

Investigating the substitution of pumice with cement in self-compacting earth concrete in terms of mechanical strength, microstructure and life cycle analysis

Afshin Khodaparast¹, Kianoosh Samimi^{2*}, Mahyar pakan³

1- PhD student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2* - Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Ph.D., Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Clearly, with increased awareness of global warming, earth-based construction is gaining renewed interest. Therefore, a comprehensive study has been conducted to evaluate the use of natural pozzolan (pumice) as an alternative to cement in self-compacting earth concrete. In this regard, fresh state, mechanical, microstructural, and life cycle analyses of pumice-containing self-compacting earth concrete are evaluated in this study. To choose the optimal type of earth, compressive strength, chemical analysis, and required SP amount for three different types of earth pastes were investigated. Based on this result, in order to achieve the allowable self-compacting earth concrete fresh state, the amount of SP required decreases as the amount of pumice replacement increases. Based on the results, pumice substitution decreases compressive strength at all curing ages. However, pumice's pozzolanic effects increase compressive strength over time. Stress-strain results indicate that the failure modes of pumice-containing mixtures are more brittle due to the insufficient cementation hydration products at early curing ages. Also, with increasing the proportion of pumice in the SCEC mixtures at long-term curing ages, the ductility and maximum strain of the concrete increase at long-term curing ages. A microstructural analysis indicated that substituting pumice for cement increases voids and cracks at an early curing age due to insufficient hydration products. Long-term pumice pozzolanic reactions also increase CH and CSH phases after 90 days of curing. Furthermore, the life cycle analysis based on the ReCiPe 2016 method indicates that increasing pumice substitution can reduce environmental impact of the SCEC mixtures. Moreover, substituting 35% of cement content for pumice reduces CO₂ emissions by 31.22%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 August 2024

Revise Date: 19 November 2024

Accept Date: 23 November 2024

Keywords:

CO₂ emission
Self-compacting earth concrete
Pumice
mechanical strength
life cycle

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.470374.3479](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.470374.3479)

*Corresponding author: Kianoosh Samimi.

Email address: k_samimi@sbu.ac.ir

بررسی استفاده از پومیس در بتن حاکی خودمتراکم از منظر مقاومت مکانیکی، ریزساختار و تحلیل چرخه عمر

کیانوش صمیمی^{۱*}، مهیار پاکان^۲ افشین خداپرست^۱

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

بدیهی است که با افزایش آگاهی نسبت به گرم شدن کره زمین، ساخت و سازه‌های مبتنی بر خاک مورد توجه مجدد قرار گرفته است. بدین منظور، مطالعه‌ای جامع در جهت امکان سازی استفاده از بتن حاکی خودمتراکم حاوی پومیس به عنوان جایگزین سیمان در بتن با انجام آزمایشات مختلف انجام گردیده است. از این رو، آزمایشاتی جهت مطالعه مقاومت مکانیکی، ریزساختاری و تحلیل چرخه عمر بر روی بتن حاکی خودمتراکم حاوی درصد های مختلف جایگزینی پومیس با سیمان انجام شده است. ابتدا، مخلوط‌هایی حاوی سیمان، پومیس و ۳ نوع خاک مختلف جهت تعیین خاک بهینه در جهت ساخت بتن از منظر نتایج مقاومت فشاری، مشخصات شیمیایی، و میزان روان کننده مورد نیاز بررسی گردید. نتایج آزمایشات حالت تازه نشان داد، برای حفظ محدوده استاندارد حالت تازه بتن حاکی خودمتراکم، با افزایش میزان جایگزینی پومیس میزان روان کننده مورد نیاز کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش میزان جایگزینی پومیس، میزان مقاومت فشاری در سنین اولیه نگهداری کاهش قابل ملاحظه‌ای به همراه دارد. اما با گذشت زمان بواسطه خواص پوزولانی پومیس، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش تنش-کرنش نشان داد، مود شکست نمونه‌ها بواسطه جایگزینی پومیس به جای سیمان در سنین اولیه نگهداری ترد و شکننده می‌باشند. با افزایش میزان پومیس در مدت نگهداری بالاتر، شکل پذیری و کرنش قابل تحمل بتن در زمان نگهداری بیشتر، افزایش می‌یابد. بررسی نتایج ریز ساختار نشان داد، در سنین اولیه نگهداری میزان فضای خالی و ترک در نمونه‌ها بواسطه عدم حضور سیمان کافی و تکمیل فرآیند هیدراتاسیون افزایش می‌یابد. همچنین، در مدت زمان نگهداری ۹۰ روز، بواسطه خواص پوزولانی پومیس شاهد افزایش فازهای CH و CSH بوده‌ایم. تحلیل چرخه عمر بر اساس روش ReCiPe 2016 نشان می‌دهد، افزایش جایگزینی پومیس تاثیر بسزایی در کاهش آسیب‌های محیط زیستی بتن دارد. همچنین بر اساس نتایج، میزان انتشار CO₂ در جایگزینی ۳۵٪ محتوای سیمان با پومیس به میزان ۳۱/۲۲٪ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: انتشار گاز CO₂، بتن حاکی خودمتراکم، پومیس، مقاومت مکانیکی، چرخه عمر

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.470374.3479	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.470374.3479	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۹/۰۳	۱۴۰۳/۰۹/۰۳	۱۴۰۳/۰۸/۲۹	۱۴۰۳/۰۶/۰۳
کیانوش صمیمی K_samimi@sbu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

توافقنامه آب و هوای پاریس در سال ۲۰۱۶ توسط سران کشورها امضا گردید، که بر کاهش میزان افزایش گرمای کره زمین تاکید نموده است [۱]. بر اساس گزارش سالانه سازمان ملل متحد، توافق نامه پاریس تا به امروز در حدود یک سوم از گازهای گلخانه‌ای را برای جلوگیری از گرم شدن فاجعه بار کره زمین را کاهش داده است [۲]. در کنفرانس آب و هوای سازمان ملل (COP28) که در سال ۲۰۲۳ در دبئی برگزار گردید، سوخت های فسیلی به عنوان بزرگترین چالش برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای معرفی گردیدند. تقریباً ۷۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان بواسطه مصرف سوخت های فسیلی تولید می‌شود. طبق بررسی‌ها، سهم صنعت ساخت و ساز از تولید گازهای گلخانه‌ای در حدود ۲۳ درصد می‌باشد [۳]. برای کاهش اثرات زیست محیطی مرتبط با صنعت ساختمان، کاهش مصرف سیمان و استفاده از مصالح جایگزین بی‌ضرر محیط زیست یکی از راه‌های مواجهه با بحران گرمایش زمین می‌باشد [۴]. استفاده از مصالح مبتنی بر انواع خاک موجود در زمین، نظیر مصالح خشتی، آجر، کاه گل و غیره، که یک روش موثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد، از گذشته تا به امروز توسط مردم جهان مورد استفاده قرار گرفته است. از مزایای این روش، تولید مقرون به صرفه، منابع کافی، عدم نیازمندی به انتقال مواد مورد استفاده اشاره نمود [۵]. خاک های طبیعی در نقاط مختلف جهان فراوان، ارزان و قابل دسترس می‌باشند و با توجه عدم انتقال، موجب کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. مضاف بر این، انرژی مورد نیاز برای دسترسی به مصالح خاکی بسیار پایین می‌باشد و برخلاف سیمان برای تولید به انرژی بالا نیازمند نمی‌باشد. میزان تولید گاز CO₂ معادل در تولید یک کیلوگرم خاک در حدود ۰.۰۲۳ کیلوگرم می‌باشد که این مقدار در تولید مصالح معمولی در حدود ۰.۱۳ کیلوگرم می‌باشد [۶]. استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مواد بازیافتی جهت کاهش مصرف سیمان و همچنین بهبود کاستی‌های بتن‌های سبز در جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اجتناب ناپذیر می‌باشد [۷، ۸ و ۹]. همچنین، پومیس یکی از مواد پوزولانی طبیعی است که از فوران‌های آتشفشانی به وجود می‌آید. در سال‌های اخیر، پومیس بواسطه رفتار رئولوژیکی مناسب، خواص مکانیکی، دوام و سازگاری با محیط زیست و همچنین مقرون به صرفه بودن، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱۰ و ۱۱].

بتن دومین ماده پرمصرف بعد از آب در جهان می‌باشد [۱۲]. بتن معمولی دارای چالش‌هایی نظیر نیازمندی به تراکم مناسب و کارایی پایین که منجر به کاهش سرعت اجرا می‌گردد، می‌باشد. پژوهشگران در جهت بهبود عملکرد و حذف معایب بتن سنتی، بتن خودمتراکم را پیشنهاد نمودند که بواسطه بهبود خواص بتن معمولی و افزایش سرعت بتن‌ریزی، موجب به کارگیری روز افزون آن در صنعت ساختمان گردیده است [۱۳]. همچنین، بتن خاکی خودمتراکم را می‌توان برای ساخت عناصر سازه‌ای و غیر سازه‌ای با در نظر گرفتن همزمان علم بتن خودمتراکم و بتن خاکی، به کار گرفت. بتن خاکی خودمتراکم امکان ریختن بتن به صورت کامل بدون تراکم اضافی را به جای متراکم کردن پیوسته در بتن معمولی، ممکن می‌سازد. استفاده از بتن خودمتراکم خاکی، کیفیت بتن نهایی را بهبود می‌بخشد و زمان اجرای پروژه‌ها را کاهش می‌دهد و به مزایای اقتصادی استفاده از خاک به عنوان مصالح ساختمانی کمک می‌نماید. از این رو، محققین امکان استفاده از بتن خاکی در صنعت ساختمان را به عنوان رویکردی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارائه بتن‌هایی قابل قبول برای احداث المان‌های مختلف در سازه مورد بررسی قرار دادند. در این راستا، کهندل‌نیا و همکاران در پژوهشی نشان دادند که جایگزینی ۷۵ درصد خاک با سیمان موجب کاهش ۹۲٪ مقاومت فشاری و افزایش ۸۲٪ نفوذپذیری بتن می‌گردد [۱۴]. مقاومت فشاری بتن خاکی مورد مطالعه پس از گذشت ۶ ماه از نگهداری، از ۱ MPa به ۵ MPa افزایش یافت، اما همچنان برای اهداف باربری ناکافی می‌باشد. همچنین، نتایج آزمایش آلتراسونیک نشان داد که سرعت موج برشی بر اساس افزودن ۲۰، ۳۰ و ۴۰٪ درصد خاک رس به ترتیب ۳۰، ۳۲ و ۳۵٪ درصد کاهش یافته است. خدایرست و همکاران در پژوهشی با ارائه طرح‌های اختلاط دارای مقاومت‌های فشاری قابل قبول سازه‌ای و غیر سازه‌ای نشان دادند که برای رسیدن به جریان اسلامپ مجاز بتن خاکی خودمتراکم، استفاده از مقادیر بالای روان کننده اجتناب ناپذیر می‌باشد. نتایج آزمایش تنش-کرنش همچنین نشان داد، با افزایش میزان جایگزینی خاک رس با سیمان، میزان مدول الاستیسیته کاهش و شکلپذیری افزایش یافت. بر اساس نتایج تحلیل چرخه عمر، نقش محتوای سیمان در تولید گاز CO₂ قابل ملاحظه می‌باشد و این مقدار در بتن شاهد به ۹۴٪ کل تولید CO₂ می‌رسد. درصد کاهش تولید گاز CO₂ در بتن‌های خاکی خودمتراکم پیشنهادی در این پژوهش در محدوده ۳۳٪ تا ۸۸٪ می‌باشد [۱۵]. در همین راستا، عزیزی و همکاران در پژوهشی به بررسی بتن خاکی حاوی درصد‌های مختلف دوده

سیلیس پرداختند. در این پژوهش در ابتدا، ترکیب بهینه بر مبنای میزان درصدهای مختلف دوده سیلیس (۷/۵٪، ۱۰٪ و ۱۲/۵٪) و انتخاب روش‌های مختلف عمل‌آوری بر مبنای افزایش مقاومت فشاری خمیر سیمان حاوی رس بررسی گردید. نتایج پژوهش نشان داد، مقاومت فشاری مخلوط‌های خاک و سیمان در نگهداری خشک عملکرد بهتری دارند، در صورتی که برای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس عمل‌آوری مرطوب مطلوب‌تر بود. بر اساس نتایج، مقاومت فشاری نمونه بتنی حاوی ۵۰ درصد خاک جایگزین سیمان نسبت به نمونه شاهد به میزان ۵۶/۹۶٪ و ۶۰/۸۸٪ به ترتیب پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری در شرایط خشک کاهش یافت. از طرفی مخلوط حاوی ۵۰ درصد خاک و ۱۰ درصد دوده سیلیس مقاومت فشاری را در ۲۸ روز ۲۸/۰۸٪ و در ۹۰ روز ۳۵/۱۸٪ در مقایسه با مخلوط حاوی ۵۰ درصد خاک رس در عمل‌آوری مرطوب بهبود بخشید [۱۶]. رحمان و همکاران همچنین اثرات جایگزینی سیمان با پومیس را تا ۴۰٪ در بتن معمولی بررسی کردند و نتایج نشان داد که طرح اختلاط بهینه بتن شامل ۸۰٪ سیمان و ۲۰٪ پومیس می‌باشد. افزایش مقاومت فشاری ۹/۸٪ و کاهش تخلخل ۳۶٪ پس از ۹۰ روز نگهداری در مقایسه با مخلوط شاهد مشاهده شد [۱۷]. به همین ترتیب صمیمی و همکاران در پژوهش‌هایی جداگانه گزارش دادند که طرح بتن خود متراکم با ۱۵٪ جایگزینی پومیس با سیمان حداقل مقاومت فشاری قابل مقایسه‌ای را با طرح بدون افزودنی در سنین طولانی مدت نشان داد [۱۸ و ۱۹]. پژوهش شمس و همکاران حاکی از آن می‌باشد که چقرمگی بتن حاکی با افزایش نسبت آب به سیمان رابطه معکوس دارد. نتایج نشان داد که این میزان کاهش با افزایش سه برابری نسبت آب به سیمان، به میزان ۵ برابر می‌باشد که ضرورت محدود نگه داشتن نسبت آب به سیمان را نشان می‌دهد [۲۰].

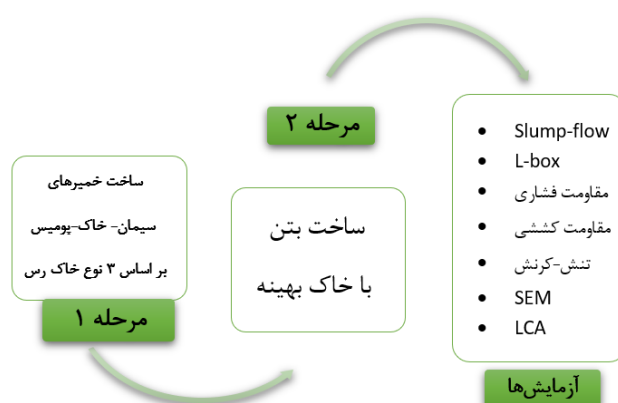
بررسی ادبیات تحقیقات گذشته نشان داد که نیل به اهداف محیط زیستی، مقاومتی، و اقتصادی بتن حاکی خود متراکم با چالش‌هایی همراه است. کاهش هرچه بیشتر تولید گازهای گلخانه‌ای همراه با کسب مقاومت مکانیکی قابل قبول برای المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای، و همچنین بهبود مسائل اقتصادی بتن حاکی خود متراکم بوسیله جایگزینی بیش از پیش سیمان با مواد پوزولانی ارزان و سازگار با محیط زیست که دارای خواص رئولوژیکی مناسب باشد، اجتناب ناپذیر است. هدف اصلی و نوآوری این پژوهش، نیل به اهداف توسعه پایدار با ارائه راهکاری موثر در جهت کاهش بیش از پیش مصرف سیمان در صنعت ساختمان و کاهش قیمت تمام شده کمتر با معرفی طرح‌های اختلاط پیشنهادی بتن حاکی خود متراکم حاوی پومیس می‌باشد. بتن حاکی خود متراکم حاوی پومیس پیشنهادی با تلفیق علم بتن حاکی و بتن خود متراکم حاوی پوزولان‌های طبیعی، علاوه بر کاهش قابل ملاحظه تولید گازهای گلخانه‌ای می‌تواند کیفیت، کارایی و سرعت اجرای بتن را بهبود بخشیده و بتنی اقتصادی به صنعت ساختمان ارائه نماید. با توجه افزایش مقاومت‌های مکانیکی قابل ملاحظه و بهبود شکل‌پذیری طرح‌های بتن حاکی خود متراکم پیشنهادی نسبت به تحقیقات گذشته، امکان استفاده از طرح‌های اختلاط مذکور برای المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای حتی در مناطق مستعد بارهای جانبی نظیر باد و زلزله، امکان پذیر می‌باشد.

برای نیل به اهداف این پژوهش، ابتدا ۳ نوع خاک از مناطق مختلف کشور انتخاب گردید. به منظور انتخاب خاک بهینه، مخلوط‌های حاوی خاک، سیمان و پومیس از هر نوع خاک ساخته شده و از لحاظ مقاومت فشاری در سنین مختلف نگهداری مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از انتخاب خاک بهینه، اقدام به ساخت بتن حاکی خود متراکم حاوی پومیس شده است. پس از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، تنش-کرنش و آلتراسونیک در سنین مختلف نگهداری بر روی طرح‌های اختلاط پیشنهادی، کلیه نتایج مورد ارزیابی و تفسیر قرار گرفت. همچنین برای اثبات نتایج مقاومت‌های مکانیکی، تحلیل‌های ریزساختاری نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM¹)، تحلیل ترموگراویمتری (TGA²)، بر روی طرح‌های اختلاط انجام شد. در انتها، با استفاده از تحلیل چرخه عمر (LCA³)، میزان تولید دی اکسید کربن در همه طرح‌های اختلاط بتن پس از محاسبه، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شکل شماره ۱ روند کلی این تحقیق را به طور خلاصه به تصویر کشیده است.

¹ Field emission scanning electron microscopy

² Thermogravimetric analysis

³ Life Safety analysis



شکل ۱: روند کلی روند تحقیق

۲- برنامه آزمایشگاهی

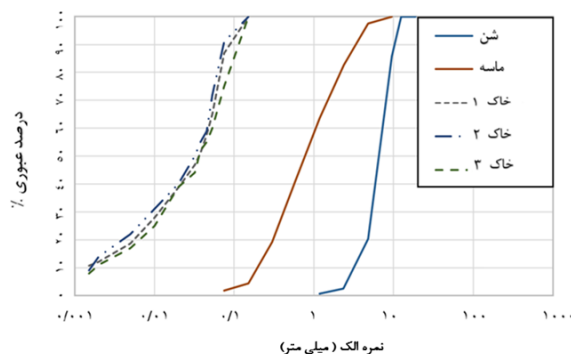
• ۱-۲ مصالح

در مطالعه حاضر از سه نوع خاک متفاوت (نوع I، II و III) به ترتیب از مناطق مختلف قائمشهر، رامسر و گرگان استفاده شده است. خاک‌های فوق شامل کوآرتر، کائولینیت، ایلیت، مونت مورلینیت می‌باشند. سیمان پرتلند نوع II طبق استاندارد ASTM⁴-C150 از کارخانه سیمان تهران تهیه شده است [۲۱]. تحلیل شیمیایی و فیزیکی سیمان استفاده شده، انواع خاک‌ها و روان‌کننده مورد استفاده در جدول شماره ۱ ارائه شده است. برای تمامی طرح‌های اختلاط بتن، از سنگدانه‌های خرد شده با اندازه اسمی ۰ تا ۴ میلی‌متر برای ماسه و اندازه‌های ۶ تا ۱۲ میلی‌متر برای شن استفاده شده است. توزیع اندازه ذرات سنگدانه‌ها و انواع خاک در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. الک‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل الک‌های $\frac{3}{4}$ " (۱۹/۰۰ میلی‌متر)، $\frac{1}{4}$ " (۱۲/۷۰ میلی‌متر)، $\frac{3}{8}$ " (۱۹/۰۰ میلی‌متر)، ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر)، ۸ (۲/۳۶ میلی‌متر)، ۱۰ (۲/۰۰ میلی‌متر)، ۱۶ (۱/۲ میلی‌متر)، ۳۰ (۶۰۰ میکرون)، ۴۰ (۴۲۰ میکرون)، ۵۰ (۳۰۰ میکرون)، ۱۰۰ (۱۵۰ میکرون)، و ۲۰۰ (۷۵ میکرون) می‌باشند. فوق روان‌کننده پلی-کربوکسیلات اثر ساخت شرکت سیکا با مشخصات مندرج در جدول ۱، در ساخت بتن استفاده شده است.

جدول ۱: تحلیل شیمیایی و فیزیکی سیمان، انواع خاک‌ها و روان‌کننده

عناصر %	سیمان پرتلند (نوع II)	پومیس	خاک نوع ۱	خاک نوع ۲	خاک نوع ۳	روان‌کننده
SiO ₂	۱۸/۸۸	۳/۳۷	۵۲/۹۸	۴۳/۰۸	۵۰/۹۵	-
Al ₂ O ₃	۴/۰۱	۵۶/۳۹	۱۴/۲۴	۱۱/۹۳	۱۳/۲۵	-
Fe ₂ O ₃	۳/۴۵	۱۶/۳۲	۴/۷۶	۵/۲۰	۵/۳۳	-
CaO	۶۳/۲۳	۱۶/۳۲	۱۰/۳۵	۱۵/۶۵	۱۰/۴۸	-
MgO	۳/۲۶	۱۰/۵۱	۳/۴۹	۳/۰۵	۳/۴۵	-
SO ₃	۴/۱۲	۱/۸۵	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۱۵	-
TiO ₂	۰/۳۱	۱/۳۶	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۶۶	-
MnO	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۶	-
Na ₂ O	۰/۱۱	۰/۵۲	۱/۱۶	۰/۸۱	۱/۲۴	۱/۵>
K ₂ O	۰/۸۲	۳/۱۳	۲/۵۶	۲/۳۱	۲/۷۸	-
Ba	۰/۲۸	۲/۲۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۷	-
Cl	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۱>
Zr	-	۰/۰۶	۰/۰۲	-	۱/۰۲۰	-
Cu	۰/۰۱	۱۰/۰۱	۰/۰۱	-	-	-

Liquid Limit (LL)	-	-	٪۲۹	٪۲۸	٪۲۷	-
Plastic Limit (PL)	-	-	٪۱۱	٪۱۱	٪۱۰	-
PH	-	-	۸/۶۱	۸/۲۸	۸/۶۴	۷/۰۰
Loss of ignition	۱/۰۷	-	۹/۱۳	۱۶/۰۷	۱۱/۰۶	-
مدول نرمی (kg/m ²)	۲۹۰	۴۲۴/۵۱	-	-	-	-
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۳/۱۵	۲/۵۸	۱/۸۳	۱/۸۱	۱/۷۹	۱/۰۶



شکل ۲: اندازه سنگدانه‌ها و خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق

۲-۲ آماده سازی نمونه های مخلوط خاک - سیمان - پومیس

در این مطالعه، طرح مخلوط REF-C0 بدون هیچ گونه درصد جایگزینی خاک و پومیس به عنوان نمونه شاهد ساخته شده است. همچنین مخلوط‌های CI-50، CII-50 و CIII-50 به عنوان نمونه‌های حاوی ۵۰٪ خاک جایگزین سیمان ساخته شدند. همچنین مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ از سه نوع خاک با درصد‌های مختلف جایگزینی پومیس با سیمان جهت ساخت مخلوط‌های خاک-سیمان-پومیس به منظور انتخاب خاک بهینه در نظر گرفته شد. بر اساس جدول ۲، مخلوط‌های خاک-سیمان-پومیس بر اساس نوع خاک مورد استفاده، در هر دسته بندی طبقه بندی شدند. بر این اساس، مخلوط‌های گروه‌های الف، ب و ث به ترتیب از نوع خاک I، II و III ساخته شدند. در هر گروه، نسبت جایگزینی پومیس با سیمان برابر ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۳۵٪ بوده است. تمام مخلوط‌های خاک-سیمان-پومیس در مخلوط کن ۶ لیتری ساخته شدند. روند اختلاط شامل ریختن کل سیمان، خاک، پومیس و ترکیب آب و روان کننده به صورت تدریجی در مخلوط کن بوده و سپس به مدت سه دقیقه با سرعت کم مخلوط شدند. در ادامه، مخلوط‌ها به مدت ۱ دقیقه با سرعت بالا مخلوط شدند. نمونه‌های مکعبی (۵۰×۵۰×۵۰mm³) مطابق با آیین نامه ASTM C31 ساخته شدند [۲۲]. پس از ریختن مخلوط در قالب‌ها، با دو لایه ورقه‌های پلاستیکی پیچیده شده و به مدت ۲۴ ساعت در یک محفظه با دمای کنترل شده ۲ ± ۲۲ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. شرایط نگهداری نمونه‌ها بر اساس روند تحقیقات گذشته بدون تماس مستقیم نمونه‌های حاوی خاک با آب صورت پذیرفته است. نمونه‌های بتن حاوی خاک به واسطه جذب آب در سطح نمونه و کاهش سرعت انعقاد، موجب کاهش مقاومت‌های مکانیکی می‌گردد. بر این اساس نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت قالب برداری شده و در دمای اتاق با رطوبت ۱ ± ۵۰ درصد بدون تماس مستقیم با آب نگهداری شدند.

جدول ۲. طرح اختلاط نمونه‌های خمیر خاک-سیمان-پومیس

	طرح اختلاط	سیمان (kg/m ³)	پومیس (kg/m ³)	خاک (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	روان کننده (kg/m ³)
گروه A	CI-50	۲۲۵	۰	۲۲۵	۱۸۰	۲/۱۴
	CI-50-P10	۲۰۲/۵	۲۲/۵۰	۲۲۵	۱۸۰	۲/۰۲
	CI-50-P15	۱۹۱/۲۵	۳۳/۷۵	۲۲۵	۱۸۰	۱/۹۸
	CI-50-P25	۱۶۸/۷۵	۵۶/۲۵	۲۲۵	۱۸۰	۱/۹۳
	CI-50-P35	۱۴۶/۲۵	۷۸/۷۵	۲۲۵	۱۸۰	۱/۸۲
	CII-50	۲۲۵	۰	۲۲۵	۱۸۰	۱/۹۱
	CII-50-P10	۲۰۲/۵	۲۲/۵۰	۲۲۵	۱۸۰	۱/۹۰

گروه B	CII-50-P15	۱۹۱/۲۵	۳۳/۷۵	۲۲۵	۱۸۰	۱/۸۵
	CII-50-P25	۱۶۸/۷۵	۵۶/۲۵	۲۲۵	۱۸۰	۱/۸۱
	CII-50-P35	۱۴۶/۲۵	۷۸/۷۵	۲۲۵	۱۸۰	۱/۸۰
گروه C	CIII-50	۲۲۵	۰	۲۲۵	۱۸۰	۲/۶۴
	CIII-50-P10	۲۰۲/۵	۲۲/۵۰	۲۲۵	۱۸۰	۲/۶۲
	CIII-50-P15	۱۹۱/۲۵	۳۳/۷۵	۲۲۵	۱۸۰	۲/۴۵
	CIII-50-P25	۱۶۸/۷۵	۵۶/۲۵	۲۲۵	۱۸۰	۲/۴۱
	CIII-50-P35	۱۴۶/۲۵	۷۸/۷۵	۲۲۵	۱۸۰	۲/۲۳

۲-۳ طرح‌های اختلاط بتن خاکی خودمتراکم

بر اساس بررسی نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های خاک-سیمان-پومیس، خاک نوع I به عنوان خاک بهینه انتخاب شد. سپس بتن‌های خاکی خودمتراکم حاوی پومیس با استفاده از خاک نوع I ساخته شدند. علاوه بر نمونه شاهد (REF)، پنج طرح اختلاط دیگر به منظور بررسی تاثیر درصدهای مختلف خاک بر خصوصیات بتن خودمتراکم خاکی تهیه گردیدند. طبق جدول شماره ۳، طرح‌های اختلاط بتن خودمتراکم خاکی به ترتیب شامل ۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۱۰۰٪ درصد خاک می‌باشند که به ترتیب به صورت REF-C0، SCEC-C50، SCEC-C60، SCEC-C70، SCEC-C80 و SCEC-C100 نام‌گذاری شدند.

جدول ۳. نسبت طرح اختلاط بتن خود متراکم خاکی

طرح اختلاط	سیمان (Kg/m ³)	خاک (Kg/m ³)	پومیس (Kg/m ³)	ماسه (Kg/m ³)	شن (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	روان کننده (Kg/m ³)	نسبت آب به سیمان
SCEC-C50	۲۲۵	۲۲۵	۰	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۹/۷۷	۰/۴
SCEC-C50-P10	۲۰۲/۵۰	۲۲۵	۲۲/۵	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۹/۱۷	۰/۴
SCEC-C50-P15	۱۹۱/۲۵	۲۲۵	۳۳/۷۵	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۸/۶۷	۰/۴
SCEC-C50-P25	۱۶۸/۷۵	۲۲۵	۵۶/۲۵	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۸/۳۳	۰/۴
SCEC-C50-P35	۱۴۶/۲۵	۲۲۵	۷۸/۷۵	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۸/۲۳	۰/۴

۲-۴ آماده سازی و نگهداری نمونه‌های بتن خودمتراکم خاکی

کلیه اختلاط‌های بتن خود متراکم خاکی حاوی پومیس در یک مخلوط کن ۱۵۰ لیتری تهیه شدند. ابتدا، سنگدانه‌ها در مخلوط‌کن قرار داده شد و سپس به مدت ۳ دقیقه هم زده شدند. در این مدت $\frac{2}{3}$ از آب طرح اختلاط به مخلوط کن افزوده شد. سپس خاک، سیمان، و پومیس به آن افزوده شده و به مدت ۱ دقیقه دیگر مخلوط شدند. سپس، فوق روان کننده و آب باقی مانده اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه هم زده شدند. اطراف دهانه مخلوط‌کن با یک پوشش پلاستیکی بسته شده تا از تبخیر آب به حداقل برسد. سرعت مخلوط در هر مرحله ۱۴۰ دور در دقیقه ثابت بود. تهیه نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای مطابق با آیین‌نامه‌های ASTM C31 و ASTM C511 انجام گردید [۲۲] و [۲۳]. قالب گیری و نگهداری نمونه‌ها مشابه بخش ۲-۲ انجام شده است.

۳- روش آزمایش

۳-۱- خواص حالت تازه بتن

طبق آیین‌نامه EFNARC، آزمایش‌های Slump-Flow و L-box برای بررسی کارایی حالت تازه بتن خودمتراکم حاوی پومیس در نظر گرفته شد. آزمایش Slump-Flow یکی از آزمایش‌های رایج برای اندازه‌گیری وضعیت حالت تازه بتن خودمتراکم می‌باشد. مطابق

EFNARC، بتن با مقادیر قطر پخش‌شدگی در محدوده ۵۵۰ تا ۸۵۰ میلی‌متر به عنوان بتن خودمتراکم استاندارد طبقه بندی می‌گردد. برای ارزیابی قابلیت عبور بتن تازه برای جریان در فضاهای، از دست‌دادن یکنواختی یا ایجاد انسداد، از آزمایش L-box استفاده شد. این آزمایش مستلزم حرکت افقی بتن تازه از طریق دهانه‌های بین میله‌های افقی و عمودی می‌باشد. در آیین‌نامه EFNARC، محدوده ۰/۸ تا ۱/۱ برای نسبت L-BOX برای بتن خود متراکم استاندارد در نظر گرفته شده است.

۲-۳ مقاومت فشاری

مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های خاک-سیمان-پومیس بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ mm³ پس از ۳، ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز نگهداری گزارش شدند. علاوه بر این، مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف بتن خودمتراکم خاکی حاوی پومیس مورد بررسی که نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ mm³ می‌باشد، پس از ۳، ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز نگهداری اندازه‌گیری شدند. برای هر طرح مخلوط خمیر و طرح اختلاط بتن خاکی خود متراکم حاوی پومیس، مقاومت فشاری با استفاده از میانگین سه نمونه اندازه‌گیری شده است. مقاومت فشاری برای مخلوط‌های خاک-سیمان-پومیس طبق آیین‌نامه ASTM C109/C10 [۲۴]، و برای نمونه‌های بتن با رعایت استاندارد ASTM C39-18 [۲۵] انجام شده است. میزان سرعت بارگذاری آزمایش برای نمونه‌های خمیر ۰/۴۸ MP/s و برای نمونه‌های بتن ۰/۲۲MP/s در مدت اندازه‌گیری ثابت نگه داشته شدند.

۳-۳ آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی برای تعیین ظرفیت کششی بتن خودمتراکم خاکی حاوی پومیس استفاده شده است. برای تعیین مقاومت کششی، نمونه‌های استوانه‌ای 100×200 mm² طبق آیین‌نامه ASTM C496 [۲۶] بررسی شدند. همانند آزمون مقاومت فشاری، میانگین مقاومت کششی سه نمونه برای هر طرح اختلاط در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز نگهداری ارزیابی گردید. لازم به ذکر می‌باشد که نرخ بارگذاری آزمایش مقاومت کششی ۰/۰۲ Mpa/s می‌باشد. مطابق ASTM C496، توجه به ظاهر بتن، نوع شکست و حداکثر بار اعمالی که تجهیزات آزمایش در هنگام شکست نشان می‌دهند، دارای اهمیت می‌باشد.

۴-۳ تعیین منحنی تنش - کرنش

رفتار تنش - کرنش نمونه‌ها با انجام آزمایش تنش-کرنش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 100×200 mm² که کلاهدک گذاری (کپینگ) شده بودند، با استفاده از دستگاه با ظرفیت ۶۰۰۰ کیلونیوتن محاسبه گردید. برای تعیین تغییر شکل طولی از میانگین دو تغییر شکل بالا و پایین استفاده شد. مقادیر نیرو با استفاده از لودسل زیر نمونه سیلندر محاسبه گردید. سپس مقادیر از طریق یک Data logger به کامپیوتر انتقال یافت.

۵-۳ تحلیل ریز ساختار FESEM-EDX

مورفولوژی نمونه‌های بتن خودمتراکم خاکی حاوی پومیس در سن ۲۸ و ۹۰ روز پس از ایجاد پوشش طلا بروی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با استفاده از دستگاه ESEM FEI Quanta 200 تعیین گردید. در ادامه، طیف سنجی اشعه ایکس (MAP-EDX) برای تحلیل عنصری بر روی نمونه‌ها ارائه گردید.

۶-۳ آنالیز چرخه عمر LCA

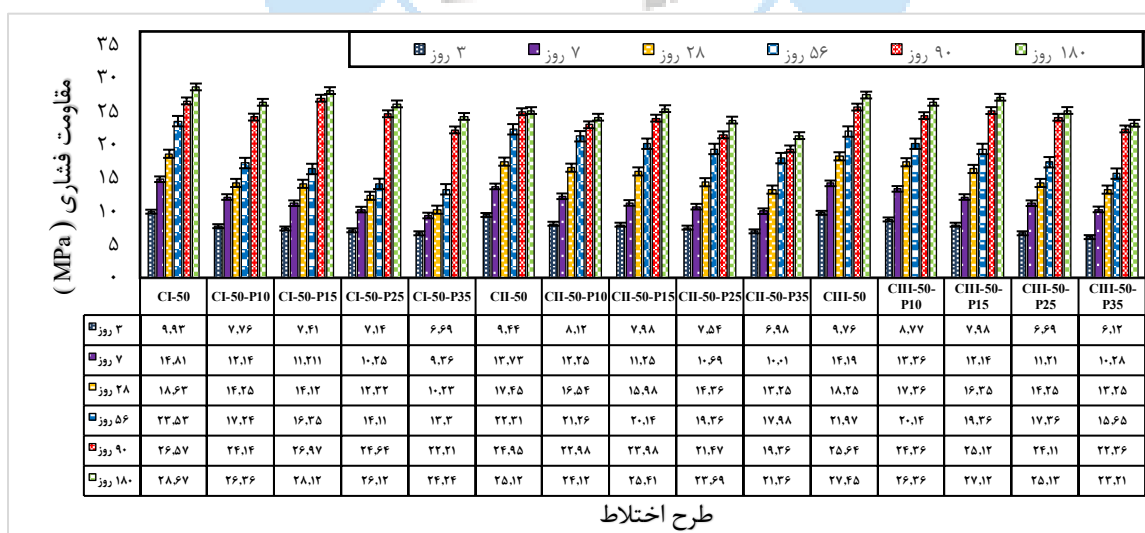
در این پژوهش تحلیل چرخه عمر برای تعیین میزان آسیب طرح‌های اختلاط مورد بررسی به محیط زیست بر اساس روش مختلف ReCiPe 2016 انجام شده است. لذا برای این منظور، از پایگاه داده قدرتمند Ecoinvent 3 نرم افزار SimaPro که یکی از بهترین

نرم افزارهای تحلیل چرخه عمر می‌باشد، استفاده شده است. این پایگاه داده بیش از ۱۰۰۰۰ فرآیند کلی را در خود جای داده است، که شامل انرژی، حمل و نقل، ساخت، مواد شیمیایی، کشاورزی، محصولات پاک کننده و صنایع مدیریت زباله است.

۴- نتایج

۴-۱ شناسایی خاک بهینه

در شکل شماره ۳، مقادیر مقاومت فشاری مخلوط‌های خاک-سیمان-پومیس، در زمان ۳، ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز نگهداری نشان داده شده است. کمترین و بیشترین مقدار مقاومت مخلوط‌ها در همه سنین نگهداری به ترتیب مربوط به مخلوط CIII-50-P35 و مخلوط CI-50 می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که در تمام سنین نگهداری، با افزایش میزان خاک مقاومت فشاری روند نزولی داشته است. بر اساس نتایج، ویژگی‌های نوع خاک مورد استفاده تأثیر بالایی بر مقاومت فشاری مخلوط‌ها گذاشته است. در حالت کلی، جذب زیاد آب توسط خاک عامل اصلی در کاهش مقاومت فشاری می‌باشد. دلیل جذب آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون سیمان، مدت زمان فرایندهای هیدراتاسیون کاهش می‌یابد. لذا، تولید محصولات هیدراتاسیون مانند پرتلندیت و ژل سیلیکات کلسیم با سرعت پایینی رخ می‌دهد و در نتیجه رشد مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. در تمام مدت نگهداری، مقاومت فشاری مخلوط‌های ساخته شده از خاک نوع I بیشتر از مقاومت فشاری سایر خاک‌ها بوده است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که خاک نوع I مقاومت فشاری بیشتری را در مخلوط‌های خمیر سیمان-پومیس از خود نشان می‌دهد. همانطور که در جدول شماره ۱ مشاهده گردید، خاک نوع I نسبت به انواع دیگر خاک‌ها دارای میزان سیلیس بالاتری بوده است و این موضوع باعث ترکیب مقادیر بالای سیلیس با هیدروکسید کلسیم و تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته می‌باشد که موجب افزایش مقاومت فشاری در مخلوط‌ها می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد، با افزایش میزان سن نگهداری بتن تأثیر پومیس برای افزایش مقاومت فشاری بواسطه خواص پوزولانی پومیس افزایش می‌یابد. بر اساس شکل ۳، در طرح اختلاط CI-50-P15، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز نسبت به ۹۰ روز به میزان ۹۱٪ افزایش یافته است. بر اساس نتایج، خاک نوع I دارای میزان مقاومت فشاری بیشتری نسبت به دیگر خاک‌ها در تمام سنین نگهداری می‌باشد. در نتیجه، برای تولید بتن‌های حاوی خودمترکم حاوی پومیس مطابق جدول شماره ۲، خاک نوع I به عنوان خاک بهینه انتخاب شده است.



شکل ۳: مقاومت فشاری خمیرهای خاک-سیمان در سنین نگهداری مختلف

• ۴-۲ خواص حالت تازه بتن

جریان اسلامپ انواع طرح اختلاط بتن خودمتراکم خاکی حاوی پومیس در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. همچنین بر اساس جدول شماره ۴، قطر جریان اسلامپ همه طرح‌های بتن خاکی خودمتراکم در حدود 20 ± 700 میلی‌متر بوده است. نتایج قطر جریان اسلامپ مطابق با نتایج NGO [۲۷] نشان داد که افزایش درصد پومیس به عنوان جایگزینی برای سیمان موجب افزایش جریان اسلامپ شده است. اندازه T50 (زمان رسیدن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر) نیز در جدول شماره ۴ ارائه شده است که از ۲ تا ۲.۶ ثانیه متغیر است. محدوده مجاز برای پارامتر T50 برای گذر از خطر جداسازی سنگدانه‌ها بین ۲ تا ۵ ثانیه می‌باشد که نشان دهنده لزجی کافی برای بتن خودمتراکم استاندارد می‌باشد. در این پژوهش، بواسطه افزایش قطر جریان اسلامپ و افزایش نسبت L-box بواسطه افزایش میزان پومیس، میزان استفاده از فوق روان‌کننده با افزایش جایگزینی پومیس روند کاهشی داشته است. لذا، در این تحقیق، مقدار فوق روان‌کننده مصرفی در طرح‌های اختلاط برای رسیدن به جریان اسلامپ در رده SF2 (محدوده جریان اسلامپ ۶۵۰-۷۵۰ میلیمتر) طبق استاندارد AFGC 2002، می‌باشد [۲۸]. مقادیر ضریب L-box بین ۰/۸۷ و ۰/۹۴ در جدول شماره ۴ ارائه شده است. مطابق نتایج، مقادیر قطر جریان اسلامپ و L-box در چهارچوب مجاز آیین‌نامه EFNARC هستند.

جدول ۴: نتایج آزمایش‌های حالت بتن تازه

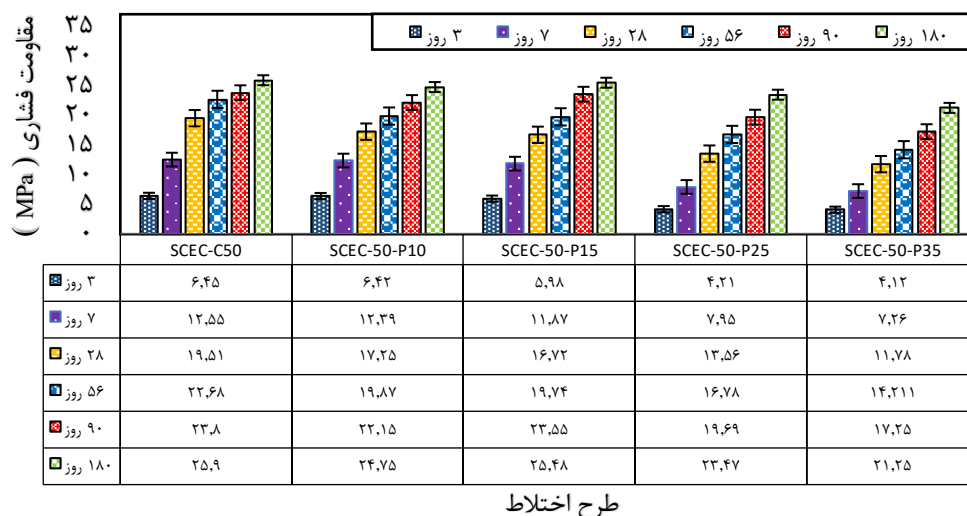
طرح اختلاط	Slump flow		L-box		
	Dia (mm)	T50 (s)	(h2/h1)	T20 (s)	T40 (s)
SCEC-C50	۷۲۱	۲/۴۵	۰/۸۷	۱/۵۴	۲/۷۵
SCEC-C50-P10	۷۲۳	۲/۵۴	۰/۹۲	۱/۵۹	۲/۶۱
SCEC-C50-P15	۷۲۹	۲/۵۱	۰/۹۳	۱/۶۴	۲/۵۹
SCEC-C50-P25	۷۲۵	۲/۵۳	۰/۹۳	۱/۶۱	۲/۴۸
SCEC-C50-P35	۷۴۱	۲/۵۱	۰/۹۴	۱/۶۴	۲/۴۶



شکل ۴: جریان اسلامپ انواع طرح اختلاط بتن خودمتراکم خاکی

• ۳-۴ مقاومت فشاری بتن

مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط بتن خودمتراکم خاکی در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز نگهداری در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. مقاومت نمونه‌ها، میانگین ۳ نمونه می‌باشد. مطابق شکل ۵، کمترین و بیشترین مقادیر مقاومت فشاری در تمام سنین نگهداری، به ترتیب مربوط به طرح SCEC-C50-P35 و طرح SCEC-C50 (شاهد) می‌باشد. نتایج مقاومت فشاری نشان داد که افزودن پومیس به عنوان جایگزینی برای سیمان در همه طرح‌های اختلاط به طور کلی موجب کاهش مقاومت فشاری بتن خاکی خودمتراکم در تمامی سنین، خصوصاً سنین اولیه نگهداری می‌گردد. برای نمونه، در طرح SCEC-C50-P35، مقاومت فشاری ۳، ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز نگهداری به ترتیب ۳۶/۱۲، ۴۲/۱۵، ۳۹/۶۲، ۳۷/۳۴، ۲۷/۵۲ و ۱۷/۹۵٪ نسبت به بتن SCEC-C50 (شاهد)، کاهش یافت. بر اساس نتایج، افزایش جایگزینی پومیس تا ۳۵٪ منجر به کاهش قابل ملاحظه مقاومت فشاری در سنین مختلف نگهداری می‌گردد. این نتیجه را می‌توان به کاهش مقدار کلینکر به دلیل جایگزینی سیمان با خاک پومیس نسبت داد. اگر چه افزودن پومیس موجب کاهش مقاومت فشاری می‌گردد، اما روند کاهش مقاومت فشاری نسبت به میزان افزایش خاک پومیس به طور خطی نمی‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل شماره ۵، مقاومت فشاری SCEC-C50-P15 به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در مقایسه با طرح SCEC-C50، به میزان ۱۲/۹۶ و ۱۷/۶۲٪ کاهش مقاومت داشته است. کاهش روند نزولی مقاومت فشاری با افزایش میزان پومیس در سنین بالاتر نگهداری، بواسطه خواص پوزولانی طولانی مدت پومیس می‌باشد [۱۲]. بر اساس نتایج، مقاومت فشاری، نمونه SCEC-C50-P15 دارای مقاومت فشاری قابل مقایسه بالا نمونه شاهد (بدون پومیس) در سنین بالا می‌باشد، که منعکس کننده اثرات قابل توجه خواص پوزولانی پومیس بر خواص مکانیکی بتن خاکی خودمتراکم می‌باشد. شایان ذکر می‌باشد، همانطور که در شکل ۵ مشاهده گردید، میزان مطابقت افزایش پومیس و کاهش مقاومت فشاری برای سن ۳ روز نگهداری نسبت به سایر سنین نگهداری کمتر می‌باشد، که می‌توان آن را به عوامل دیگر مانند ترکیبات چسباننده که مانع تشکیل ژل‌های C-S-H شود، نسبت داد. بر اساس نتایج مقاومت فشاری، درصد بهینه جایگزینی پومیس با سیمان در حدود ۱۵٪ می‌باشد.

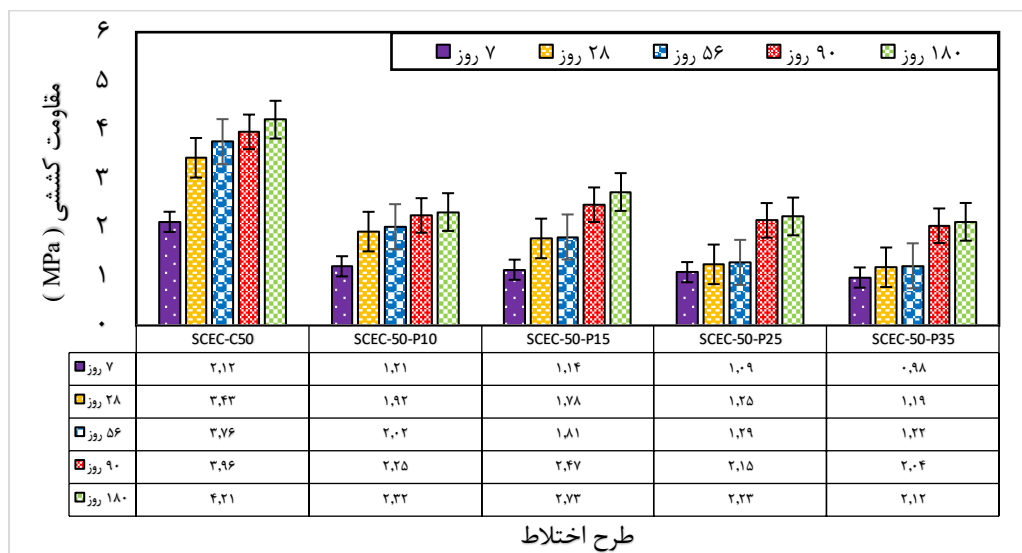


شکل ۵: مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خاکی خود متراکم بر اساس سن نگهداری

• ۴-۴ مقاومت کششی

مقاومت کششی، مشابه مقاومت فشاری، به عنوان شاخصی برای تعیین خصوصیات مکانیکی بتن می‌باشد، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. شکل ۶ نتایج آزمون مقاومت کششی نمونه‌های بتن خاکی خود متراکم حاوی پومیس را در سنین نگهداری ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز ارائه می‌نماید. مقاومت کششی بتن شاهد (بدون پومیس) ۲,۱۲، ۳,۴۳، ۳,۷۶، ۳,۹۶ و ۴,۲۱ MPa در سنین نگهداری ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز می‌باشد، در حالی که مقادیر متناظر برای SCEC-C50 با ۳۵٪ پومیس به ترتیب ۰,۹۸، ۱,۱۹، ۱,۲۲، ۲,۰۴ و ۲,۱۲ MPa می‌باشد. مطابق نتایج، مقاومت کششی نمونه‌های بتن خاکی خودمتراکم با افزایش سن نگهداری، افزایش قابل ملاحظه‌ای خصوصاً در

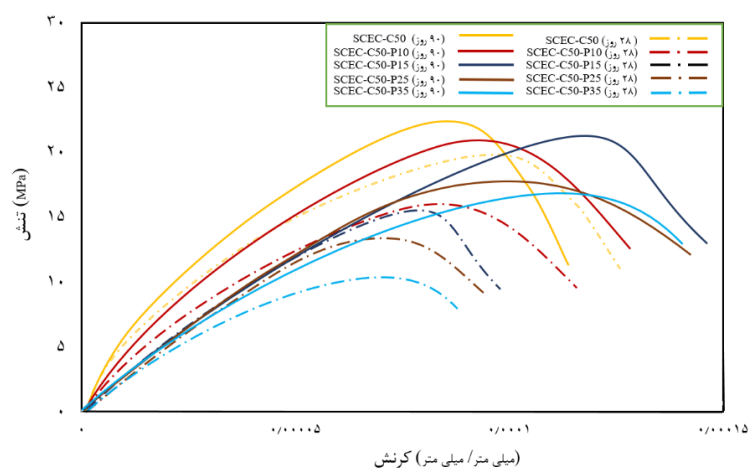
سنین بالا می‌یابند. بر اساس نتایج، با افزایش جایگزینی پومیس تا ۱۵٪ به جای سیمان، میزان کاهش مقاومت کششی در سنین بالاتر روند نزولی دارد. برخلاف مقاومت فشاری، مقاومت کششی نمونه‌های حاوی پومیس در مدت نگهداری بالاتر نیز، تفاوت محسوسی با نمونه بدون پومیس دارند و با افزایش میزان جایگزینی، مقاومت کششی همواره کاهش می‌یابد.













شکل ۶. مقاومت کششی نمونه‌های بتن خاکی خود متراکم در سنین مختلف نگهداری

• ۴-۵ رفتار تنش - کرنش نمونه‌های بتن خاکی خود متراکم

به منظور درک بهتر رفتار بتن خاکی خود متراکم حاوی پومیس، آزمایش تنش-کرنش برای انواع طرح‌های اختلاط در سنین نگهداری ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری، انجام پذیرفته و میانگین ۳ نمونه برای هر طرح اختلاط به عنوان منحنی تنش-کرنش در شکل شماره ۷ نشان داده شده است. منحنی تنش-کرنش به صورت کلی دارای ۳ بخش می‌باشد: (۱) بخش خطی (۲) بخش الاستو-پلاست (۳) بخش غیر-خطی [۲۹]. بر اساس شکل ۷، در ابتدای بارگذاری، منحنی تنش و کرنش خطی می‌باشد. شیب منحنی تنش-کرنش به عنوان مدول الاستیسیته در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نتایج، شیب منحنی تنش-کرنش با افزایش میزان پومیس در سنین اولیه نگهداری کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج، بتن‌های خاکی خود متراکم حاوی پومیس، افزایش بار محوری موجب تسریع در رشد کرنش نسبت به تنش می‌گردد و منحنی تنش-کرنش را به حالت غیر خطی میل می‌دهد. لذا، انحنای نمودار با افزایش درصد جایگزینی پومیس و کاهش محتوای سیمان، روند نزولی دارد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش مدت زمان نگهداری بواسطه رفتار پوزولانی بلند مدت پومیس، شیب منحنی که نشان دهنده مدول الاستیسیته می‌باشد، افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج، میزان جایگزینی سیمان با پومیس در زمان‌های نگهداری کوتاه مدت، همواره روند نزولی دارد. اما، در مدت نگهداری بالاتر درصد بهینه جایگزینی پومیس ۱۵٪ می‌باشد. برای همه نمونه‌ها، افزایش موضعی تنش در نقاط خاصی پس از تنش حداکثر را می‌توان به تغییر در سرعت بارگذاری و بخش نزولی (پلاستیک) سریع قبل از شکست نسبت داد. نتایج نشان داد که، محتوای پومیس تأثیر زیادی بر منحنی تنش-کرنش دارد و این میزان در بیشترین کرنش قابل تحمل نمود بیشتری دارد. بر اساس شکل ۷، با افزایش میزان سن نگهداری بتن، بواسطه خواص پوزولانی بلند مدت پومیس و افزایش تراکم، کرنش تسلیم و کرنش نهایی افزایش می‌یابد. لذا مشاهده می‌گردد، طرح اختلاط SCEC-C50-P15، دارای کرنش قابل تحمل بیشتری نسبت به درصد‌های جایگزینی بالاتر را دارد. همچنین برای بررسی‌های مضاعف، نحوه شکست نمونه‌های حاوی پومیس در شکل شماره ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش مدت زمان نگهداری، نحوه شکست تغییر یافته و بتن از حالت ترد به شکننده خارج خواهد شد. در شکل شماره ۸ نشان داده شده است، که نمونه‌های حاوی پومیس دارای تمرکز تنش در ابتدای نمونه گردیده و ترک‌ها نتوانسته‌اند به پیوستن به یکدیگر مسیر شکل پذیری بالاتر را فراهم نمایند. لذا با افزایش سن نگهداری بتن خود متراکم، بواسطه رفتار موثر پوزولانی پومیس شکل شکست تغییر یافته است.



شکل ۷: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های مورد مطالعه در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری

				
SCEC-C50 (روز ۲۸)	SCEC-C50-P10 (روز ۲۸)	SCEC-C50-P15 (روز ۲۸)	SCEC-C50-P25 (روز ۲۸)	SCEC-C50-P35 (روز ۲۸)
				
SCEC-C50 (روز ۹۰)	SCEC-C50-P15 (روز ۹۰)	SCEC-C50-P15 (روز ۹۰)	SCEC-C50-P25 (روز ۹۰)	SCEC-C50-P35 (روز ۹۰)

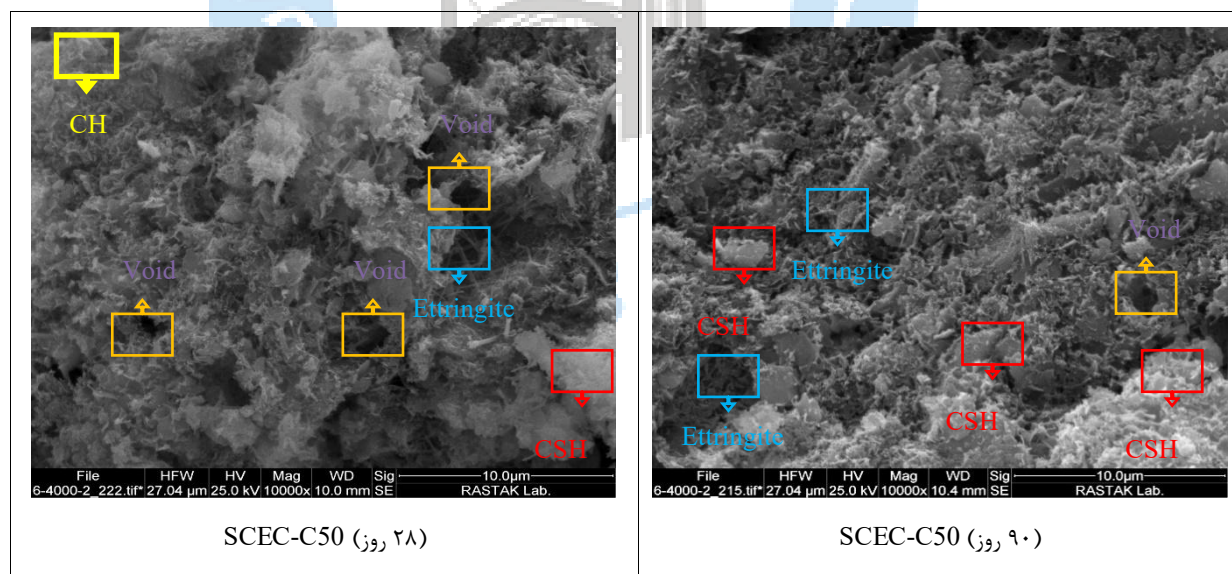
شکل ۸: نحوه شکست و گسترش ترک در نمونه‌های تحت آزمایش تنش-کرنش در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری

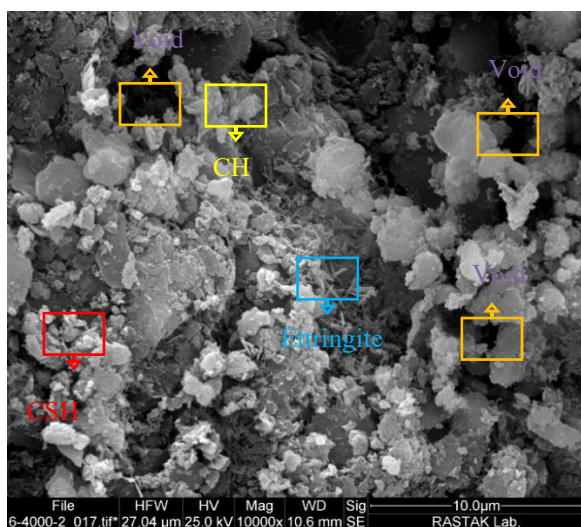
۴-۶ ریزساختار بتن

۴-۶-۱ تحلیل تصاویر FESEM

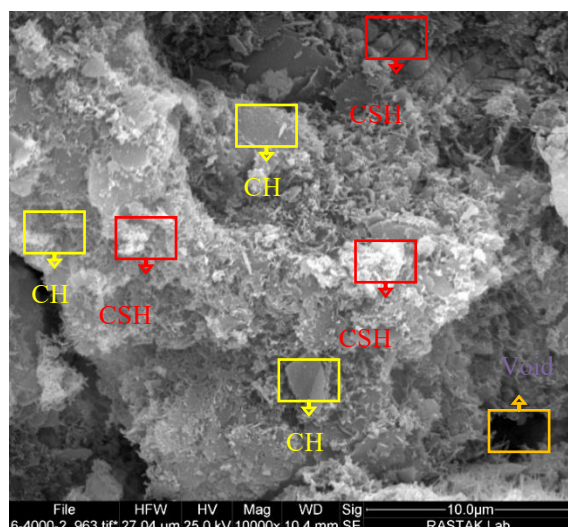
در این پژوهش، ریزساختار نمونه‌های مورد بررسی بتن حاکی خودمتراکم حاوی پومیس در سن ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری در شکل شماره ۱۱ نشان داده شده است. تصاویر SEM در بزرگنمایی ۱۰ هزار برابر و با نوار مقیاس ۱۰ میکرومتر از نمونه‌ها ارائه شده است. لذا با

استفاده از تصاویر FESEM، می‌توان فازهای CH، CSH و Ettringite های سوزنی شکل در خمیر سیمانی را بررسی نمود. با توجه به درصد جایگزینی مختلف پومیس، سطح توزیع، اندازه و حجم فازها در هر طرح تفاوت دارد [۱۲ و ۳۰]. بر اساس شکل ۹، ریز ساختار نمونه SCEC-C50 ساختاری نسبتاً متراکم‌تری نسبت به دیگر نمونه‌های حاوی درصدهای بالاتر جایگزینی پومیس با سیمان را نشان می‌دهد. لذا، بالاترین تعداد حفرات در نمونه حاوی ۳۵٪ جایگزینی سیمان با پومیس مشاهده می‌گردد. مطابق نتایج، نمونه‌های حاوی پومیس در سنین پایین‌تر نگهداری دارای حفرات و شکاف‌های بیشتری می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد، پومیس در سنین اولیه نگهداری هنوز وارد فاز پوزولانی نشده است و پیوندی بین سنگدانه‌ها ایجاد ننموده است. بر اساس شکل ۹، وجود پومیس در تشکیل فازهای ریزساختاری ذکر شده غیر قابل انکار می‌باشد. با افزودن محتوای پومیس در نمونه‌های بتن حاکی خود متراکم، موجب افزایش فضاهای توخالی (Void) و ترک (Crack) خصوصاً در سنین اولیه نگهداری می‌گردد. ایجاد حفرات و ترک‌ها، با افزایش میزان محتوای پومیس افزایش می‌یابند و در نمونه SCEC-C50-P35 به بیشترین حالت خود می‌رسند. بر اساس شکل ۹، مشاهده می‌گردد با افزایش میزان سن نگهداری بتن، بواسطه خواص پوزولانی بلندمدت پومیس شاهد کاهش حفرات و ترک‌ها و افزایش تراکم نیز می‌باشیم. نتایج نشان می‌دهد، میزان ۱۵٪ جایگزینی پومیس به جای سیمان موجب افزایش فازهای CH و CSH می‌گردد. مطابق نتایج صمیمی و همکاران، بر اساس نتایج ریزساختاری می‌توان درصد ۱۵٪ را به عنوان درصد بهینه برای جایگزینی پومیس به جای سیمان عنوان نمود [۳۱ و ۳۲]. با افزایش میزان پومیس از ۱۵٪، افزایش میزان ترک‌ها و فضای خالی در سنین مختلف مشاهده گردید. همچنین، تصاویر تحلیل عنصری (EDAX-MAP) عناصر مختلف نظیر کلسیم، سیلیس، اکسیژن، آلومینیوم و کربن برای انواع طرح‌های بتن حاکی خود متراکم حاوی پومیس در شکل‌های شماره ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. لذا، بر اساس نتایج تحلیل عنصری نمونه‌های مختلف با جایگزینی پومیس با سیمان، کاهش قابل ملاحظه میزان کربن و افزایش سیلیس را به همراه دارد و تطابق خوبی با مقاومت‌های مکانیکی نمونه‌ها داشته است. افزودن میزان رس از ۵۰ تا ۸۰٪ جایگزینی سیمان موجب کاهش میزان کربن، کاهش آهن، اکسیژن و افزایش سیلیس می‌گردد. همانطور که در نتایج مقاومت‌های مکانیکی مشاهده گردید، با افزودن میزان خاک رس مقاومت مکانیکی بتن حاکی خود متراکم کاهش می‌یابد، اما سرعت کاهش مقاومت در محتوای بالای رس روند نزولی دارد. لذا نتایج نشان داده شده در تحلیل عنصری تطابق خوبی با نتایج مقاومت مکانیکی نمونه‌ها داشته است.

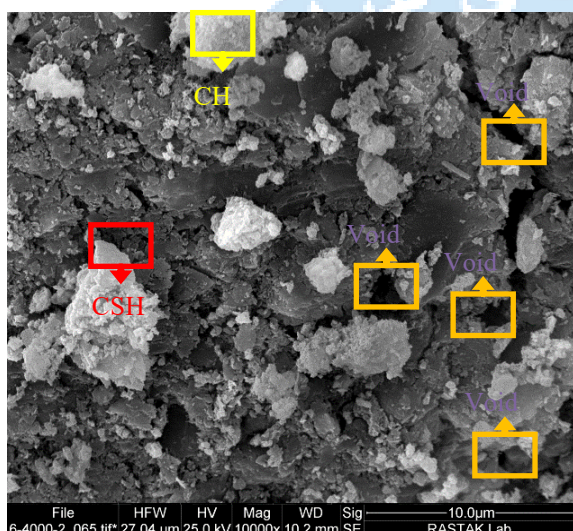




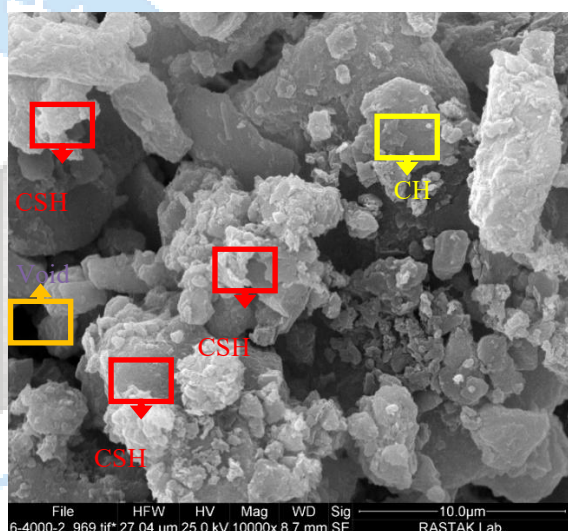
SCEC-C50-P10 (روز ۲۸)



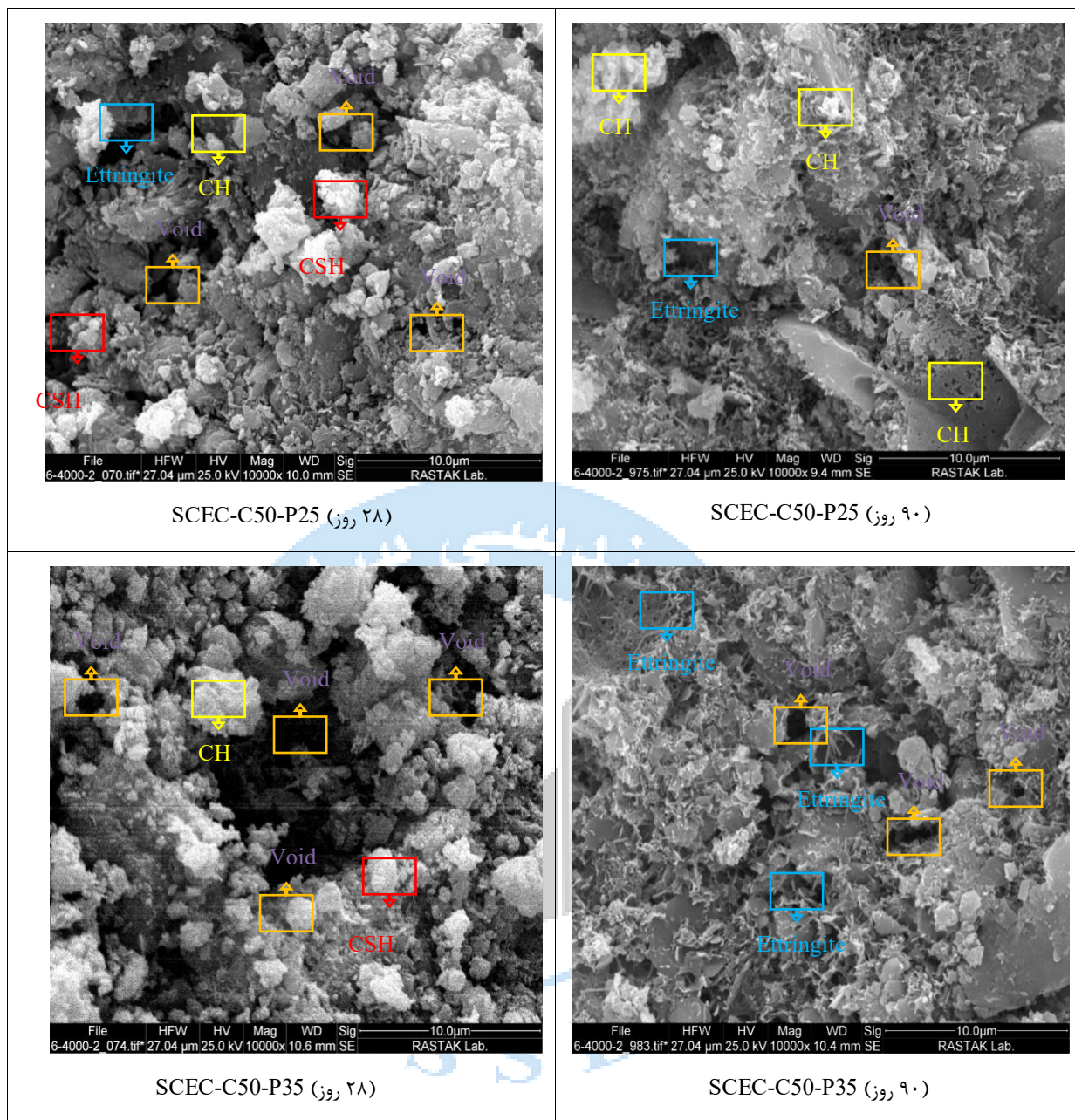
SCEC-C50-P10 (روز ۹۰)



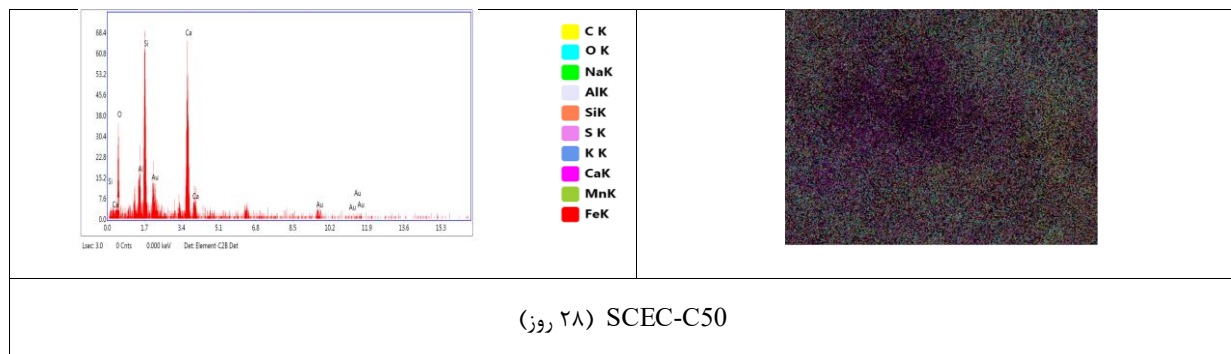
SCEC-C50-P15 (روز ۲۸)

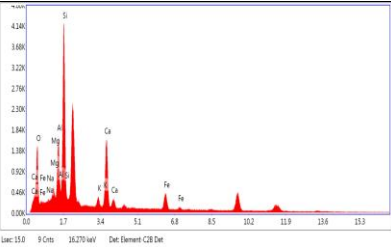
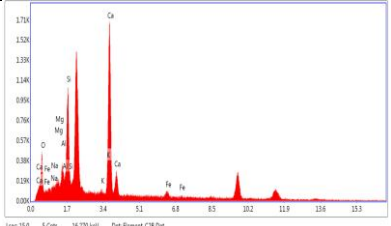
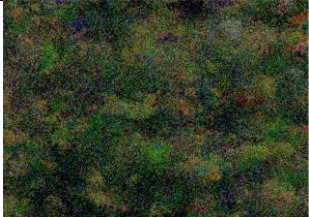
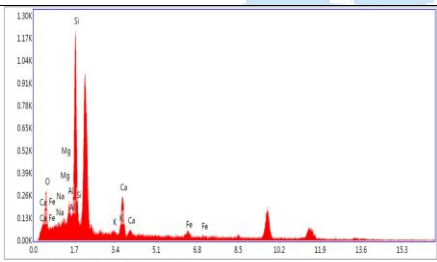
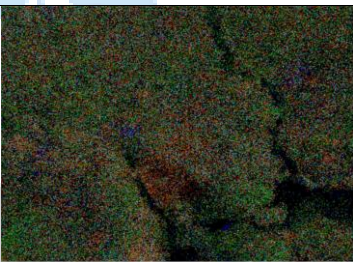
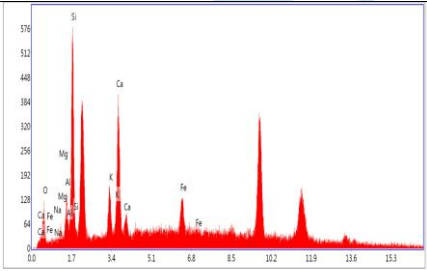
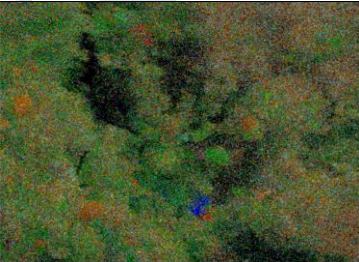


SCEC-C50-P15 (روز ۹۰)

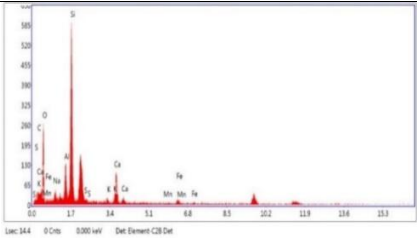
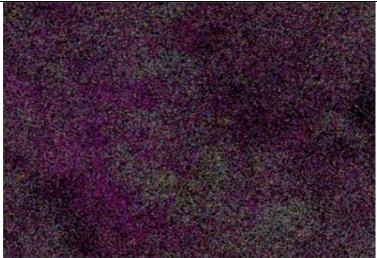
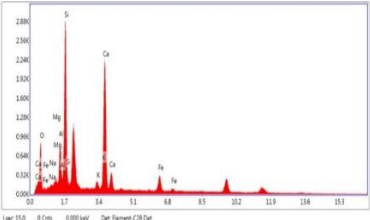
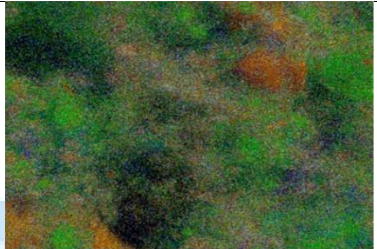
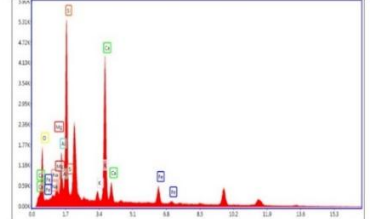
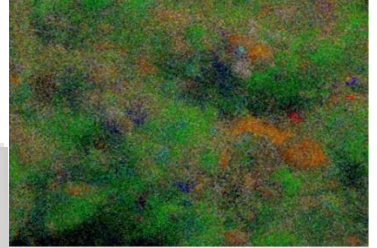
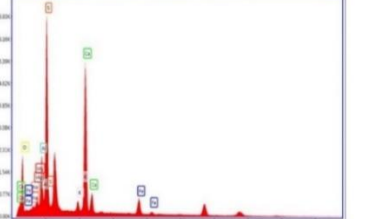



شکل ۹: تصاویر ریزساختار تحلیل FESEM برای طرح‌های اختلاط شاهد و SCEC-C100



 <ul style="list-style-type: none"> ■ C K ■ O K ■ NaK ■ AlK ■ SiK ■ S K ■ K K ■ CaK ■ MnK ■ FeK 	
<p>(روز ۲۸) SCEC-C50-P10</p>	
 <ul style="list-style-type: none"> ■ C K ■ O K ■ NaK ■ AlK ■ SiK ■ S K ■ K K ■ CaK ■ MnK ■ FeK 	
<p>(روز ۲۸) SCEC-C50-P15</p>	
 <ul style="list-style-type: none"> ■ C K ■ O K ■ NaK ■ AlK ■ SiK ■ S K ■ K K ■ CaK ■ MnK ■ FeK 	
<p>(روز ۲۸) SCEC-C50-P25</p>	
 <ul style="list-style-type: none"> ■ C K ■ O K ■ NaK ■ AlK ■ SiK ■ S K ■ K K ■ CaK ■ MnK ■ FeK 	
<p>(روز ۲۸) SCEC-C50-P35</p>	

شکل ۱۰: نقشه تحلیل عنصری (EDAX-MAP) نمونه‌های مورد مطالعه در مدت زمان ۲۸ روز نگهداری

	
<p>SCEC-C50 (۹۰ روز)</p>	
	
<p>SCEC-C50-P10 (۹۰ روز)</p>	
	
<p>SCEC-C50-P15 (۹۰ روز)</p>	
	
<p>SCEC-C50-P25 (۹۰ روز)</p>	

SCEC-C50-P35 (۹۰ روز)

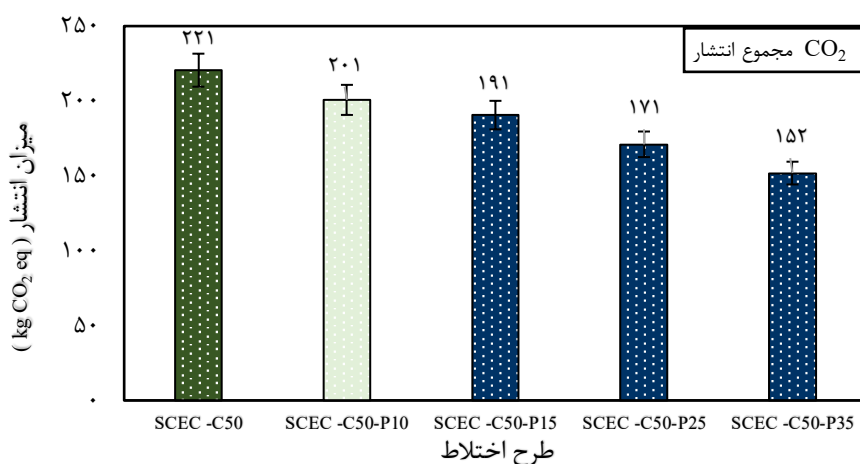
شکل ۱۱: نقشه تحلیل عنصری (EDAX-MAP) نمونه‌های مورد مطالعه در مدت زمان ۹۰ روز نگهداری

۴-۷ تاثیرات محیط زیستی بتن خاکی

در این پژوهش بر اساس روش مطرح شده در بخش ۳-۶ (ReCiPe 2016) میزان تاثیر پارامترهای مختلف آلاینده‌های انواع طرح‌های مورد مطالعه بررسی شده است. میزان تاثیر پارامترهای مختلفی نظیر سلامت انسانی، اکوسیستم، و منابع به صورت عددی در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق نتایج، بیشترین وزن حاصل از تاثیر پارامترهای مختلف بر محیط زیست متعلق به نمونه بدون پومیس (SCEC-C50) می‌باشد. با افزایش میزان پومیس، وزن کل کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج، میزان جایگزینی ۳۵٪ پومیس موجب کاهش ۲۸.۸۱٪ وزن کل پارامترها می‌گردد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که، با افزایش جایگزینی سیمان با پومیس کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان تاثیر بتن خاکی خودمتراکم حاوی پومیس بر محیط ایجاد می‌گردد. در ادامه میزان تولید گاز CO₂ توسط هر طرح اختلاط مورد مطالعه نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج شکل ۱۲، بیشترین نقش تولید CO₂ در فرایند تولید بتن مربوط به سیمان می‌باشد. هر چقدر میزان سیمان کمتر باشد، میزان انتشار CO₂ نیز کمتر می‌باشد. که این میزان آن در بتن بدون پومیس (SCEC-C50) ۲۲۱ kg CO₂ eq می‌باشد. بر اساس نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف، با جایگزینی میزان ۵۰٪ خاک رس به جای سیمان در بتن خاکی خودمتراکم بدون پومیس، امکان دستیابی به مقاومت‌های حدود ۲۰ MPa که میزان حداقل بسیاری از آیین‌نامه‌ها برای استفاده از بتن در اجزای باربر می‌باشد، قابل دستیابی می‌باشد. نتایج نشان داده است که با افزودن میزان پومیس، کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان انتشار CO₂ رخ داده است. بر اساس نتایج، با افزایش ۱۰، ۱۵، ۲۵، و ۳۵٪ پومیس به جای سیمان، میزان انتشار CO₂ به ترتیب ۹/۱۲، ۱۳/۵۷، ۲۲/۶۲، ۳۱/۲۲٪ کاهش می‌یابد. در مجموع بررسی نتایج چرخه عمر دو روش فوق نشان دادند، با افزایش میزان پومیس شاهد کاهش صدمات محیط زیستی بتن خواهیم بود.

جدول ۵: میزان CO₂ تولید شده در ۱ متر مکعب از بتن‌های خاکی خودمتراکم مورد مطالعه

وزن کل	منابع (USD2013)	اکوسیستم (SPECIES.YR)	سلامت انسانی (DALY)	طرح اختلاط
۲۵/۳۴	۱۰/۷۰	۶/۵۹	۴/۹۴	SCEC-C50
۲۳/۲۱	۱۰/۰۷	۶/۰۲	۴/۵۲	SCEC-C50-P10
۲۲/۰۷	۹/۷۱	۵/۷۲	۴/۳۱	SCEC-C50-P15
۲۰/۰۲	۹/۱۳	۵/۱۶	۳/۹۱	SCEC-C50-P25
۱۸/۰۴	۸/۶۲	۴/۶۲	۳/۵۲	SCEC-C50-P35



شکل ۱۲: میزان CO₂ تولید شده در ۱ متر مکعب از بتن‌های حاکی خودمتراکم حاوی پومیس

۵- نتیجه گیری

بواسطه گرمایش زمین و نقش موثر صنعت سیمان در فرآیند تولید گازهای گلخانه‌ای، در این تحقیق با معرفی بتن حاکی خودمتراکم اقدام به کاهش هر چه بیشتر محتوای سیمان با پوزولان طبیعی پومیس شده است. در این راستا، مطالعه آزمایشگاهی جامعی جهت بررسی رفتار مکانیکی، ریزساختار و چرخه عمر زیست محیطی بتن حاکی خودمتراکم حاوی پومیس صورت پذیرفته است. نتایج این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

۱. بررسی آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های سیمان- خاک- پومیس و آزمایش شیمیایی رس‌های پیشنهادی، خاک رس نوع I با بواسطه مقاومت فشاری بهتر و ساختار شیمیایی مناسب، و کاهش میزان استفاده از روان کننده به عنوان رس بهینه انتخاب شده و از آن به عنوان رس انتخابی در جهت ساخت طرح‌های اختلاط بتن حاکی خود متراکم حاوی پومیس مورد استفاده قرار گرفت.

۲. نتایج مقاومت فشاری نشان داد، افزایش جایگزینی پومیس به جای سیمان همواره در سنین مختلف موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد. اما روند کاهش مقاومت فشاری نسبت به افزایش زمان کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌گیرد. لذا پومیس بواسطه رفتار پوزولانی درازمدت خود موجب افزایش مقاومت فشاری می‌گردد. به‌طوریکه مشاهده می‌گردد، نمونه حاوی ۱۵٪ پومیس دارای مقاومت فشاری قابل مقایسه با نمونه بدون پومیس در سن ۹۰ روز نگهداری می‌باشند. نتایج نشان داد، با جایگزینی ۱۵٪ پومیس به جای سیمان شاهد کاهش مقاومت فشاری به میزان ۱۴/۱ و ۱۱/۱۲٪ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری می‌گردد.

۳. نتایج مقاومت کششی نشان داد با افزایش میزان جایگزینی پومیس به جای سیمان، موجب کاهش مقاومت کششی گردید. بر اساس نتایج، افزایش زمان نگهداری موجب افزایش مقاومت کششی می‌گردد. روند کاهش مقاومت کششی با افزایش زمان مطابق نتایج مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. جایگزینی ۱۵٪ پومیس به جای سیمان مقاومت کششی بالاتری نسبت به دیگر درصد‌های جایگزینی دارد.

۴. نمودارهای آزمایش تنش- کرنش بتن حاکی خودمتراکم حاوی پومیس نشان داد که با افزایش میزان جایگزینی پومیس به جای سیمان، کرنش نهایی قابل تحمل بتن در زمان‌های ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. لذا بر اساس نتایج، تاثیر پوزولانی دراز مدت پومیس می‌تواند نقش مهمی در رفتار تنش- کرنش بتن داشته باشد. نتایج تنش- کرنش نشان داد با افزایش میزان جایگزینی سیمان با پومیس شاهد افزایش شکلپذیری و چقرمگی بتن بوده ایم. لذا رفتار پوزولانی دراز مدت پومیس موجب افزایش تراکم و کاهش تخلخل می‌گردد. همچنین جایگزینی پومیس در سنین اولیه موجب شکست زود هنگام و عدم پذیرش کرنش کافی می‌گردد. لذا با افزایش سن نگهداری بتن شاهد افزایش ظرفیت کافی برای تحمل کرنش‌های بالاتر را افزایش می‌دهد. لذا شکل شکست نمونه‌ها با افزایش میزان پومیس دچار تغییر می‌گردد.

۵. بر اساس تصاویر FESEM بتن حاکی خودمتراکم حاوی پومیس، با افزایش میزان درصد پومیس در سنین اولیه نگهداری، میزان محصولات هیدراتاسیون نظیر CH و CSH روند نزولی داشته و میزان $Void$ و ترک افزایش می‌یابد. افزایش فضای خالی و هیدراته نشده نمونه‌های حاوی پومیس در سنین اولیه نگهداری، با افزایش جایگزینی پومیس، به دلیل وجود رشته- های $Ettringite$ به عنوان یک عامل انبساطی، همخوانی مناسبی با نتایج مقاومت‌های فشاری داشته است. همچنین رفتار پوزولانی بلند مدت پومیس، با تشکیل پیوندهایی باعث شکل گیری فازهای CH ، CSH جهت چسبندگی بین سنگدانه‌ها و ایجاد ناحیه انتقال سطحی (ITZ) ضعیفی گردد.

۶. بر اساس تحلیل چرخه عمر نمونه‌های مورد مطالعه بتن حاکی خودمتراکم حاوی پومیس، نقش سیمان در انتشار CO_2 بسیار زیاد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش میزان پومیس کاهش قابل توجه‌ای در کاهش صدمات محیط زیستی حاصل از ساخت بتن را دارا می‌باشد. نتایج تحلیل چرخه عمر بر اساس روش ReCiPe 2016 نشان می‌دهد، با افزایش میزان جایگزینی ۳۵٪ پومیس به جای سیمان در بتن خودمتراکم حاکی، موجب کاهش ۲۸/۸۱٪ وزن کل پارامترهای محیط زیستی مذکور می‌باشد. همچنین با افزایش جایگزینی پومیس با سیمان موجب کاهش قابل ملاحظه میزان انتشار CO_2 در طرح‌های اختلاط می‌گردد. بر اساس نتایج میزان جایگزینی ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵٪ پومیس به جای سیمان به ترتیب موجب کاهش انتشار CO_2 به ترتیب به میزان ۹/۰۱، ۱۳/۵۷، ۲۲/۶۲ و ۳۱/۲۲٪ می‌گردد. با توجه به افزایش دمای کره زمین و نقش ۸ درصدی صنعت سیمان در انتشار گازهای گلخانه‌ای، پیشنهاد استفاده از بتن حاکی خودمتراکم حاوی پومیس در جهت کاهش میزان وابستگی به سیمان در صنعت ساخت و ساز می‌تواند نقش عمده‌ای در کاهش انتشار گلخانه‌ای نظیر CO_2 داشته باشد.

سیاسگزار

نویسندگان مقاله از شرکت دانش بنیان توسعه فناوریان سبزکارا و آزمایشگاه دوام و توسعه پایدار دانشگاه شهید بهشتی جهت مجوز انجام آزمایش‌ها، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] T. Economist. (2017). Summit-mania new life for the Paris climate deal. Economist.
- [2] Harvey, F. (2017). *Calls for greater fossil fuel divestment at anniversary of Paris climate deal*. The Guardian.
- [3] Zhang, H., Wang, B., Xie, A. and Qi, Y. (2017). *Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 152, pp. 154-67.
- [4] Saidi, M. Cherif, A.S. Zeghamati, B. and Sediki, E. (2018), *Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks*. Construction and Building Materials, Elsevier. Vol. 167, pp. 566-77.
- [5] Silva, R. Mendes, N. Oliveira, D. Romanazzi, A. Domínguez-Martínez, O. Miranda, T. (2018). *Evaluating the seismic behaviour of rammed earth buildings from Portugal: From simple tools to advanced approaches*. Engineering Structures, Elsevier. Vol. 157, pp. 144-56.
- [6] Huang, L. Krigsvoll, G. Johansen, F. Liu, Y. Zhang, X. (2018). *Carbon emission of global construction sector*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 81, pp. 1906-16.
- [7] Bayat, H. Ramezani-pour, A. Farnood Ahmadi, P. Naghizade, A. (202۰). *Mechanical and rheological properties of self-compacting concrete containing slag and natural zeolite*. AUT Journal of Civil Engineering. Vol. 4, pp. 81-90.
- [8] Mohseni pour asl, J. Gholhaki, M. Sharbatdar, M. Pachideh, G. (2022). *An experimental investigation into the mechanical performance and microstructure of cementitious mortars containing recycled waste materials subjected to various environments*. Journal of Building Engineering. Vol. 13, pp. 12-32.
- [9] Khalily, M. Saberi, H. Mansouri, V. Sadeghi, A. Pachideh, G. (2022). *An Experimental Study on the Effect of High Temperatures on Performance of the Plastic Lightweight Concrete Containing Steel, Polypropylene and Glass Fibers*. Journal of Structural and Construction Engineering, (JSCE). Vol. 2022, pp. 10-21.
- [10] Toufigh, V. Pachideh, G. (2020). *Cementitious mortars containing pozzolana under elevated temperatures*. Structural concrete. Vol. 1, pp. 34-53.
- [11] Chambua, G. Safiel, T. Yusuf, A. Naghizade, A. (2021). *Strength and durability properties of concrete containing pumice and scoria as supplementary cementitious material*. Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2021, pp. 1-13.

- [12] Samimi, K. Kamaragi, G. Le Roy, R. (2019). *Microstructure, thermal analysis and chloride penetration of self-compacting concrete under different conditions*. Magazine of Concrete Research, Thomas Telford Ltd. Vol. 71, pp. 126–43.
- [13] Pachideh, G. Ketabdari, H. (2023). *Investigation of the mechanical properties of self-compacting concrete containing recycled steel springs; experimental and numerical investigation*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Taylor & Francis. Vol. 310, pp. 215.
- [14] Kohandelnia, M. Hosseinpoor, M. Yahia, A. and Belarbi, R. (2023). *Multiscale investigation of self-consolidating earthen materials using a novel concrete-equivalent mortar approach*. Journal of Construction and Building Materials, Elsevier. Vol. 370, pp. 130700.
- [15] Khodaparast, A. Samimi, K. Pakan, M. (2024). *Investigation of the mechanical properties and microstructure of self-compacting earth concretes for use in low-carbon construction systems*. Journal of Structural and Construction Engineering, (JSCE). Vol. 2024, pp. 17-37.
- [16] Azizi, M. Samimi, K. (2024). *Investigating the mechanical properties, shrinkage and microstructure of self-compacting earth concrete containing silica fume*. Journal of Structural and Construction Engineering, (JSCE). Vol. 2024, pp. 11-25.
- [17] Rahman, F. Adil, W. Raheel, M. Saberian, M. Li, J. Maqsood, T. (2022). *Experimental investigation of high replacement of cement by pumice in cement mortar: A mechanical, durability and microstructural study*. Journal of Building Engineering. Vol. 49, pp 104037.
- [18] Samimi, K. Kamali-Bernard, S. Akbar Maghsoudi, A. Maghsoudi, M. Siad, H. (2017). *Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes*. Construction and Building Materials, Elsevier. Vol. 151, pp. 292–311.
- [19] Samimi, K. Pakan, M. Eslami, J. (2023). *Investigating the compressive strength and microstructural analysis of mortar containing synthesized graphene and natural pozzolans in the face of alkali-silica reactions*. Journal of Building Engineering, Elsevier. Vol. 68, pp. 106126.
- [20] Shamas, Y. Nithin, H. Sharma, V. Jeevan, S.D. Patil, S. Imanzadeh, S. et al. (2023). *Toughness and Ultimate Compressive Strength of Bio-Based Raw Earth Concrete*. RILEM Book series, Springer. p. 310–23.
- [21] ASTM C150. (2020). *Standard Specification for Portland cement*. ASTM Int. p. 1–8.
- [22] ASTM C31 / C31M - 21a. (2021). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. ASTM International, Philadelphia. p. 1–7.
- [23] ASTM C511-19. (2019). *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. ASTM Stand. Guid. p. 13.
- [24] ASTM C109 / C109M-21. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. ASTM International, Philadelphia. p. 17.
- [25] C39/C39M-18, ASTM. (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, Philadelphia. p. 22.
- [26] C496/496M, ASTM (2017). *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International, Philadelphia. P. 12.
- [27] NGO, D, (2017). *Développement d'un nouveau éco-béton à base de sol et fibres végétales – Etude du comportement mécanique et de durabilité*, DOCTEUR DE L, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX. Vol. 3, p 25.
- [28] Association Française du Génie Civil (AFGC). (2002). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. AFGC-SETRA. p. 11.
- [29] Wei, Y. Zhou, M. Zhao, K. Zhao, K. Li, G. (2020). *Stress-strain relationship model of glulam bamboo under axial loading*. Advanced Composites Letters, SAGE Publications Sage UK: London, England. Vol. 29, pp. 26.
- [30] Samimi, K., Pakan, M., Eslami, J. and Asgharnejad, L. (2022). *Investigation of two different water-dispersed graphene on the performance of graphene/cement paste: Surfactant and superplasticizer effect*. Construction and Building Materials, Vol.349, p.128756.

- [31] Samimi, K. and Zareechian, M., (2022). *Chemical resistance of synthesized graphene-modified cement paste containing natural pozzolans to acid attack*. Journal of Building Engineering. Vol.60, p.105174.
- [32] Samimi, K. Farahani, M. Pakan, M. and Shirzadi Javid, A.A. (2022). *Influence of pumice and metakaolin on compressive strength and durability of concrete in acidic media and on chloride resistance under immersion and tidal conditions*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, Vol. 46(2), pp.1153-1175.

