نقش جایگزینی خاکستر بادی و سرباره بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

امیربهادر مرادی خو[1]، علیرضا اسپرهم[2]

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران.

۲- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران.

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط :amirbahador.mk@gmail.com

چکیده

بتن ژئوپلیمری در سال‌های اخیر به عنوان یک جایگزین سبز برای بتن پرتلند مطرح شده است که می‌تواند از اثرات منفی زیست محیطی تولید سیمان پرتلند بکاهد. در این پژوهش آزمایشگاهی اثرجایگزینی خاکستر بادی کلاس F و سرباره به جای متاکائولن، بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، مورد مطالعه قرار گرفت. پس از انجام آزمایش‌های اولیه، به منظور بررسی تاثیر خاکستر بادی و سرباره بر مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری، این مواد در نسبت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین شدند و نمونه‌ها ساخته و عمل‌آوری شدند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای گرفته شد. نتایج نشان داد استفاده از خاکستر بادی کلاس F و سرباره، سبب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می‌شود.

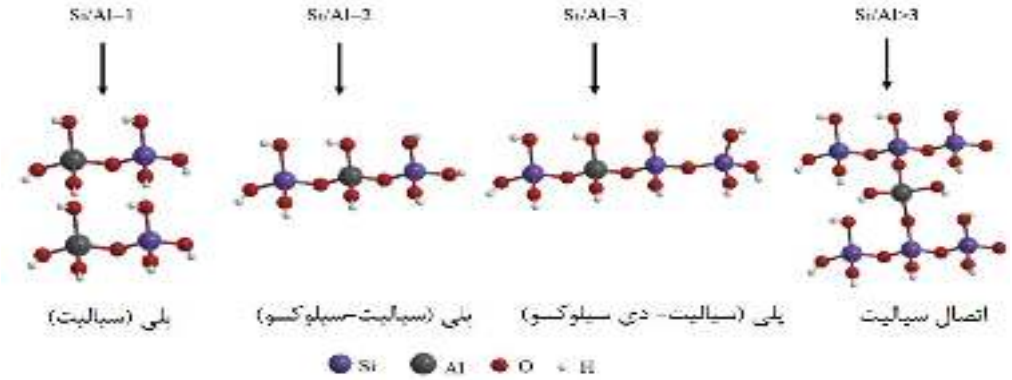
کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، متاکائولن، سرباره، خاکستر بادی، مقاومت فشاری.

۱. مقدمه

سیمان پرتلند به عنوان عنصر اصلی سازنده بتن‌های معمولی، پرمصرف‌ترین مصالح سیمانی در صنعت ساخت ساز است [۴-۱]. اما تولید سیمان پرتلند معایب بزرگ زیست محیطی دارد از جمله مصرف بالای انرژی، مصرف منابع اولیه و انتشار گاز دی‌اکسید کربن [۱ و ۵]. به طوری که تولید ۱ تن سیمان پرتلند سبب رها سازی تقریبا ۱ تن دی‌اکسید کربن به محیط زیست [۸-۶] و مصرف ۱/۵ تن مواد اولیه می‌شود [۹]. از سوی دیگر، آلودگی و پدیده گرمایش جهانی به مهمترین نگرانی‌ها در کشورهای پیشرفته تبدیل شده‌اند [۲]. 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 [۱۰]. فرآیند تولید سیمان پرتلند عامل تولید ۷

تا ۱۰ درصد از کل میزان انتشار جهانی دی‌اکسید کربن است [۱۱]. کشور ما نیز به عنوان پنجمین تولید کننده سیمان پرتلند در معرض این مشکلات زیست محیطی قرار دارد. در سال‌های اخیر ژئوپلیمرها به عنوان یک عامل سیمانی سبز و یک جایگزین مناسب برای سیمان پرتلند، در سراسر جهان مطرح شده است. ژئوپلیمر برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی توسط Davidovits شیمیدان برجسته فرانسوی، به عنوان بایندرهای جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی شد. استفاده از سیمان های ژئوپلیمری می تواند انتشار دی‌اکسید کربن را ۴۴-۶۴ درصد در مقایسه با سیمان پرتلند، کاهش دهد [۱۲] همچنین، سبب استفاده بهینه از ضایعات موجود می‌شود که تاثیر مثبتی بر محیط زیست دارد [۱۳]. از نقطه نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن های ژئوپلیمری خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن های معمولی دارند که از جمله آنها می توان مقاومت های مکانیکی [۱۴-۱۶]، کارایی بالا [۱۷]، مقاومت در برابر آتش سوزی و حرارت های بالا [۱۸-۲۰]، نفوذ پذیری کم و مقاومت در برابر حمله نمک ها و اسید ها [۲۱ و ۲۲] وخزش پایین [۲۳ و ۲۴] اشاره کرد.

ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از واکنش ژئوپلیمریزاسیون منبع آلومیناسیلیکاتی غنی از سیلیکا (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) با یک محلول قلیایی فعال کننده حاصل می‌شوند [۲۵ و ۲۶]. ژئوپلیمریزاسیون واکنش سریع شیمیایی در شرایط قلیایی بین مینرال‌های Si و Al است که باعث تشکیل زنجیره سه بعدی پلیمری Si-O-Al می‌شود [۲۹-۲۷]. Davidovits 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. وی اعتقاد دارد سه مونومر اصلی پلی سیالیت (PS)، پلی سیالیت سیکلو (PSS) و پلی سیلیکات دی سیکلو (PSDS)، اساس ساختمان ژئوپلیمرها را تشکیل می‌دهند [۳۰-۳۳]. در شکل ۱ تصویر شماتیک این مونومرها نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر شماتیک سه مونومر PS، PSS و PSDS

محلول فعال‌کننده قلیایی به عنوان یکی از دو بخش اصلی ژئوپلیمرها نقش مهمی در تجزیه و تشکیل ساختار کریستالی Si و Al ایفا می‌کند و معمولا بر مبنای سدیم یا پتاسیم که از فلزات قلیایی حلال هستند، انتخاب می شود. رایج‌ترین محلول فعال‌کننده قلیایی مورد استفاده در ژئوپلیمریزاسیون، ترکیبی ازمحلول هیدروکسید سدیم (NaOH) یا پتاسیم (KOH) با محلول سیلیکات سدیم یا پتاسیم است [۳۴]. منبع آلومیناسیلکاتی که با نام‌های دیگری مانند منبع ژئوپلیمریزاسیون، raw material، source material و بایندر شناخته می‌شود به عنوان تامین کننده Si و Al مهمترین نقش را در سیمان‌های ژئوپلیمری دارد. منبع آلومیناسیلیکاتی می‌تواند طبیعی مانند زئولیت یا کائولن، صنعتی مانند متاکائولن و یا مواد ضایعاتی یا محصول جانبی[۱]باشد که معمول‌ترین آنها فلی‌اش یا خاکستر بادی[۲]و سرباره کوره آهن گدازی[۳]است [۳۹-۳۵]. نوع منبع، محتوای عناصر منبع، ساختار مولکولی و درجه کریستالین

---

[۱] By product

[۲] Fly ash

[۳] Granulated Blast Furnace Slag (GGBS)

منبع، مواد قلیایی موجود در منبع، نسبت Si/Al در منبع و غیره از پارامترهای تاثیرگذار در مقاومت بتن‌های ژئوپلیمری است. یکی از منابع آلومیناسیلیکاتی متاکائولن است. متاکائولن از کلسینه کردن کائولن در دمای ۶۰۰ – ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. در این مقاله از متاکائولن به عنوان منبع اصلی آلومیناسیلیکاتی استفاده شد. سرباره کوره آهن گدازی که به اختصار سرباره نامیده می‌شود، محصول جانبی کوره ذوب آهن است که به دلیل ماهیت ساختاری یکی از پر پتانسیل‌ترین منابع آلومیناسیلیکاتی است [۳۹ و ۴۰]. خاکستر بادی محصول جانبی نیروگاه ذغالسنگ سوز است که به دلیل ماهیت ساختاری آمورف می‌تواند یکی از بهترین منابع اولیه ژئوپلیمریزاسیون باشد [۳۹]. خاکستر بادی در دو کلاس C (دارای مقادیر زیاد اکسید کلسیم[۴]) و F (حاوی مقادیر کم اکسید کلسیم) دسته‌بندی می‌شود. در این مقاله از خاکستر بادی کلاس F و سرباره به عنوان منابع آلومیناسیلیکاتی جایگزین متاکائولن، برای ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده شد.

در زمینه ترکیب منابع آلومیناسیلیکاتی تحقیقات اندکی انجام شده است که در ادامه به اختصار به آنها پرداخته می‌شود. Zhang و همکاران [۴۱] در پژوهشی در خصوص مطالعه مقاومت حرارتی ژئوپلیمرها، از ترکیب متاکائولن و خاکستر بادی استفاده و نتیجه‌گیری کردند جایگزینی خاکستر بادی به میزان ۵۰ درصد، سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. Fernández-Jiménez و همکاران [۴۲] نیز در پژوهشی در این رابطه نتایج مشابهی گرفتند. Rajamma و همکاران [۴۳] نیز اثرات مثبت جایگزین کردن خاکستر بادی تا ۴۰ درصد به جای متاکائولن را مشاهده کردند. Bernal و همکاران [۴۴] نیز در پژوهشی در مورد استفاده از ترکیب سرباره و متاکائولن، نتیجه‌گیری کردند که استفاده از ۴۰ درصد سرباره به جای متاکائولن، سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌شود. Yip و دیگران [۴۵] نیز در جریان تحقیقاتشان نتیجه گیری کردند ترکیب سرباره (زیر ۴۰ درصد) و متاکاولن، سبب افزایش مقاومت فشاری و دوام بتن و همچنین بهبود میکروساختار سیمان ژئوپلیمری می‌شود.

در این پژوهش آزمایشگاهی تلاش شد نقش ترکیب خاکستر بادی و سرباره با متاکائولن بر مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی بتن ژئوپلیمری مورد مطالعه قرار گیرد. در همین راستا، خاکستر بادی و سرباره در نسبت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، جایگزین متاکائولن شد و نمونه‌های بتن ژئوپلیمری ساخته و عمل‌آوری شدند. سپس آزمون مقاومت فشاری، کششی غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای ۷ و ۲۸ روزه از نمونه‌ها گرفته شد. در پایان نتایج به دست آمده گردآوری و تحلیل و گزارش شدند.

۲. مواد

منبع آلومیناسیلیکاتی اصلی در این پژوهش متاکائولن بود. متاکائولن مصرفی از معادن اطراف اصفهان تهیه شد که آنالیز XRF آن در جدول ۱ ارائه شده است. سرباره مصرفی نیز محصول شرکت ذوب آهن اصفهان بود که آنالیز XRF آن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین خاکستر بادی از نوع کلاس F و محصول هند بود. آنالیز XRF این ماده نیز در جدول ۳ ارائه شده است. تصویر این منابع نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱ – آنالیز XRF متاکائولن

SiO_2	Al_2O_3	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	ZrO_2	K_2O	Na_2O	MnO	L.O.I
54.45	30.21	1.23	1.41	4.89	0.10	4.05	2.32	0.11	1.41

جدول ۲- آنالیز XRF سرباره

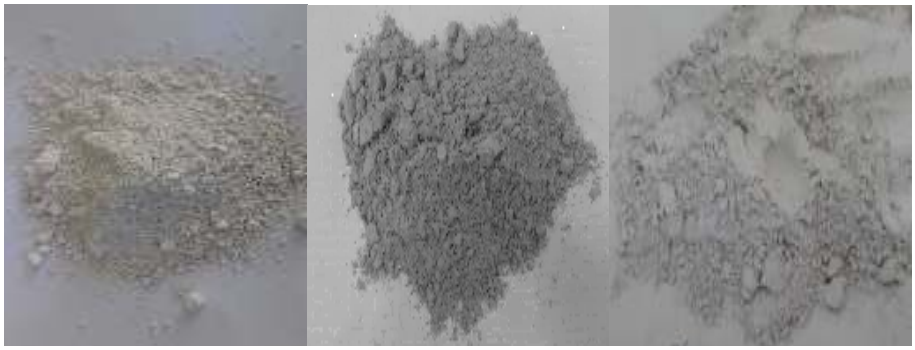
SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K^2O	Na_2O	MnO	Cl
34.4	11.2	37	0.6	9.8	0.68	0.6	1.58	0.002

جدول ۳- آنالیز XRF خاکستر بادی کلاس F

SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K^2O	TiO_2	Na_2O	MnO	P_2O_5

[۴] CaO

70.7	21.1	1.13	3.90	0.77	1.09	0.92	0.26	0.05	0.05



سرباره **خاکستر بادی کلاس F** **متاکائولن**

شکل ۲ – تصاویر منابع آلومیناسیلیکاتی مورد استفاده در این مقاله

هیدروکسید سدیم (NaOH) با خلوص ۹۸ درصد از شرکت قطران شیمی خریداری شد و محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت SiO_2 به Na_2O برابر با ۲ از شرکت نفیس سیلیکات اصفهان خریداری شد. آنالیز شیمیایی این دو ماده در جدول ۴ نشان داده شده است. شن و ماسه مصرفی از معادن اطراف شهریار تهیه شد. شن مصرفی از نوع شن شکسته بود که پس از تهیه، توسط الک استاندارد ASTM دانه‌بندی شد. در این پژوهش، از شن در ۲ اندازه ۱۰ و ۷ میلی‌متری استفاده شد. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C۱۲۷ [۴۶] از شن مصرفی، گرفته شد. این آزمایش از ماسه نیز مطابق با استاندارد ASTM C۱۲۸ [۴۷]، به عمل آمد که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین ضریب نرمی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C۱۳۶ [۴۸] ، ۳/۰۱۱۳، میزان رد شده از الک شماره ۲۰۰، ۰/۷۲ درصد و ارزش ماسه‌ای نیز بر اساس استاندارد ASTM D۲۴۱۹ [۴۹]، ۷۳ اندازه‌گیری شد. آب مصرفی نیزآب لوله کشی شهر تهران بود. روان‌کننده مورد استفاده نیز از نوع پلی‌کربوکسیلاتی با وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب، بود که از کلنیک تخصصی بتن خریداری شده بود.

جدول ۴ – آنالیز شیمیایی محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم

NaOH			Na_2SiO_3 solution		
Chemical analysis	Result	Unit	Chemical analysis	Result	Unit
NaOH	98	%			
Na_2CO_3	1	%	SiO_2	30.00	%
NaCl	200	ppm	Na_2O	14.50	%
Fe	6	ppm	Water	55.50	%
SiO_2	15.7	ppm			
Appearance	White flake		Appearance	Clear liquid	

جدول ۵ – جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌ها

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

۳. روش آزمایشگاهی

پس از انجام آزمایش‌های اولیه و استفاده از نتایج تحقیقات قبلی [۵۰]، طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن انتخاب شد و سرباره و خاکستر بادی در نسبت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین متاکائولن شد. طرح‌های اختلاط در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶ – طرح‌های اختلاط بتن ژئوپلیمری

نام طرح	متاکائولن	خاکستر بادی	سرباره	هیدروکسید سدیم	سیلیکات سدیم	شن	ماسه	روان کننده	آب اضافه	مقیاس
M	350	0	0	140	210	840	840	14	30	Kg/m^3
MF۱۰	315	35	0	140	210	840	840	14	30	Kg/m^3
MF۲۰	280	70	0	140	210	840	840	14	30	Kg/m^3
MF۳۰	245	105	0	140	210	840	840	14	30	Kg/m^3
MS۱۰	315	0	35	140	210	840	840	14	30	Kg/m^3
MS۲۰	280	0	70	140	210	840	840	14	30	Kg/m^3
MS۳۰	245	0	105	140	210	840	840	14	30	Kg/m^3

در این طرح اختلاط:

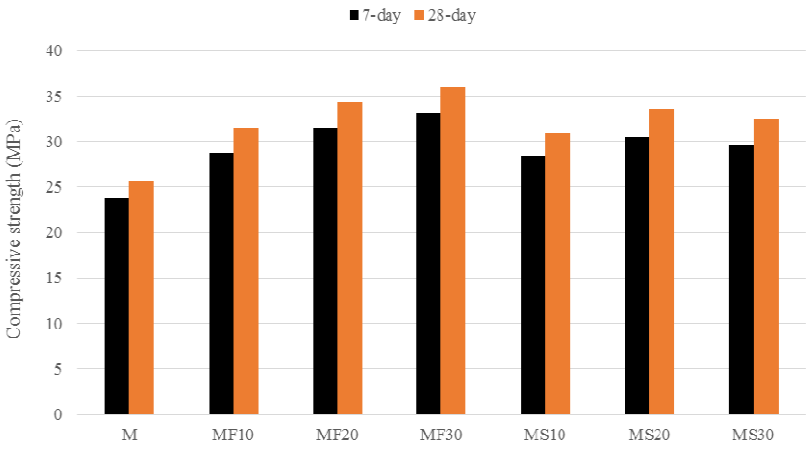
- نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۱/۵ است.
- غلظت محلول هیدروکسید سدیم ۱۴ مولار است.
- میزان روان کننده ۴ درصد وزنی متاکائولن است.
- نسبت شن به ماسه برابر ۱ است.
- نسبت شن ۷ به ۱۰ میلی‌متری برابر ۱ است.
- نسبت بایندر به سنگدانه ۰/۲ است.
- نسبت سنگدانه به وزن کل بتن ۸۰ درصد است.

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا محلول فعال‌کننده قلیایی آماده شد. به همین منظور ابتدا محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مولار با محلول سیلیکات سدیم و روان کننده مطابق با طرح‌های اختلاط، مخلوط شد. به محلول به دست آمده ۲۴ ساعت زمان داده شد تا سرد شود. در روز آزمایش، ابتدا مواد خشک شامل: شن، ماسه، متاکائولن، سرباره و خاکستر بادی مطابق با طرح‌های اختلاط در میکسر پرتابی بتن ریخته و به مدت ۳ دقیقه به منظور توزیع یکنواخت به صورت خشک، میکس شدند. سپس محلول فعال‌کننده قلیایی و آب اضافه به میکسر اضافه شد و مخلوط بتن به مدت ۲ دقیقه میکس شد. بعد از اتمام میکس، نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی بتن قالب‌بندی شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز ویبره، متراکم شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. پس از پایان عمل‌آوری، نمونه‌ها از آون خارج شده و در دمای محیط قرار گرفتند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری، کششی و خمشی ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد. لازم به ذکر است ابعاد نمونه‌های فشاری ۱۰×۱۰×۱۰، خمشی ۵۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر بود. همچنین ابعاد نمونه‌های کششی نیز سیلندری ۱۰×۲۰ سانتی‌متر بود.

آزمون‌های انجام شده شامل: آزمون مقاومت فشاری بر اساس BS۱۸۸۱: Part۱۱۶ [۵۱] آزمون کشش غیرمستقیم (برزیلین) بر اساس ASTM C۴۹۶ [۵۲]، آزمون مقاومت خمشی بر اساس ASTM C۲۹۳ [۵۳]، بود.

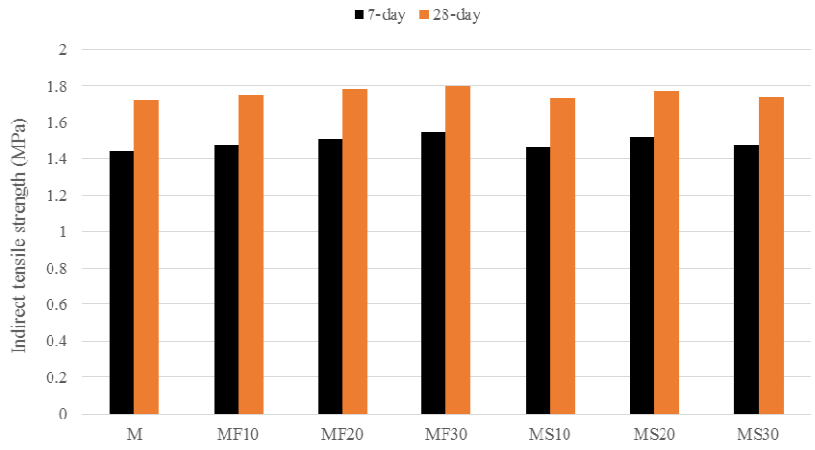
۴. نتایج و بحث

نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها و بررسی تاثیر جایگزینی خاکستر بادی و سرباره در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه M (۱۰۰ درصد متاکائولن) ۲۳/۸ و ۲۵/۶ مگاپاسکال بود. جایگزین کردن ۱۰ درصد خاکستر بادی (MF۱۰)، سبب افزایش تقریبا ۲۳ درصدی مقاومت فشاری شد. همچنین با افزایش بیشتر درصد جایگزینی خاکستر بادی به میزان ۲۰ و ۳۰ درصد (MF۲۰ و MF۳۰) مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز بیشتر افزایش یافت به طوری که در نسبت ۳۰ درصد، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه MF۳۰ با تقریبا ۴۱ درصد افزایش نسبت به M، به ۳۳/۱ و ۳۶ مگاپاسکال رسید. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه MS۱۰ که شامل ۱۰ درصد سرباره و ۹۰ درصد متاکائولن بود، به ترتیب ۲۸/۳ و ۳۰/۹ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد (تقریبا ۲۱ درصد افزایش نسبت به ۱۰۰ درصد متاکائولن). با جایگزینی بیشتر سرباره به میزان ۲۰ درصد (MS۲۰)، روند بهبود مقاومت فشاری نیز افزایش یافت و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه این نمونه با تقریبا ۳۱ درصد افزایش نسبت به طرح M، ۳۰/۵ و ۳۳/۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. اما با جایگزینی بیشتر سرباره به میزان ۳۰ درصد (MS۳۰)، بر خلاف خاکستر بادی، مقاومت فشاری نمونه اندکی نسبت به MS۲۰ کاهش یافت (۴ درصد).



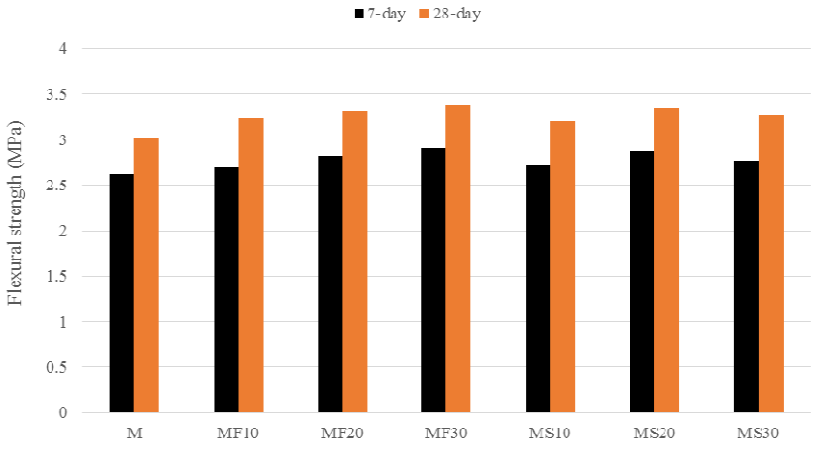
شکل ۳ – نتایج آزمون مقاومت فشاری

نتایج آزمون مقاومت کششی و خمشی نمونه‌ها نیز در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. همان طور که نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه M، به ترتیب ۱/۴۴ و ۱/۷۲ مگاپاسکال اندازه گیری شد. جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی به جای متاکائولن سبب افزایش تقریبا ۲، ۴ و ۵ درصدی مقاومت کششی نسبت به طرح M شد. به طوری که بیشترین مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه در طرح MF۳۰ به میزان ۱/۵۵ و ۱/۸ مگاپاسکال مشاهده شد. جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد سرباره به جای متاکائولن سبب افزایش تقریبا ۱ و ۳ درصدی مقاومت کششی نسبت به طرح M شد. اما با جایگزینی بیشتر سرباره به میزان ۳۰ درصد به جای متاکائولن، مشابه با مقاومت فشاری، مقاومت کششی نیز اندکی نسبت به MS۲۰ کاهش یافت (۱ درصد).



شکل ۴ – نتایج آزمون مقاومت کششی

در رابطه مقاومت خمشی نیز نتایج مشابه مقاومت کششی بود. با توجه به نتایج شکل ۵، مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه نمونه M (۱۰۰ درصد متاکائولن)، به ترتیب ۲/۶۲ و ۳/۰۲ مگاپاسکال بود. جایگزینی خاکستر بادی به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به جای متاکائولن سبب افزایش ۷، ۱۰ و ۱۲ درصدی مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به طرح N شد و همچنین جایگزینی سرباره به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به جای متاکائولن سبب افزایش ۶، ۱۱ و ۸ درصدی مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به طرح N شد. بیشترین مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به طرح MS_{30} به میزان ۲/۹ و ۳/۳۸ مگاپاسکال بود.



شکل ۵ – نتایج آزمون مقاومت خمشی

در خصوص جمع بندی نتایج بدست آمده می‌توان گفت جایگزینی خاکستر بادی به جای متاکائولن، سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه ۱۰۰ درصد متاکائولن شد. این موضوع می‌تواند به دلایل مختلفی مرتبط باشد. اولین پارامتر میزان آمورف بودن یا درجه کریستالین منبع آلومیناسیلیکاتی است. این پارامتر در اغلب موارد نادیده گرفته می‌شود ولی یکی از شروط مهم منبع آلومیناسیلیکاتی است. منابع دارای درجه کریستالین بالا، به دلیل عدم واکنش پذیری و داشتن ساختار کریستالی قوی و منظم نمی‌توانند به نحو موثری در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون شرکت کنند زیرا شکستن

ساختارهای SiO_2 و Al_2O_3 برای تبدیل شدن به مونومرهای SiO_4 و AlO_4^- در این منابع، به میزان کمتر و سخت‌تر انجام می‌شود [۳۹]. خاکستر بادی به لحاظ ساختاری آمورف‌تر نسبت متاکائولن است در نتیجه جایگزین کردن یک ماده آمورف به جای یک ماده کمتر آمورف، سبب افزایش روند ژئوپلیمریزاسیون و افزایش مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری می‌شود [۳۹ و ۴۰]. از سوی دیگر، یکی دیگر از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری نسبت Si/Al منبع آلومیناسیلیکاتی است. پژوهشگران متعددی نسبت Si/Al را موثرترین پارامتر بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌دانند. این پژوهشگران بهینه این نسبت را بین ۳/۳ تا ۳/۵ گزارش کرده‌اند که منجر به دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری می‌شود [۳۴، ۴۰، ۵۴ و ۵۵]. نسبت Si/Al در متاکائولن مصرفی در این پژوهش برابر با ۱/۸ بود. این نسبت در خاکستر بادی ۳/۳۵ است. در واقع با ترکیب خاکستر بادی به جای متاکائولن، علاوه بر آمورف‌تر شدن ماده سازنده سیمان، نسبت Si/Al نیز افزایش یافته و به حد بهینه (۳/۳ تا ۳/۵) نزدیک تر می‌شود. در نتیجه مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش یافته و همچنین با افزایش نسبت جایگزینی، میزان افزایش و بهبود مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نیز افزایش می‌یابد. میزان بهینه جایگزینی خاکستر بادی در این پژوهش ۳۰ درصد اندازه‌گیری شد.

از سوی دیگر، جایگزین کردن سرباره به جای متاکائولن نیز سبب افزایش مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن شد. این مساله نیز می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. یکی از دلایل مشابه با خاکستربادی، ساختار آمورف‌تر و واکنش‌پذیرتر سرباره نسبت به متاکائولن است. اما دلایل دیگر می‌تواند با خاکستر بادی متفاوت باشد. اگرچه نسبت Si/Al سرباره برابر ۳ است و مشابه با خاکستر بادی می‌تواند باعث افزایش مقاومت‌های مکانیکی بتن شود ولی پارامترهای مهم دیگری نیز وجود دارد که باعث اختلاف در نتایج حاصله از جایگزینی سرباره با خاکستر بادی شده است. پارامتر تاثیرگذار دیگر میزان محتوای CaO منبع آلومیناسیلیکاتی است. این پارارمتر با توجه به نتایج این مقاله و پژوهش‌های قبلی ما [۳۹] نقش قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری دارد. van Jaarsveld و همکاران [۵۴] در پژوهشی در مورد ژئوپلیمرها نتیجه‌گیری کردند که ویژگی‌های منبع آلومیناسیلیکاتی به ویژه میزان CaO، خواص ژئوپلیمر را تعیین می‌کند. Xu و همکاران [۵۶] نیز میزان CaO منبع آلومیناسیلکاتی را در کنار پارامترهای محلول قلیایی و نسبت Si/Al، از فاکتورهای مهم و تاثیرگذار بر خصوصیات و مقاومت‌های ژئوپلیمر می‌دانند. در حالت استفاده از خاکستر بادی و متاکائولن با توجه به اینکه هر دو ماده دارای درصد بسیار کم CaO هستند (۱/۱۳ و ۱/۲۳ درصد)، لذا نقش CaO در مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری کلیدی نیست. اما در خصوص سرباره با توجه به درصد بالای CaO در سرباره (۳۷ درصد) این نقش می‌تواند مهم و تاثیرگذار باشد. استفاده از سرباره تا ۲۰ درصد، به دلیل داشتن مقادیر زیاد CaO و بالا رفتن نسبت Ca/Si و همچنین پتانسیل CaO برای ژئوپلیمریزاسیون یون Ca^{2+} و تشکیل زنجیره با این یون [۳۹ و ۴۰] منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری شد. اما از سوی دیگر، با افزایش بیشتر نسبت جایگزینی سرباره از ۲۰ به ۳۰ درصد مقاومت‌های مکانیکی بتن نسبت به ۲۰ درصد سرباره، کاهش یافت. یکی دیگر از پارامترهای مهم منابع آلومیناسیلکاتی میزان Al_2O_3 موجود در منبع است [۳۹]. همان طور که گفته شد و نتایج این مقاله نشان داد با افزایش میزان CaO (Ca/Si) در منبع آلومیناسیلیکاتی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. اما از سوی دیگر در منابع آلومیناسیلیکاتی با میزان بالای CaO، میزان Al_2O_3 موجود در منبع از اهمیت بسیار بالایی برخودار است. در این منابع آلومیناسیلیکاتی در صورت وجود مقادیر زیاد Al_2O_3، میزان زیادی از Al^{3+} نیز تولید می‌شود. این ماده با Ca واکنش داده و باعث تشکیل ترکیبات کلسیم آلومینات در کنار شبکه ژئوپلیمر و ژل C-H-S می‌شود که این موضوع سبب کاهش مقاومت فشاری ژئوپلیمر می‌شود [۳۹ و ۴۰]. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، متاکائولن دارای مقادیر زیاد Al_2O_3 است (۳۰/۲۱ درصد) در نتیجه هنگام استفاده از ترکیب متاکائولن و سرباره اگر میزان سرباره بیش از اندازه (۳۰ درصد) باشد مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان بهینه جایگزینی سرباره برای بیشترین تاثیرگذاری در بهبود مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی در این پژوهش، ۲۰ درصد سنجش شد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی سعی شد در حد توان به مطالعه نقش جایگزینی خاکستر بادی کلاس F و سرباره کوره آهن‌گدازی به جای متاکائولن، بر مقاومت‌های فشاری، کشی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن پرداخته شود در این راستا پس از انجام آزمایش‌های مربوطه و تجزیه و تحلیل داده‌ها، موارد زیر به عنوان نتیجه‌گیری این مقاله ارائه می‌شود:

- جایگزینی خاکستر بادی کلاس F به جای متاکائولن در ترکیب بتن ژئوپلیمری، سبب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن شد. میزان بهینه جایگزینی خاکستر بادی در این پژوهش، ۳۰ درصد سنجش شد که موجب افزایش تقریبا ۴۰، ۵ و ۱۲ درصدی مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری نسبت به نمونه شاهد (۱۰۰ درصد متاکائولن) شد.
- جایگزینی سرباره به جای متاکائولن در ترکیب بتن ژئوپلیمری، سبب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن شد. میزان بهینه جایگزینی خاکستر بادی در این پژوهش، ۲۰ درصد سنجش شد که موجب افزایش تقریبا ۳۱، ۳ و ۱۰ درصدی مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری نسبت به نمونه شاهد (۱۰۰ درصد متاکائولن) شد.
- اگرچه جایگزینی هر دو منبع آلومیناسیلیکاتی خاکستر بادی کلاس F و سرباره سبب بهبود مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری شد اما جایگزینی خاکستر بادی کلاس F منجر به دستیابی به نتایج بهتری می‌شود.

۶. مراجع

[۱] Davidovits, J. (۱۹۹۴). “Global warming impact on the cement and aggregates industries”. World Resour. Rev, Vol. ۶(۲), pp ۲۶۳–۲۷۸.

[۲] Part, W.K., Ramli, M. and Cheah, C.B. (۲۰۱۵). “An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products”. Constr. Build. Mater, Vol. ۷۷, pp ۳۷۰–۳۹۵.

[۳] Yusuf, M.O., Megat Johari, M.A., Ahmad, Z.A. and Maslehuddin, M. (۲۰۱۴). “Strength andmicrostructure of alkali-activated binary blended binder containing palm oilfuel ash and ground blast-furnace slag”. Constr. Build. Mater, Vol. ۵۲, pp ۵۰۴–510.

[۴] Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Arulrajah, A., Shen, S. and Chindaprasirtf, P. (۲۰۱۸). “High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material”. Journal of Hazardous Materials, Vol. ۳۴۱, pp ۲۵۷–۲67.

[۵] Haddad, R.H. and Alshbuol, O. (۲۰۱۶). “Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: a parametric study”. Constr. Build. Mater, Vol. ۱۱۴, pp ۶۹۹–۷۰۷.

[۶] Davidovits, J. (۲۰۱۳). “Geopolymer Cement Geopolymer Cement”. a review.

[۷] Hasanbeigi, A., Menke, C. and Price, L. (۲۰۱۰). “The CO۲ abatement cost curve for the Thailand cement industry”. J. Clean. Prod, Vol. ۱۸, pp ۱۵۰۹–۱۵۱۸.

[۸] Malhotra, V.M. (۲۰۰۶). “Reducing CO۲ Emissions”. ACI Concrete International, Vol. ۲۸, pp ۴۲-45.

[۹] Rashad, A.M. (۲۰۱۳). “A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag–a guide for civil engineer”. Constr. Build. Mater, Vol. ۴۷, pp 29–55.

[۱۰] McCaffrey, R. (۲۰۰۲). “Climate change and the cement industry”. Global. Cem. Lime Mag, pp ۱۵–9.

[۱۱] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. and Jullien, A. (۲۰۱۰). “Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation”, J. Clean. Prod, Vol. ۱۸, pp ۴۷۸–۴۸۵.

[۱۲] Mclellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., Van Riessen, A. and Corder, G.D. (۲۰۱۱). “Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement”. J. Clean. Prod, Vol. ۱۹, pp ۱۰۸۰–۱۰۹۰.

[۱۳] Assi, L.N., Deaver, E.E. and Ziehl, P. (۲۰۱۸). “Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete”. Constr. Build. Mater, Vol. ۱۶۷, pp ۳۷۲–۳۸۰.

[۱۴] Amnadnua, K., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. (۲۰۱۳). “Strength, water permeability: and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash”. Mater. Des, Vol. ۵۱, pp ۸۹۴–۹۰۱.

[۱۵] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J. (۲۰۰۷). “The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’”. Cem. Concr. Res, Vol. ۳۷(۱۲), pp 1590–1597.

[۱۶] Wang, S.D., Scrivener, K.L. and Pratt, P. (۱۹۹۴). “Factors affecting the strength of alkali activated slag”. Cem. Concr, Res. Vol. ۲۴(۶), pp ۱۰۳۳–۱۰۴۳.

[۱۷] Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I. and Palomo, A. (۲۰۰۷). “Durable characteristics of alkali activated fly ashes”. J. Mater. Sci, Vol. ۴۲, pp ۳۰۵۵–۳۰۶۵.

[۱۸] Cheng, T.W. and Chiu, J.P. (۲۰۰۳). “Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag”. Miner. Eng, Vol. ۱۶(۳), pp ۲۰۵–۲۱۰.

[۱۹] Sarker, P.K., Kelly, S. and Yao, Z. (۲۰۱۴). “Effect of fire exposure on cracking: spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete”. Mater. Des, Vol. ۶۳, pp ۵۸۴–592.

[۲۰] Zhang, H.Y. et al. (۲۰۱۴). “Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications”. Constr. Build. Mater, Vol. ۵۵, pp ۳۸–۴۵.

[۲۱] Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., Vazquez, T. and Grutzeck, M.W. (۱۹۹۹). “Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin”. Cem. Concr. Res, Vol. 27(7), pp 997–1000.

[۲۲] Bakharev, T., J. Sanjayan, J. and Cheng, Y.B. (۲۰۰۳). “Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack”. Cem. Concr. Res, Vol. ۳۳(۱۰), pp ۱۶۰۷–۱۶۱۱.

[۲۳] Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G. and Tao, M. (۲۰۱۳). “Experimental feasibilitystudy of geopolymer as the next-generation soil stabilizer”. Constr. Build. Mater, Vol. ۴۷, pp۱۴۶۸–1478.

[۲۴] Wallah, S.E. (۲۰۱۱). “Creep behaviour of fly ash-based geopolymer concrete”. Civ. Eng. Dimens, Vol. ۱۲, pp ۷۳–۷۸.

[۲۵] DeSilva, P., Sagoe-Crenstil, K. and Sirivivatnanon, V. (۲۰۰۷). “Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_2”. Cem. Concr. Res, Vol. ۳۷(۴), pp ۵۱۲–۵۱.

[۲۶] Part, W.K., M. Ramli, M. and Cheah, C.B. (۲۰۱۵). “An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products”. Constr. Build. Mater, Vol. ۷۷, pp ۳۷۰–۳۹۵.

[۲۷] Gao, K., Lin, K.L., DeYing Wang, C.L., Hwang, B.L.A., Shiu Tuan, H.S. and Cheng, T.W. (۲۰۱۳). “Effect of nano-SiO_2 on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers”. Constr. Build. Mater, Vol. ۴۸, pp ۴۴۱–۴۴۷.

[۲۸] Davidovits, J. (۱۹۹۹). “Chemistry of geopolymeric systems, terminology, Geopolymer’ ۹۹ second international conference”. France, pp ۹–۳۹.

[۲۹] Görhan, G. and Kürklü, G. (۲۰۱۴). “The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures”. Comp. Part B: Eng, Vol. ۵۸, pp 371–377.

[۳۰] Davidovits, J. (۱۹۸۸a). “Soft Mineralurgy and Geopolymers”. Paper presented at the Geopolymer ’۸۸, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiegne, France.

[۳۱] Davidovits, J. (۱۹۸۸b). “Geopolymer Chemistry and Properties”. Paper presented at the Geopolymer ’۸۸, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiegne, France.

[۳۲] Davidovits, J. (۱۹۹۱). “Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials”. Journal of Thermal Analysis, Vol. ۳۷, pp ۱۶۳۳-۱۶۵۶.

[۳۳] Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. (۲۰۰۲a). “The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based Geopolymers”. Chemical Engineering Journal, Vol. ۸۹(۱-۳), pp ۶۳-۷۳.

[۳۴] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V. (۲۰۰۴). “On the development of fly ash-based geopolymer concrete”. ACI Mater. J, Vol. ۱۰۱, pp ۴۶۷–۴۷۲.

[۳۵] Roy, D.M. (۱۹۹۹). “Alkali-activated cements opportunities and challenges”. Cem. Concr. Res, Vol. ۲۹(۲), pp ۲۴۹–۲۵۴.

[۳۶] Mithun, B., et al. (۲۰۱۵). “Flexural fatigue performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate, ” Sel. Sci. Pap.-J. Civil Eng, Vol. ۱۰(۱), pp ۷–۱۸.

[۳۷] Talling, B. and Krivenko, P. (۱۹۹۶). “Blast Furnace Slag-the Ultimate Binder, in: Waste Materials Used in Concrete Manufacturing”. Elsevier, pp ۲۳۵–۲۸۹.

[۳۸] Palankar, N., Shankar, A.R. and Mithun, B. (۲۰۱۵). “Air-cured alkali activated binders for concrete pavements”. Int. J. Pavement Res. Technol, Vol. ۸(۴), pp ۲۸۹–۲۹۴.

[۳۹] مرادی خو، ا.، اسپرهم، ع. (۱۳۹۸). " بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه منابع آلومیناسیلیکاتی مختلف". سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت. دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

[۴۰] Panagiotopoulou, C., Kakali, G., Tsivilis, S., Perraki, T. and Perraki, M. (۲۰۱۰). “Synthesis and Characterisation of Slag Based Geopolymers”. Materials Science Forum, Vol. ۶۳۶-۶37, pp 155-160.

[۴۱] Zhang, H.Y., Kodur, V., Qi, S.L., Cao, L. and Wu, B. (۲۰۱۴). “Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications”. Construction and Building Materials, Vol. ۵۵, 38-45.

[۴۲] Fernández-Jiménez, A., Monzó, M., Vicent, M., Barba, A. and Palomo, A. (۲۰۰۸). “Alkaline activation of metakaolin–fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements”. Microporous and Mesoporous Materials, Vol. 108(1), 41-49.

[۴۳] Rajamma, R., Labrincha, J.A. and Ferreira, V.M. (۲۰۱۲). “Alkali activation of biomass fly ash–metakaolin blends”. Fuel, Vol. 98, 265-271.

[۴۴] Bernal, S.A., Rodríguez, E.D., Mejía de Gutiérrez, R., Gordillo, M. and Provis, J.L. (۲۰۱۱). “Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends”. Journal of Materials Science, Vol. 46(16), 5477-5486.

[۴۵] Yip, C.K., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J. (۲۰۰۵). “The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation”. Cement and Concrete Research, Vol. 35(9), 1688-1697.

[۴۶] ASTM C۱۲۷-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۵.

[۴۷] ASTM C۱۲۸-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۵.

[۴۸] ASTM C۱۳۶ / C۱۳۶M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۴.

[۴۹] ASTM D۲۴۱۹-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۴.

[۵۰] مرادی خو، ا.، حسینی، م.، موسوی کاشی، ا. و امامی، ف. (۱۳۹۸). " نقش الیاف هیبریدی و نانوسیلیس بر مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن". پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه سازه، زلزله و ژئوتکنیک، دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

[۵۱] British Standards Institution, Testing Concrete: Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cubes, BS۱۸۸۱: Part۱۱۶: ۱۹۸۳, London.

[۵۲] ASTM C۴۹۶ / C۴۹۶M-۱7, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۷.

[۵۳] ASTM C۲۹۳ / C۲۹۳M-16, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۶.

[۵۴] van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. (۲۰۰۳). "The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-based Geopolymers". Materials Letters, Vol. 57(7), pp 1272-1280.

[۵۵] Fernández-Jiménez, A. and Palomo. A. (2003). "Characterisation of Fly Ash: Potential Reactivity as Alkaline Cements". Fuel, Vol. 82(18), pp 2259-2265.

[۵۶] Xu, H. and van Deventer, J.S.J. (۲۰۰۲). "Geopolymerisation of Multiple Minerals". Minerals Engineering, Vol. 15(12), pp 1131-1139.