس از تهیه، توسط الک استاندارد ASTM دانه بندی شد و از شن در دو اندازه ۱۰ و ۷ میلی متری استفاده شد. ضریب نرمی ماسه  $3/2913$  اندازه گیری شد. همچنین در این تحقیق ضریب (sand Equivalent) SE یا ارزش ماسه ای ماسه مورد مصرف نیز  $73$  اندازه گیری شد. آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر اصفهان بود. نانوسیلیس مورد استفاده در این تحقیق با اندازه ذرات  $40$  نانومتر، از شرکت دانش بنیان نانوایران خریداری شد. آنالیز XRF نانوسیلیس در جدول شماره ۳ ارائه شده است. در این تحقیق از نسل جدید الیاف کوبلیمری یا همان الیاف پلیمری اصلاح شده، استفاده شد. این الیاف به صورت هیبریدی دو گانه و در دو اندازه ۶ و ۱۲ میلی متری ترکیب شده بودند. وزن مخصوص الیاف  $930$  کیلوگرم در مترمکعب، مقاومت کششی  $570$  مگاپاسکال بود. این الیاف از شرکت نانو نخ سیرجان و به صورت نسخه پیچی شده برای افزایش مقاومت کششی و خمشی تهیه شد. شکل شماره ۲، الیاف مصرفی در این مقاله را نشان می دهد.

جدول ۳- آنالیز XRF نانوسیلیس

$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	MnO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	MgO	BaO	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



شکل ۲- الیاف هیبریدی کوبلیمری مصرفی

### ۳. روش آزمایشگاهی

در ابتدا به منظور تعیین میزان عیار متاکائولن و میزان محلول 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 نمونه های دیگر با ۳۰ و ۶۰

کیلوگرم در مترمکعب آب اضافه در ترکیب خود ساخته شدند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۷ روزه گرفته شد. در مورد نتایج این آزمون، اگرچه نمونه بدون آب اضافه مقاومت فشاری بالاتری را نشان داد ولی این طرح اختلاط به لحاظ اجرایی و میکس کردن در میکسر، دارای مشکل اجرایی و کارایی پایین بود و عملاً استفاده از آن دشوار بود. لذا در این پژوهش از آب اضافه به میزان ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب استفاده شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری این ۳ نمونه در نمودار ۱ در بخش نتایج و بحث ارائه خواهد شد. طرح‌های اختلاط بتن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ - طرح‌های اختلاط بتن

نام طرح	مناکولن	نانوسیلیس	الیاف	KOH	سیلیکات سدیم	شن	ماسه	آب اضافه	مقیاس
M	350	0	0	140	210	840	840	30	kg/m <sup>3</sup>
MN2	343	7	0	140	210	840	840	30	kg/m <sup>3</sup>
M2-1.5	343	7	1.5	140	210	840	840	30	kg/m <sup>3</sup>
M2-2	343	7	2	140	210	840	840	30	kg/m <sup>3</sup>
M2-2.5	343	7	2.5	140	210	840	840	30	kg/m <sup>3</sup>

در این طرح‌ها:

- طرح M نمونه شاهد است.
- MNS2 همان طرح M (شاهد) است که به منظور بررسی اثر نانوسیلیس بر مقاومت کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری، به میزان ۲ درصد وزنی مناکولن، نانوسیلیس به آن اضافه شده است همچنین میزان نانوسیلیس در طرح‌های بتن الیافی ۲ درصد وزنی مناکولن است.
- میزان الیاف در طرح‌های M2-1.5، M2-2، M2-2.5 به ترتیب ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب انتخاب شد.
- نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول KOH در تمامی طرح‌ها برابر با ۱/۵ و نسبت وزنی محلول قلیایی به مناکولن ۱ است.
- نسبت شن به ماسه برابر ۱ و نسبت شن ۷ به ۱۰ میلی‌متری برابر با ۱ است.
- نسبت مناکولن به سنگدانه ۲۱ درصد و نسبت سنگدانه به وزن کل بتن ۷۵ درصد است.

پس از انتخاب نهایی طرح اختلاط نهایی بتن کار ساخت نمونه‌های کششی و خمشی آغاز شد. بدین منظور، ابتدا یک روز قبل از آزمایش محلول KOH با غلظت ۱۲ مولار ساخته شد. سپس محلول فعال‌کننده قلیایی شامل محلول KOH ۱۲ مولار 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: مناکولن، شن، ماسه و الیاف به مدت ۲ دقیقه به صورت خشک در میکسر پرتابی بتن، میکس شدند. سپس محلول 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 مطابق با استانداردهای ASTM قالب‌بندی و متراکم شدند. برای متراکم کردن بتن از میز ویرنه استفاده شد و نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز ویرنه، ویرنه شدند. نمونه‌های بتن 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 کششی و خمشی ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد که نتایج این تست‌ها در ادامه و در بخش نتایج و بحث ارائه خواهد شد. تصویر نمونه‌های ساخته شده در شکل ۳ ارائه شده است.

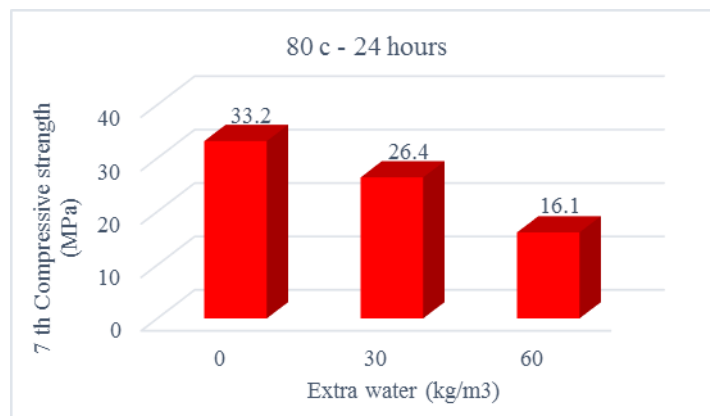


شکل ۳ - نمونه‌های ساخته شده بتن ژئوپلیمری الیافی بر پایه مناکولن

لازم به ذکر است ابعاد نمونه های خمشی  $40 \times 10 \times 10$  سانتی متر و ابعاد نمونه های کششی  $20 \times 10$  سانتی متر و به صورت سیلندری بود. 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.

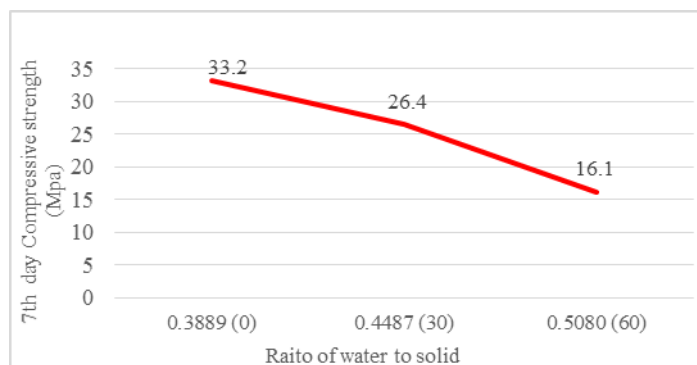
## ۴. نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از آزمایش تاثیر میزان آب اضافه بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن در نمودار ۱ ارائه شده است.



نمودار ۱ - تاثیر آب اضافه بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

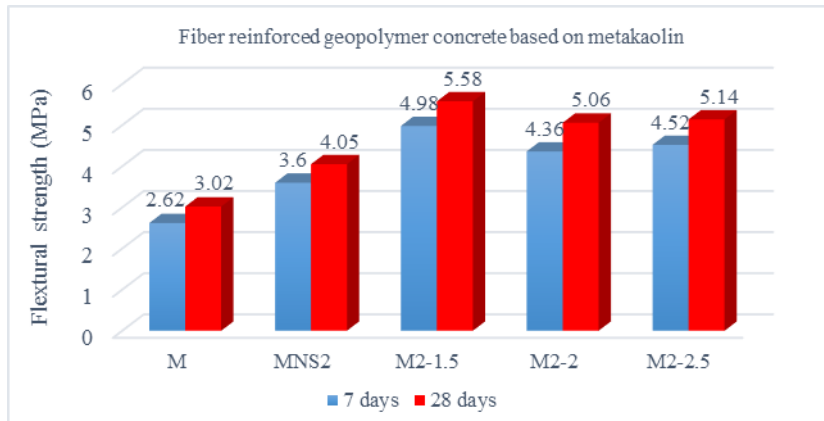
همان طور که نتایج نشان می دهد افزودن آب اضافه به بتن موجب کاهش قابل ملاحظه مقاومت فشاری بتن می شود به طوری که مقاومت فشاری ۷ روزه در طرح هایی که ۰، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در مترمکعب آب اضافه داشتند به ترتیب برابر با  $33/2$ ،  $26/4$  و  $16/1$  مگاپاسکال سنجش شد. این موضوع نشان دهنده میزان تاثیر پارامتر مهم نسبت آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون، بر مقاومت های مکانیکی بتن ژئوپلیمری است. به منظور بررسی این پارامتر نمودار شماره ۲ تنظیم شده است.



نمودار ۲ - تاثیر نسبت آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

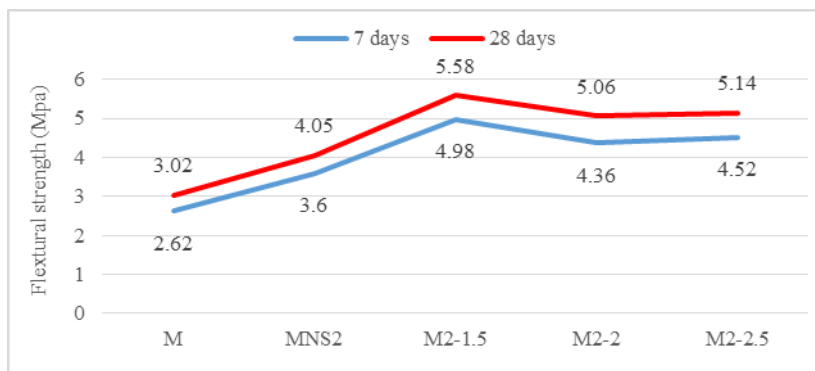
در نمودار شماره ۲ میزان آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون برای طرح های با اضافه به میزان ۰، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در مترمکعب، به ترتیب برابر  $0/4487$ ،  $0/4487$  و  $0/5080$  است. با اضافه کردن آب به مخلوط بتن به میزان ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در مترمکعب مقاومت فشاری ۷ روزه به ترتیب به میزان تقریباً ۲۰ و ۵۱ درصد کاهش یافته است که این میزان قابل توجهی است. این موضوع در تحقیقات قبلی ما [32] نیز دیده شد. همچنین Hardjito و همکاران [13] نیز در جریان تحقیقات خود نتایج مشابهی گرفتند. از طرف دیگر اگر چه در حالتی که آب اضافه به طرح اختلاط اضافه نمی شود مقاومت فشاری بالاتری ارائه بدست می آید اما این طرح اختلاط دارای مشکلات اجرایی است و بتن کارایی پایینی دارد. در نتیجه میزان

آب اضافه ۳۰ کیلوگرم در متر مکعب 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 در مقاومت خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن در نمودار ۳ ارائه شده است.



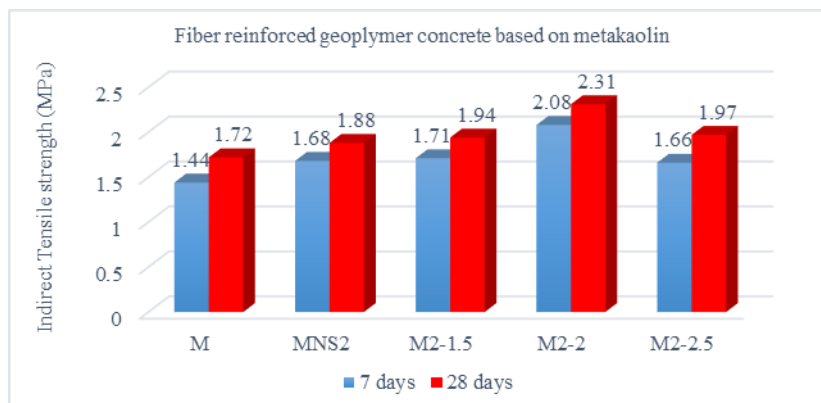
نمودار ۳ - مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه طرح های بتن ژئوپلیمری الیافی و نمونه های شاهد

همان طور که نتایج نمودار ۳ نشان می دهد با اضافه کردن الیاف هیبریدی به میزان ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در مترمکعب و ۲ درصد نانوسیلیس به بتن، مقاومت خمشی ۷ روزه نمونه ها به ترتیب ۴/۹۸، ۴/۳۶ و ۴/۵۲ مگاپاسکال اندازه گیری شد و این عدد در مقاومت خمشی ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۵/۸۶، ۵/۰۶ و ۵/۱۴ مگاپاسکال است. 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 به ترتیب 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. به منظور بررسی دقیق تر و مقایسه طرح ها نمودار ۴ تنظیم شد.



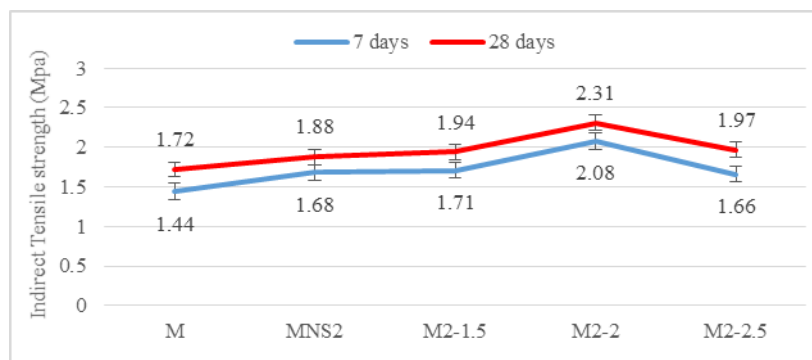
نمودار ۴ - مقایسه مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه طرح ها

همان طور که نمودار 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. 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 کولپلمری دوگانه 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 مربوط به هم افزایی اثر الیاف در بهبود مقاومت خمشی و اثر نانوسیلیس در تقویت ناحیه تماس باشد. میزان بهینه الیاف کولپلمری دو جزئی در مقاومت خمشی ۱/۵ کیلوگرم در مترمکعب است. نتایج مربوط به آزمایش مقاومت کششی در نمودار ۵ ارائه شده است.



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

همان طور که نتایج این نمودار نشان می دهد مقاومت کششی ۷ روزه نمونه های بتن دارای الیاف هیبریدی به میزان ۱/۵، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم در متر مکعب و ۲ درصد نانوسیلیس، به ترتیب برابر با ۱/۷۱، ۲/۰۸ و ۱/۶۶ مگاپاسکال است و این عدد در مقاومت کششی ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۱/۹۴، ۲/۳۱ و ۱/۹۷ مگاپاسکال است. مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه های طرح M (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 کولیمیری است و کمترین مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به نمونه شاهد است. به منظور بررسی دقیق تر و مقایسه طرح ها نمودار ۶ تنظیم شد.



نمودار شماره ۶ - مقایسه مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه طرح ها

نتایج نمودار ۶ 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 کولیمیری دوگانه 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 میزان تاثیر گذاری بر مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه در این تحقیق ۲ کیلوگرم در مترمکعب اندازه گیری شد.

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. 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 [26-28]. قنبری و همکاران

[33] نیز در جریان تحقیقات خود بر روی ژئوپلیمر بر پایه متاکائولن، گزارش کردند که افزودن نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی می شود و این افزایش در مقاومت خمشی بیشتر است به طوری که افزودن نانوسیلیس سبب افزایش این مقاومت تا تقریباً ۸۰ درصد می شود. صدر ممتازی و همکاران [22] نیز در تحقیقات خود در 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 که اضافه کردن الیاف در حالت عمومی سبب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن و در نتیجه افزایش شکل پذیری می شود. میزان 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 [34]. در حالت کلی ساختار ژئوپلیمرها شامل: ژل شکل گرفته ژئوپلیمری، ذرات باقی مانده و واکنش نداده ی منبع ژئوپلیمریزاسیون و حفره ها و خلل و فرج مختلف است [34-37]. این الیاف می توانند از طریق محصور کردن ماتریس ژئوپلیمر با دو سر خود، یک اثر پل مانند روی ترک ها و سوارخ ها داشته باشند که موجب افزایش سختی و مقاومت ماتریس ژئوپلیمر می شود [34]. در نتیجه بتن ژئوپلیمری الیافی مقاومت کششی و خمشی بالاتری نسبت به نمونه های بدون الیاف را ارائه می دهند. همچنین استفاده همزمان از نانوسیلیس و الیاف به علت هم افزایی اثر نانوسیلیس و الیاف، باعث 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 سپس با افزایش بار روی بتن، الیاف تنش اضافی را از طریق چسبندگی به ناحیه تماس، به ماتریس بتن منتقل می کند [22]. در نتیجه با تقویت ناحیه تماس توسط نانوسیلیس الیاف موجود نیز می تواند عملکرد بهتری ارائه کند. 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 جمع شدگی الیاف موجب کاهش مقاومت خمشی و کششی نسبت به درصد بهینه می شود [22]. Zhang و همکاران [34] 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 [22] نیز با افزودن الیاف PP 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 کرده اند.

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله سعی شد که در حد توان به بررسی نقش الیاف کولپلیمری هیبریدی دوگانه و نانوسیلیس بر مقاومت های خمشی و کششی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن پرداخته شود. در همین راستا با توجه به نتایج به دست آمده در بخش قبل می توان موارد زیر را به عنوان نتایج ارائه کرد: اضافه کردن آب اضافه به بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن سبب کاهش قابل ملاحظه مقاومت فشاری می شود.

- نسبت آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون از نسبت های تاثیر گذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن است. میزان بهینه این نسبت در این مقاله ۰/۳۸۸۹ اندازه گیری شد و با افزایش این نسبت مقاومت فشاری به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.
- اضافه کردن نانوسیلیس به میزان ۲ درصد وزنی متاکائولن و به صورت جایگزینی در ترکیب بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، سبب افزایش مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۱۷ و ۱۰ درصد نسبت به نمونه بدون نانوسیلیس می شود.
- اضافه کردن نانوسیلیس به میزان ۲ درصد وزنی متاکائولن و به صورت جایگزینی در ترکیب بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، سبب افزایش مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۳۷ و ۳۵ درصد نسبت به نمونه بدون نانوسیلیس می شود.
- اگرچه اضافه کردن نانوسیلیس سبب افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن می شود اما در مقاومت خمشی تاثیر گذاری بیشتری دارد.
- اضافه کردن ۲ درصد نانوسیلیس و الیاف دوگانه کولپلیمری در اندازه های 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 می شود. میزان بهینه استفاده از این الیاف برای تقویت مقاومت کششی ۲ کیلوگرم در مترمکعب است.



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



- اضافه کردن ۲ درصد نانوسیلیس و الیاف دوگانه کولپیمری در اندازه های 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 می شود. میزان بهینه استفاده از این الیاف برای تقویت مقاومت خمشی ۱/۵ کیلوگرم در مترمکعب است.

## ۶. مراجع

1. Malhotra, V.M., (1999), "Making concrete 'greener' with fly ash," *ACI Concrete International*, **21**, pp 61-66.
2. Davidovits, J., (1994c), "Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries," *World Resource Review*, **6** (2), pp 263-278.
3. Malhotra, V.M., (2006), "Reducing CO2 Emissions," *ACI Concrete International*, **28**, pp 42-45.
4. McCaffrey, R., (2002), "Climate Change and the Cement Industry," *Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)*, pp 15-19.
5. Alzeer, M. and Mackenzie, K., (2013), *Appl. Clay Sci*, **75-76**, pp 148-152.
6. Davidovits, J., (1988a), "Soft Mineralurgy and Geopolymers," Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
7. Davidovits, J., (1988b), "Geopolymer Chemistry and Properties," Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
8. Davidovits, J., (1991), "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials," *Journal of Thermal Analysis*, **37**, pp 1633-1656.
9. Van Jaarsveld, J.G.S, van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C., (2002a), "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based Geopolymers," *Chemical Engineering Journal*, **89** (1-3), pp 63-73.
10. DeSilva, P., Sagoe-Crenstil, K. and Sirivivatnanon, V., (2007), "Kinetics of geopolymerization: role of  $Al_2O_3$  and  $SiO_2$ ," *Cem. Concr*, **37** (4), pp 512-51.
11. Xu, H. and van Deventer J.S.J., (2000), "The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals," *International Journal of Mineral Processing*, **59** (3), pp 247-266.
12. Davidovits, J., (1999), "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology," *Geopolymer '99 International Conference*, France.
13. Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V., (2004b), "On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," *ACI Materials Journal*, **101** (6), pp 467-472.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Cheng, T.W. and Chiu, J.P., (2003), "Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag," *Miner. Eng*, **16** (3), pp 205-210.



18. Sakkas, K., Pantias, 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
۲۲. 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.
23. Naaman, A.E., Wongtanakitcharoen, T. and Hauser, G., (2005), "Influence of Different Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete," ACI Materials Journal, **102**, pp 49-58.
24. ACI Committee 544, (1996), "Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal.
25. Soroushian p., (1986), "Secondary reinforcement adding cellulose fibers", ACI, Concrete International, pp 28-38.
26. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and Rongshen, K., (2007), "Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", Construction and Building Materials, **21**, pp 539-545.
27. Collepardi, M., Ogoumah Olagot, J., Troli, R., Simonelli, F. and Collepardi, S., (2007), "Combination of silica fume, Fly Ash and Amorphous Nano Silicain Super plasticized High Performance Concretes, Enco," Engineering Concrete, Ponzano Veneto, Italy.
28. Li, G., (2004), "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>," Cement and Concrete Research, **34**, pp 1043-1049.
29. Nili, M., Afrouhsabet, 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.
30. Vandewalle, L., (2008), "Hybrid Fiber Reinforced Concrete, Proceedings", Int'l Conference Concrete: Construction's Sustainable Option, Dundee, UK, pp 11-22.
31. 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.
۳۲. 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.
۳۳. 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.
34. 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 0049–0052.
35. 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.



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



36. 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.
37. Zhu, H., Yao, X. and Zhang, Z., (2007), "Optimum activated temperature of kaolin," *Cent South Univ Technol*, 14 (S2), pp 131–134.