



تأثیر جایگزینی کائولن با سرباره، خاکستر بادی و زئولیت بر مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه کائولن

علیرضا اسپرهم^۱، میرحمید حسینی^۲، اعظم موسوی کاشی^۳، فرشته امامی^۲، امیربهادر مرادی خو^{۱*}

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

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

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

* تهران، Amirbahador.mk@gmail.com

چکیده

بتن ژئوپلیمری در سال‌های اخیر به عنوان یک جایگزین سبز برای بتن پرتلند مطرح شده است که می‌تواند از اثرهای منفی زیست محیطی تولید سیمان پرتلند بکاهد. ژئوپلیمرها از دو بخش اصلی منبع آلومیناسیلیکاتی و محلول فعال‌کننده قلیایی ساخته می‌شوند. رایج‌ترین منابع آلومیناسیلیکاتی متاکائولن، خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی، زئولیت، کائولن است. همچنین، بتن ژئوپلیمری می‌تواند با استفاده از ترکیب این منابع نیز ساخته شود. اما از سوی دیگر، مطالعه تأثیر استفاده از ترکیب این منابع بر مشخصه‌های مختلف بتن ژئوپلیمری مانند مقاومت‌های مکانیکی و غیره، ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش آزمایشگاهی، تأثیر جایگزینی خاکستر بادی کلاس F، سرباره و زئولیت به جای کائولن، بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه کائولن، مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا، این منابع در نسبت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین کائولن شدند. در ادامه، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری ساخته و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد. نتایج نشان داد جایگزینی خاکستر بادی کلاس F و سرباره سبب افزایش و جایگزینی زئولیت سبب کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه کائولن می‌شود.

کلیدواژگان

بتن ژئوپلیمری، کائولن، سرباره، خاکستر بادی، زئولیت

Impact of Replacing Kaolinite with Slag, Fly Ash and Zeolite on the Mechanical Strengths of Geopolymer Concrete Based on Kaolinite

Alireza Esparham¹, Mirhamid Hosseyni², Azam Mousavi Kashi³, Fereshteh Emami², Amir Bahador Moradikhou^{1*}

1. MSc. Student of Civil, Structural, and Geotechnics Engineering Department, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2. Assistant Professor of Civil, Structural, and Geotechnics Engineering Department, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

3. Assistant Professor of Materials Engineering Department, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

* Tehran, Iran, Amirbahador.mk@gmail.com

Abstract

In recent years, geopolymer concrete has been introduced as a green alternative to Portland cement concrete which can potentially reduce negative environmental impacts of Portland cement. Geopolymers are manufactured from 2 main parts: Aluminosilicate source and alkaline activator solution. The most common Aluminosilicate sources used in geopolymers are as follows: fly ash, blast furnace slag, metakaolin and zeolite. Geopolymer concrete can also be manufactured by using a combination of these sources. But, on the other hand, it is necessary to study the impact of using these sources on different characteristics of geopolymer concrete such as mechanical properties and so on. In this experimental study, the effect of replacing kaolinite with fly ash (Class F), slag and zeolite on the compressive, tensile and flexural strengths of geopolymer concrete based on kaolinite, was investigated. In this regard, kaolinite was replaced by these sources in the ratio of 10, 20 and 30%. Subsequently, geopolymer concrete specimens were manufactured and cured at 80°C. Thereafter, they were subjected to 7-days and 28-days compressive, tensile and flexural strength tests. The obtained results indicated that replacing kaolinite with slag and fly ash (Class F) results in increasing compressive, tensile and flexural strengths of geopolymer concrete specimens. Also, replacement of kaolinite with Zeolite reduces the mechanical strengths of geopolymer concrete specimens.

Keywords

Geopolymer Concrete, Kaolinite, Slag, Fly Ash, Zeolite

۱- مقدمه

سیمان پرتلند به عنوان عنصر اصلی سازنده بتن‌های معمولی، پرمصرف‌ترین مصالح سیمانی در صنعت ساخت‌وساز است [1,2]. اما تولید سیمان پرتلند

گفته می‌شود، یک منبع آلومیناسیلیکاتی طبیعی است. در این مقاله از کائولن به عنوان منبع اصلی آلومیناسیلیکاتی استفاده شد. سربراره کوره آهن‌گدازی که به اختصار سربراره نامیده می‌شود، محصول جانبی کوره ذوب آهن است که به دلیل ماهیت ساختاری یکی از پر پتانسیل‌ترین منابع آلومیناسیلیکاتی است [34, 35]. خاکستر بادی محصول جانبی نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز است که به دلیل ماهیت ساختاری آمورف می‌تواند یکی از بهترین منابع اولیه ژئوپلیمریزاسیون باشد [35]. خاکستر بادی در دو کلاس C (دارای مقادیر زیاد اکسیدکلسیم^۴) و F (حاوی مقادیر کم اکسیدکلسیم) دسته‌بندی می‌شود. ژئولیت یکی دیگر از منابع آلومیناسیلیکاتی است که در دو دسته طبیعی و مصنوعی، تقسیم‌بندی می‌شود. ژئولیت طبیعی با توجه به این حقیقت که فراوان‌ترین ترکیب موجود در پوسته زمین آلومیناسیلیکات‌ها هستند، در طبیعت به وفور یافت می‌شود [36]. ژئولیت‌ها آلومیناسیلیکات‌های کریستالینی هستند که ساختار آنها از واحدهای چهار وجهی^۵ سیلیکون-اکسیژن (SiO₄) و آلومینیوم-اکسیژن (AlO₄) تشکیل شده است [37]. بیش از ۵۰ نوع ژئولیت طبیعی تاکنون شناسایی شده است که یکی از این دسته‌ها کلینوپتیلولیت^۶ نام دارد. در این مقاله از خاکستر بادی کلاس F، ژئولیت (کلینوپتیلولیت) و سربراره به عنوان منابع آلومیناسیلیکاتی جایگزین کائولن، 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 [20] در پژوهشی در خصوص مطالعه مقاومت حرارتی ژئوپلیمرها، از ترکیب متاکائولن و خاکستر بادی استفاده و نتیجه‌گیری کردند که جایگزینی خاکستر بادی به میزان 50 درصد، سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. Fernández و Jiménez و همکاران [39] نیز در پژوهشی در این مورد، به نتایج مشابهی دست یافتند. همچنین، Rajamma و همکاران [40] اثرهای مثبت جایگزین کردن خاکستر بادی تا 40 درصد به جای متاکائولن را مشاهده کردند. Bernal و همکاران [41] هم در پژوهشی در خصوص استفاده از ترکیب سربراره و متاکائولن، نتیجه‌گرفتند که استفاده از 40 درصد سربراره به جای متاکائولن، سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌شود. Yip و دیگران [42] نیز در جریان تحقیقاتشان نتیجه‌گیری کردند که ترکیب سربراره (زیر 40 درصد) و متاکائولن، سبب افزایش مقاومت فشاری و دوام بتن و همچنین، بهبود میکروساختار سیمان ژئوپلیمری می‌شود. Andrejkovičová و همکاران [43] در پژوهشی در مورد خمیر سیمان ژئوپلیمری از ترکیب متاکائولن و ژئولیت در درصدهای مختلف جایگزینی، به عنوان منبع آلومیناسیلیکاتی استفاده کردند. این پژوهشگران نتیجه‌گیری کردند که جایگزین کردن ژئولیت به جای متاکائولن سبب افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌شود. Cheng و همکاران [44] نیز در تحقیقاتشان به نتایج مشابهی دست یافتند.

در این پژوهش آزمایشگاهی تلاش شد نقش ترکیب خاکستر بادی، ژئولیت و سربراره با کائولن بر مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی بتن ژئوپلیمری مورد مطالعه قرار گیرد. در همین راستا، خاکستر بادی، ژئولیت و سربراره در نسبت‌های 10، 20 و 30 درصد، جایگزین کائولن شد و نمونه‌های بتن ژئوپلیمری ساخته و عمل‌آوری شدند. سپس، آزمون مقاومت فشاری،

معایب بزرگ زیست محیطی، از جمله: مصرف بالای انرژی، مصرف منابع اولیه و انتشار گاز دی‌اکسید کربن [4,3] دارد. به طوری که تولید یک تن سیمان پرتلند سبب رهاسازی تقریباً یک تن دی‌اکسید کربن به محیط زیست [5-7] و مصرف ۱/۵ تن مواد اولیه می‌شود [8]. از سوی دیگر، آلودگی و پدیده گرمایش جهانی به مهم‌ترین نگرانی‌ها در کشورهای پیشرفته تبدیل شده‌اند [1]. 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 [9]. فرآیند تولید سیمان پرتلند عامل تولید ۷ تا ۱۰ درصد از کل میزان انتشار جهانی دی‌اکسید کربن است [10]. کشور ما نیز به عنوان پنجمین تولیدکننده 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 چسباننده‌ای جدید از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی شد. استفاده از سیمان‌های ژئوپلیمری می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن را ۴۴ تا ۶۴ درصد در مقایسه با سیمان پرتلند، کاهش دهد [11]. همچنین، سبب استفاده بهینه از ضایعات موجود می‌شود که تأثیر مثبتی بر محیط زیست دارد [12]. از نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن‌های ژئوپلیمری خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند که از جمله آنها می‌توان به مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بیشتر [13-15]، سخت شدن سریع‌تر [15,16]، دوام بیشتر [17]، مقاومت در برابر آتش‌سوزی و حرارت‌های بالا [18-20]، نفوذپذیری کمتر و مقاومت در برابر حمله نمک‌ها و اسیدها [21, 22] و خزش کمتر [23, 24] اشاره کرد.

ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از واکنش ژئوپلیمریزاسیون بین منبع آلومیناسیلیکاتی غنی از سیلیکا (SiO₂) و آلومینا (Al₂O₃) با یک محلول فعال‌کننده قلیایی حاصل می‌شوند [25, 26]. ژئوپلیمریزاسیون واکنش سریع شیمیایی در شرایط قلیایی بین عناصر Si و Al است که باعث تشکیل زنجیره سه بعدی پلیمری Si-O-Al می‌شود [27, 28]. 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 معمولاً بر مبنای سدیم یا پتاسیم که از فلزات قلیایی حلال هستند، انتخاب می‌شود. رایج‌ترین محلول فعال‌کننده قلیایی مورد استفاده در ژئوپلیمریزاسیون، ترکیبی از محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) یا پتاسیم (KOH) با محلول سیلیکات سدیم یا پتاسیم است [29]. منبع آلومیناسیلیکاتی که با نام‌های دیگری، مانند: منبع ژئوپلیمریزاسیون، ماده پایه ۱ و چسباننده شناخته می‌شود، به عنوان تأمین‌کننده Si و Al، مهم‌ترین نقش را در سیمان‌های ژئوپلیمری دارد. منبع آلومیناسیلیکاتی می‌تواند طبیعی، مانند: ژئولیت یا کائولن؛ صنعتی، مانند: متاکائولن؛ و یا مواد ضایعاتی یا محصول جانبی^۱ باشد که معمول‌ترین آنها خاکستر بادی^۲ و سربراره کوره آهن‌گدازی^۳ است [30-33]. نوع منبع، محتوای عناصر منبع، ساختار مولکولی مولکولی و درجه کریستالین منبع، مواد قلیایی موجود در منبع، نسبت Si/Al در منبع و غیره از پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت بتن‌های ژئوپلیمری است. یکی از منابع آلومیناسیلیکاتی کائولن است. کائولن که به آن خاک چینی هم

* CaO

5 Tetrahedral

6 Clinoptilolite

1 By Product

2 Fly Ash

3 Granulated Blast Furnace Slag (GGBS)

نیز از نوع پلی کربوکسیلاتی با وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب، بود.

کشتی غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای 7 و 28 روزه از نمونه‌ها گرفته شد. در پایان، نتایج به دست آمده گردآوری و تحلیل و گزارش شدند.

۲- مواد مصرفی

منبع آلومیناسیلیکاتی اصلی در این پژوهش کائولن بود. کائولن مصرفی از کارخانه‌ای در اطراف اصفهان تهیه شد. سربراره مصرفی نیز محصول شرکت ذوب آهن اصفهان بود. همچنین، خاکستر بادی از نوع کلاس F و محصول هند بود. زئولیت مورد استفاده نیز از نوع زئولیت طبیعی و از رده کلینوپتیلولیت بود که از معدن افتر شرق سمنان استخراج شده بود. آنالیز XRF این ماده در جدول 1 ارایه شده است.

جدول 1 آنالیز XRF منابع آلومیناسیلیکاتی مصرفی (%)

محتوای اکسیدها	کائولن	سربراره	خاکستر بادی	زئولیت
SiO ₂	54.4	34.4	70.7	67.7
Al ₂ O ₃	30.2	11.2	21.1	10.4
CaO	1.3	37	1.13	1.6
Fe ₂ O ₃	4.9	0.6	3.9	1.5
K ₂ O	4.1	0.68	1.09	3.2
Na ₂ O	2.3	0.6	0.26	2.2
MnO	0.12	1.58	0.05	0.13
MgO	-	9.8	0.77	-
TiO ₂	1.4	-	0.92	-
ZrO ₂	0.1	-	-	0.99
Cl	-	0.002	-	-
P ₂ O ₅	-	-	0.05	-
LOI	1.4	-	1.8	13.8

محلول فعال‌کننده قلیایی در این پژوهش هیدروکسید سدیم با خلوص 98 درصد و محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت SiO₂ به Na₂O برابر با 2، بود. آنالیز شیمیایی این دو ماده در جدول 2 نشان داده شده است. شن و ماسه مصرفی نیز از معادن اطراف تهران تهیه شد. شن مصرفی از نوع شن شکسته بود که پس از تهیه، توسط الک استاندارد ASTM C33 [45] دانه‌بندی گردید. در این پژوهش، از شن با حداکثر قطر 12.5 میلی‌متر استفاده شد. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C127 [46] از شن مصرفی، گرفته شد. این آزمایش از ماسه مصرفی نیز مطابق با استاندارد ASTM C128 [47]، به عمل آمد که نتایج آن در جدول 3 ارایه شده است. همچنین، ضریب نرمی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C136 [48] برابر با 2.8، میزان رد شده از الک شماره 200، 0.9 درصد و ارزش ماسه‌ای نیز بر اساس استاندارد ASTM D2419 [49]، 74 اندازه‌گیری شد. آب مصرفی هم آب لوله‌کشی شهر تهران بود. روان‌کننده مورد استفاده

جدول 2 آنالیز شیمیایی هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم

Table 2 Chemical Analysis of Sodium Hydroxide and Sodium Silicate

سیلیکات سدیم مایع		هیدروکسید سدیم	
نتیجه واحد	ترکیب شیمیایی	نتیجه واحد	ترکیب شیمیایی
30 %	SiO ₂	98 %	NaOH
14.5 %	Na ₂ O	1 %	Na ₂ CO ₃
55.5 %	Water	200 ppm	NaCl
2.07	Modulus ratio (SiO ₂ /Na ₂ O)	6 ppm	Fe
-		15.7 ppm	SiO ₂

جدول 3 جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌ها

Table 3 Water absorption and specific density of aggregates

ماده	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	جذب آب (%)
شن	2.69	0.8
ماسه	2.65	2.2

۲- روش آزمایشگاهی

پس از انجام دادن آزمایش‌های اولیه و استفاده از نتایج تحقیقات قبلی [50]، طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری بر پایه کائولن انتخاب شد و سربراره، خاکستر بادی و زئولیت در نسبت‌های 10، 20 و 30 درصد جایگزین کائولن شد. طرح‌های اختلاط در جدول 4 ارایه شده است.

برای ساخت نمونه‌ها، نخست محلول فعال‌کننده قلیایی آماده شد. به همین منظور، ابتدا محلول هیدروکسید سدیم با غلظت 14 مولار با محلول سیلیکات سدیم و روان‌کننده مطابق با طرح‌های اختلاط، مخلوط گردید. به محلول به دست آمده 24 ساعت زمان داده شد تا سرد شود. در روز آزمایش، ابتدا مواد خشک شامل: شن، ماسه، کائولن، سربراره، زئولیت و خاکستر بادی مطابق با طرح‌های اختلاط در میکسر پرتابی بتن ریخته و به مدت 3 دقیقه به منظور توزیع یکنواخت به صورت خشک، میکس شدند. سپس، محلول فعال‌کننده قلیایی و آب اضافه به میکسر افزوده و مخلوط بتن به مدت 2 دقیقه میکس گردید. بعد از اتمام میکس، نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی بتن قالب‌گیری شدند. نمونه‌ها به مدت 10 ثانیه روی میز ویریه، متراکم گردیدند. سپس نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در آون و در دمای 80 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 7 و 28 روزه گرفته شد. شایان ذکر است ابعاد نمونه‌های فشاری 10×10×10 و خمشی 10×10×50 سانتی‌متر بود. همچنین، ابعاد نمونه‌های کششی سیلندری 20×10 سانتی‌متر بود.

آزمون‌های انجام شده روی نمونه‌های بتنی شامل: آزمون مقاومت فشاری بر اساس BS1881: Part116 [51]، آزمون کشش غیرمستقیم (برزیلین) بر اساس ASTM C496 [52] و آزمون مقاومت خمشی سه نقطه‌ای بر اساس ASTM C293 [53] بود.

جدول ۴ طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری

Table 4 Mix designs of geopolymers concrete

نام طرح	کائولن	خاکستر بادی	سرباره	ژئولیت	هیدروکسید سدیم	سیلیکات سدیم	شن	ماسه	روان کننده	آب اضافه	مقیاس
M	350	0	0	0	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³
MF10	315	35	0	0	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³
MF20	280	70	0	0	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³
MF30	245	105	0	0	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³
MS10	315	0	35	0	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³
MS20	280	0	70	0	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³
MS30	245	0	105	0	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³
MZ10	315	0	0	35	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³
MZ20	280	0	0	70	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³
MZ30	245	0	0	105	140	210	840	840	8	20	Kg/m ³

شد. اما با جایگزینی بیشتر سرباره به میزان 30 درصد به جای کائولن، مشابه با مقاومت فشاری، مقاومت کششی نیز اندکی نسبت به MS20 کاهش یافت (1 درصد). جایگزین کردن ژئولیت به جای کائولن، شبیه به مقاومت فشاری، در تمام نسبت‌های جایگزینی سبب کاهش مقاومت کششی 7 و 28 روزه نمونه‌ها نسبت به طرح M شد. به طوری که در نسبت جایگزینی 10 درصد (MZ10)، مقاومت کششی 7 و 28 روزه با تقریباً 36 و 39 درصد کاهش نسبت به طرح M، 0.92 و 1.05 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. با افزایش درصد جایگزینی از 10 به 30 درصد، مقاومت کششی نمونه‌ها اندکی افزایش یافت. اما کماکان به طور قابل ملاحظه‌ای از طرح M کمتر است. مقاومت کششی 7 و 28 روزه نمونه MZ30 به ترتیب 1 و 1.16 مگاپاسکال سنجش شد که تقریباً 30 و 32 درصد کمتر از نمونه M است.

در رابطه مقاومت خمشی نیز نتایج مشابه با مقاومت کششی بود. با توجه به نتایج شکل 3، مقاومت خمشی 7 و 28 روزه نمونه M (100 درصد کائولن)، به ترتیب 2.62 و 3.02 مگاپاسکال بود. جایگزینی خاکستر بادی به میزان 10، 20 و 30 درصد به جای کائولن سبب افزایش 7، 10 و 12 درصدی مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به طرح M شد. همچنین، جایگزینی سرباره به میزان 10، 20 و 30 درصد به جای کائولن سبب افزایش 6، 11 و 8 درصدی مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به طرح M گردید. بیشترین مقاومت خمشی 7 و 28 روزه مربوط به طرح MS30 به میزان 2.9 و 3.38 مگاپاسکال بود. همچنین، جایگزینی 10، 20 و 30 درصد ژئولیت سبب کاهش 40، 37 و 32 درصدی مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به طرح M شد.

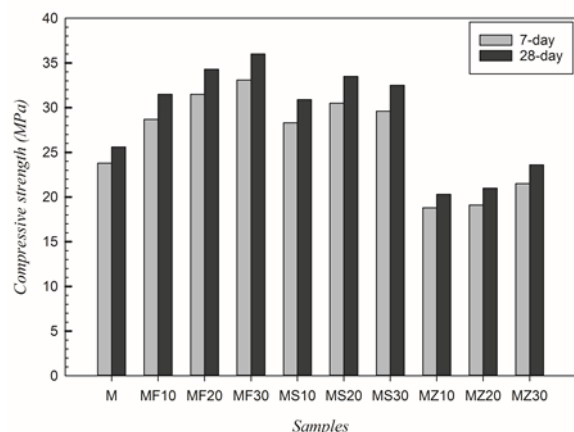


Fig. 1 Compressive strength of geopolymers concrete specimens

شکل ۱ مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری

۴- نتایج و بحث

نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها و بررسی تأثیر جایگزینی خاکستر بادی، ژئولیت و سرباره در شکل 1 ارائه شده است. همان‌طور که شکل 1 نشان می‌دهد، مقاومت فشاری 7 و 28 روزه نمونه M (100 درصد کائولن) 23.8 و 25.6 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. جایگزین کردن 10 درصد خاکستر بادی (MF10)، سبب افزایش تقریباً 23 درصدی مقاومت فشاری گردید. همچنین، با افزایش بیشتر درصد جایگزینی خاکستر بادی به میزان 20 و 30 درصد (MF20 و MF30) مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز بیشتر افزایش یافت. به طوری که در نسبت 30 درصد، مقاومت فشاری 7 و 28 روزه نمونه MF30 با تقریباً 41 درصد افزایش نسبت به M، به 33.1 و 36 مگاپاسکال رسید.

مقاومت فشاری 7 و 28 روزه نمونه MS10 که شامل 10 درصد سرباره و 90 درصد کائولن بود، به ترتیب 28.3 و 30.9 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد (تقریباً 21 درصد افزایش نسبت به 100 درصد کائولن). با جایگزینی بیشتر سرباره به میزان 20 درصد (MS20)، روند بهبود مقاومت فشاری نیز افزایش یافت و مقاومت فشاری 7 و 28 روزه این نمونه با تقریباً 31 درصد افزایش نسبت به طرح M، 30.5 و 33.5 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. اما با جایگزینی بیشتر سرباره به میزان 30 درصد (MS30)، بر خلاف خاکستر بادی، مقاومت فشاری نمونه اندکی نسبت به MS20 کاهش یافت (تقریباً 4 درصد). اما در خصوص ژئولیت نتایج تفاوت داشت. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد جایگزین کردن ژئولیت در حالت کلی و در تمام نسبت‌های جایگزینی، سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه 100 درصد کائولن (M) شد. با جایگزین کردن ژئولیت به میزان 10 درصد (MZ10)، مقاومت فشاری 7 و 28 روزه بتن، به ترتیب تقریباً 21 و 20 درصد نسبت به نمونه M، کاهش یافته است. با افزایش درصد جایگزینی ژئولیت از 10 به 30 درصد، نتایج اندکی بهبود یافت و مقاومت فشاری 7 و 28 روزه طرح MZ30 به ترتیب 21.9 و 23.6 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد که تقریباً 8 درصد نسبت به نمونه M کمتر بود.

نتایج آزمون مقاومت کششی و خمشی نمونه‌ها نیز در شکل‌های 2 و 3 ارائه شده است. همان‌طور که نتایج شکل 2 نشان می‌دهد مقاومت کششی 7 و 28 روزه نمونه M، به ترتیب 1.44 و 1.72 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. جایگزینی 10، 20 و 30 درصد خاکستر بادی به جای کائولن سبب افزایش تقریباً 2، 4 و 5 درصدی مقاومت کششی نسبت به طرح M گردید. به طوری که بیشترین مقاومت کششی 7 و 28 روزه در طرح MF30 به میزان 1.55 و 1.8 مگاپاسکال مشاهده شد. جایگزینی 10 و 20 درصد سرباره به جای کائولن سبب افزایش تقریباً 1 و 3 درصدی مقاومت کششی نسبت به طرح M

پژوهشگران متعددی نسبت Si/Al را مؤثرترین پارامتر بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌دانند. این پژوهشگران میزان بهینه این نسبت را بین 3.3 تا 3.5 گزارش کرده‌اند که منجر به دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری می‌شود [55,54,35,29]. نسبت Si/Al در کائولن مصرفی در این پژوهش برابر با 1.8 بود. این نسبت در خاکستر بادی 3.35 است. در واقع با ترکیب خاکستر بادی به جای کائولن، علاوه بر آمورفتر شدن ماده سازنده سیمان، نسبت Si/Al نیز افزایش می‌یابد و به حد بهینه (3.3 تا 3.5) نزدیکتر می‌شود. در نتیجه، مقاومت فشاری، کششی و خمشی زیاد می‌شود 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 30 درصد اندازه‌گیری شد.

در خصوص جایگزین کردن سربره به جای کائولن، جمع‌بندی نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که جایگزین کردن سربره نیز سبب افزایش مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه کائولن شده است. این مسأله می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. یکی از دلایل مشابه با خاکستر بادی، ساختار آمورفتر و واکنش‌پذیرتر سربره نسبت به کائولن است. اما دلایل دیگر می‌تواند با خاکستر بادی متفاوت باشد. اگرچه نسبت Si/Al سربره برابر با 3 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 حاصل از جایگزینی سربره با خاکستر بادی شده است. پارامتر تأثیرگذار دیگر میزان محتوای CaO منبع آلومیناسیلیکاتی است. این پارامتر با توجه به نتایج این مقاله و پژوهش‌های قبلی ما [34] نقش قابل‌ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری دارد. Van Jaarsveld و همکاران [54] در پژوهشی در مورد ژئوپلیمرها نتیجه‌گیری کردند که ویژگی‌های منبع آلومیناسیلیکاتی به ویژه میزان اکسید کلسیم CaO، خواص ژئوپلیمر را تعیین می‌کند. Xu و همکاران [56] نیز میزان CaO منبع آلومیناسیلیکاتی را در کنار پارامترهای محلول قلیایی و نسبت Si/Al، از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار بر خصوصیات و مقاومت‌های مکانیکی ژئوپلیمرها می‌دانند. در حالت استفاده از خاکستر بادی و کائولن با توجه به اینکه هر دو ماده دارای درصد بسیار کم CaO هستند (1.13 درصد در خاکستر بادی و 1.3 درصد در کائولن)، لذا نقش CaO در مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری کلیدی نیست. اما در خصوص سربره، با توجه به درصد بالای CaO در سربره (37 درصد)، این نقش می‌تواند مهم و تأثیرگذار باشد. جایگزین کردن سربره تا 20 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 [35,34] منجر به افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری شد.

از سوی دیگر، با افزایش بیشتر نسبت جایگزینی سربره از 20 به 30 درصد مقاومت‌های مکانیکی بتن نسبت به حالت جایگزینی 20 درصد سربره، کاهش یافت. دلیل این موضوع می‌تواند یکی دیگر از پارامترهای مهم منابع آلومیناسیلیکاتی، یعنی میزان Al_2O_3 موجود در منبع باشد [34]. همان‌طور که گفته شد و نتایج این مقاله نشان داد، با افزایش میزان CaO (Ca/Si) در منبع آلومیناسیلیکاتی مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی 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 برخوردار 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 می‌دهد و باعث

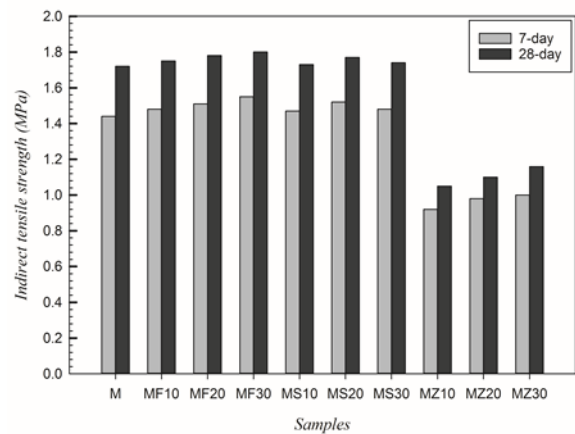


Fig. 2 Indirect tensile strength of gepolymer concrete specimens

شکل ۲ مقاومت کششی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری

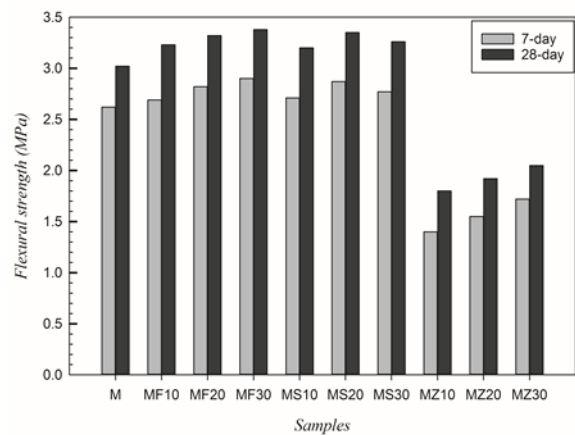


Fig. 3 Flexural strength of gepolymer concrete specimens

شکل ۳ مقاومت خمشی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری

در خصوص جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت جایگزینی خاکستر بادی به جای کائولن، سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه 100 درصد کائولن 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 واکنش‌پذیری و داشتن ساختار کریستالی قوی و منظم نمی‌توانند به نحو مؤثری 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 [34]. خاکستر بادی به لحاظ ساختاری، ساختار مناسب‌تری نسبت به کائولن برای ساختن ژئوپلیمر دارد. در نتیجه، جایگزین کردن خاکستر بادی به جای کائولن، سبب افزایش روند ژئوپلیمریزاسیون و افزایش مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری می‌شود [30-34].

از سوی دیگر، یکی دیگر از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری نسبت Si/Al منبع آلومیناسیلیکاتی است.

3- 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 می‌گردد.

4- جایگزینی ژئولیت به جای کائولن در ترکیب بتن ژئوپلیمری، سبب کاهش قابل‌ملاحظه مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی 7 و 28 روزه بتن شد. میزان بهینه جایگزینی ژئولیت در پژوهش 30 درصد اندازه‌گیری گردید. در این نسبت جایگزینی کمترین کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی 28 روزه به میزان 8، 32 و 31 درصد نسبت به نمونه شاهد (100 درصد کائولن)، سنجش شد.

۶- مراجع

- [1] W. K. Part, M. Ramli, C. B. Cheah, An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymers derived from industrial by-products, *Construction and Building Materials*, Vol. 77, pp. 370–395, 2015.
- [2] M. O. Yusuf, M. A. Megat Johari, Z. A. Ahmad, M. Maslehuiddin, Strength and microstructure of alkali-activated binary blended binder containing palm oil fuel ash and ground blast-furnace slag, *Construction and Building Materials*, Vol. 52, pp. 504–510, 2014.
- [3] J. Davidovits, Global warming impact on the cement and aggregates industries, *World Resource Review*, Vol. 6, No. 2, pp. 263–278, 1994.
- [4] R. H. Haddad, O. Alshbuol, Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: a parametric study, *Construction and Building Materials*, Vol. 114, pp. 699–707, 2016.
- [5] A. Hasanbeigi, C. Menke, L. Price, The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry, *Journal of Clean Production*, Vol. 18, pp. 1509–1518, 2010.
- [6] V. M. Malhotra, Reducing CO₂ Emissions, *ACI Concrete International*, Vol. 28, pp. 42–45, 2006.
- [7] J. Davidovits, Geopolymer cements to minimise carbon-dioxide green house warming, *Ceramic Transactions*, Vol. 37, pp. 165–182, 1993.
- [8] A. M. Rashad, A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag—a guide for civil engineer, *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 29–55, 2013.
- [9] R. McCaffrey, Climate change and the cement industry, *Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)*, pp. 15–19, 2002.
- [10] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, A. Jullien, Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation, *Journal of Clean Production*, Vol. 18, pp. 478–485, 2010.
- [11] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, G. D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement, *Journal of Clean Production*, Vol. 19, No. 9, pp. 1080–1090, 2011.
- [12] L. N. Assi, E. E. Deaver, P. Ziehl, Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 167, pp. 372–380, 2018.
- [13] K. Amnadnua, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, Strength, water permeability and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash, *Materials and Design*, Vol. 51, pp. 894–901, 2013.
- [14] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, J. S. J. van Deventer, The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete', *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 12, pp. 1590–1597, 2007.
- [15] A. B. Moradikhrou, A. Esparham, Comparison of compressive, tensile and flexural strengths and water absorption of geopolymer and conventional concrete, *Proceedings of The 2nd Conference on Civil Engineering, Architecture and Urbanism of the Islamic Countries*, Tabriz, Iran, October, 2019. (in Persian)
- [16] A. B. Moradikhrou, A. Esparham, Experimental study of the comparison of compressive, tensile and flexural strengths and

تشکیل ترکیبات کلسیم آلومینات در کنار شبکه ژئوپلیمر و Zl C-S-H می‌شود که این موضوع سبب کاهش مقاومت فشاری ژئوپلیمر می‌گردد [35,34]. همان‌طور که در جدول 1 مشاهده می‌شود، کائولن دارای مقادیر زیاد Al_2O_3 است (30.2 درصد). در نتیجه، هنگام استفاده از ترکیب کائولن و سرباره اگر میزان سرباره بیش از اندازه (30 درصد) باشد، مقاومت‌های مکانیکی بتن ژئوپلیمری کاهش می‌یابد. در نتیجه، میزان بهینه جایگزینی سرباره برای بیشترین تأثیرگذاری در بهبود مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی در این پژوهش، 20 درصد سنجش شد.

در مورد جایگزین کردن ژئولیت به جای کائولن، جمع‌بندی نتایج نشان داد جایگزینی این ماده به جای کائولن سبب کاهش قابل‌ملاحظه مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری نسبت به حالت استفاده از 100 درصد کائولن شده است. دلیل این موضوع می‌تواند مربوط به ساختار ژئولیت باشد. ژئولیت دارای ساختار کریستالی قوی است [37] و در میان منابع آلومیناسیلیکاتی استفاده شده در این مقاله، قوی‌ترین ساختار کریستالی را داراست و همان‌طور که گفته شد، منبع آلومیناسیلیکاتی باید دارای ساختار مناسب آمورف باشد. ژئولیت در مقایسه با کائولن ساختار کریستالی دارد. در نتیجه جایگزینی یک ماده با درجه کریستالین بالاتر به جای یک ماده با درجه کریستالین پایین‌تر، سبب کاهش نسبی روند ژئوپلیمریزاسیون و در نتیجه، کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی می‌شود. از سوی دیگر، با افزایش درصد جایگزینی ژئولیت از 10 به 30 درصد، کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها اندکی افزایش یافت. دلیل این افزایش مقاومت می‌تواند مربوط به ساختار چهار وجهی شکل کلینوپتیلولیت باشد که موجب تقویت ماتریس ژئوپلیمر کائولن می‌شود [43]. اگرچه همان‌طور که گفته شد، با جایگزینی ژئولیت روند واکنش ژئوپلیمریزاسیون کمتر می‌شود، اما با افزایش درصد جایگزینی ژئولیت به دلیل توانایی ژئولیت در مسلح کردن ماتریس خمیر سیمان ژئوپلیمری کائولن، مقاومت‌های مکانیکی در طرح‌های MZ10 تا MZ30 به تدریج افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی تلاش شد به مطالعه نقش جایگزینی خاکستر بادی کلاس F، ژئولیت طبیعی از نوع کلینوپتیلولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی به جای کائولن، بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن ژئوپلیمری بر پایه کائولن پرداخته شود. در این راستا، پس از انجام دادن آزمایش‌های مربوط و تجزیه و تحلیل داده‌ها، موارد زیر به عنوان نتایج مشخص این مقاله ارائه می‌شود:

1- جایگزینی خاکستر بادی کلاس F به جای کائولن در ترکیب بتن ژئوپلیمری، سبب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن شد. میزان بهینه جایگزینی خاکستر بادی در این پژوهش، 30 درصد اندازه‌گیری شد که موجب افزایش تقریباً 40، 5 و 12 درصدی مقاومت فشاری، کششی و خمشی 28 روزه بتن ژئوپلیمری نسبت به نمونه شاهد (100 درصد کائولن) شد.

2- جایگزینی سرباره به جای کائولن در ترکیب بتن ژئوپلیمری، سبب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن شد. میزان بهینه جایگزینی خاکستر بادی در این پژوهش، 20 درصد سنجش شد که موجب افزایش تقریباً 31، 3 و 10 درصدی مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی 28 روزه بتن ژئوپلیمری نسبت به نمونه شاهد (100 درصد کائولن) گردید.

- [37] E. A. Ortega, C. Cheeseman, J. Knight, M. Loizidou, Properties of alkali-activated clinoptilolite, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 10, pp. 1641-1646, 2000.
- [38] H. Y. Zhang, S. L. Qi, L. Cao, B. Wu, Development of metakaolin-fly ash based geopolymers for fire resistance applications, *Construction and Building Materials*, Vol. 55, pp. 38-45, 2014.
- [39] A. Fernández-Jiménez, M. Monzó, M. Vicent, A. Barba, A. Palomo, Alkaline activation of metakaolin-fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements, *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 108, No. 1, pp. 41-49, 2008.
- [40] R. Rajamma, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, Alkali activation of biomass fly ash-metakaolin blends, *Fuel*, Vol. 98, pp. 265-271, 2012.
- [41] S. A. Bernal, E. D. Rodríguez, R. Mejía de Gutiérrez, M. Gordillo, J. L. Provis, Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends, *Journal of Materials Science*, Vol. 46, No. 16, pp. 5477-5486, 2011.
- [42] C. K. Yip, G. C. Lukey, G.C. J. S. J. van Deventer, The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 9, pp. 1688-1697, 2005.
- [43] S. Andrejkovičová, A. Sudagar, J. Rocha, C. Patinha, W. Hajjaji, E. F. da Silva, The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers, *Applied Clay Science*, Vol. 126, pp. 141-152, 2016.
- [44] T. W. Cheng, M. L. Lee, M. S. Ko, T. H. Ueng, S. F. Yang, The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer, *Applied Clay Science*, Vol. 56, pp. 90-96, 2012.
- [45] ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2018.
- [46] ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2015.
- [47] ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2015.
- [48] ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2014.
- [49] ASTM D2419-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2014.
- [50] A. B. Moradikhou, M. H. Hosseini, A. Mousavi Kashi, F. Emami, A. Esparham, Experimental study of the effect of 2-element hybrid copolymer fibers and nano-silica particles on compressive, tensile and flexural strengths of metakaolin-based geopolymer concrete, *Journal of Concrete Structure and Materials*, Vol. 4, No. 2, pp. 62-82, 2019. (in Persian فارسی)
- [51] British Standards Institution, Testing Concrete: Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cubes, BS 1881: Part 116, 1983, London.
- [52] ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2017.
- [53] ASTM C293 / C293M-16, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2016.
- [54] J. G. S. van Jaarsveld, J. S. J. van Deventer, G. C. Lukey, The Characterisation of Source Materials in Fly Ash based Geopolymers, *Materials Letters*, Vol. 57, No. 7, pp. 1272-1280, 2003.
- [55] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Characterisation of Fly Ash: Potential Reactivity as Alkaline Cements, *Fuel*, Vol. 82, No. 18, pp. 2259-2265, 2003.
- [56] H. Xu, J. S. J. van Deventer, Geopolymerisation of Multiple Minerals, *Minerals Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 1131-1139, 2002.
- water absorption of fly ash-based geopolymer concrete and conventional concrete, *Proceedings of The 1st International Conference on Civil, Architecture and Urbanity of Iran*, University of Tehran, Tehran, Iran, October 31, 2019. (in Persian فارسی)
- [17] A. Fernández-Jiménez, I. García-Lodeiro, A. Palomo, Durable characteristics of alkali activated fly ashes, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 9, pp. 3055-3065, 2007.
- [18] T. W. Cheng, J. P. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 205-210, 2003.
- [19] P. K. Sarker, S. Kelly, Z. Yao, Effect of fire exposure on cracking: spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete, *Materials and Design*, Vol. 63, pp. 584-592, 2014.
- [20] H. Y. Zhang, V. Kodur, S. L. Qi, L. Cao, B. Wu, Development of metakaolin-fly ash based geopolymers for fire resistance applications, *Construction and Building Materials*, Vol. 55, pp. 38-45, 2014.
- [21] A. Palomo, M. T. Blanco-Varela, M. L. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez, M. W. Grutzeck, Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 7, pp. 997-1000, 1999.
- [22] T. Bakharev, J. G. Sanjayan, Y. B. Cheng, Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 10, pp. 1607-1611, 2003.
- [23] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 1468-1478, 2013.
- [24] S. E. Wallah, Creep behaviour of fly ash based geopolymer concrete, *Civil Engineering Dimension*, Vol. 2, No. 7, pp. 73-78, 2010.
- [25] P. DeSilva, K. Sagoe-Crenstil, V. Srivivatnanon, Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 4, pp. 512-517, 2007.
- [26] W. K. Part, M. Ramli, C. B. Cheah, An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products, *Construction and Building Materials*, Vol. 77, pp. 370-395, 2015.
- [27] K. Gao, K. L. Lin, C. L. DeYing Wang, B. L. A. Hwang, H. S. Shiu Tuan, T. W. Cheng, Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers, *Construction and Building Materials*, Vol. 48, pp. 441-447, 2013.
- [28] G. Görhan, G. Kürklü, The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash based geopolymer mortar cured at different temperatures, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, pp. 371-377, 2014.
- [29] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, B. V. Rangan, On the development of fly ash-based geopolymer concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 6, pp. 467-472, 2004.
- [30] D. M. Roy, Alkali-activated cements opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 2, pp. 249-254, 1999.
- [31] B. Mithun, M. C. Narasimhan, N. Palankar, A. U. Ravishankar, Flexural fatigue performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate, *Selected Scientific Papers: Journal of Civil Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 7-18, 2015.
- [32] C. Shi, A. Fernández Jiménez, A. Palomo, New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 750-763, 2011.
- [33] N. Palankar, A. R. Shankar, B. Mithun, Air-cured alkali activated binders for concrete pavements, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 289-294, 2015.
- [34] A. B. Moradikhou, A. Esparham, Geopolymer concrete based on various aluminosilicate sources, *Proceedings of The 3rd International Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, June 26-27, 2019. (in Persian فارسی)
- [35] C. Panagiotopoulou, G. Kakali, S. Tsvilis, T. Perraki, M. Perraki, Synthesis and Characterisation of Slag Based Geopolymers, *Materials Science Forum*, Vol. 636-637, pp. 155-160, 2010.
- [36] C. Villa, E. T. Pecina, R. Torres, L. Gómez, Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 11, pp. 2084-2090, 2010.