Journal of Structural and Construction Engineering, 8(Special Issue 1), 2021, pp. 388-409

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Laboratory study of fresh and hardened properties of self-compacting geopolymer concrete and comparison with other concrete

Mahbobeh Mirzaie Aliabadi [1], mohammad hossein soleymani [2] , alireza dadpour [2]

1- Department of Civil Engineering,Faculty of Engineering,Behbahan Khatam Alanbia University of Technology
2 Department of Civil Engineering,Faculty of Engineering,Behbahan khatam Alanbia University of Technology

ABSTRACT

One of the most important challenges facing civil engineering community besides cost, performance problems such as vibration, especially in thin sections, the smooth and concrete movement of reinforced and complex sections, is increased resistance with reducing or not using cement. The purpose of this research is to innovate in Portland cementless concrete industry, which is inspired by geopolymer technology and its incorporation in self-compacting concrete (SCC) to produce sustainable concrete, in order to reduce carbon emission from Portland cement (PC) production. In this regard, the furnaces slag as amorphous (cement replacement) and alkaline actuators are used and laboratory study was performed on the fresh properties (slump Flow, T50, L-Box, hopper V and J rings) and hardened properties (compressive and tensile strength). Results indicate easy filling in narrow sections, improved compression, good bonding strength, reduced maintenance, faster construction speed, about 70% increase in 28-day resistance and 86% in 90-day resistance of Type III geopolymer concrete with respect to Portland cement concrete (reference concrete) with constant grade of 400 kg / m^3, Use of industrial waste and reduction of air pollution, Improve mechanical properties (according to statistical results of compressive strengths up to 65 MPa), Reduce the overall construction cost of self-compacting geopolymer concrete in comparison to the rate of acquisition of resistance of conventional self-compacting concrete, self-compacting concrete with different slag percentages, conventional geopolymer concrete and ordinary concrete. Due to the high cost of alkaline activators in the country, lack of equipment and infrastructure for slag powder, insufficient information on the durability of geopolymer concrete is predicted and thereby create new opportunities for the construction industry.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 20 September 2019
Revise Date: 06 March 2020
Accept Date: 19 April 2020

Keywords:
Self-Compacting Geopolymer Concrete
Self-Compact Concrete
Alkali Activators
Geopolymer Cements
Ground granulated blast furnace slag

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.201768.1952

*Corresponding author: Mahbobeh Mirzaie Aliabadi
Email address: mahbobehmirzaie@gmail.com

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی آزمایشگاهی خصوصیات تازه و سخت شده بتن ژئوپلیمرخودتراکم و مقایسه آن با سایر بتن‌ها

محمدحسین سلیمانی [۱]، محبوبه میرزائی علی آبادی*[۲]- علیرضا دادپور [۳]

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا(ص) بهبهان

۲-استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا(ص) بهبهان

۳-کارشناس آزمایشگاه عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا(ص) بهبهان

چکیده

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی مهندسی عمران علاوه بر هزینه، مشکلات اجرا مثل ویبره زدن بخصوص در مقاطع جدارنازک، روانی و حرکت بتن در مقاطع پرآرماتور و پیچیده، افزایش مقاومت با کاهش یا عدم استفاده از سیمان می‌باشد. هدف از این تحقیق، یک نوآوری در صنعت بتن بدون سیمان پرتلند است، که با الهام از تکنولوژی ژئوپلیمرها و ترکیب آن در بتن خودتراکم (SCC)، جهت تولید بتن پایدار، به‌منظور کاهش انتشار کربن حاصل از تولید سیمان پرتلند (PC) ایجاد می‌شود. در این راستا از سرباره کوره آهن‌گدازی به‌صورت آمورف (جایگزین سیمان) با استفاده از فعال‌کننده‌های قلیایی و بررسی آزمایشگاهی خصوصیات تازه (اسلامت فلو، T50، L-Box، قیف V و J رینگ) و خصوصیات سخت‌شده (مقاومت فشاری و کششی دو نیم شدن) بتن‌های ژئوپلیمرخودتراکم (SCGC) موردبررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از پرشدن آسان بتن در بخش‌های باریک و محدود، بهبود تراکم، استحکام پیوستگی مناسب با آرماتور، کاهش تعمیر و نگهداری، کیفیت بهتر بتن، کسب مقاومت بیشتر در زمان کوتاه‌تر، افزایش حدود ۷۰ درصدی مقاومت ۲۸ روزه و ۸۶ درصدی مقاومت ۹۰ روزه بتن ژئوپلیمرخودتراکم نوع III نسبت به بتن با سیمان پرتلند (بتن مرجع) با عیار ثابت ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. همچنین از دیگر مزایا می‌توان به عدم نیاز به ویبره زدن، استفاده از ضایعات صنعتی و کاهش آلودگی هوا، بهبود خواص مکانیکی (طبق نتایج آماری مقاومت‌های فشاری تا ۶۵ مگاپاسکال) و همچنین کاهش هزینه کلی ساخت‌وساز بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری نسبت به نرخ کسب مقاومت بتن‌های خودتراکم معمولی، بتن‌های خودتراکم با درصدهای مختلف سرباره، بتن‌های معمولی ژئوپلیمری و بتن‌های معمولی اشاره کرد. با توجه به گران بودن فعال‌کننده‌های قلیایی در کشور، نبود دستگاه‌ها و زیرساخت‌های لازم جهت تولید پودرسرباره، عدم اطلاعات کافی در زمینه دوام بتن‌های ژئوپلیمری پیش‌بینی شده است که نتایج این مطالعه دامنه بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری (SCGC) را گسترش داده و در نتیجه فرصت‌های جدیدی برای صنعت ساخت‌وساز ایجاد کند.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمرخودتراکم، بتن خودتراکم، فعال‌کننده‌های قلیایی، سیمان‌های ژئوپلیمری، سرباره کوره آهن‌گدازی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.201768.1952
۱۳۹۸/۰۶/۲۹	۱۳۹۸/۱۲/۱۶	۱۳۹۹/۰۱/۳۱	۱۳۹۹/۰۱/۳۱	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2020.201768.1952

*نویسنده مسئول: محبوبه میرزائی علی آبادی

پست الکترونیکی: mahbobehmirzaie@gmail.com

۱- مقدمه

بتن یکی از مهم‌ترین موادی است که به‌طور گسترده برای مواد ساختمانی در جهان استفاده می‌شود با توجه به ادامه افزایش استفاده از سیمان در ساخت بتن برای توسعه زیرساخت‌ها و اهمیت نسبی آن در زمینه‌های مسائل مربوط به محیط‌زیست جهانی، توجه ویژه‌ای به نقش سیمان در توسعه پایدار گرفته است. اکنون تولید بتن مبتنی بر OPC[1] در مقیاس بزرگ‌تر به مواردی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. بر اساس نظرسنجی که توسط آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)[2] انجام شده است صنعت سیمان مسئول تولید تقریباً ۶-۷٪ از انتشار جهانی CO2 به جو زمین است. ژئوپلیمرها، یکی از روش‌های تولید بتن پایدار به‌منظور کاهش حد انتشار کربن مورد استفاده از سیمان پرتلند در تولید بتن و کلاس جدیدی از مخلوط بتن بدون سیمان پرتلند هستند، که از طریق واکنش مواد غنی از آلومینوسیلیکات با محلول قلیایی تولید می‌شوند [۱]. بعضی از مواد پوزولانی در طبیعت مانند خاکستر بادی[3]، خاکستر پوسته برنج[4]، خاکستر سوخت روغن نخل[5]، سرباره[6] (GGBFS)، متاکائولین[7] و دوده‌ی سیلیسی مورد استفاده برای جایگزینی سیمان است. خاکستر بادی و سرباره(GGBFS) با توجه به درصد بالایی از آلومینا و سیلیس در آن‌ها اغلب به‌عنوان مواد جایگزین سیمان استفاده می‌شود. از پودر سرباره می‌توان به‌عنوان یک اتصال‌دهنده تنها در تولید بتن استفاده شود، اگر توسط یک فعال‌کننده قلیایی با pH بالا از جمله سدیم هیدروکسید (NaOH)، سدیم سیلیکات (Na2SiO3) ،کربنات سدیم و کربنات کلسیم یا ترکیب آن‌ها فعال شود. این سیستم‌های اتصال‌دهنده دارای قابلیت استفاده از حجم زیادی از (GGBFS) است که به دفع ایمنی زباله‌ها و کاهش مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی منجر می‌شود[۲]. به‌دلیل هزینه‌های بالای انرژی مصرفی در تولید سیمان پرتلند و آلاینده‌های ناشی از آن، تلاش‌های فراوانی برای کاهش میزان تولید کلینکر سیمان پرتلند و یافتن موادی برای جایگزینی آن شده است. به‌همین جهت توجه ویژه‌ای به پوزولان‌ها به‌عنوان جایگزین کامل سیمان پرتلند با هدف تولید سیمان‌ها و بتن‌های ژئوپلیمری (بتن‌های بدون سیمان) شده است. لذا تولید و استفاده از سیمان‌های ژئوپلیمری از چند دهه اخیر موردتوجه عده کمی از دانشمندان قرار گرفته است. از اواخر قرن بیستم، ژئوپلیمرها به دلیل عملکرد مناسب و خواص بسیار خوبشان، به‌عنوان جایگزین مصالح ساختمانی موردتوجه قرار گرفتند. در دهه گذشته به‌دلیل کاربرد این مواد در زمینه‌های مختلف مهندسی، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است ژئوپلیمرها گروهی از مواد سیمانی بادوام و مقاوم هستند که در دمای زیر ۱۰۰ درجه سانتی-گراد سخت می‌شوند [۳]. بتن ژئوپلیمر، بتنی است که در آن از مصالح آلومینا- سیلیکاتی غنی از سیلیکون (Si) و آلومینیوم (AL) و محلول قلیایی به‌عنوان چسباننده استفاده می‌شود [۱]. بتن‌های ژئوپلیمری دارای خواص مکانیکی، دوام و عملکرد ساختاری بهتر در مقایسه با بتن معمولی است هرچند در عمل استفاده از بتن ژئوپلیمری بسیار محدود است که علت آن عدم وجود مطالعات در ساختار عناصر، طراحی و برنامه‌های کاربردی است [۴].

۲- کارهای انجام شده

عمده‌ترین تفاوت بین سیمان پرتلند و ژئوپلیمرها در مکانیزم گیرش و سخت‌شدن آن‌ها می‌باشد. این فرآیند در سیمان پرتلند از طریق هیدراتاسیون انجام می‌شود، اما در ژئوپلیمرها واکنش بین کاتیون‌های شیمیایی جهت تشکیل سیلیکات آلومینیم است که ازلحاظ شیمیایی ساختاری مشابه مواد چسباننده به‌کاررفته در سنگ‌ها دارد. بنابراین تکنولوژی تولید سیمانی را در نظر بگیرید که در آن سنگ‌آهک بکار نرفته و در عوض سیلیکات آلومینیوم مورداستفاده قرار می‌گیرد [۵]. عبارت "Geopolymer" در اصل توسط داویدوویتس[8] در دهه ۱۹۷۰ تعریف شده است. این اصطلاح به یک طبقه از مواد اشاره دارد که حاوی یک ساختار پلی‌سیالات مشابه (آلومینوسیلیکات) است که توسط گلوفسکی[9] شناسایی شده است [۶]. بتن‌های ژئوپلیمری کمابیش همانند بتن‌های معمولی می‌توانند تولید و قالب‌گیری شوند ولی

[1] Ordinary portland cement
[2] International Energy Agency
[3] Fly Ash
[4] Rice Husk Ash
[5] Palm Oil Fuel Ash
[6] ground granulated blast furnace slag
[7] Metakaolin
[8] Davidovits
[9] Glukhovsky

گیرش بتن‌های ژئوپلیمری سریع‌تر است [۷]. خواص مکانیکی سیمان‌های ژئوپلیمری قابل رقابت با سیمان‌های پرتلند معمولی است. مطالعات انجام‌شده در زمینه بتن‌های ژئوپلیمری نشان می‌دهد که عوامل تأثیرگذار در خواص مکانیکی و دوام این بتن‌ها کاملاً شناخته‌شده نیست. به‌علاوه دانش اندکی در زمینه رفتار ملات‌ها و بتن‌های ژئوپلیمری ساخته‌شده با پوزولان‌های طبیعی در دسترس بوده و همچنین رفتار و خواص خمیر سیمان‌های ژئوپلیمری تأثیر به سزایی روی خواص ملات‌ها و بتن‌های ژئوپلیمری دارد. گروهی از چسباننده‌های معدنی مانند زئولیت‌ها که دارای ساختار پلیمری Si-O-Al می‌باشند اصطلاحاً ژئوپلیمر گفته می‌شود. نسبت مولی Si/Al در ژئوپلیمرها تقریباً با زئولیت‌ها برابر است با این تفاوت که ژئوپلیمرها ازنظر ساختاری آمورف و زئولیت‌ها کریستاله می‌باشند [۸]. در ساخت سیمان‌های ژئوپلیمری از محلول‌هایی با قلیائیت بالا برای حل کردن یون‌های Si و Al استفاده می‌شود. مراحل ژئوپلیمریزاسیون عبارتنداز:

۱- تبدیل آلومینا و سیلیکا در محیط قلیایی بالا به مایع

۲- جایگزینی اکسید مایع و به دنبال آن تشکیل ژل

۳- ساختارهای سیلیکا - آلومینات و تشکیل شبکه سه‌بعدی (3D) به‌دلیل غلظت تراکمی زیاد (واکنش پلیمریزاسیون) و سخت شدن و گیرش و کسب مقاومت [۹]

در پدیده ژئوپلیمریزاسیون، مواد موجود در فعال‌سازهایی مانند Na(OH)، سیلیکات سدیم، کربنات سدیم و کلسیم نقش‌های متفاوتی دارند. به این‌صورت که تماماً یا قسمتی از مواد جامد ماده پایه در محلول قلیایی حل می‌گردد و تشکیل آلومینوسیلیکات چهاروجهی می‌دهد، درحالی‌که سیلیکات محلول به‌عنوان کاتالیزور در پدیده پلیمریزاسیون عمل می‌کند و محصولی آمورف به وجود می‌آید. لذا می‌توان از طریق فرآیند ژئوپلیمریزاسیون تعداد زیادی از مواد آلومینوسیلیکاتی مصنوعی و طبیعی مانند خاکستر بادی، روباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر پوسته برنج، دوده سیلیسی، روباره کوره قوس الکتریکی، متاکائولن و پوزولان‌های طبیعی را به محصولات ساختمانی تبدیل کرد. ژئوپلیمریزاسیون شامل واکنش شیمیایی اکسیدهای آلومینیوم و سیلیسیوم با سیلیکات‌های قلیایی برای شکل‌گیری پیوند پلیمری Si-O-Al با ساختار سه‌بعدی آمورف یا نیمه کریستاله است [۱۰]. داویدوویتس سه شکل برای این ساختار تعریف کرده است:

(الف) پلی‌سیالات (-Si-O-Al-O-)

(ب)پلی‌سیالات سیلوکسی (-Si-O-Al-O-Si-O)

(ج)پلی‌سیالات دی سیلوکسی (-Si-O-Al-O- Si-O-Si-O)

۳- روش تحقیق

مطالعه حاضر بررسی و مقایسه خصوصیات تازه و سخت شده بتن‌های ژئوپلیمرخودتراکم (SCGC)[10] بر کارایی، مقاومت فشاری و کششی از طریق یک مطالعه پارامتری با استفاده از تجزیه‌وتحلیل آزمایش‌های مختلف است. از GGBFS به‌عنوان ماده اولیه برای ساخت سیمان‌های ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گرفته است. تولید SCGC به‌طور عمده در تنظیم پارامترهایی مانند نسبت ترکیب فعال‌سازهای مختلف، تعیین نسبت بهینه فعال‌کننده قلیایی مطلوب و غلظت مناسب محلول هیدروکسید سدیم است. از فوق‌روان‌کننده به‌عنوان یک افزودنی برای افزایش کارایی و کاهش آب بتن استفاده شده است. استفاده از فوق‌روان‌کننده هیچ تأثیری روی خواص تازه SCGC ندارد و فقط زمان عمل‌آوری را به تأخیر می‌اندازد. در SCGC نسبت آب به جامدات ژئوپلیمر نقش حیاتی دارد، زیرا این نسبت نه تنها بر خصوصیات سخت‌شده بلکه بر خواص تازه نیز تأثیر می‌گذارد. در کل نسبت آب به جامدات ژئوپلیمر در SCGC، ۰/۳۵ انتخاب‌شده است. انتخاب غیرمستقیم پارامترهای بالا می‌تواند تأثیر جدی بر روی هزینه داشته باشد و ممکن است خواص مهندسی مورد نیاز را نداشته باشد.

[10] self compact geopolymer concrete

۳-۱- مواد و مصالح

برای ساخت SCGC، از GGBFS کارخانه ذوب‌آهن اصفهان به‌عنوان ماده اولیه و پایه، شن و ماسه محلی بهبهان، هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، کربنات سدیم و کربنات کلسیم به‌عنوان فعال‌کننده‌های قلیایی و فوق‌روان‌کننده استفاده شد.

۳-۱-۱- سرباره (GGBFS)

اجزای تشکیل‌دهنده سرباره به‌طور عمده آهک، سیلیس و آلومین است و شباهت بسیاری به اجزای سیمان پرتلند دارد. ترکیب شیمیایی سرباره بستگی به ترکیب سنگ معدن هم‌چنین ناخالصی‌های موجود در سنگ‌آهک اضافه‌شده به کوره دارد. لذا از نظر هدایت تولید آهن در کوره ذوب آهن بهتر است سنگ‌آهک دارای خلوص بالاتری باشد. به‌طورکلی سرباره‌ها تفاوت‌هایی در ترکیب شیمیایی خود دارند و درصد ترکیب اجزای اصلی به این صورت است. سرباره مورد استفاده در این مطالعه (شکل۱) از کارخانه ذوب‌آهن اصفهان تهیه‌شده که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

جدول۱: مشخصات شیمیایی سرباره (GGBFS)

Component	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Na2O	Cl	MnO
GGBFS(%)	۳۵/۰۵	۱۰/۳۶	۰/۹	۳۶	۱۰/۴	۰/۶۸	۰/۶	۰/۰۰۲	۱/۵۸

شکل۱: سرباره (GGBFS)

۳-۱-۲- شن و ماسه (سنگدانه)

سنگ‌دانه‌های درشت از نوع شکسته و با حداکثر اندازه ۱۹/۵ میلی‌متر و سنگ‌دانه‌های ریز مصرفی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر با F.M=۳/۴۸ از نوع طبیعی شسته و از معادن بهبهان تأمین شده است. هر سه نوع سنگدانه طبق آزمایش توصیفی با استفاده از اسیدکلریدریک ۰/۱ نرمال دارای مقدار کمی آهک است که نشان می‌دهد جنس آن‌ها از سنگ‌آهک بوده است. در این مطالعه از سنگدانه به‌صورت کارگاهی استفاده شده است.

۳-۱-۳- فعال‌کننده‌های قلیایی

در ژئوپلیمریزاسیون[11]، فعال‌کننده قلیایی نقش مهمی ایفا می‌کند. شایع‌ترین فعال‌کننده‌های قلیایی که در سنتز ژئوپلیمر استفاده می‌شوند ترکیبی از سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم (شکل ۲ و ۳)، کربنات سدیم و کربنات کلسیم (شکل ۴ و ۵) هستند [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵]. در این مقاله از دو نوع فعال‌ساز استفاده شده است؛ نوع اول شامل هیدروکسید سدیم با درجه خلوص ۹۸٪ و سدیم سیلیکات مایع با نسبت SiO2 به Na2O تقریبی ۲/۰۷، که غلظت هیدروکسید سدیم ۱۸/۷۵ میلی‌لیتر نگه‌داری شد و محلول هیدروکسید سدیم با حل کردن گلوله‌های هیدروکسید سدیم در آب تهیه شد. سپس سیلیکات سدیم و محلول هیدروکسید سدیم با هم مخلوط شدند و

[11] geopolymerization

محلول قلیایی تهیه شد. نوع دوم ترکیب کربنات سدیم و کربنات کلسیم با نسبت ۵۰ درصد می‌باشد که کربنات سدیم دارای ۰/۸۵ درصد Na2O در هر کیلوگرم می‌باشد.

شکل۲: سدیم سیلیکات مایع

شکل۳: سدیم هیدروکسید (سود پرک)

شکل۴: کربنات سدیم

شکل۵: کربنات کلسیم

۳-۱-۴- فوق روان‌کننده[۱۲]

برای دستیابی به کارایی بالا و جابجایی بیشتر در مخلوط بتن خودتراکم (SCC)[۱۳]، معمولاً استفاده از superplasticizer استفاده می‌شود. در این مقاله از فوق‌روان‌کننده Super Plast PC5000(HR) از خانواده پلی کربوکسیلات‌ها و قوی‌ترین نوع فوق‌روان‌کننده‌ها، با نام تجاری PC 5000 (شکل ۶) و تولید شرکت شیمی ساختمان با وزن مخصوص ۱۱۰۰ ldkg/m^3 و غلظت ۲۰٪ مطابق با استاندارد ASTM-C1017[۱۶] و استاندارد اروپایی EN-934-2 است در مخلوط SCGC مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[12] superplasticizer
[13] self compact concrete

شکل۶: فوق روان کننده PC5000

۳-۲- طرح اختلاط‌ها

در این بررسی ۱۲ سری و در مجموع ۲۴۰ نمونه بتن شامل معمولی و خودتراکم با سیمان پرتلند، معمولی و خودتراکم با سیمان سرباره‌ای، معمولی و خودتراکم ژئوپلیمری نوع II و III ساخته شد که جزئیات طرح اختلاط بتن‌های ژئوپلیمرخودتراکم در جدول ۲ و ۳ و سایر بتن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است.

۳-۳- طرح اختلاط بتن‌های ژئوپلیمرخودتراکم

نسبت اجزای مخلوط SCGC، بر اساس اطلاعات مربوط به نسبت مخلوط بتن ژئوپلیمر و SCC موجود در مقاله‌ها انتخاب شده است. ترکیب SCGC برای رسیدن به یک هدف ۲۸ روزه فشاری ۴۰ مگاپاسکال طراحی شده است. جزئیات طرح اختلاط بتن‌های ژئوپلیمرخودتراکم در جدول ۲ و ۳ داده شده است. مقدار سرباره ۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب و نسبت آب به پودر پایه (سرباره) ۰/۳۹ و ۰/۲۵ نگه‌داری شده است.

جدول۲: طرح اختلاط بتن ژئوپلیمر خودتراکم نوعII

سرباره(kg/m3)	۴۰۰
ماسه(kg/m3)	۱۱۰۰
شن(kg/m3)	۴۷۰
کربنات سدیم(%)	۶
کربنات کلسیم(%)	۶
فوق روان کننده(%)	۶
نسبت آب به سرباره (%)	۳۹
زمان عمل‌آوری(hrs)	۲۴
دمای عمل‌آوری(°C)	۷۰

جدول۳: طرح اختلاط بتن ژئوپلیمر خودتراکم نوعIII

سرباره(kg/m3)	۴۰۰
ماسه(kg/m3)	۱۱۰۰
شن(kg/m3)	۴۷۰
سدیم هیدروکسید	۵۱/۵۲
مولاریته سدیم هیدروکسید	۱۸/۷۵
سیلیکات سدیم مایع(kg/m3)	۱۲۸/۵۸
فوق روان کننده(%)	۱/۵
نسبت آب به سرباره (%)	۲۵
زمان عمل‌آوری(hrs)	۲۴
دمای عمل‌آوری(°C)	محیط

جدول۴: طرح اختلاط سایر بتن‌ها

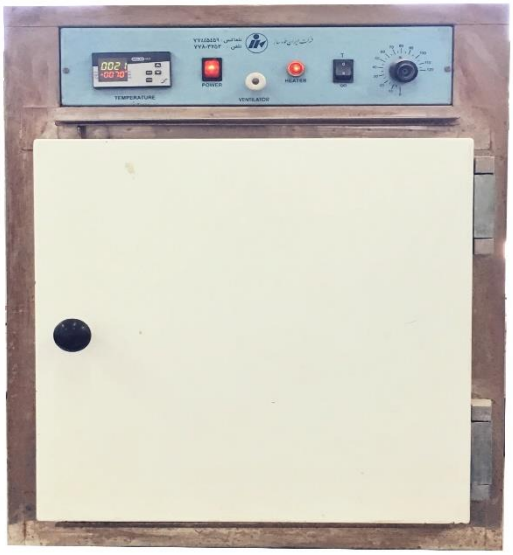
طرح مخلوط MX.ID	سرباره $\frac{kg}{m^3}$	سیمان پرتلند II (kg)	سیمان پرتلند V (kg)	نسبت آب به سرباره	فوق روان کننده (پودر سرباره) درصد	شن (kg)	ماسه (kg)	مولاریته سیلیکات سدیم مایع	سیلیکات سدیم مایع (kg)	سدیم هیدروکسید (kg)	نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم	کربنات سدیم ۶ درصد سرباره (kg)	کربنات کلسیم ۶ درصد سرباره (kg)	نسبت محلول قلیایی –سیلیکاتی به سرباره	پودر سنگ سیلیس (kg)	شرایط عمل‌آوری
C-OPC(V)	–	–	۴۰۰	۰/۳۹	–	۱۰۸۸	۸۶۵	–	–	–	–	–	–	–	–	محیط
SC-OPC(II)	۲۸۰	۱۲۰	–	۰/۳۹	–	۱۰۸۸	۸۶۵	–	–	–	–	–	–	–	–	محیط
SC-OPC(V)	۲۸۰	–	۱۲۰	۰/۳۹	–	۱۰۸۸	۸۶۵	–	–	–	–	–	–	–	–	محیط
GCII	۴۰۰	–	-	۰/۳۹	–	۱۰۸۸	۸۶۵	–	–	–	–	۲۴	۲۴	–	–	۷۰ درجه
GCIII	۴۰۰	–	-	۰/۲۵	–	۱۰۸۸	۸۶۵	۱۸/۷۵	۱۲۸/۵۸	۵۱/۴۲	۲/۵	–	–	۰/۴۵	–	محیط
SCSC-OPC(II)	۲۸۰	۱۲۰	–	۰/۳۹	۱/۵	۴۷۰	۱۱۰۰	–	–	–	–	–		–	۱۷۵	محیط
SCSC-OPC(V)	۲۸۰	–	۱۲۰	۰/۳۹	۱/۵	۴۷۰	۱۱۰۰	–	–	–	–	–	–	–	۱۷۵	محیط
SCC-OPC(V)	-	-	۴۰۰	۰/۳۹	۱/۵	۴۷۰	۱۱۰۰	–	–	–	–	–		–	۱۷۵	محیط
SCSC-OPC(II)-50	۲۰۰	۲۰۰	–	۰/۳۹	۱/۵	۴۷۰	۱۱۰۰	–	–	–	–	–		–	۱۷۵	محیط
SCSC-OPC(II)-70	۱۲۰	۲۸۰	–	۰/۳۹	۱/۵	۴۷۰	۱۱۰۰	–	–	–	–	–		–	۱۷۵	محیط

C:concrete & **OPC(II) or(V):**ordinary portland cement(II)or(V) & **SC**:slag concrete & **GC**:geopolymer concrete & **SCSC**:self compact slag concrete & **SCGC**:self compact geopolymer concrete

۳-۴- مخلوط کردن، قالب‌گیری و عمل‌آوری بتن‌های ژئوپلیمری

۳-۴-۱- بتن ژئوپلیمرخودتراکم نوع II

برای ساخت این نوع بتن از همزن دیگ ثابت استفاده شده است. ابتدا سرباره، پودرسنگ سیلیس و ترکیب کربنات سدیم و کلسیم درون همزن دیگ ثابت ریخته شد تا به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شوند. سپس سنگدانه‌ها به همزن اضافه شدند و مجدداً به مدت ۳۰ ثانیه دیگر کاملاً مخلوط شدند. $\frac{1}{3}$ آب به همراه ابررواِن‌کننده به مخلوط اضافه شد. $\frac{1}{3}$ دیگر از آب بعد از سپری شدن ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شد. مقدار آب باقی‌مانده بعد از گذشت ۲ دقیقه به درون همزن اضافه شد و به بتن اجازه داده شد تا به مدت ۵/۵ دقیقه مخلوط شود. در طول این مدت عمل میکس‌کردن بتن ۱ دقیقه متوقف گردید. نمونه‌ها همراه قالب به مدت ۲۴ ساعت درون گرم‌خانه (آون) (شکل ۷) در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شدند، سپس از قالب بیرون آورده شدند و در مخزن نگه‌داری تا رسیدن به سنین مختلف برای انجام آزمایشات مقاومت فشاری و کششی عمل‌آوری شدند.



شکل۷: گرمخانه (آون)

شکل۸: قیف V

شکل۹: اسلامپ

شکل۱۰: L-Box

شکل۱۱: J-Ring

۳-۴-۲- بتن ژئوپلیمر خودتراکم نوع III

برای ساخت این نوع بتن ابتدا باید سدیم هیدروکسید با $\frac{2}{3}$ وزنی آب طرح اختلاط مخلوط شود، سپس هم‌زده تا به‌صورت کاملاً محلول درآید. انحلال سدیم هیدروکسید با آب بسیار گرمازا بوده و باید محلول ۲۴ ساعت قبل از ساخت بتن آماده شود، تا هم‌دما با محیط شود، سپس محلول سیلیکات سدیم را به آن اضافه کرده تا به مدت یک دقیقه به‌صورت یکنواخت مخلوط شود. برای ساخت بتن‌ها از مخلوط‌کن (میکسر) و سنگدانه‌ها به‌صورت کارگاهی استفاده شد. پودر سرباره و پودرسنگ سیلیس به مدت ۳۰ ثانیه درون میکسر مخلوط شدند. سپس کل سنگدانه درون میکسر ریخته شده و۳۰ ثانیه مخلوط شدند. مرحله بعد محلول سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم را به مخلوط اضافه شده و مواد به مدت ۳ دقیقه مخلوط شد. سپس $\frac{1}{3}$ دیگر آب نصف شده، همراه ابرروان‌کننده به مخلوط اضافه می‌شود. مقدار آب باقی‌مانده را بعد از گذشت ۲ دقیقه به مخلوط‌کن اضافه کرده و به بتن اجازه داده می‌شود تا به مدت ۵/۵ دقیقه مخلوط شود تا ترکیبی براق و همگن به‌دست آید. در طول این مدت عمل میکس‌کردن بتن ۱ دقیقه متوقف گردید. سپس مخلوط ترکیب‌شده تحت آزمایشات مختلف کارایی بتن خودتراکم قرار گرفت و بعد از آن به قالب‌های مربوطه برای آزمون‌های مختلف ریخته شد. نمونه‌ها همراه قالب به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق (محیط) نگه‌داری شدند. سپس از قالب بیرون آورده و درمخزن نگه‌داری تا رسیدن به سنین مختلف برای انجام آزمایشات مقاومت فشاری و کششی عمل‌آوری شدند.

۳-۵- آزمایشات کارایی بتن‌های ژئوپلیمرخودتراکم

در تحقیق حاضر، برای مشخص‌کردن خصوصیات تازه بتن ژئوپلیمرخودتراکم، آزمایش‌هایی مانند جریان تخلیه (اسلامپ)، جریان تدریجی T-50، V-Funnel، L-Box و J-Ring (شکل ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱) به‌عنوان آزمایش‌های کارایی انجام شد. تمام این آزمایش‌ها بر اساس دستورالعمل‌های اروپایی (۲۰۰۵) (EFNARC) [۱۷ و ۱۸] که در جدول ۵ نشان داده شده است، برای بتن‌های SCC انجام شد.

جدول۵: حدود قابل قبول آزمایشات کارایی بتن خودتراکم تازه بر اساس آیین‌نامه EFNARC [۱۸]

شماره	نوع تست	خصوصیت	حدود	
			Minimum	Maximum
۱	Slump flow (SF1)	توانایی پر کردن	550 mm	650 mm
	Slump flow (SF2)		660 mm	750 mm
	Slump flow (SF3)		760 mm	850 mm
۲	t50cms slump flow	توانایی پر کردن	2sec	5sec
۳	J- ring	توانایی عبور	0mm	10mm
۴	V- funnel	توانایی پر کردن	8sec	12sec
۵	L- box	توانایی عبور	0.8	1.0

۳-۶- آزمایشات بتن ژئوپلیمرخودتراکم سخت شده

برای ارزیابی خواص مکانیکی SCGC، آزمایش‌هایی مانند مقاومت فشاری و استحکام کششی انجام شد.

۳-۶-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین خواص مکانیکی برای ارزیابی کیفیت بتن سخت می‌باشد. آزمون مقاومت فشاری طبق استاندارد BS EN 12390-3: 2002 [۱۹] بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متری برای بتن‌های ژئوپلیمر نوع II و نمونه‌های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری برای بتن‌های ژئوپلیمر نوع III با استفاده از دستگاه تست فشرده‌سازی دیجیتال ۲۰۰۰ کیلوگرم انجام شد. در پایان آزمون مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بتن سخت‌شده (شکل ۱۲) مورد بررسی قرار گرفت.

شکل۱۲: مقاومت فشاری

۳-۶-۲- مقاومت کششی دونیم شدن

مقاومت کششی دونیم شدن با انجام آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متری، بر اساس روش BS EN 12390-6: 2000 [۲۰]، به‌صورت خطی متقاطع با سرعت ۰/۹۴ kN/sec بدون هرگونه شوک ناگهانی و به‌صورت خطی برای جلوگیری از چرخش نمونه‌ها در طول تست استفاده شد. دو نمونه استوانه‌ای در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز پس از عمل‌آوری نمونه‌ها (شکل ۱۳) مورد آزمایش قرار گرفتند.

شکل۱۳: مقاومت کششی دونیم شدن

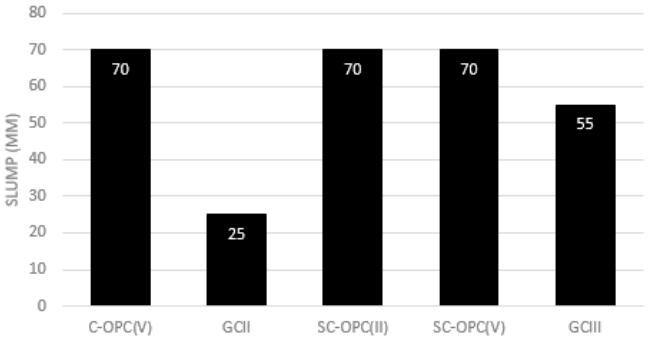
۴- نتیجه‌گیری

۴-۱- خواص تازه

کارایی بالا، معیاری مهم در SCGC و همچنین ویژگی‌های مقاومت فشاری و دوام بهتر است. نتایج آزمایشات خواص تازه SCGC همراه با حداقل و حداکثر سطوح پیشنهادشده توسط ERNARC [۱۸] در جدول ۶ آمده است. بر اساس جدول ۶ و نمودارهای ۱۵ تا ۱۹، نتایج اندازه‌گیری‌های کمی و مشاهدات بصری نشان داد که SCGC مبتنی بر سرباره از لحاظ خصوصیات جریان‌پذیری (آزمایش‌های Slump-Flow و V-Funnel) یا توانایی عبور (آزمون‌های L-Box و J-Ring) نتایج موردنظر را تولید می‌کند و معیارها را برای SCC طبقه‌بندی می‌کند. SCGC به میزان قابل‌توجهی تغییر شکل‌پذیری تحت وزن خود داشت و دارای ویسکوزیته بسیار بالایی بود که برای جلوگیری از جداسازی ذرات جامد درشت ضروری بود. هنگام گرفتن اسلامپ هیچ‌گونه جدایی سنگدانه‌ها مشاهده نشد.

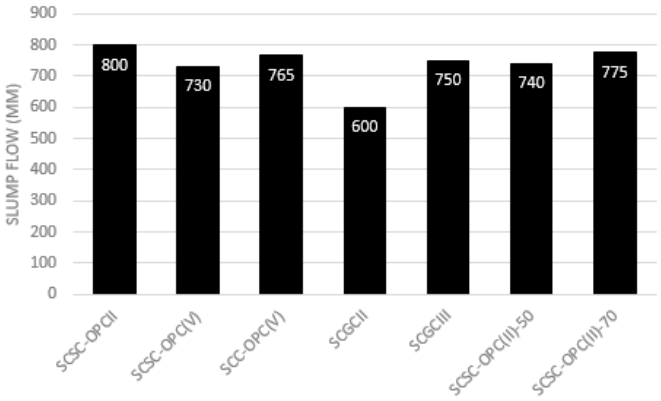
جدول ۶: نتایج خواص تازه بتن‌ها

نوع بتن	Mix ID	Slump flow diameter (mm)	T50 cm Slump flow time (sec)	V-Funnel flow time (sec)	L-Box (H2/H1) Ratio	J-Ring time (sec)	J-Ring blocking step (mm)
معمولی با سیمان تیپ۵	C-OPC(V)	70	-	-	-	-	-
ژئوپلیمر نوع II	GCII	25	-	-	-	-	-
سرباره‌ای+ ۳۰٪ سیمان تیپ۲	SC-OPC(II)	70	-	-	-	-	-
سرباره‌ای + ۳۰٪ سیمان تیپ۵	SC-OPC(V)	70	-	-	-	-	-
ژئوپلیمر نوع III	GCIII	55	-	-	-	-	-
سرباره‌ای خودتراکم+ ۳۰٪ سیمان تیپ۲	SCSC-OPCII	800	3	7	1	3	2.5
سرباره‌ای خودتراکم+ ۳۰٪ سیمان تیپ۵	SCSC-OPC(V)	730	3	8	1	3	7
معمولی خودتراکم+ سیمان تیپ۵	SCC-OPC(V)	765	5	11	0.91	6	6.5
ژئوپلیمرخودتراکم نوع II	SCGCII	600	2	3	0.65	3	8
ژئوپلیمر خودتراکم نوع III	SCGCIII	750	4	11	0.9	6	7
سرباره‌ای خودتراکم + ۵۰٪ سیمان تیپ۲	SCSC-OPC(II)-50	740	3.5	10	0.95	5	8
سرباره‌ای خودتراکم + ۷۰٪ سیمان تیپ۲	SCSC-OPC(II)-70	775	2.5	10.5	0.97	4.5	7.5
	Acceptance Criteria for SCC as per EFNARC [18]						
	Min.	550	2	6	0.8	1	0
	Max.	850	5	12	1.0	10	10

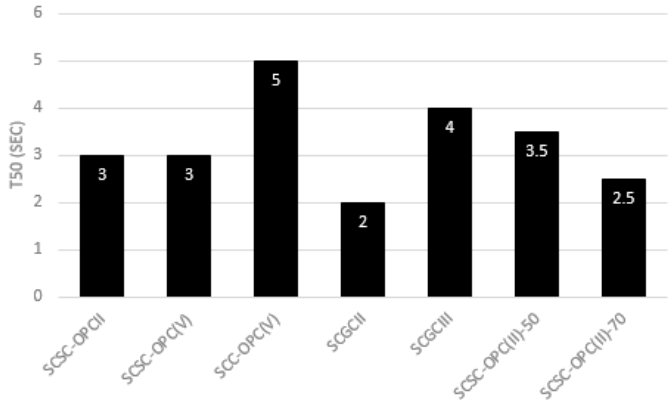


شکل۱۴: اسلامپ بتن‌های معمولی

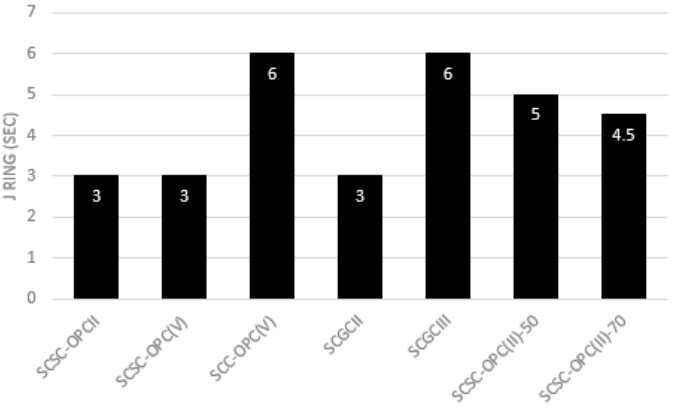
مطابق جدول ۶ و شکل۱۴ خواص تازه بتن‌های معمولی فقط شامل اسلامپ فلو می‌باشد همانطورکه پیش بینی می‌شد و نتایج نشان می‌دهد اسلامپ بتن‌های ژئوپلیمرکمتر از سایر بتن‌های معمولی است و دلیل آن ویسکوزیته بالای چنین بتن‌هایی است. دربتن ژئوپلیمرنوع**III** به‌دلیل استفاده از سیلیکات سدیم مایع اسلامپ بیشتر از نوع**II** آن است که دلیل آن وجود حدود۵۵درصد آب(خلوص۴۵درصد سیلیکات سدیم) دراین ماده و خاصیت روانی آن می‌باشد.



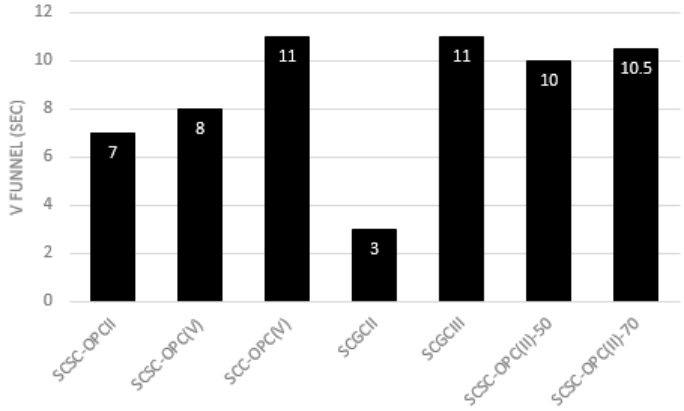
شکل۱۵: اسلامپ بتن‌های خودتراکم



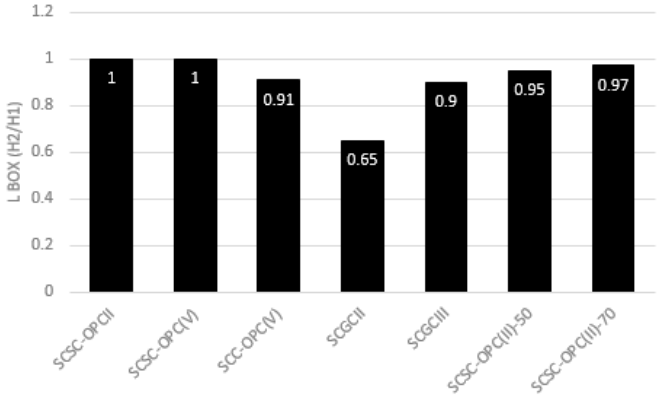
شکل۱۶: نتایج آزمایش T50



شکل ۱۷: نتایج آزمایش J- ring



شکل ۱۸: نتایج آزمایش V- funnel



شکل ۱۹: نتایج آزمایش L-box

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول۶ و نمودارهای ۱۵ تا ۱۹، تمام بتن‌های خودتراکم به‌جز SCGCII از لحاظ آزمایش‌های بتن تازه در محدوده‌ی رضایت بخشی قرار داشتند. بعضی خواص تازه بتن SCGCII نسبت به سایر بتن‌ها برتر بود. مانند (زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر (T50)، قیف V و J-ring) اما در آزمایش L-box و قطر بازشدگی و میزان سیالیت (اسلامپ) نتوانست امتیاز رضایت‌بخشی را به‌دست آورد. SCGCIII از لحاظ آزمایش‌های خواص تازه در بین تمام بتن‌های خودتراکم عملکرد بهتری داشت که دلیل آن ویسکوزیته بالای سیلیکات سدیم و درعین‌حال قابلیت روانی این ماده در ساخت چنین بتن‌هایی بود.

۴- ۱-۱صحت سنجی نتایج بتن تازه

پس از انجام آزمایشات بتن تازه، بدلیل جدید بودن برخی بتن‌ها، به منظور صحت سنجی مقایسه نتایج آزمایشات بتن تازه SCGCIII برپایه GGBFS با نتایج یامینی و همکاران [۲۱] و SCGCIII بر پایه خاکستربادی نورالدین و همکاران [۲۲] انجام شد. مقایسه نتایج همخوانی خوبی را با نتایج قبلی نشان می‌دهد.خلاصه نتایج مقایسه در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷: نتایج مقایسه خواص تازه SCGCIII

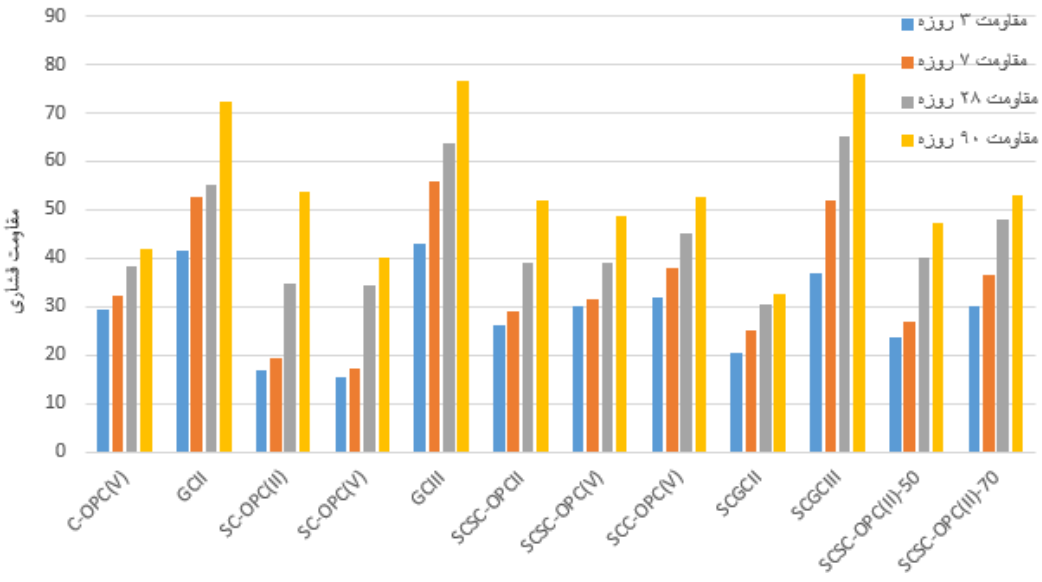
MX.IDطرح مخلوط	Slump flow diameter (mm)			T50 cm Slump flow time (sec)			V-Funnel flow time (sec)			L-Box (H2/H1) Ratio			J-ring blocking (mm)		
	تحقیق حاضر	یامینی و همکاران[۲۱]	نورالدین و همکاران [۲۲]	تحقیق حاضر	یامینی و همکاران[۲۱]	نورالدین و همکاران [۲۲]	تحقیق حاضر	یامینی و همکاران[۲۱]	نورالدین و همکاران [۲۲]	تحقیق حاضر	یامینی و همکاران[۲۱]	نورالدین و همکاران [۲۲]	تحقیق حاضر	یامینی و همکاران[۲۱]	نورالدین و همکاران [۲۲]
SCGCIII	750	710	770	4	4	3	11	8	6	0.9	0.95	1	7	6	3

۴-۲- مقاومت فشاری

کیفیت و تحمل هر نوع بتن با استحکام فشاری بررسی می‌شود. نتایج آزمون میانگین مقاومت فشاری SCGC مبتنی بر سرباره تا ۹۰ روز و سایر بتن‌ها در جدول ۷ و نمودار ۲۰ ارائه شده است. واکنش بتن‌های ژئوپلیمر نوع III برخلاف نوع II به‌سرعت انجام می‌شود و طی چند ساعت اول درصد قابل‌توجهی از مقدار مقاومت فشاری آن‌ها به‌دست می‌آید [۲۳]. این پدیده در تحقیق حاضر درست بود. میزان رسیدن به مقاومت فشاری با تغییر مولاریته مولد و نسبت فعال‌کننده قلیایی مقایسه شد. نمونه‌های آزمایش ۱۵۰ میلی‌متری در شرایط محیطی و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز تحت عمل‌آوری قرار گرفتند و سپس در دستگاه با ظرفیت آزمون فشاری KN۲۰۰۰ آزمایش شدند.

جدول ۸: مقاومت‌های فشاری بتن‌های ساخته‌شده

نوع بتن	Mix ID	وزن مخصوص بتن تازه (kg)	مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال			
			۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
معمولی با سیمان تیپ ۵	C-OPC(V)	۲۳۳۵	۲۹/۴	۳۲/۲	۳۸/۲۴	۴۲
ژئوپلیمر نوع II	GCII	۲۳۵۸	۴۱/۴	۵۲/۶۵	۵۵/۲۵	۷۲/۲۳
سرباره‌ای+ سیمان تیپ ۲	SC-OPC(II)	۲۴۵۸	۱۶/۸	۱۹/۲	۳۴/۸۲	۵۳/۷۷
سرباره‌ای+ سیمان تیپ ۵	SC-OPC(V)	۲۴۵۶	۱۵/۲۷	۱۷/۳۵	۳۴/۵۳	۴۰/۲۱
ژئوپلیمر نوع III	GCIII	۲۴۸۰	۴۳	۵۶	۶۳/۷	۷۶/۵۳
سرباره‌ای خودتراکم+ سیمان تیپ ۲	SCSC-OPCII	۲۴۶۰	۲۶/۲۵	۲۸/۸۸	۳۹	۵۱/۸۷
سرباره‌ای خودتراکم+ سیمان تیپ ۵	SCSC-OPC(V)	۲۴۲۵	۳۰	۳۱/۴	۳۹	۴۸/۶
معمولی خودتراکم+ سیمان تیپ ۵	SCC-OPC(V)	۲۴۸۵	۳۲	۳۸	۴۵	۵۲/۵
ژئوپلیمرخودتراکم نوع II	SCGCII	۲۲۷۵	۲۰/۵۵	۲۵/۱	۳۰/۶	۳۲/۴۸
ژئوپلیمرخودتراکم نوع III	SCGCIII	۲۴۳۸	۳۶/۷۲	۵۲	۶۵	۷۸/۲
سرباره‌ای خودتراکم+ سیمان تیپ ۲ (۵۰*۵۰)	SCSC-OPC(II)-50	۲۳۷۵	۲۳/۵۴	۲۶/۹۶	۴۰/۱۴	۴۷/۳
سرباره‌ای خودتراکم+ سیمان تیپ ۲ (۷۰*۳۰)	SCSC-OPC(II)-70	۲۳۱۰	۳۰/۲	۳۶/۴۲	۴۷/۹۴	۵۳



شکل ۲۰: مقاومت فشاری بتن‌ها

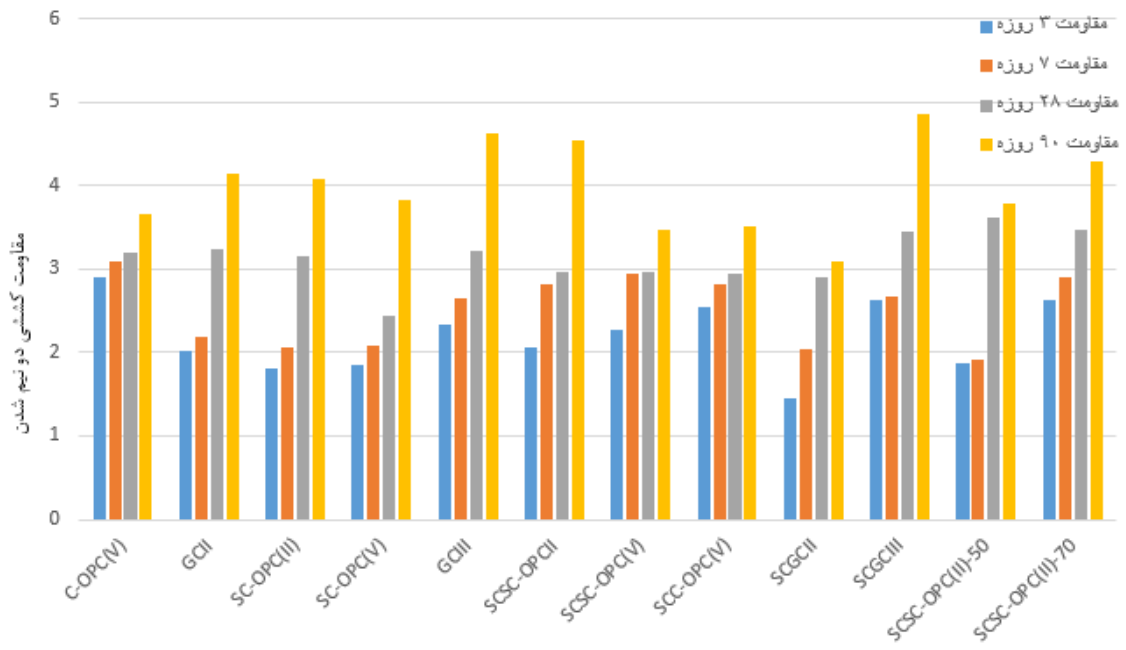
با توجه به نتایج بدست آمده در جدول۸ و نمودار۲۰، مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری معمولی (GCII و GCIII) و ژئوپلیمرخودتراکم نوع III (SCGCIII) نسبت به بتن مرجع (بتن با سیمان پرتلند) و همچنین سایر بتن‌ها در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بیشتر بود، که با توجه به عیار سیمان (سرباره) ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به‌کاررفته برای ساخت چنین بتن‌هایی و افزایش مقاومت ۲۸ روزه حدود ۴۴/۵، ۶۶/۵ و ۷۰ درصدی به ترتیب برای بتن ژئوپلیمر نوع II (GCII)، بتن ژئوپلیمر نوع III (GCIII) و بتن ژئوپلیمر خودتراکم نوع III (SCGCIII) نسبت به بتن مرجع، پیشرفت چشمگیری می‌باشد. علاوه براین بتن ژئوپلیمرخوتراکم نوع II کاهش مقاومت ۲۸ روزه حدود ۲۰ درصدی نسبت به بتن مرجع داشت که به نظر می‌رسد علت آن ناسازگاری فوق‌روان‌کننده و یا کاهش و تأخیر زیاد انداختن در گیرش و سفت شدن و کسب مقاومت چنین بتنی باشد (این بتن برای گیرش و سخت شدن نیاز به گرما دارد و فوق روان کننده نیز سرعت گیرش را به تأخیر می‌اندازد).

۴-۳- مقاومت کششی دونیم شدن

میانگین نتایج مقاومت کششی دونیم شدن به‌دست‌آمده برای SCGC و سایر بتن‌ها در ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز پس از عمل‌آوری، در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۹ و نمودار ۲۱ نشان می‌دهد که استحکام کششی SCGC تنها کسری از مقاومت فشاری آن است، همان‌طور که در بتن سیمان پرتلند نیز دیده می‌شود. مقادیر مقاومت کششیSCGC بین ۵/۱۵ تا ۹/۴۷ درصد از مقاومت فشاری است. به‌طور متوسط، مقاومت کششی دونیم شدن SCGC در حدود ۷/۳۱٪ از مقاومت فشاری آن است که با توافق خوب با محدوده ۵-۱۰٪ از بتن سیمان پرتلند با قدرت نرمال گزارش شده است. صوفی و همکاران [۲۴]. نیز آزمایش‌های غیرمستقیم کششی را در مورد ملات و بتن ژئوپلیمر انجام دادند. روند نتایج آزمون مشاهده‌شده در این مطالعه مشابه آنچه در نتایج داده‌شده در جدول ۹ دیده می‌شود می‌باشد.

جدول ۹: مقاومت‌های کششی دونیم شدن بتن‌های ساخته‌شده

نوع بتن	Mix ID	وزن مخصوص بتن تازه (kg)	مقاومت کششی دو نیم شدن برحسب مگاپاسکال (Mpa)			
			۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
معمولی با سیمان تیپ ۵	C-OPC(V)	۲۳۳۵	۲/۹۰	۳/۱	۳/۲	۳/۶۵
ژئوپلیمر نوع II	GCII	۲۳۵۸	۲/۰۱	۲/۱۸	۳/۲۳	۴/۱۴
سرباره‌ای+ سیمان تیپ ۲	SC-OPC(II)	۲۴۵۸	۱/۸	۲/۰۶	۳/۱۶	۴/۰۷
سرباره‌ای+ سیمان تیپ ۵	SC-OPC(V)	۲۴۵۶	۱/۸۴	۲/۰۹	۲/۴۳	۳/۸۲
ژئوپلیمر نوع III	GCIII	۲۴۸۰	۲/۳۴	۲/۶۶	۳/۲۲	۴/۶۳
سرباره‌ای خودتراکم+ سیمان تیپ ۲	SCSC-OPCII	۲۴۶۰	۲/۰۶	۲/۸۲	۲/۹۶	۴/۵۴
سرباره‌ای خودتراکم+ سیمان تیپ ۵	SCSC-OPC(V)	۲۴۲۵	۲/۲۸	۲/۹۴	۲/۹۶	۳/۴۷
معمولی خودتراکم+ سیمان تیپ ۵	SCC-OPC(V)	۲۴۸۵	۲/۵۴	۲/۸۲	۲/۹۵	۳/۵۲
ژئوپلیمرخودتراکم نوع II	SCGCII	۲۲۷۵	۱/۴۶	۲/۰۴	۲/۹	۳/۱
ژئوپلیمرخودتراکم نوع III	SCGCIII	۲۴۳۸	۲/۶۲	۲/۶۸	۳/۴۵	۴/۸۶
سرباره‌ای خودتراکم+ سیمان تیپ ۲ (۵۰*۵۰)	SCSC-OPC(II)-50	۲۳۷۵	۱/۸۸	۱/۹۲	۳/۶۲	۳/۷۸
سرباره‌ای خودتراکم+ سیمان تیپ ۲ (۷۰*۳۰)	SCSC-OPC(II)-70	۲۳۱۰	۲/۶۲	۲/۹۱	۳/۴۸	۴/۳



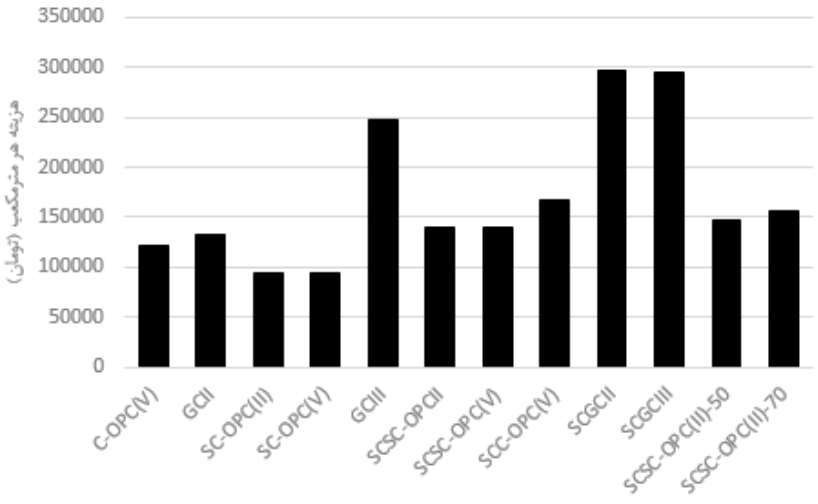
شکل ۲۱: مقاومت کششی دونیم شدن بتن‌ها

۴-۴- مقایسه هزینه‌ها

طبق بررسی انجام شده توسط سانگ و همکاران بتن ژئوپلیمر در کاهش انرژی موردنیاز تا ۴۰ درصد نسبت به سیمان پرتلند کمک می‌کند [۲۵]. مصرف سوخت (انرژی حرارتی) بر کاهش میزان انتشار CO_2 واکنش نشان خواهد داد. علاوه بر این بتن ژئوپلیمر از مواد زائد مانند خاکستربادی، سرباره و... استفاده می‌کند. تمام خصوصیات موردنظر بتن ژئوپلیمر را از دیدگاه زیست‌محیطی مطلوب‌تر از انواع دیگر بتن ترغیب می‌کند، گرچه هزینه آن بالاتر است. عملکرد بتن ژئوپلیمر در برابر حمله سولفات، مقاومت در برابر آتش، و شرایط سخت آب و هوایی نسبت به بتن سیمان پرتلند برتر است. این حقایق ممکن است به جبران نگرانی‌های با هزینه بالا کمک کنند. هزینه بتن ژئوپلیمر بسته به میزان قیمت محلی مواد خام، محاسبه خواهد شد. هزینه‌های مواد به احتمال زیاد به پیشنهاد و درخواست متفاوت است. هزینه حمل‌ونقل نیز با توجه به مقدار سفارش و نوع وسیله حمل متفاوت خواهد بود. بنابراین، هزینه بر اساس میانگین و بیشترین مقدار مورد انتظار محاسبه خواهد شد. در این بررسی هزینه تولید یک مترمکعب بتن ژئوپلیمر با سایر بتن‌ها بر اساس قیمت مصالح در سال ۱۳۹۷ محاسبه و مقایسه شده است. برای تولید یک مترمکعب از تمامی بتن‌ها شامل معمولی و خودتراکم با سیمان پرتلند، سرباره‌ای معمولی و خودتراکم، ژئوپلیمر معمولی و خودتراکم، تعدادی مواد و مصالح موردنیاز است که مطابق جدول ۱۰ و نمودار ۲۲ نشان داده شده است. مقاومت فشاری و کششی مرجع در این بررسی مقاومت‌های سنین مختلف بتن با سیمان پرتلند، انتخاب شده است. شرایط محیطی موردنظر در آزمایشگاه ۲۲/۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۰: برآورد قیمت بتن‌های ساخته‌شده با توجه به طرح اختلاط‌های استفاده‌شده

نوع مصالح	واحد	قیمت (تومان)	نوع بتن	MIX	قیمت یک مترمکعب بتن (تومان)
شن بادامی	تن	۱۵۵۰۰	بتن معمولی باسیمان پرتلند	C-OPC	۱۲۲۰۰۰
شن نخودی	تن	۱۳۵۰۰	بتن سرباره‌ای با ۳۰ درصد سیمان پرتلند	SC-OPC	۹۴۰۰۰
ماسه	تن	۱۶۰۰۰	بتن ژئوپلیمر نوع II	GCII	۱۳۳۰۰۰
سیمان پرتلند	پاکت ۵۰ کیلویی	۱۱۵۰۰	بتن ژئوپلیمر نوع III	GCIII	۲۴۸۰۰۰
سرباره	پاکت ۵۰ کیلویی	۶۵۰۰	بتن خودتراکم باسیمان پرتلند	SCC-OPC	۱۶۸۰۰۰
فوق روان کننده	کیلوگرم	۶۵۰۰	بتن سرباره‌ای خودتراکم با ۳۰ درصد سیمان پرتلند	SCSC-OPC30	۱۴۰۰۰۰
سدیم هیدروکسید	کیلوگرم	۱۶۰۰	بتن سرباره‌ای خودتراکم با ۵۰ درصد سیمان پرتلند	SCSC-OPC50	۱۴۸۰۰۰
سیلیکات سدیم مایع	لیتر	۶۵۰	بتن سرباره‌ای خودتراکم با ۷۰ درصد سیمان پرتلند	SCC-OPC70	۱۵۶۰۰۰
پودرسنگ سیلیس	کیلوگرم	۷۰	بتن ژئوپلیمر خودتراکم نوع II	SCGCII	۲۹۶۰۰۰
کربنات سدیم	کیلوگرم	۱۶۰۰	بتن ژئوپلیمر خودتراکم نوع III	SCGCIII	۲۹۵۰۰۰
کربنات کلسیم	کیلوگرم	۵۰۰			



شکل ۲۲: مقایسه هزینه‌ها

۵- جمع‌بندی

این مطالعه یک روش تحقیق تجربی بر روی خواص کارایی و رفتار مکانیکی SCGC های مبتنی بر سرباره، تحت عمل‌آوری در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و شرایط محیطی ارائه کرده است. بر اساس ارزیابی آزمایشات انجام‌شده روی بتن‌های مختلف آزمایشگاهی در این مقاله، نتیجه‌گیری‌های زیر به‌دست‌آمده است:

۱- ترکیب SCGCIII باعث افزایش مقاومت فشاری زیاد در سنین پایین‌تر (عمدتاً در طی ۳ روز اول) و با پیشرفت کمتر ۲۸ روزه نسبت به سنین پایین‌تر همراه بود. مقاومت فشاری SCGCIII مبتنی بر سرباره بیش از ۶۰ مگاپاسکال به دست آمد، که برای بتن مورداستفاده از مصالح محلی بسیار مناسب است.

۲- بتن ژئوپلیمرمعمولی و خودتراکم نوعIII بیشترین مقاومت فشاری را در بین بتن‌ها کسب کردند و با توجه به زودگیر بودن این‌گونه بتن‌ها و هم‌چنین مقاومت بالا در سنین اولیه بتن، باعث سرعت در انجام عملیات قالب برداری پروژه‌ها و کاهش هزینه نگه‌داری و عمل‌آوری بتن می‌شود.

۳- با توجه به خصوصیات بتن‌های ژئوپلیمر که شامل: کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت در برابر حملات شیمیایی، مقاومت در برابر آتش، کاهش جمع شدگی ناشی از خشک شدن و شرایط سخت آب و هوایی، بهبود خواص بتن تازه و سخت شده بتن، افزایش دوام بتن و کنترل واکنش قلیایی سنگدانه می‌باشد، بتن ژئوپلیمرخودتراکم نوعIII بهترین گزینه جهت کاربرد در پروژه‌های عظیم ملی و افزایش طول عمر آن‌ها و استفاده کمتر از منابع ملی جهت تولید سیمان پرتلند می‌باشد.

۴- خواص تازه بتن ژئوپلیمرخودتراکم نوعII در رسیدن به بعضی الزامات EFNARC ناموفق بود و ازلحاظ مقاومت نیز با بتن ژئوپلیمر مقاومت فشاری و کششی به مراتب کمتری داشت. دلیل آن می‌تواند ناسازگاری فوق‌روان‌کننده، افزایش خاصیت دیرگیری به دلیل استفاده از فوق‌روان‌کننده باشد (زیرا این نوع بتن برای تشکیل پیوند پلیمریزاسیون سفت و سخت شدن نیاز به گرما دارد) که باید بررسی شود.

۵- مقاومت کششی دونیم شدن SCGC مبتنی بر سرباره کمتر از ۱۰ درصد مقاومت فشاری آن بود، همان‌طور که در بتن سیمان معمولی نیز وجود دارد. مقادیر مقاومت کششی در محدوده پیش‌بینی‌شده برای بتن‌های مبتنی بر OPC کاهش یافته است. به‌طور متوسط، مقاومت کششی دونیم شدن SCGC در حدود ۵ تا ۱۰ درصد مقاومت فشاری آن بود که در توافق خوب با محدوده گزارش‌شده برای مقاومت نرمال بتن سیمان پرتلند است.

۶- با توجه به گران بودن فعال‌کننده‌های قلیایی و افزایش قیمت تمام‌شده بتن، به نظر می‌رسد استفاده گسترده از این نوع بتن‌ها در ساخت‌وساز صرفه اقتصادی نداشته و تنها جهت مصارف خاص ازجمله قطعات پیش‌ساخته، سازه‌های هیدرولیکی، مصارف نظامی و... توجیه اقتصادی داشته باشد.

۷- بتن خودتراکم سرباره‌ای با جایگزینی ۷۰ درصد سیمان پرتلند بیشترین مقاومت را در بین بتن‌های سرباره‌ای کسب کرد و از لحاظ هزینه نیز معقول بود. پیشنهاد می‌شود تأثیر جایگزینی درصدهای مختلف سرباره با سیمان پرتلند بررسی شود و درصد بهینه و اقتصادی جهت کاربرد عملی در پروژه‌های ساختمانی تعیین شود.

۸- کمپین‌های ارتباطی نشان می‌دهد که بالا بردن آگاهی مردم در مورد مسائل مربوط به انتشار CO_2 و اطلاع‌رسانی به آن‌ها در مورد چگونگی سیمان سبز (سیمان ژئوپلیمر) می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی مناسب برای کمک به افزایش موفقیت در کسب‌وکار بتن سبز (ژئوپلیمر) باشد.

پیشنهادات برای تحقیقات آتی:

۱- در این تحقیق از پودر سرباره به‌عنوان پودر پایه و اتصال‌دهنده (Binder) با عیار ثابت ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود برای ساخت بتن‌های ژئوپلیمر عیارهای مختلف سرباره و جایگزینی بخشی از سرباره با پوزولان‌های دیگر ازجمله خاکستربادی و خاکستر پوسته برنج و... تأثیر آن‌ها روی خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن ژئوپلیمر خودتراکم بررسی شود.

۲- در این تحقیق از درصد ثابت و مخلوط کربنات سدیم و کربنات کلسیم (۱۲ درصد سرباره) برای بتن‌های ژئوپلیمر نوع II و غلظت ۱۸/۷۵ سیلیکات سدیم مایع برای ساخت بتن‌های ژئوپلیمر نوع III استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود تأثیر درصدها و غلظت‌های مختلف در ساخت هریک از انواع بتن بررسی شود.

۳- با توجه به اینکه کاهش غلظت هیدروکسید سدیم باعث کاهش هزینه در هر مترمکعب می‌شود و تأثیر زیادی بر مصرف سوخت دارد، بنابراین کاهش غلظت هیدروکسیدسدیم باید تمرکز اصلی در تحقیقات آینده باشد.

۴- پیشنهاد می‌شود درصدها و غلظت‌های مختلف فعال‌سازها در ساخت بتن‌های ژئوپلیمری و مقایسه و برآورد هزینه تمام‌شده هرکدام از بتن‌ها بررسی گردد.

۵- محاسبه انتشار CO2 و مقایسه آن با سیمان پرتلند و یافتن راه‌های بالقوه برای کاهش آن مطالعه گردد.

مراجع

[1] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, S.K. Bhattacharyya, Geopolymer concrete: a review of some recent developments, Constr. Build. Mater. 85 (2015) 78–90.

[2] Nurdeen M. Altwair and Shahid Kabir, Green Concrete Structures By Replacing Cement With Pozzolanic Materials To Reduce Greenhouse Gas Emissions For Sustainable Environment, American Society Of Civil Engineers 6th International Engineering and Construction Conference (IECC'6), airo, Egypt, June 28-30, 2010

[3] Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis 1991;37(8): 1633-56

[4] Chau-Khun Ma, Abdullah Zawawi Awang, Wahid Omar, Structural and material performance of geopolymer concrete, Construction and Building Materials 186 (2018) 90–102

[۵] وحید بحرینی احسان الله ضیغمی " بتن های ژئوپلیمری خواص و کاربردها "، اولین کنفرانس ملی مصالح و سازه‌های نوین در مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته بهمن ۱۳۹۱

[۶] C. Shi, D. Roy, and P. Krivenko, *Alkali-Activated Cements and Concretes*. CRC Press, 2006.

[۷] Morin KA, Hutt NM. Environmental geochemistry of minesite drainage: Practical and case studies. Minesite Drainage Assessment Group (MDAG) Publishing, Vancouver,B.C.; 1997.

[۸] Zeng X, Wu J, Rohlf RA. Seismic stability of coal-waste tailings dams. eotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, Proceedings of a SpecialtyConference, ASCE; 1998. p. 950-61.

[۹] Nagaraj. V. K and D.L. Venkatesh Babu, Assessing the performance of molarity and alkaline activator ratio on engineering properties of self-compacting alkaline activated concrete at ambient temperature, Journal of Building Engineering, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.005

[۱۰] D. Adak a, M. Sarkar b, S. Mandal , Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar, Construction and Building Materials 70 (2014) 453–459

[۱۱] J. S. J. van Deventer, J. L. Provis, P. Duxson, and G. C. Lukey, "Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products," *J. Hazard. Mater.*, vol. 139, no. 3, pp. 506–513, Jan. 2007.

[12] F. Puertas, S. Martínez-Ramírez, S. Alonso, and T. Vázquez, "Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 1625–1632, Oct. 2000.

[13] J. L. Provis and S. A. Bernal, "Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 44, no. 1, pp. 299–327, Aug. 2014.

[14] K. Komnitsas and D. Zaharaki, "Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry," *Miner. Eng.*, vol. 20, no. 14, pp. 1261–1277, Nov. 2007.

[15] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, and J. S. J. van Deventer, "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties," Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp., vol. 269, no. 1–3, pp. 47–58, Nov. 2005

[16] ASTM-C1017:Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concret.

[17] EFNARC, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use, 2005.

[18] EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, Norfolk, UK:
European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, February

[19] BS EN 12390-3:2002, Testing hardened concrete – part 3: Compressive strength of test specimens; 2002.

[20] BS EN 12390-6:2000, Testing hardened concrete – part 6: Tensile Splitting strength of test specimens; 2000
[21] Yamini J. Patel, Niraj Shah, Development of self-compacting geopolymer concrete as asustainable construction material, Sustainable Environment Research 28 (2018) 412e421
[22] Muhd Fadhil Nuruddin, Samuel Demie, and Nasir Shafiq, Effect of mix composition on workability and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete, Universiti Teknologi Petronas, Can. J. Civ. Eng. 38: 1196–1203 (2011)
[23] Davidovits, J., Geopolymer Chemistry and Applications, 2nd edition, Institut Geopolymer, Saint-Quentin, France, 2008
[24] Sofi, M., van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., Lukey, G. C., Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs), *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, pp. 251–257.
[25] Song XJ, Marosszeky M, Brungs M, Munn R. Durability of fly ash based geopolymer concrete against sulphuric acid attack. 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components, Lyon, France; 2005.