

An investigation of the mechanical properties and microstructure of self-compacting earth concretes for use in low-carbon construction systems

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

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

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

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

ABSTRACT

Nowadays, because of global warming and its consequences, low-carbon materials such as clay and low-carbon cement are becoming more popular. Hence, they may be able to play a significant role in reducing greenhouse gas emissions. In this study, the fresh state, mechanical properties, microstructure, and life cycle analysis of self-compacting earth concrete were investigated to evaluate its potential utilization in both structural and non-structural components. Three types of clay were substituted with cement as a paste to determine the best type of clay for concrete production. According to earth concrete design mixtures, clay is substituted for cement in amounts of 50%, 60%, 70%, 80% and 100%. It can be concluded from these results that compressive strength decreased as clay content increased. However, this trend did not remain constant throughout the curing process. According to the stress-strain results, earth concretes that contain a high percentage of clay are more tolerable strain and have a lower modulus of elasticity and toughness. Ultrasonic results classified self-compacting earth concrete mixtures according to quality. Following that, based on a regression analysis result, a formula was developed to calculate compressive strength using non-destructive ultrasonic data. Microstructure tests, such as thermogravimetry and FESEM, confirm the mechanical strength results and show that clay content was the main reason for the cracks and holes. Finally, the life cycle analysis indicated that earth concrete decreased CO₂ emissions by 33% and 88% in structural and non-structural design mixtures, respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 February 2024

Revise Date: 21 May 2024

Accept Date: 05 June 2024

Keywords:

Greenhouse gases, self-compacting earth concrete, mechanical strength, microstructure, life cycle.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.440442.3344](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.440442.3344)

*Corresponding author: Kianoosh Samimi

Email address:

متراکم: استفاده در سیستم‌های بررسی خواص مکانیکی، ریزساختار بتن خاکی خود کربن ساخت و ساز کم

افشین خداپرست¹، کیانوش صمیمی^{2*}، مهیار پاکان³

1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

2- *استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

3- دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

امروزه به واسطه گرمایش کره زمین و مخاطره‌های زیست محیطی حاصل از آن، استفاده از مصالح کم‌کربن نظیر خاک رس، سیمان‌های کم‌کربن و غیره به دلیل نقش آن‌ها در کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از صنعت ساخت و ساز اجتناب ناپذیر می‌باشد. در این مطالعه، جهت امکان‌سنجی استفاده از بتن خاکی در المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای (پرکننده)، مطالعه‌ای جامع بر روی خواص مکانیکی، ریزساختاری و تحلیل چرخه عمر طرح‌های پیشنهادی بتن خاکی بر مبنای عملکرد خودمتراکم صورت پذیرفته است. بدین منظور، ابتدا درصد‌های مختلف 3 نوع خاک رس مختلف با سیمان جایگزین شدند. بر اساس نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های خمیر سیمانی، خاک رس بهینه انتخاب و برای ساخت بتن‌های خاکی خودمتراکم استفاده گردید. در این پژوهش، میزان جایگزینی سیمان بر اساس 50، 60، 70، 80 و 100٪ خاک رس انجام پذیرفت. بر اساس نتایج خواص مکانیکی، مقاومت فشاری با افزایش خاک رس روند کاهشی داشته، اما این روند با افزایش زمان نگهداری بتن ثابت نبوده است. همچنین نتایج منحنی‌های تنش-کرنش نشان داد که نمونه‌های حاوی مقادیر بالای خاک رس دارای کرنش قابل تحمل بیشتر، مدول ارتجاعی و چقرمگی کمتر می‌باشند. بر اساس نتایج آلتراسونیک، مخلوط‌های بتن خاکی خودمتراکم بر اساس کیفیت طبقه بندی شدند و با تحلیل رگرسیون رابطه‌ای برای محاسبه مقاومت فشاری بر اساس نتایج غیر مخرب آلتراسونیک در این نوع بتن ارائه گردید. نتایج آزمایش‌های ریز ساختار بتن نظیر FESEM و ترموتراگيومتری، متناسب با نتایج مقاومت مکانیکی می‌باشد و کاهش محصولات هیدراتاسیون، افزایش ترک و حفرات به واسطه افزایش میزان خاک رس را تأیید می‌نماید. در نهایت تحلیل چرخه عمر نشان می‌دهد استفاده از بتن خاکی می‌تواند میزان تولید CO_2 را در طرح‌های سازه‌ای به مقدار 33٪ و در طرح‌های غیر سازه‌ای (پرکننده) تا 88٪ کاهش دهد.

کلمات کلیدی: گازهای گلخانه‌ای، بتن خاکی خودمتراکم، مقاومت مکانیکی، ریز ساختار، چرخه عمر

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.440442.3344	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.440442.3344	/11/30 1403	/11/30 1403	/03/16 1403	/03/01 1403	1402/11/17
					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: کیانوش صمیمی	

1- مقدمه

افزایش دمای کره زمین به دلیل مصرف بی‌رویه انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش منابع طبیعی، تهدیدی مهم برای زندگی بشر بر روی زمین محسوب می‌گردد [1]. در این راستا، توافقنامه آب و هوای پاریس در سال 2016 توسط سران اکثر کشورهای جهان امضا گردید که عمدتاً بر کاهش میزان گرمای سالانه کره زمین تأکید نموده است [2]. همچنین، هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوا (IPCC) گزارش داده است که محدود کردن گرمایش کره زمین به میزان 1/5 درجه سانتی‌گراد در سال، می‌تواند به اهداف جهانی نظیر برنامه‌های توسعه پایدار کمک نماید [3 و 4]. تقریباً 70 درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان به‌واسطه مصرف سوخت‌های فسیلی که در صنعت برق، حمل و نقل و فرایندهای مختلف صنعتی نظیر سیمان و فولاد استفاده می‌گردد، تولید می‌شود. طبق گزارش‌ها، سهم صنعت ساختمان از تولید گازهای گلخانه‌ای در حدود 23 درصد می‌باشد [5]. صنعت سیمان در حدود 8 درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهان را به خود اختصاص داده است [6 و 7]. لذا برای کاهش اثرات منفی زیست محیطی مرتبط با صنعت ساخت و ساز، کاهش نیازمندی به مصرف سیمان و استفاده از مصالح و روش‌های اجرایی سازگار با محیط زیست یکی از راه‌های برون رفت از این بحران می‌باشد [8 و 9]. استفاده از مصالح مبتنی بر خاک رس نظیر مصالح خشتی، آجرهای رسی فشرده، ملات کاه-گلی و غیره، یک رویکرد پایدار برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. از مزایای این رویکرد می‌توان به تولید مقرون به صرفه، منابع فراوان و بهره‌وری انرژی اشاره کرد [10]. خاک رس در نقاط مختلف جهان فراوان، ارزان و قابل دسترس می‌باشد و با توجه به حمل و نقل محدود، موجب کاهش قابل ملاحظه انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردند. علاوه بر این، انرژی مورد نیاز دسترسی به مصالح خاکی بسیار پایین می‌باشد، زیرا خاک رس بر خلاف سیمان برای تولید، به حرارت 1450 درجه سانتی‌گراد نیاز ندارد و همچنین، انتشار CO₂ که در طی فرایند کلسیناسیون سنگ آهک (CaCO₃) در طی فرایند تولید سیمان انتشار می‌یابد، وجود نخواهد داشت [11 و 12]. در حالت مقایسه‌ای، میزان تولید گاز CO₂ معادل در تولید یک کیلوگرم خاک رس در حدود 0/023 کیلوگرم می‌باشد که این مقدار در تولید یک کیلوگرم سیمان در حدود 0/9 کیلوگرم می‌باشد [13 و 14].

پر واضح است، بتن دومین ماده پرمصرف بعد از آب در جهان است که به طور گسترده در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد [15]. بتن معمولی دارای چالش‌هایی نظیر تراکم لایه به لایه، سرعت پایین اجرا و عدم بتن ریزی صحیح در المان‌های دارای تراکم فولاد بالا می‌باشد. جهت بهبود خواص و حذف معایب بتن معمولی، بتن خودتراکم توسط پژوهشگران پیشنهاد گردیده است که به‌واسطه رفع معایب بتن سنتی، سهم قابل قبولی در صنعت ساختمان به خود اختصاص داده است [16-20]. از سوی دیگر، بتن خاکی خودمتراکم را می‌توان برای ساخت المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای (پرکننده) با در نظر گرفتن همزمان دانش بتن خودمتراکم و بتن خاکی، به کار گرفت. بتن خاکی خودمتراکم امکان ریختن بتن به صورت کامل بدون تراکم اضافی در قالب را به جای متراکم کردن لایه به لایه، امکان‌پذیر می‌نماید. استفاده از این نوع بتن موجب افزایش کیفیت نهایی بتن، کاهش هزینه و صرفه‌جویی در زمان می‌گردد. به‌واسطه نیل به اهداف زیست محیطی، پژوهشگران امکان استفاده از بتن خاکی در صنعت ساخت و ساز را به عنوان رویکردی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. در این راستا، ایمان‌زاده و همکاران در پژوهشی نشان دادند که جایگزینی 20 درصدی خاک رس با سیمان، موجب افزایش 10 درصدی شکل‌پذیری می‌گردد. در این پژوهش حداکثر مقاومت فشاری به دست آمده برای این بتن خاکی 4 MPa گزارش شده است [21]. فردون و همکاران نشان دادند که جایگزینی 20 تا 40 درصدی خاک رس در بتن موجب کاهش خواص مکانیکی و انرژی شکست می‌گردد. در حالی که این میزان جایگزینی چقرمگی بتن را افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج، حداکثر مقاومت فشاری به 5/2 MPa می‌رسد [22]. کهندل‌نیا و همکاران در پژوهشی نشان دادند که جایگزینی 75 درصد خاک رس با سیمان موجب کاهش 92٪ مقاومت فشاری بتن می‌گردد [23]. همچنین، کهندل‌نیا و همکاران در پژوهشی دیگر دریافتند که مقاومت فشاری بتن با افزایش زمان نگهداری، افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری بتن خاکی مورد مطالعه پس از گذشت 6 ماه نگهداری، از 1 MPa به 5 MPa افزایش یافت، اما همچنان برای اهداف سازه‌ای کافی نمی‌باشد. نتایج آزمایش آلتراسونیک نشان داد که سرعت موج برشی بر اساس جایگزینی 20، 30 و 40٪ خاک رس به ترتیب 30، 32 و 35٪ کاهش یافته است [24]. نتایج پژوهش شمس و همکاران نشان داد که چقرمگی بتن خاکی خودمتراکم با

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (<https://www.ipcc.ch/>)

افزایش نسبت آب به سیمان، کاهش قابل ملاحظه‌ای یافت. نتایج نشان داد که این میزان کاهش با افزایش سه برابری نسبت آب به سیمان، به میزان 5 برابر می‌باشد که ضرورت محدود نگه داشتن نسبت آب به سیمان را نشان می‌دهد [25]. مطابق نتایج اوتلت و همکاران، وضعیت بهینه بتن خاکی با استفاده از طرح اختلاطی متشکل از 5٪ سیمان و 1٪ روان‌کننده امکان پذیر می‌باشد. نتایج نشان داد که طرح‌های اختلاط پیشنهادی آن‌ها دارای مقاومت‌های فشاری در محدوده 0/5 تا 8 MPa می‌باشد. علاوه بر این، در این پژوهش میزان انتشار گاز CO₂ بتن خاکی خودمتراکم با بلوک‌های سیمانی توخالی نیز مقایسه گردید و نتایج نشان داد که میزان تولید گاز CO₂ برای آنها تقریباً یکسان می‌باشد [26]. همچنین، هوانگ و همکاران، در پژوهشی دریافتند که میزان تولید گاز CO₂ در بتن خاکی در مقایسه با بتن معمولی 30٪ کاهش یافته است [27].

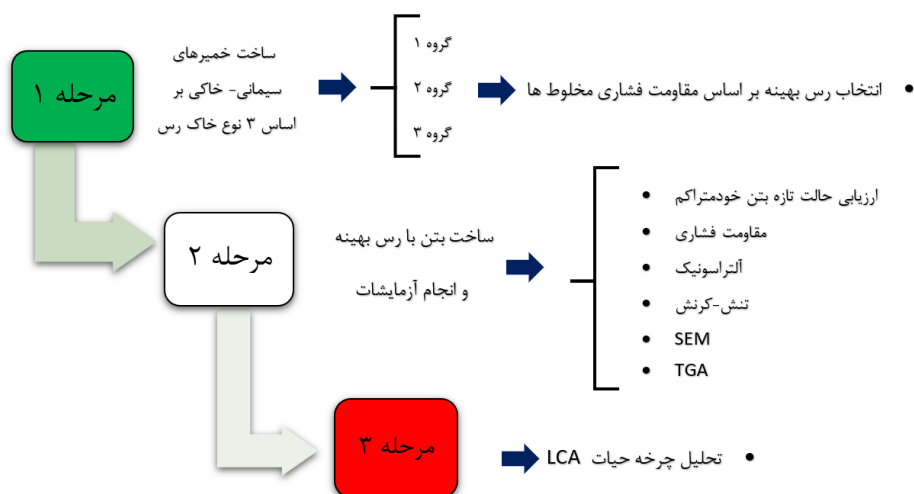
بررسی ادبیات تحقیقات پیشین نشان داد که بتن‌های خاکی دارای چالش‌های مختلفی نظیر مقاومت فشاری محدود (1 تا 12 MPa)، شکل‌پذیری کم و سرعت اجرای پایین می‌باشد که استفاده از آن را در عناصر سازه‌ای و غیرسازه‌ای (پرکننده) خصوصاً در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا را با چالش‌هایی همراه کرده است [20-27]. تا آنجا که مطالعات پژوهشگران بررسی گردید، تا به امروز، طرح اختلاطی برای بتن خاکی خودمتراکم که دارای مقاومت، کارایی و شکل‌پذیری قابل قبول برای استفاده در المان‌های سازه‌ای باشد، گزارش نشده است. هدف اصلی و نوآوری این پژوهش، نیل به اهداف توسعه پایدار با ارائه راهکاری موثر در جهت کاهش مصرف سیمان در صنعت ساختمان با معرفی طرح‌های اختلاط پیشنهادی بتن خاکی خودمتراکم می‌باشد. بتن خاکی خودمتراکم پیشنهادی با تلفیق علم بتن خاکی و بتن خودمتراکم، علاوه بر کاهش قابل ملاحظه تولید گازهای گلخانه‌ای می‌تواند کیفیت 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 خاکی خودمتراکم پیشنهادی نسبت به تحقیقات گذشته، امکان استفاده از طرح‌های اختلاط مذکور برای المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای حتی در مناطق مستعد بارهای جانبی دینامیکی نظیر باد و زلزله، فراهم می‌باشد.

برای نیل به اهداف این پژوهش، ابتدا 3 نوع خاک رس از مناطق مختلف کشور انتخاب گردید. به منظور انتخاب رس بهینه، مخلوط‌های خاک-سیمان از هر نوع خاک رس ساخته شده و از لحاظ مقاومت فشاری در سنین نگهداری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از انتخاب خاک رس بهینه، اقدام به ساخت بتن خاکی خودمتراکم 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 (FESEM²)، تحلیل ترموگراویمتری (TGA³)، بر روی طرح‌های اختلاط انجام شد. در انتها، با استفاده از تحلیل چرخه عمر (LCA⁴)، میزان تولید دی اکسید کربن در همه مخلوط‌های بتنی پس از محاسبه، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شکل شماره 1 نمای کلی این تحقیق را به طور خلاصه به تصویر کشیده است.

² Field emission scanning electron microscopy

³ Thermogravimetric analysis

⁴ Life Safety analysis



شکل ۱: نمای کلی روند تحقیق

۲- برنامه آزمایشگاهی

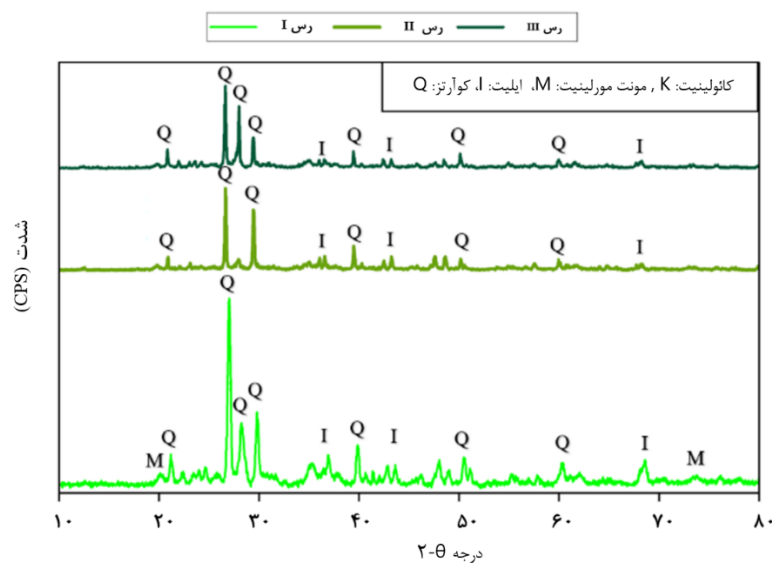
۱-۲ مصالح

در این پژوهش از سه نوع خاک رس مختلف (نوع I، II و III) با روانی پایین بر مبنای سیستم طبقه‌بندی USCS⁵ به ترتیب از مناطق قائمشهر، رامسر و گرگان استفاده گردیده است [28]. نتایج آزمایش XRD⁶ انواع رس در شکل شماره 2 نشان داده شده است. رس های انتخابی شامل کوآرتر، کائولینیت، ایلیت، مونت مورلینیت می باشند. سیمان پرتلند نوع II طبق استاندارد ASTM⁷-C150 از کارخانه سیمان تهران تهیه گردید [29]. تحلیل شیمیایی و فیزیکی سیمان، خاک های رس و روان کننده مورد استفاده در جدول شماره 1 ارائه شده است. برای تمام طرح های اختلاط بتن، از سنگدانه های خرد شده با اندازه اسمی 0 تا 4 میلی متر برای ماسه و اندازه های 6 تا 12 میلی متر برای شن استفاده گردیده است. توزیع اندازه ذرات سنگدانه ها و انواع رس در شکل شماره 3 نشان داده شده است. الک های مورد استفاده در این پژوهش شامل الک های "3/4" (19/00 میلی متر)، "1/2" (12/70 میلی متر)، "3/8" (19/00 میلی متر)، "4" (4/75 میلی متر)، "8" (2/36 میلی متر)، "10" (2/00 میلی متر)، "16" (1/2 میلی متر)، "30" (600 میکرون)، "40" (420 میکرون)، "50" (300 میکرون)، "100" (150 میکرون)، و "200" (75 میکرون) می باشند. همچنین، فوق روان کننده پلی-کربوکسیلات اتر ساخت شرکت سیکا با مشخصات مندرج در جدول 1، در ساخت بتن استفاده شده است.

⁵ The Unified Soil Classification System

⁶ X-ray diffraction

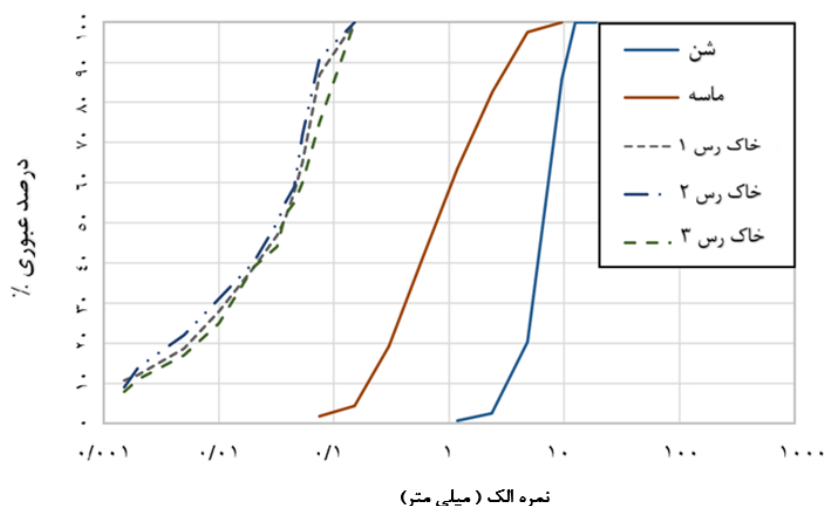
⁷ American Society for Testing and Materials



شکل 2: نتایج آزمایش XRD برای انواع رس‌های انتخابی در این تحقیق

جدول 1: تحلیل شیمیایی و فیزیکی سیمان، انواع خاک رس و روان کننده

عناصر %	سیمان پرتلند (نوع II)	خاک رس نوع 1	خاک رس نوع 2	خاک رس نوع 3	روان کننده
SiO ₂	18/88	52/98	43/08	50/95	-
Al ₂ O ₃	4/01	14/24	11/93	13/25	-
Fe ₂ O ₃	3/45	4/76	5/20	5/33	-
CaO	63/23	10/35	15/65	10/48	-
MgO	3/26	3/49	3/05	3/45	-
SO ₃	4/12	0/12	0/19	0/15	-
TiO ₂	0/31	0/61	0/58	0/66	-
MnO	0/25	0/15	0/12	0/16	-
Na ₂ O	0/11	1/16	0/81	1/24	1/5>
K ₂ O	0/82	2/56	2/31	2/78	-
Ba	0/28	0/05	0/05	0/07	-
Cl	0/02	0/03	0/04	0/03	0/1>
Zr	-	0/02	-	0/20	-
Cu	0/01	0/01	-	-	-
Liquid Limit (LL)	-	7/29	7/28	7/27	-
Plastic Limit (PL)	-	7/11	7/11	7/10	-
PH	-	8/61	8/28	8/64	7/00
Loss of ignition	1/07	9/13	16/07	11/06	-
مدول نرمی (kg/m ²)	290	-	-	-	-
وزن مخصوص (gr/cm ³)	3/15	1.83	1.81	1.79	1.06



شکل 3: اندازه سنگدانه‌ها و خاک‌های رس مورد استفاده در پژوهش

2-2 آماده‌سازی و طرح اختلاط مخلوط‌های خاک-سیمان

در این مطالعه، طرح مخلوط REF-C0 بدون هیچ گونه درصد جایگزینی خاک رس به عنوان نمونه شاهد ساخته شده است. سپس سه نوع خاک رس با درصد‌های مختلف جایگزینی با سیمان جهت ساخت مخلوط‌های خاک-سیمان به منظور انتخاب رس بهینه در نظر گرفته شد. بر اساس جدول 2، مخلوط‌های خاک-سیمان بر اساس نوع خاک رس مورد استفاده، در 3 دسته بندی طبقه بندی شدند. بر این اساس، مخلوط‌های گروه‌های A، B و C به ترتیب از نوع خاک رس I، II و III ساخته شدند. در هر گروه، نسبت جایگزینی خاک رس با سیمان برابر 50، 60، 70، 80 و 100٪ بوده است. تمام مخلوط‌های خاک-سیمان در مخلوط کن 6 لیتری ساخته شدند. روند اختلاط شامل ریختن کل سیمان، خاک رس و ترکیب آب و روان‌کننده به صورت تدریجی در مخلوط کن بوده و سپس به مدت سه دقیقه با سرعت کم مخلوط شدند. در مرحله بعد، مخلوط‌ها به مدت یک دقیقه دیگر با سرعت زیاد مخلوط گردیدند. نمونه‌های مکعبی ($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$) مطابق با آیین‌نامه ASTM C31 ساخته شدند (شکل 4) [30]. پس از ریختن مخلوط در قالب‌ها، با دو لایه ورقه‌های پلاستیکی پیچیده شده و به مدت 24 ساعت در یک محفظه با دمای کنترل شده 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. شرایط نگهداری نمونه‌ها بر اساس روند تحقیقات گذشته بدون تماس مستقیم نمونه‌های حاوی خاک رس با آب صورت پذیرفته است. نمونه‌های بتن حاوی خاک رس به‌واسطه جذب آب در سطح نمونه و کاهش سرعت انقباض، موجب کاهش مقاومت‌های مکانیکی می‌گردد. بر این اساس نمونه‌ها پس از 24 ساعت قالب برداری شده و در دمای اتاق با رطوبت 50 ± 1 درصد بدون تماس مستقیم با آب نگهداری شدند.



شکل 4: نحوه آماده‌سازی نمونه‌های مخلوط خاک-سیمان

جدول 2: طرح اختلاط نمونه‌های مخلوط خاک - سیمان خمیر سیمانی

طرح اختلاط	سیمان (kg/m ³)	خاک رس (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	روان کننده (kg/m ³)	
Ref	450	0	180	1/49	
گروه A	CI-50	225	225	180	2/14
	CI-60	180	270	180	2/64
	CI-70	135	315	180	3/04
	CI-80	90	360	180	3/48
	CI-100	0	450	180	7/14
گروه B	CII-50	225	225	180	1/91
	CII-60	180	270	180	2/21
	CII-70	135	315	180	2/49
	CII-80	90	360	180	3/2
	CII-100	0	450	180	6/94
گروه C	CIII-50	225	225	180	2/64
	CIII-60	180	270	180	3/51
	CIII-70	135	315	180	5/86
	CIII-80	90	360	180	6/15
	CIII-100	0	450	180	7/34

3-2 طرح‌های اختلاط بتن خاکی خودمتراکم

بر اساس بررسی نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های خاک-سیمان ساخته شده با انواع خاک رس، رس نوع I به عنوان رس بهینه انتخاب گردید. سپس بتن‌های خاکی پیشنهادی با استفاده از خاک رس نوع I ساخته شدند. علاوه بر نمونه شاهد (REF-C0)، پنج طرح اختلاط دیگر به منظور بررسی تاثیر درصدهای مختلف خاک رس بر خصوصیات بتن خودمتراکم خاکی تهیه گردیدند. طبق جدول شماره 3، طرح‌های اختلاط بتن خودمتراکم خاکی به ترتیب شامل 0، 50، 60، 70، 80 و 100٪ درصد خاک رس می‌باشند که به ترتیب به صورت REF-C0، SCEC-C50، SCEC-C60، SCEC-C70، SCEC-C80 و SCEC-C100 نام‌گذاری شدند.

جدول 3: نسبت طرح اختلاط بتن خاکی خود متراکم

طرح اختلاط	سیمان (Kg/m ³)	خاک رس (Kg/m ³)	ماسه (Kg/m ³)	شن (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	روان کننده (Kg/m ³)	نسبت آب به سیمان
Ref-C0	450	0	790	790	180	4/13	0/4
SCEC-C50	225	225	790	790	180	9/77	0/4
SCEC-C60	180	270	790	790	180	10/12	0/4
SCEC-C70	135	315	790	790	180	14/05	0/4
SCEC-C80	90	360	790	790	180	15/83	0/4
SCEC-C100	0	450	790	790	180	20/12	0/4

4-2 آماده سازی و نگهداری نمونه‌های بتن خودمتراکم خاکی

کلیه طرح‌های اختلاط بتن در یک مخلوط کن 150 لیتری تهیه شدند. ابتدا، سنگدانه‌های شن و ماسه در مخلوط کن قرار داده شد و سپس به مدت 3 دقیقه مخلوط شدند. در این مدت $\frac{2}{3}$ از آب طرح اختلاط به مخلوط کن اضافه گردید. سپس خاک رس و سیمان به آن اضافه شده و به مدت یک دقیقه دیگر مخلوط شدند. سپس، فوق روان کننده و آب باقی مانده اضافه گردید و به مدت 2 دقیقه مخلوط شدند. اطراف دهانه مخلوط کن با یک پوشش پلاستیکی پوشانده شد تا از تبخیر آب جلوگیری گردد. سرعت مخلوط در هر مرحله 140

دور در دقیقه ثابت نگه داشته شد. تهیه نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای مطابق با آیین‌نامه‌های ASTM C31 و ASTM C511 انجام گردید [30 و 31]. قالب گیری و نگهداری نمونه‌ها مشابه بخش 2-2 انجام شده است.

3- روش آزمایش

3-1 خواص حالت تازه بتن

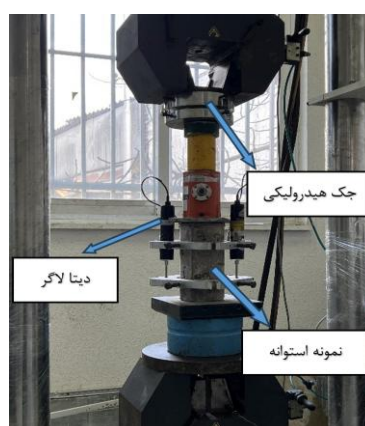
طبق آیین‌نامه EFNARC، آزمایش‌های Slump-Flow و L-box برای ارزیابی کارایی حالت تازه طرح‌های بتن خودمتراکم انجام گردید. آزمایش Slump-Flow یکی از مهمترین و رایج ترین آزمایش‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری وضعیت حالت تازه بتن خودمتراکم می‌باشد [32]. مطابق EFNARC، بتن با مقادیر قطر پخش‌شدگی در محدوده 550 تا 850 میلی‌متر به عنوان بتن خودمتراکم شناخته می‌شود. برای ارزیابی توانایی بتن تازه برای جریان در فضاهای تنگ (از جمله مناطق با میلگرد متراکم) بدون جداسازی، از دست‌دادن یکنواختی یا ایجاد انسداد، از آزمایش L-box استفاده گردید. این آزمایش مستلزم حرکت افقی حجم مشخصی از بتن تازه از طریق دهانه‌های بین میله‌های صاف و عمودی است. مطابق آیین‌نامه EFNARC، نسبت L-box برای بتن خود متراکم باید در محدوده 0.8 تا 1 باشد.

3-2 مقاومت فشاری

مقاومت فشاری کلیه مخلوط‌های خاک-سیمان بر روی 135 نمونه مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ پس از 3، 7، 28، 56، 90 و 180 روز نگهداری گزارش شدند. علاوه بر این، مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف بتنی مورد مطالعه که در مجموع 72 نمونه مکعبی $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ می‌باشد، پس از 7، 28، 90، 56 و 180 روز نگهداری اندازه‌گیری و ارائه شدند. برای هر طرح مخلوط خمیر سیمانی و طرح اختلاط بتن حاکی خود متراکم، مقاومت فشاری با استفاده از میانگین سه نمونه محاسبه گردید. مقاومت فشاری برای مخلوط‌های خاک-سیمان طبق آیین‌نامه ASTM C109/C10 [33] و برای نمونه‌های بتنی با رعایت استاندارد ASTM C39-18 [34] انجام گردید. میزان سرعت بارگذاری آزمایش برای نمونه‌های خمیر سیمانی $0/48 \text{ MP/s}$ و برای نمونه‌های بتن $0/22 \text{ MP/s}$ در نظر گرفته شد.

3-3 تعیین منحنی تنش-کرنش

رفتار تنش-کرنش نمونه‌های بتنی با انجام آزمایش تنش-کرنش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد $100 \times 200 \text{ mm}^2$ که از قبل کلاهک گذاری (کپینگ) شده بودند، با استفاده از دستگاه سننم با ظرفیت 6000 کیلو نیوتن اندازه‌گیری شد. برای تعیین تغییر شکل طولی از میانگین دو تغییر شکل بالا و پایین استفاده شد. مقادیر بار با استفاده از لودسل زیر نمونه سیلندر تعیین گردید. سپس مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق یک دیتا لاگر به کامپیوتر منتقل شد. نحوه آزمایش تنش-کرنش در شکل 5 نشان داده شده است.



شکل 5: دستگاه برای تعیین منحنی تنش-کرنش.

3-4 آزمایش آلتراسونیک بتن UPV⁸

آزمایش UPV (آزمایشی درجا و غیر مخرب) که می‌تواند با اندازه‌گیری سرعت عبور امواج از بتن، کیفیت و مقاومت بتن را به صورت غیر مستقیم ارزیابی نماید. سرعت‌های موج بالا نشان دهنده تراکم زیاد و کیفیت مناسب بتن می‌باشد، در حالی که سرعت‌های پایین نشان دهنده ترک و حفره در بتن می‌باشد [35]. آزمایش آلتراسونیک بر روی نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ مطابق با ASTM C597 انجام گردیده است [36].

3-5 تحلیل ریز ساختار FESEM-EDX⁹

مورفولوژی نمونه‌های بتن خودتراکم خاکی در سن 28 روز پس از ایجاد پوشش طلا بروی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با استفاده از دستگاه ESEM FEI Quanta 200 تعیین شد. همچنین، طیف سنجی اشعه ایکس (MAP-EDX) برای تحلیل عنصری بر روی نمونه‌ها انجام گردید.

3-6 تحلیل ترموگراویمتری TGA¹⁰

در این پژوهش، تحلیل ترموگراویمتری (TGA) با استفاده از دستگاه STA,BAHR 504 برای محاسبه درجه هیدراتاسیون نمونه‌های بتنی انجام شد. در طول آزمایش، نمونه‌های پودری (حدود 10 میلی گرم) در یک بوته آلومینا قرار داده شد و دما از 50 درجه سانتی‌گراد تا 800 درجه سانتی‌گراد با سرعت 10 درجه سانتی‌گراد در دقیقه افزایش یافت. برای حفاظت از فعل و انفعالات شیمیایی بالقوه بین نمونه‌ها و هوا، از جو آرگون با دبی 100 میلی‌لیتر در دقیقه استفاده شد.

۴- نتایج

4-1 شناسایی خاک رس بهینه

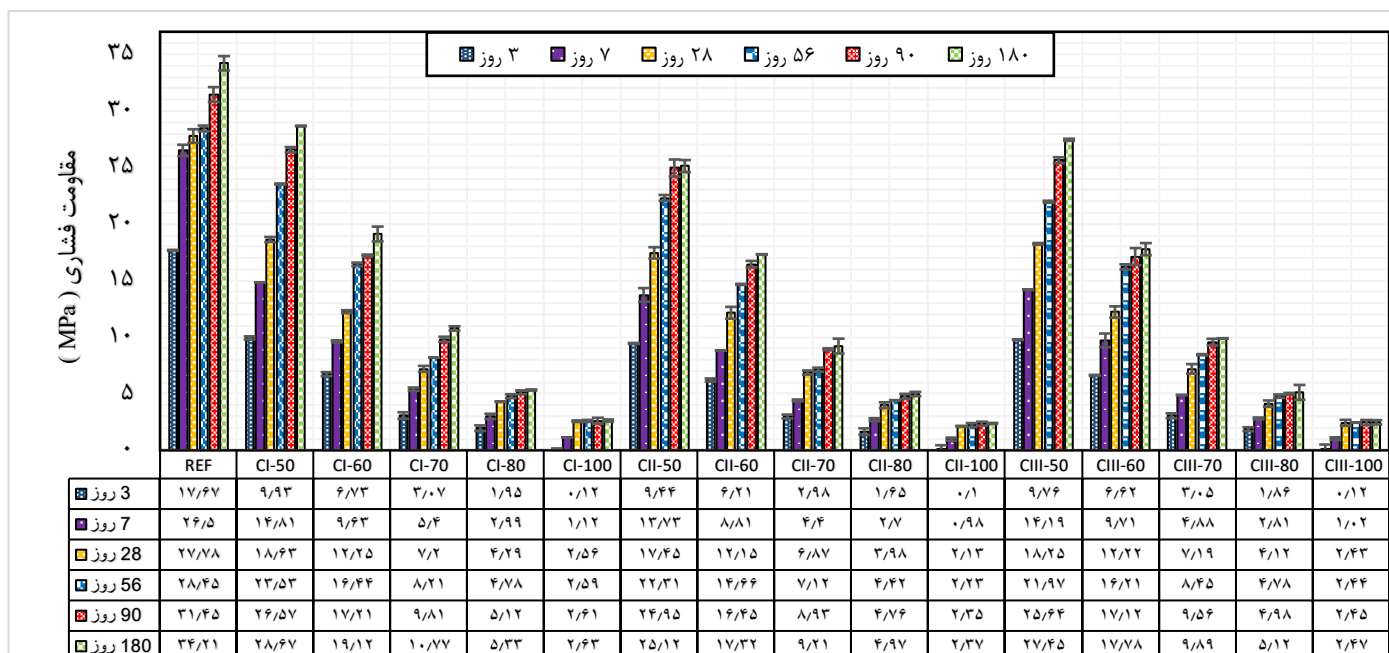
در شکل 6، مقاومت فشاری مخلوط‌های خاک-سیمان، پس از 3، 7، 28، 56، 90 و 180 روز نگهداری نشان داده شده است. کمترین و بیشترین مقدار مقاومت مخلوط‌های خمیر سیمانی در تمام سنین نگهداری به ترتیب مربوط به مخلوط CII-100 و مخلوط Ref می‌باشد. نتایج نشان داد که در تمام سنین نگهداری، با افزایش میزان خاک رس مقاومت فشاری مخلوط‌ها کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج، می‌توان مشاهده کرد که ویژگی‌های نوع رس مورد استفاده، تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری مخلوط گذاشته است. در حالت کلی، جذب بالای آب توسط خاک رس عامل اصلی در کاهش مقاومت فشاری مخلوط‌ها می‌باشد. زیرا با جذب آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون سیمان، سرعت فرایندهای هیدراتاسیون کاهش می‌یابد. در نتیجه تولید محصولات هیدراتاسیون مانند پرتلندیت و ژل سیلیکات کلسیم با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد و در پی آن رشد مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. در تمام سنین نگهداری، مقاومت فشاری مخلوط‌های ساخته شده از رس نوع I بیشتر از مقاومت فشاری سایر رس‌ها می‌باشد. برای مثال، در سن 28 روز نگهداری، مقاومت فشاری مخلوط C1-50 به ترتیب 6/76 و 2/08٪ بیشتر از CII-50 و CIII-50 است. در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که خاک رس نوع I مقاومت فشاری بالایی را در مخلوط‌های خمیر سیمانی نشان می‌دهد. همانطور که در جدول شماره 1 مشاهده می‌گردد، خاک رس نوع I نسبت به انواع دیگر رس دارای میزان سیلیس بیشتری می‌باشد و این موضوع موجب ترکیب مقادیر بیشتر سیلیس با هیدروکسید کلسیم و تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته می‌گردد که نهایتاً باعث افزایش مقاومت فشاری در نمونه می‌شود. بر اساس نتایج، خاک رس نوع I دارای مقادیر مقاومت فشاری

⁸ Ultrasonic pulse velocity

⁹ Field emission scanning electron microscopy -Energy Dispersive X-ray

¹⁰ Thermo-gravimetric analysis

بالا تری نسبت به دیگر رس ها در سنین نگهداری مختلف می باشد. در نتیجه، برای تولید بتن های خاکی خودمتراکم مطابق جدول شماره 2، خاک رس نوع I به عنوان رس بهینه انتخاب گردیده است.



شکل 6: مقاومت فشاری خمیرهای خاک-سیمان در سنین نگهداری مختلف

4-2- خواص حالت تازه بتن

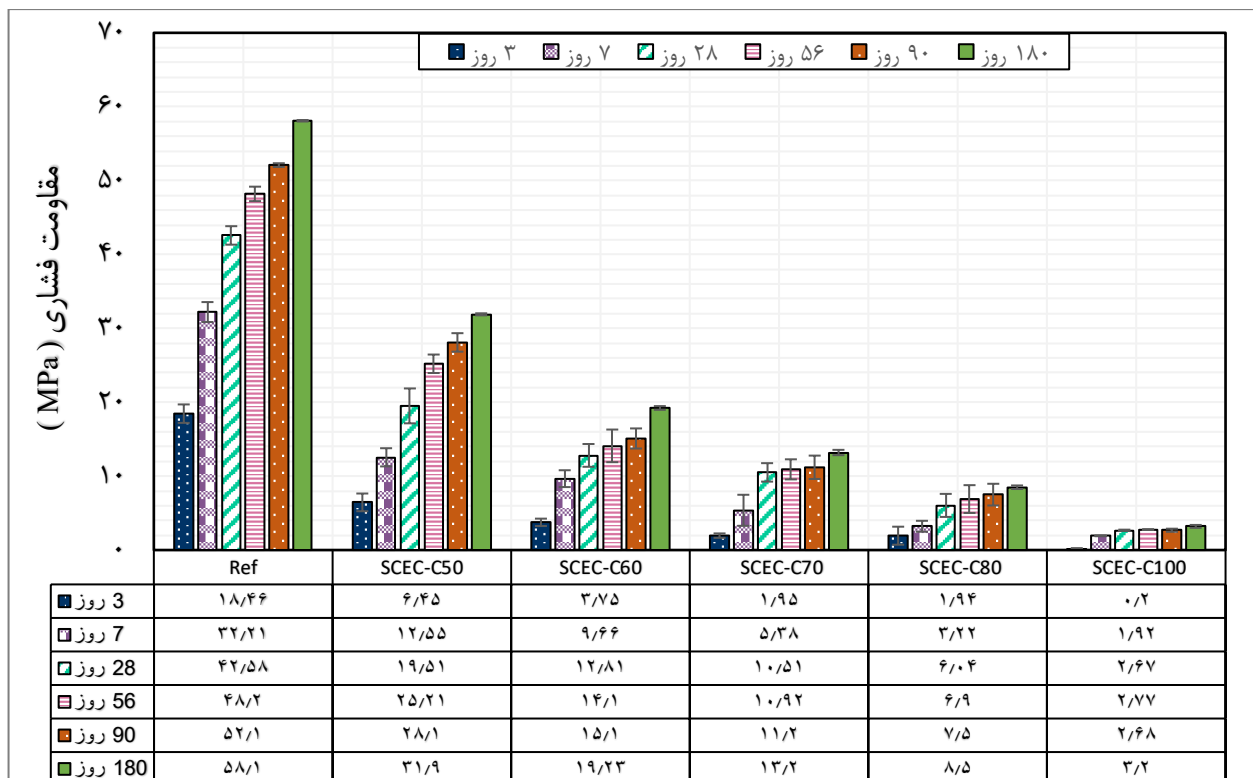
بر اساس جدول شماره 4، قطر جریان اسلامپ همه نمونه های بتن خاکی خودمتراکم در حدود 700 ± 30 میلی متر بوده و هیچ جدایی سنگدانه هایی در این آزمایش مشاهده نگردیده است. نتایج جریان اسلامپ مطابق با نتایج NGO [37] نشان داد که افزایش درصد خاک رس به عنوان جایگزینی برای سیمان منجر به کاهش قطر جریان اسلامپ شده است. برخی از پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که برای تولید بتن حاوی درصد زیادی جایگزینی به مقدار زیادی فوق روان کننده نیاز می باشد. بر اساس تحقیقات، مقدار زیاد فوق روان کننده مورد نیاز را می توان به دلایل زیر نسبت داد: (1) میزان سطح ویژه بالای خاک رس (2) افزایش حجم بتن؛ (3) ترکیب شیمیایی خاص؛ (4) ساختار متخلخل خاک رس طبیعی، که موجب جذب زیاد فوق روان کننده می باشد [38]. اندازه T_{50} (زمان رسیدن به قطر 500 میلی متر) نیز در جدول شماره 5 ارائه شده است که از 2 تا 3 ثانیه متغیر است. اگر این مقدار بیش از 5 ثانیه باشد، لزجی زیاد، و اگر زمان اندازه گیری شده کمتر از 2 ثانیه باشد، لزجی کم می باشد. در این موارد، خطر جداسازی دانه ها افزایش می یابد. در این مطالعه، مقدار فوق روان کننده مصرفی در همه مخلوط های بتنی برای رسیدن به جریان اسلامپ در دسته SF2 (محدوده جریان اسلامپ 650-750 میلیمتر) طبق استاندارد AFGC 2002، در نظر گرفته شده است [39]. مقادیر ضریب L-box بین 0/8 و 0/89 در جدول شماره 4 گزارش شده است. طبق نتایج، قطر جریان اسلامپ و L-box در محدوده مجاز آیین نامه EFNARC می باشند. لازم به ذکر است که آزمایش جریان اسلامپ و L-box در نمونه SCEC-C100 به دلیل لزجی بالای بتن حاوی 100٪ خاک رس و جذب زیاد آب توسط رس مردود گردیده و حتی با افزایش قابل توجه میزان روان کننده نیز موجب بهبود شرایط حالت تازه نگردیده است.

جدول 4: نتایج آزمایش‌های حالت بتن تازه

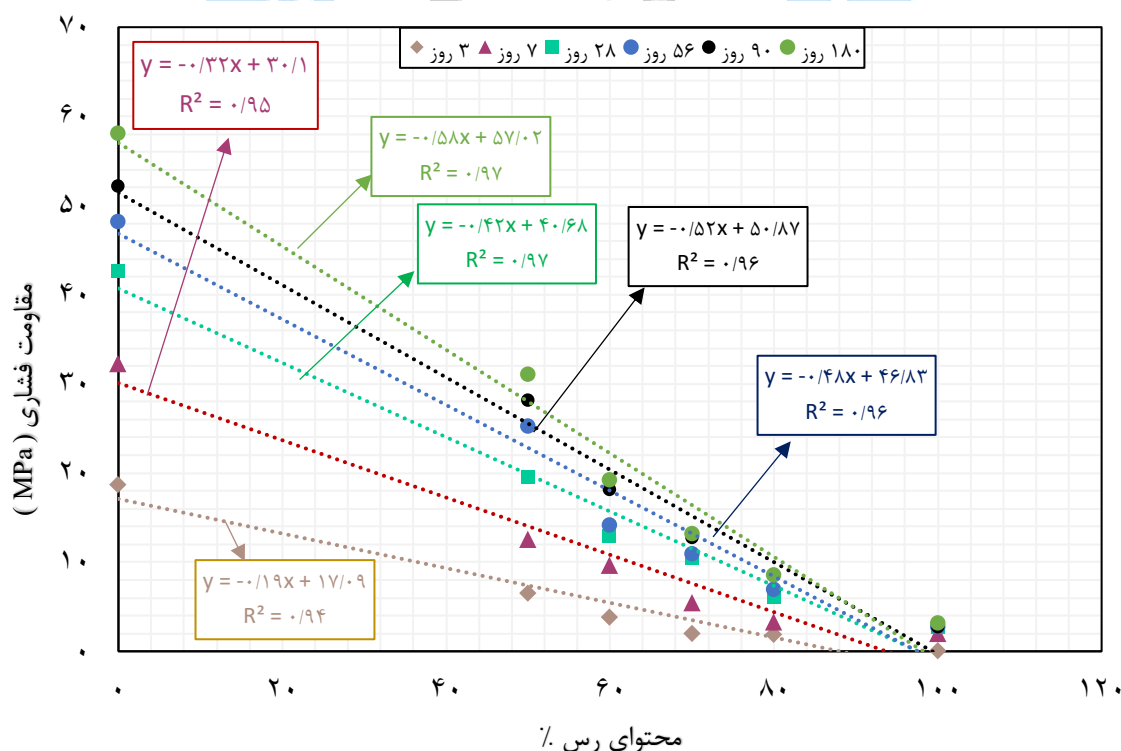
طرح اختلاط	Slump flow		L-box		
	Dia (mm)	T50 (s)	(h2/h1)	T20 (s)	T40 (s)
Ref-C0	686	2/79	0/89	1/6	2/3
SCEC -C50	725	2/45	0/87	1/54	2/7
SCEC -C60	684	2/67	0/86	1/45	2/9
SCEC -C70	678	2/35	0/84	1/57	2/2
SCEC -C80	671	2/55	0/81	1/75	2/5
SCEC -C100	200	-	-	-	-

3-4 مقاومت فشاری بتن

نتایج مقاومت فشاری بتن پس از 3، 7، 28، 56، 90 و 180 روز نگهداری در شکل شماره 7 ارائه شده است. مقاومت نمونه بتن - ها بر اساس مقاومت متوسط سه نمونه تعیین گردید. مطابق شکل 7، کمترین و بالاترین مقادیر مقاومت فشاری در تمام سنین نگهداری، به ترتیب مربوط به طرح SCEC-C100 و طرح REF-C0 (شاهد) می‌باشد. نتایج مقاومت فشاری نشان داد که افزودن خاک رس به عنوان جایگزینی برای سیمان در همه طرح‌های اختلاط به طور کلی موجب کاهش مقاومت فشاری بتن خاکی خودمتراکم در تمامی سنین نگهداری می‌گردد. برای مثال، در طرح SCEC-C50، مقاومت فشاری 3، 7، 28، 56، 90 و 180 روز نگهداری به ترتیب 65، 61، 54، 55، 52 و 49٪ نسبت به بتن شاهد، کاهش یافت. بر اساس نتایج، افزایش جایگزینی خاک رس تا 80 درصد 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 رس نسبت داد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل شماره 7، مقاومت فشاری SCEC-80 به ترتیب در سنین 28 و 90 روز برابر با 6/04 و 7/5 MPa می‌باشد که در مقایسه با طرح شاهد، به میزان 86 و 85٪ کاهش مقاومت داشته است. این مقادیر برای ساخت عناصر سازه‌ای قابل پذیرش نمی‌باشد، اما برای عناصر غیرسازه‌ای مانند دیوارهای غیر باربر و بلوک‌ها، پیشنهاد می‌گردد [40]. از سوی دیگر، مطابق با بررسی تحقیقات گذشته [37]، نتایج نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خاکی خودمتراکم با افزایش زمان نگهداری، افزایش می‌یابند. قابل ذکر است که، همه مخلوط‌ها در سن 28 روز نگهداری دارای حداقل مقاومت فشاری 2 MPa می‌باشند، که برای المان‌های خاکی غیر سازه‌ای قابل استفاده می‌باشد [41]. اگر چه افزودن خاک رس موجب کاهش مقاومت فشاری می‌گردد، اما روند کاهش مقاومت فشاری نسبت به میزان افزایش خاک رس به طور خطی نمی‌باشد. شکل 8 رابطه بین مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خاکی خودمتراکم در سنین مختلف نگهداری بر مبنای محتوای رسی مخلوط‌های بتنی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این شکل، مقاومت فشاری با محتوای رس مطابقت خوبی دارد، که منعکس کننده اثرات قابل توجه آنها بر خواص مکانیکی بتن خاکی خودمتراکم می‌باشد. شایان ذکر است، همانطور که در شکل 8 مشاهده می‌گردد، میزان مطابقت افزایش رس و کاهش مقاومت فشاری برای سن 3 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.



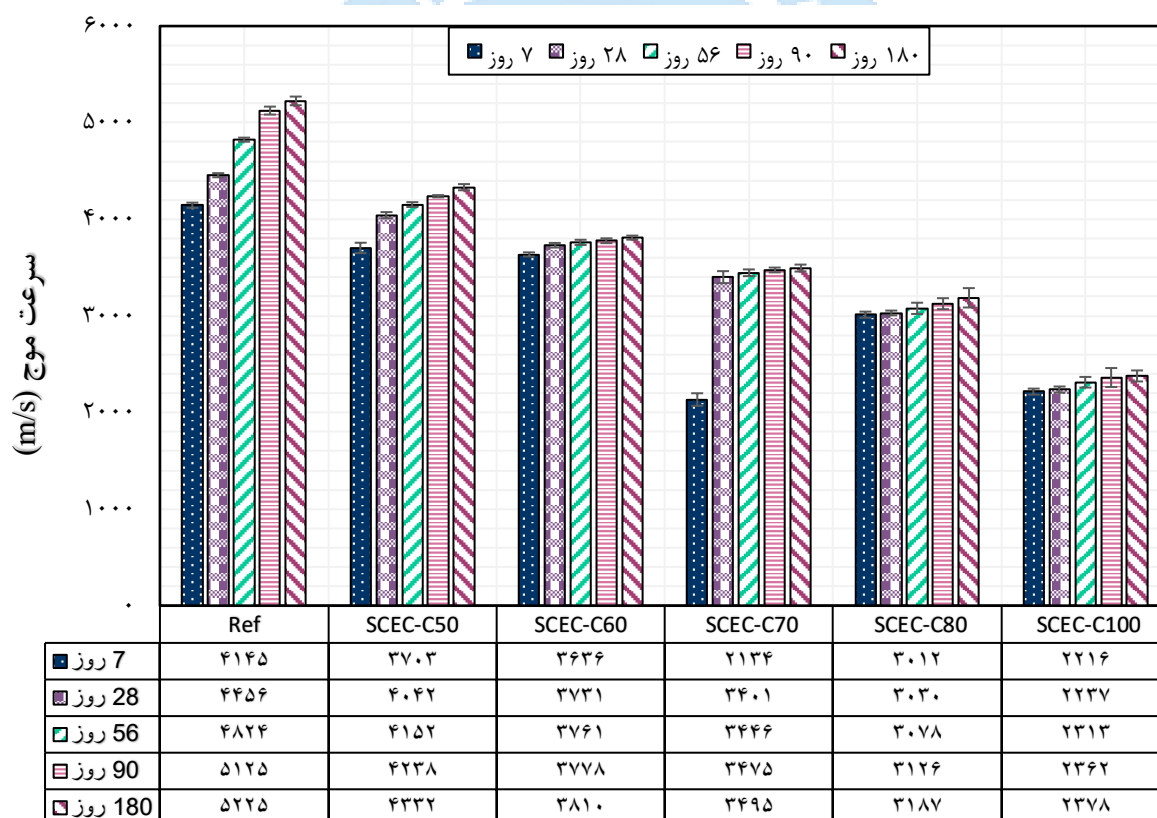
شکل 7: مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مورد مطالعه بر اساس سن نگهداری



شکل 8: رابطه بین مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاکی خودمتراکم در سنین مختلف نگهداری و محتوای رسی مختلف

4-4 نتایج آلتراسونیک UPV

نتایج آزمایش UPV بتن خاکی خودمتراکم مطابق با آیین نامه ASTM C-597 در شکل 9 نشان داده شده است [36]. برای نمونه - ها در تمام سنین، مقادیر UPV اندازه گیری شده از 2216 m/s تا 5225 m/s متغیر می باشد. آیین نامه BIS: 13311 [42] درجه بندی بر اساس مقادیر UPV و کیفیت بتن پیشنهاد نموده است. مطابق این آیین نامه بتن های دارای UPV بالاتر از 4500m/s تا 3500m/s، 3500m/s تا 3000m/s و کمتر از 3000m/s به ترتیب به عنوان بتن با کیفیت عالی، خوب، متوسط و ضعیف محسوب می گردند. مطابق شکل شماره 9، طرح اختلاط شاهد در سنین 28 روز به بعد تحت درجه بندی کیفیت عالی قرار می گیرند. نتایج نشان می دهد در سن 28 روز نگهداری طرح های REF-C0، SCEC-50، SCEC-60، SCEC-70، SCEC-80، SCEC-100 و به ترتیب تحت درجه بندی عالی، خوب، خوب، متوسط، متوسط و ضعیف قرار می گیرند. بر اساس نتایج، مقادیر UPV الگوی تقریباً مشابهی در مقایسه با آزمایش مقاومت فشاری از خود نشان داده است. به طور کلی، جایگزینی خاک رس در بتن خاکی خودمتراکم منجر به سرعت پالس کمتری نسبت به بتن شاهد می گردد. بر اساس نتایج، زمانی که 50 درصد سیمان با خاک رس در نمونه شاهد جایگزین شود، نتایج سرعت موج، به ترتیب به میزان 10/6، 9/29، 13/93، 17/31 و 18/61٪ برای سنین نگهداری 7، 28، 56، 90 و 180 روز کاهش یافت. دلیل این میزان کاهش را می توان به تخلخل بالای بتن خاکی و عدم همگنی به دلیل جایگزینی سیمان با خاک رس نسبت داد. با توجه به نتایج، افزایش میزان جایگزینی خاک رس با سیمان منجر به کاهش مقادیر UPV می گردد.



شکل 9: نتایج آلتراسونیک برای مخلوط های بتنی مورد مطالعه در سنین مختلف نگهداری

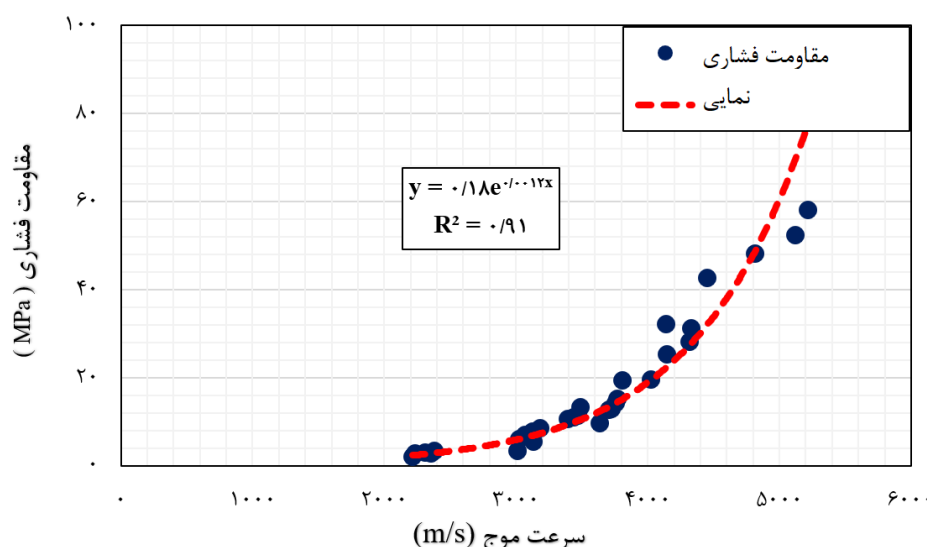
4-4-1 رابطه مقاومت فشاری و UPV

در این بخش، مقادیر UPV نمونه های بتن خاکی خودمتراکم با نتایج مقاومت فشاری با استفاده از تحلیل رگرسیون مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات پیشین، به طور کلی پذیرفته شده است که سرعت پالس مستقل از ابعاد نمونه های بتنی می باشد [43]. بر این اساس، برازش منحنی نمایی انجام گردید و میزان R^2 تعیین شد. همانطور که در شکل شماره 10 مشهود است، رابطه قوی بین

مقاومت فشاری و نتایج UPV برای نمونه‌های بتن خاکی خودمتراکم با $R^2 = 0/91$ برقرار می‌باشد. مطابق شکل 10، با افزایش میزان مقاومت فشاری، سرعت موج نیز افزایش می‌یابد. این روند مثبت منطبق بر نتایج بخش‌های پیشین می‌باشد. بر اساس نتایج رگرسیون، معادله (1) رابطه بین مقاومت فشاری و سرعت پالس را در بتن خاکی خودمتراکم پیشنهاد می‌گردد.

$$C = 0.195e^{0.0012x} \quad (1)$$

که در آن C نشان دهنده مقاومت فشاری بر حسب MPa و U نشان دهنده مقادیر UPV بر حسب متر بر ثانیه است. معادله فوق را می‌توان به طور موثر برای تخمین مقاومت فشاری با انجام آزمایش غیر مخرب آلتراسونیک در بتن‌های خاکی خودمتراکم استفاده نمود.

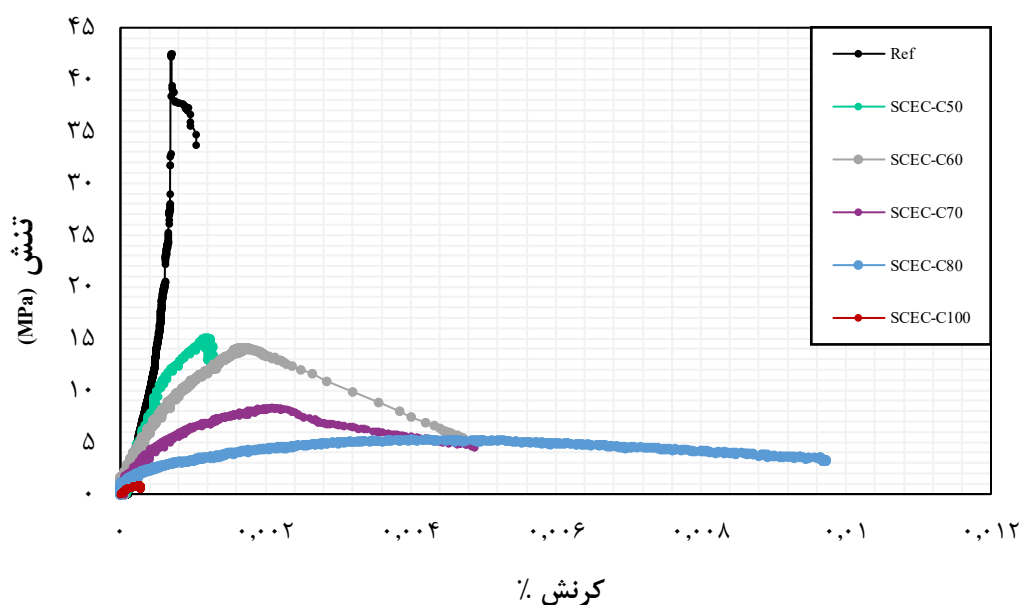


شکل 10: نمودار رابطه مقاومت فشاری و مقادیر UPV نمونه‌های بتن خاکی خودمتراکم

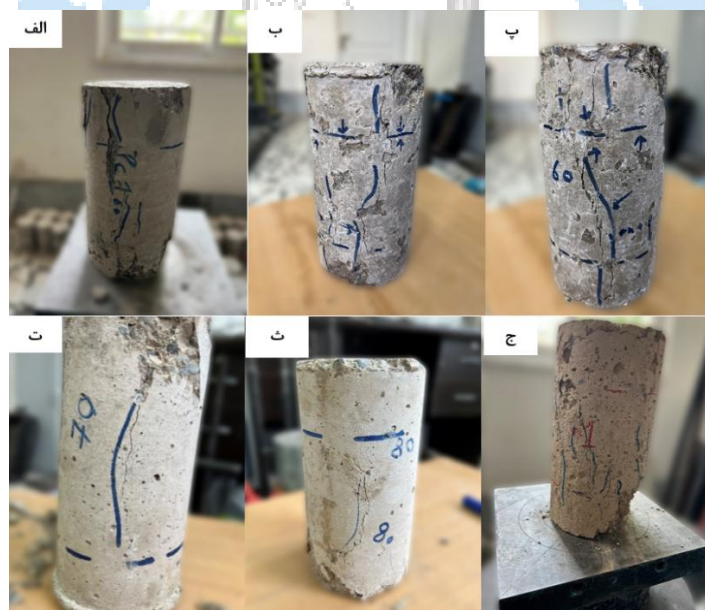
4-5 رفتار تنش - کرنش نمونه‌های بتن خاکی خودمتراکم

به منظور درک بهتر رفتار بتن خاکی خودمتراکم، آزمایش تنش-کرنش برای انواع طرح‌های اختلاط در سن نگهداری 28 روز، انجام گردیده و متوسط 3 نمونه برای هر طرح اختلاط به عنوان منحنی تنش-کرنش در شکل شماره 11 نشان داده شده است. منحنی تنش-کرنش را می‌توان به سه بخش کلی تقسیم نمود: (1) بخش الاستیک (2) بخش الاستو-پلاست (3) بخش پلاستیک. در مرحله اولیه بارگذاری، رابطه بین تنش و کرنش خطی می‌باشد [44]. بر اساس نتایج، شیب منحنی که نشان دهنده مدول ارتجاعی می‌باشد، در طرح اختلاط شاهد دارای مقادیر بیشتری نسبت به دیگر طرح‌های اختلاط می‌باشد. بر اساس نتایج، شیب منحنی تنش-کرنش با افزایش میزان رس کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد در بتن‌های خاکی خودمتراکم، افزایش بار محوری موجب رشد سریع نرخ کرنش نسبت به نرخ تنش می‌گردد و روند منحنی تنش-کرنش را به حالت غیر خطی هدایت می‌نماید. در این مرحله، انحنای نمودار با افزایش درصد جایگزینی رس و کاهش محتوای سیمان، کاهش می‌یابد. ولی با این حال، مشاهده می‌گردد که انحراف مربوط به بار نهایی با افزایش محتوای خاک رس از 50٪ به 80٪ افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، شیب اولیه کوچکتر (یعنی مدول ارتجاعی) و تنش اوج کمتر (یعنی مقاومت فشاری) منحنی تنش-کرنش برای نمونه SCEC-C80 در مقایسه با نمونه SCEC-C50، نشان دهنده عملکرد مقاومتی پایین خاک رس در ماتریس سختی بتن خاکی خودمتراکم، اما در جهتی دیگر نشان دهنده تأثیر رس در افزایش شکل‌پذیری بتن می‌باشد. در شکل شماره 12، نحوه شکست و افزایش ترک در همه نمونه‌های تحت آزمایش تنش-کرنش نشان داده شده است. بر اساس نتایج، SCEC-C50 تعداد بیشتری ترک در مقایسه با نمونه SCEC-C80 دارد که می‌توان آن را به ظرفیت بالای بتن‌های خاکی خودمتراکم با محتوای بیشتر خاک رس برای اتلاف انرژی نسبت داد. 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 رس تأثیر زیادی بر منحنی تنش-کرنش دارد و این میزان در بیشترین کرنش قابل تحمل نمود بیشتری دارد.



شکل 11: منحنی تنش-کرنش نمونه بتن شاهد و نمونه‌های بتن خاکی خودمتراکم



شکل 12: نحوه شکست و گسترش ترک در نمونه‌های تحت آزمایش تنش-کرنش. (الف) Ref-c0، (ب) SCEC-C50، (پ) SCEC-C60، (ت) SCEC-C70، (ث) SCEC-C80، و (ج) SCEC-C100

4-5-1 کرنش نهایی و مدول ارتجاعی

مدول ارتجاعی (E) و کرنش متنظر با مقاومت فشاری غالب (ε)، در جدول 5 نشان داده شده است. مدول ارتجاعی بتن بر اساس استاندارد ملی شماره 525 ایران، مطابق رابطه شماره 2 محاسبه گردیده است.

$$E = (S_2 - S_1) / (\varepsilon_2 - 0 / 00005) \quad (2)$$

که در آن، E: مدول ارتجاعی بر حسب MPa، S_2 : تنش وارده بر 40٪ بار نهایی، S_1 : تنش وارده متناظر با کرنش طولی 0/00005، بر حسب MPa، ε_2 : کرنش طولی ایجاد شده توسط تنش S_2 می‌باشد.

به طور کلی، ε با تغییر محتوای رس تغییر می‌کند و می‌توان نتیجه گرفت که ε_c با افزایش میزان رس رابطه مستقیم دارد. بر اساس نتایج، ε مربوط به طرح اختلاط SCEC-C50، به میزان 71/42٪ درصد بیشتر از نمونه REF-C0 می‌باشد. که به واسطه E کمتر، منجر به ε بالاتر می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد، تغییرات E در میزان جایگزینی رس‌های مختلف روندی کاهشی دارد. برای مثال، با جایگزینی 50 درصد خاک رس در مخلوط SCEC-C50، مدول ارتجاعی نسبت به مقدار متناظر در نمونه REF-C0 به میزان 32/89٪ کاهش می‌یابد. لذا، هر چه میزان جایگزینی رس در بتن خاکی خودمتراکم بیشتر شود، E کمتر می‌شود.

جدول 5: مشخصات مدول ارتجاعی و کرنش ماکزیمم نمونه‌ها

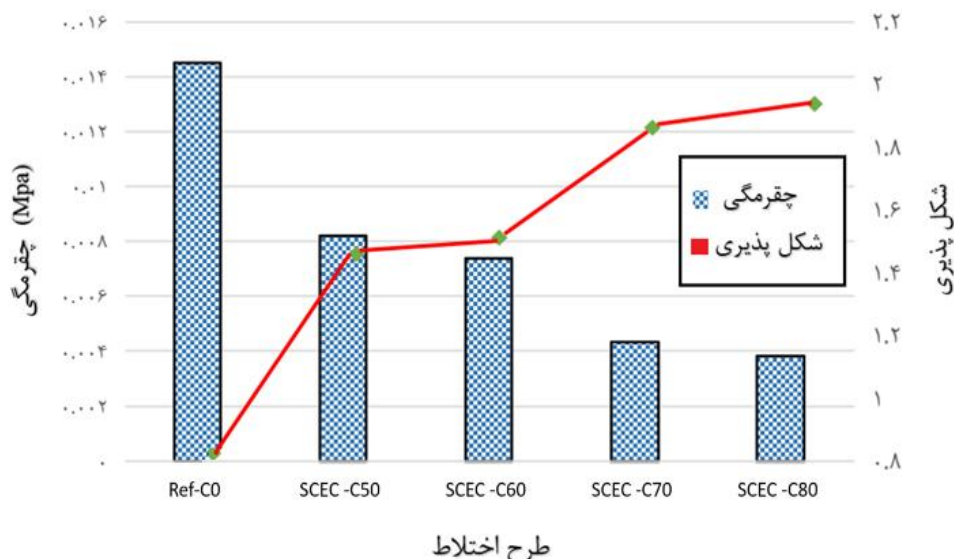
بیشینه کرنش (% EC)	مدول ارتجاعی (MPa)	طرح اختلاط
0/0007	37027/52	Ref-c0
0/0012	21644/44	SCEC-C50
0/0017	14518/73	SCEC-C60
0/0021	12212/76	SCEC-C70
0/0054	12212/76	SCEC-C80
0/0002	28149/93	SCEC-C100

4-5-2 چقرمگی و شکل پذیری

پر واضح است، چقرمگی (ظرفیت جذب انرژی بتن) نمونه‌های بتنی به به واسطه محاسبه سطح زیر منحنی تنش - کرنش تا بیشترین تنش محاسبه می‌گردد [45 و 46]. شکل 13 مقادیر چقرمگی و شکل پذیری را برای نمونه‌های شاهد و بتن‌های خاکی خود متراکم، نشان داده است. بر اساس نتایج، میزان چقرمگی در بتن SCEC-C50 (با جایگزینی 50 درصد سیمان با خاک رس)، 43٪ کاهش یافته است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش جایگزینی رس بیش از 60 درصد، سرعت کاهش چقرمگی کاهش می‌یابد. کاهش چقرمگی به طور کلی به کاهش تنش ناحیه پلاستیک بتن مرتبط می‌باشد. بر اساس نتایج، با افزایش میزان جایگزینی 60، 70 و 80٪ خاک رس، به ترتیب موجب کاهش 50، 72 و 78٪ میزان چقرمگی نسبت به بتن شاهد می‌گردد. در نتیجه، پیشنهاد می‌گردد برای استفاده از بتن خاکی خودمتراکم در المان‌های سازه‌ای و پرکننده، میزان ظرفیت جذب انرژی مورد انتظار المان مورد توجه قرار گیرد و بر اساس آن میزان جایگزینی خاک رس محدود گردد. نحوه تعیین شکل پذیری، همانطور که توسط Youssf و همکاران توصیه شده است [47]، بنابر نسبت کرنش نهایی در 80 درصد تنش نهایی به کرنش تسلیم در 0/65 تنش نهایی محاسبه گردیده است. نتایج نشان داد، استفاده از خاک رس در بتن باعث بهبود شکل پذیری می‌گردد. بر اساس شکل 13، با جایگزینی 50، 60 و 70 و 80٪ خاک رس، میزان شکل پذیری به ترتیب 80، 92، 126 و 139٪ افزایش یافته است. در بتن خاکی به دلیل وجود خاک رس و مقادیر کمتر سیمان، دارای ناحیه انتقال سطحی (ITZ¹¹) ضعیف تری می‌باشد که موجب شکل پذیری بیشتر و شکنندگی کمتر بتن می‌شود. بنابراین، جذب انرژی بالاتری را می‌توان برای بتن‌های خاکی خودمتراکم، با مقدار بالای خاک رس متصور بود. جذب بالای انرژی، موجب افزایش ناحیه پس از اوج در بتن خاکی با جایگزینی مقادیر بالاتر خاک رس می‌گردد. از نتایج می‌توان چنین استنباط نمود که، رفتار نرم شدگی پس از اوج طرح اختلاط شاهد با

¹¹ Interfacial Transition Zone

شیب تند صورت می‌پذیرد. در نتیجه، بتن حاوی سیمان بیشتر، شکننده تر می‌باشد. از این رو استفاده از بتن حاکی خودمتراکم در ساخت المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای با رعایت مباحث مقاومتی، در مناطق دارای پتانسیل بارگذاری دینامیکی نظیر باد و زلزله که نیازمند شکل‌پذیری کافی جهت میرا نمودن انرژی وارده می‌باشند، پیشنهاد می‌گردد.



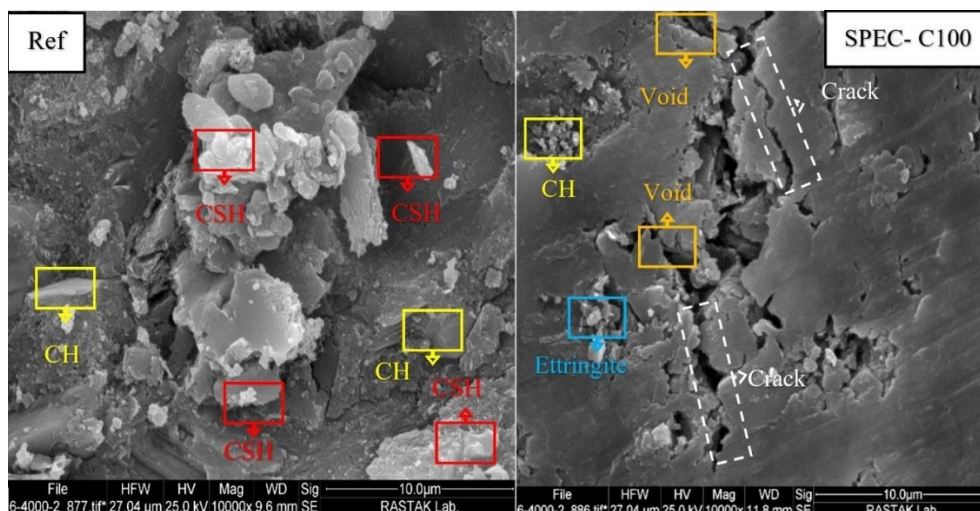
شکل 13: مقادیر چقرمگی و شکل‌پذیری برای نمونه‌های شاهد و بتن‌های حاکی خودمتراکم

6-4 ریزساختار بتن

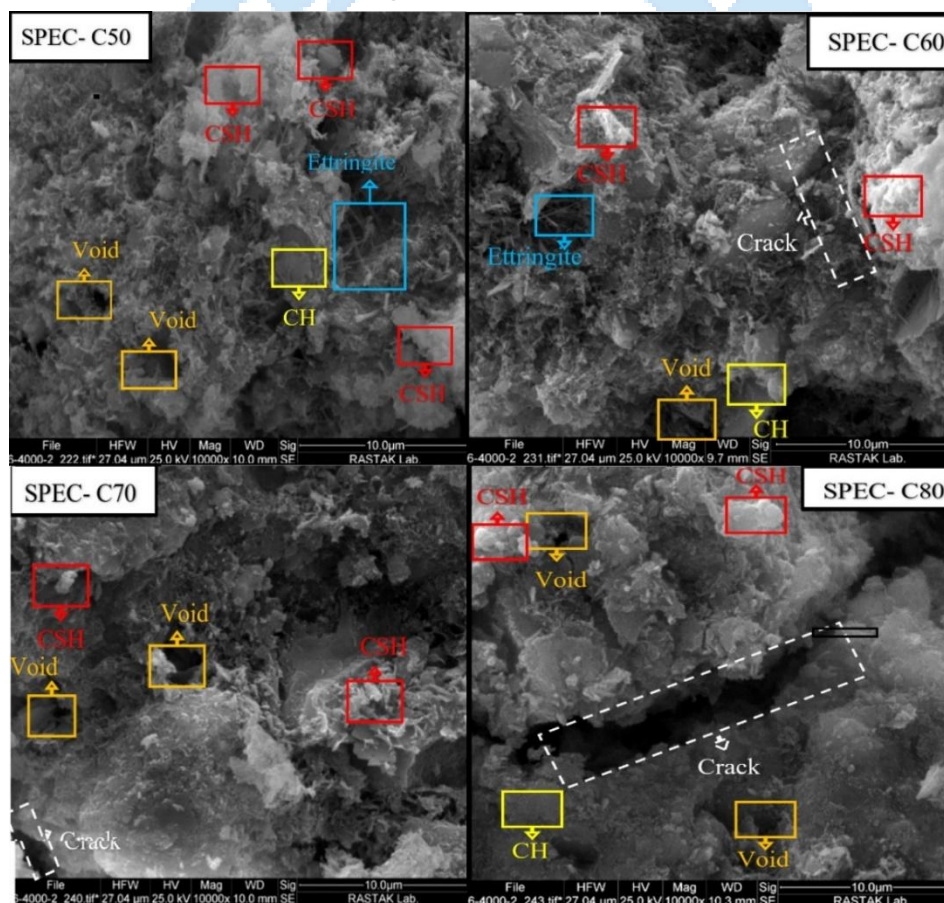
4-6-1 تحلیل تصاویر FESEM

در این مطالعه، ریزساختار نمونه‌های مختلف بتن حاکی خودمتراکم در سن 28 روز نگهداری در شکل‌های 14 و 15 ارائه شده است. تصاویر SEM در بزرگنمایی 10 هزار برابر و با نوار مقیاس 10 میکرومتر از نمونه‌ها تهیه گردیده است. با استفاده از تحلیل تصاویر FESEM، می‌توان فازهای CH، CSH و Ettringite های سوزنی شکل در خمیر سیمانی را شناسایی نمود. با توجه به درصد جایگزینی مختلف، سطح توزیع، اندازه و حجم فازها در هر طرح متمایز بوده است [48]. بر اساس نتایج مشاهده شده در شکل 14، ریز ساختار نمونه شاهد (REF-C0) ساختاری متراکم و غیرمتخلخل را نسبت به دیگر نمونه‌ها که جایگزینی خاک رس با سیمان در آنها انجام شده، نشان می‌دهد. بنابراین، بیشترین تعداد منافذ بزرگ در نمونه حاوی 100٪ رس مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که ریزترک در نمونه‌های SCEC-C100 با محتوای 100 درصد رس به دلیل وجود Ettringite که به عنوان یک عامل انبساط پذیر عمل می‌کند، مشاهده می‌گردد. بر اساس نتایج، وجود خاک رس در تشکیل فازهای ذکر شده در نمونه‌ها موثر است. با افزودن محتوای خاک رس در نمونه‌های بتن حاکی خودمتراکم، موجب افزایش فضاها توخالی (Void) و ترک (Crack) می‌گردد. و این عوامل برای طرح‌های با میزان رس بیشتر نظیر SCEC-C100 به اوج خود می‌رسد. بر اساس نتایج شکل 15، محتوای خاک رس با تشکیل پیوندهایی موجب شکل‌گیری فازهای CH، CSH جهت چسبندگی بین سنگدانه‌ها و ایجاد ناحیه انتقال سطحی (ITZ) هر چند ضعیف، نسبت به نمونه شاهد (REF-C0) می‌گردد. علاوه بر این، تصاویر تحلیل عنصری (EDAX-MAP) عناصر مختلف نظیر کلسیم، سیلیس، اکسیژن، آلومینیوم و کربن برای انواع طرح‌های بتن حاکی خودمتراکم در شکل‌های شماره 16 و 17 نشان داده شده است. بر اساس نتایج تحلیل عنصری نمونه‌های شاهد (REF-C0) و SCEC-C100 (شکل 16)، با جایگزینی رس 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 50٪ تا 80٪ جایگزینی سیمان موجب کاهش میزان کربن، کاهش

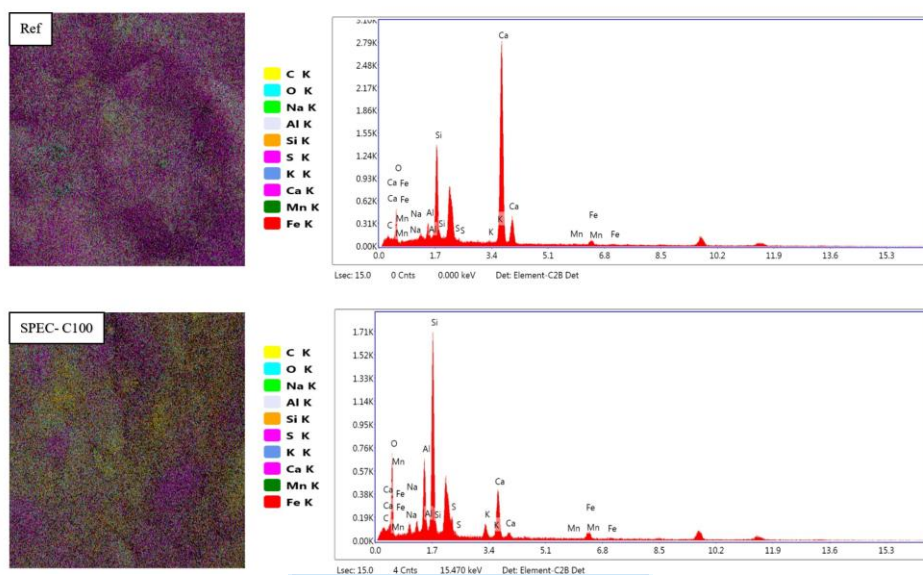
آهن، اکسیژن و افزایش سیلیس می‌گردد. همانطور که در نتایج مقاومت‌های مکانیکی مشاهده گردید، با افزودن میزان خاک رس مقاومت مکانیکی بتن حاکی خودمترکم کاهش می‌یابد، اما سرعت کاهش مقاومت در محتوای بالای رس روند نزولی دارد. لذا نتایج نشان داده شده در تحلیل عنصری تطابق خوبی با نتایج مقاومت مکانیکی نمونه‌ها داشته است.



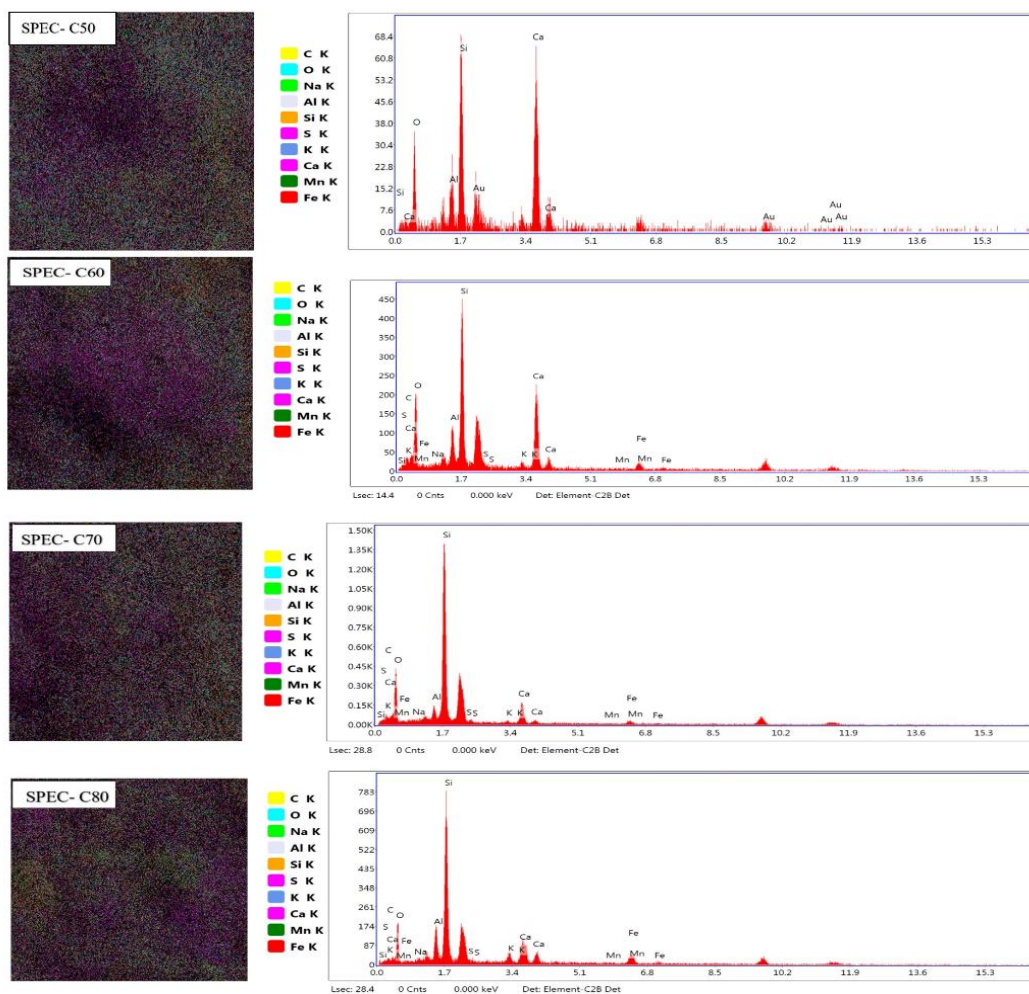
شکل 14 : تصاویر ریزساختار تحلیل FESEM برای طرح‌های اختلاط شاهد و SPEC- C100



شکل 15 : تصاویر ریزساختار تحلیل FESEM برای طرح‌های اختلاط SPEC- C80، SPEC- C70، SPEC- C60، SPEC- C50



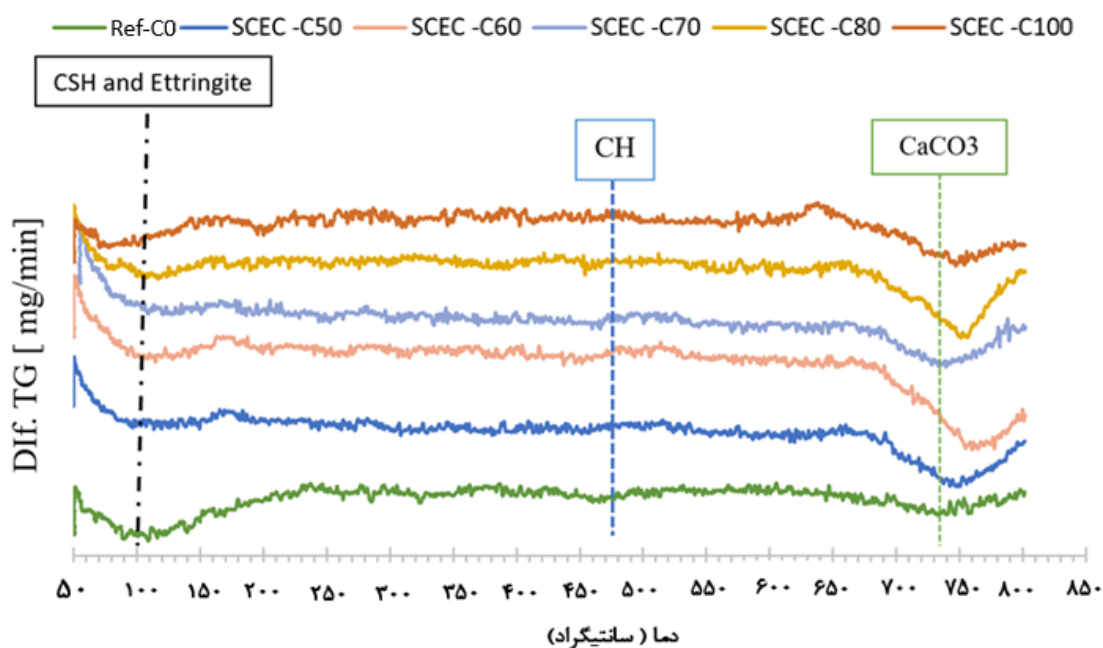
شکل 16: نقشه تحلیل عنصری (EDAX-MAP) نمونه‌های REF-C0 و SPEC-100 به تفکیک عناصر موجود



شکل 17: نقشه تحلیل عنصری (EDAX-MAP) نمونه‌های SPEC-80، SPEC-70، SPEC-60، SPEC-50 به تفکیک عناصر موجود

4-6-2 تحلیل ترموگراویمتری TGA

شکل 18 مشتق تحلیل ترموگراویمتری نمونه‌های مختلف بتن خاکی خودمتراکم را در سن نگهداری 28 روزه نشان می‌دهد. در این مطالعه، محدوده تغییر دما برای تحلیل ترموگراویمتری در محدوده 50 تا 800 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. به طور کلی، مقدار حداکثر تغییر جرمی در 100 درجه سانتی‌گراد به دلیل تجزیه Ettringite و CSH است. همچنین، تجزیه پورتلاندیت (CH) منجر به مقدار اوج تغییر جرمی در محدوده 400-500 درجه سانتی‌گراد می‌گردد. علاوه بر این، تجزیه CaCO_3 بین 550 تا 750 درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. تغییر جرم زیر 550 درجه سانتی‌گراد در مخلوط‌های مختلف خمیر سیمان عمدتاً به دلیل از دست دادن جرم ناشی از تبخیر آب در دماهای پایین است که به دو آب مختلف طبقه بندی می‌شوند: 1) آب قابل تبخیر (کمتر از 105 درجه سانتی‌گراد) و 2) آب غیرقابل تبخیر (بیشتر از 105 درجه سانتی‌گراد). عمده تغییر جرم در دمای 550 درجه سانتی‌گراد و بالاتر از آن مربوط به افت جرمی ناشی از انتشار باشد [49]. همانطور که در شکل 18 نشان داده شده است، مقدار پیک در حدود 100 درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های SCEC-100 و SCEC-80، کمتر از سایر طرح‌ها است، که نشان دهنده عدم تشکیل کامل CSH می‌باشد. برعکس، نمونه شاهد پیک‌های تیز را در حدود 100 درجه سانتی‌گراد (تجزیه CSH) در مقایسه با سایر طرح‌ها را دارد که نشان دهنده وجود مقادیر بالای ساختار CSH و CH در این طرح می‌باشد. نتایج تحلیل ترموگراویمتری نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که دو پیک تجزیه نسبت به Ca(OH)_2 و CSH از منظر مقاومت فشاری تاثیر گذار هستند. با توجه به شکل 18، مقدار پیک تجزیه CSH در همه مخلوط‌ها به جز مخلوط SCEC-100 بیشتر از مقدار پیک تجزیه Ca(OH)_2 می‌باشد. این واقعیت نشان دهنده تبدیل Ca(OH)_2 به CSH در روند هیدراتاسیون سیمان است. نتایج نشان داده است که، در دمای حدود 400-500 درجه سانتی‌گراد، کاهش مقدار CH در نمونه شاهد بیشتر می‌باشد. می‌توان استنباط نمود که با کاهش میزان سیمان میزان تولید CH کاهش می‌یابد و نمودار حالت افقی خود را حفظ می‌نماید. بر اساس نتایج، با افزایش محتوای رس در طرح‌های اختلاط، شاهد افزایش تغییر جرم در دمای حدود 750 درجه سانتی‌گراد که حاصل تجزیه CaCO_3 می‌باشد، می‌گردد. CaCO_3 عامل اصلی تولید CO_2 می‌باشد و همانطور که انتظار می‌رود با افزایش محتوای خاک رس، شاهد کاهش تولید گاز CO_2 باشیم و خاک رس به واسطه صفحات چندوجهی خود مانع تجزیه CaCO_3 می‌گردد. نتایج تحلیل ترموگراویمتری نشان می‌دهد با افزایش میزان محتوای خاک رس، محصولات هیدراتاسیون نظیر CSH و CH کاهش یافته و منطبق بر نتایج مقاومت مکانیکی می‌باشد.



شکل 18: تحلیل ترموگراویمتری مخلوط‌های مورد مطالعه در بازه 50 تا 800 درجه سانتی‌گراد

4-7 تاثیرات محیط زیستی بتن خاکی

برای ارزیابی چرخه عمر (LCA¹²) از منبع داده Ecoinvent³ در نرم افزار SimaPro، که بیش از 10000 فرایند کلی را در منبع خود دارد، استفاده شده است. این منابع شامل انرژی، حمل و نقل، ساخت، مواد شیمیایی، کشاورزی، محصولات پاک کننده و صنایع مدیریت زباله است [50]. در مرحله تولید، فرایندهایی شامل استخراج مواد خام، حمل و نقل مواد به کارخانه و فرآوری و تولید مواد تشکیل دهنده پایه در نظر گرفته شده است. میزان تولید گاز CO₂ توسط انواع مصالح مورد استفاده، در جدول 6 برای تمامی مخلوط‌های بتنی مورد مطالعه نشان داده شده است. بر اساس نتایج، بیشترین نقش تولید CO₂ در فرایند تولید بتن مربوط به سیمان می‌باشد. مطابق جدول 6 ضریب تاثیر سیمان (Cement impact Index) برای همه طرح‌های اختلاط محاسبه گردیده است. که این میزان آن در بتن شاهد به 93/71٪ از کل CO₂ تولید شده می‌باشد. میزان تولید گاز CO₂ توسط سیمان در طرح‌های SCEC-C50، SCEC-C60، SCEC-C70، SCEC-C80، و SCEC-C100 به ترتیب، 84/6، 81/7، 73/96، 64/08 و 0٪ از کل گاز تولید شده، می‌باشد. نتایج مقاومت فشاری نشان دادند که با جایگزینی 50 درصد خاک رس به جای سیمان در بتن خاکی خودمتراکم، امکان دستیابی به مقاومت‌های حدود 20 MPa (28 روز نگهداری) که محدوده بسیاری از آیین‌نامه‌ها برای استفاده از بتن در المان‌های سازه‌ای می‌باشد را فراهم نموده است. لذا بر اساس ارزیابی چرخه عمر (جدول 6)، طرح SCEC-C50، علاوه بر کاهش گاز CO₂ به میزان 44٪، می‌تواند در ساخت المان‌های سازه‌ای به همراه مزایای بتن خودمتراکم نظیر عبور از فضاهای متراکم از میلگردها پیشنهاد گردد. به علاوه طرح‌های اختلاط SCEC-C80، SCEC-C60 دارای مقاومت فشاری بین 6 تا 12 MPa در سن 28 روز نگهداری، می‌توانند در ساخت المان‌های مختلف غیر سازه‌ای نظیر دیوارها و بلوک‌های خاکی و ... که نیازمند مقاومت‌های بالا نمی‌باشد، استفاده نمود. همچنین طرح حاوی 100 درصد خاک رس (SCEC-C100) در سنین بالا (180 روز نگهداری) به مقاومت فشاری 3/27 MPa می‌رسد که استفاده از آن را در المان‌های کم اهمیت امکانپذیر می‌نماید. بر اساس نتایج بررسی چرخه عمر، در حالی که امروزه در کشورهای توسعه یافته استفاده از بتن‌های دارای عیار سیمان بالا مرسوم است، پیشنهاد استفاده از طرح‌های اختلاط بتن خودمتراکم خاکی می‌تواند برای کاهش تولید گاز CO₂ و نیل به اهداف اساسی این پژوهش راهگشا می‌باشد.

جدول 6: میزان CO₂ تولید شده در 1 متر مکعب از بتن‌های خاکی خودمتراکم مورد مطالعه

طرح اختلاط	REF-C0	SCEC-C50	SCEC-C60	SCEC-C70	SCEC-C80	SCEC-C100
سیمان	417	208	167	125	83/3	0
خاک رس	0	2/23	2/67	3/12	3/57	4/46
ماسه	9/27	9/27	2/27	2/27	2/27	2/27
شن	14/2	14/2	14/2	14/2	14/2	14/2
روان کننده	5/21	5/21	5/21	5/21	5/21	5/21
جمع کل	445	246	206	169	130	53/4
ضریب تاثیر سیمان	93/71	84/6	81/7	73/96	64/08	0

5- مقایسه نتایج

یکی از موارد مهم این پژوهش بررسی و انتخاب رس بهینه قبل از ساخت بتن خاکی خودمتراکم از بین 3 نوع خاک رس مختلف بوده است. همچنین نتایج پژوهش حاضر مطابق تحقیق پژوهشگران نشان داد که جایگزینی خاک رس با سیمان موجب کاهش مقاومت فشاری می-

¹² Life Cycle Analysis

گردد. اما میزان کاهش بواسطه خواص هیدراتاسیون بلند مدت خاک رس بهینه و طرح اختلاط‌های پیشنهادی روند بهتری داشت. همچنین نتایج مقاومت فشاری با نتایج کهن‌دل‌نیا و همکاران در خصوص تاثیر بلند مدت خاک رس صدق می‌نمود. همچنین، نتایج نشان داد، طرح اختلاط SCEC-C50 می‌تواند در اهداف سازه‌ای مورد استفاده قرار گیرد که در هیچ پژوهشی تا به امروز بتن حاکی خودمتراکم سازه‌ای پیشنهاد نشده بود. نتایج آلتراسونیک حاکی از کاهش سرعت پالس با افزایش میزان خاک رس، مطابق نتایج همکاران داشته است و انواع طرح اختلاط از لحاظ کیفیت در دسته بندی های مختلفی قرار گرفتند، که می‌تواند نسبت به تحقیقات گذشته قضاوت بهتری نسبت به طرح های اختلاط پیشنهادی ارائه نماید. نتایج چرخه عمر نیز نشان داد که افزایش میزان جایگزینی خاک رس با سیمان، در طرح های پیشنهادی تاثیر قابل ملاحظه تری در کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نسبت به نتایج هوانگ و همکاران داشته است.

6- نتیجه گیری

با توجه به تاثیر موثر جایگزینی سیمان با خاک رس در جهت کاهش اثرات زیست‌محیطی بتن، در این تحقیق مطالعه آزمایشگاهی جامعی جهت بررسی رفتار مکانیکی، ریزساختار و چرخه عمر زیست محیطی بتن حاکی خودمتراکم انجام شده است. پس از ساخت بتن‌های حاکی خودمتراکم با جایگزینی خاک رس بهینه با محتوای سیمان، خواص مکانیکی، ریز ساختار و مطالعات چرخه عمر طرح‌های اختلاط بتنی به منظور امکان سنجی استفاده از بتن حاکی خودمتراکم در المان‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. عمده نتایج به شرح ذیل می‌باشد.

1. بر اساس نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های خمیر سیمان- خاک و مشخصات شیمیایی رس‌های پیشنهادی، خاک رس نوع I با توجه به میزان مقاومت فشاری بالاتر و ساختار شیمیایی مطلوب، به عنوان رس بهینه انتخاب گردید و جهت ساخت طرح-های اختلاط بتن حاکی از آن استفاده شد.
2. در حالت کلی افزایش جایگزینی خاک رس با سیمان، موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها گردید. نتایج نشان داد که در سن نگهداری 28 روز، با جایگزینی 50، 60، 70، 80 و 100٪ خاک رس با سیمان به ترتیب شاهد 54، 69، 75، 85، 93٪ کاهش مقاومت می‌باشد. نتایج نشان داد که میزان کاهش مقاومت فشاری نسبت به میزان جایگزینی، روند ثابتی ندارد و خاک رس به‌واسطه خواص شیمیایی و ایجاد پیوندهایی در مدت نگهداری بالاتر موجب افزایش پیوستگی و افزایش مقاومت فشاری می‌گردد. بدین ترتیب میزان کاهش مقاومت فشاری در سن 180 روز نگهداری برای درصد‌های جایگزینی 50، 60، 70، 80، 100٪، به ترتیب 49، 68، 74، 84، 92٪ می‌باشد که نشان می‌دهد مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاکی خود-متراکم متأثر از زمان نگهداری می‌باشند و می‌توان مقاومت بیشتری را در سنین بالاتر از بتن حاکی خودمتراکم انتظار داشت.
3. به طور کلی با افزایش میزان جایگزینی خاک رس، میزان تخلخل بتن افزایش، سرعت موج عبوری از آن کاهش و کیفیت بتن کاهش می‌یابد. برای بتن SCEC-C50 با 50 درصد جایگزینی رس با سیمان، موجب کاهش سرعت موج برشی به میزان 9/2٪ در سن نگهداری 28 روز می‌گردد. این میزان برای بتن حاکی حاوی 100 درصد سیمان به 54٪ هم رسیده است. بر اساس نتایج، بین مقاومت فشاری و مقادیر آزمایش آلتراسونیک بر مبنای رگرسیون خطی ($R^2 = 0/91$) رابطه‌ای مستقیم وجود دارد.
4. نتایج آزمایش تنش-کرنش بتن حاکی خودمتراکم نشان داد که با افزایش میزان جایگزینی خاک رس، کرنش نهایی قابل تحمل بتن افزایش می‌یابد. این افزایش در مقادیر جایگزینی 50، 60، 70، 80٪ خاک رس به ترتیب 41، 58، 66، 87٪ نسبت به بتن شاهد (REF-C0) می‌باشد که نشان دهنده تاثیر خاک رس در نرخ افزایش کرنش نهایی قابل تحمل بتن حاکی خودمتراکم می‌باشد. از طرفی، نتایج نشان داد، تغییرات مدول الاستیسیته با جایگزینی 50، 60، 70، 80٪ خاک رس با سیمان، به ترتیب 41، 61، 67، 67٪ نسبت به بتن شاهد (REF-C0) کاهش می‌یابد. بر اساس تفسیر نتایج، مدول

الاستسیته بتن با افزایش میزان جایگزینی، کاهش می‌یابد اما این میزان کاهش، خطی نمی‌باشد و مدول الاستسیته در محتوای رس بالاتر با سرعت کمتری کاهش می‌یابد.

5. بر اساس نتایج این پژوهش، شکل پذیری و چقرمگی با افزایش میزان خاک رس، به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. نتایج نشان داد که بتن حاوی 50٪ جایگزینی خاک رس، موجب افزایش 66٪ شکل پذیری و کاهش 75٪ چقرمگی نسبت به بتن شاهد (REF-C0) می‌گردد. در نتیجه، برای استفاده از بتن خاکی خودمتراکم در المان‌های سازه‌ای، علاوه بر مقاومت‌های مکانیکی، باید رفتار شکل پذیری به همراه توانایی جذب انرژی، خصوصاً در مناطق زلزله خیز بررسی گردد. به طور کلی، بتن SCEC-C50 علاوه بر داشتن حداقل‌های مقاومتی، دارای مدول ارتجاعی، چقرمگی و شکل پذیری مناسب می‌باشد.

6. بررسی تصاویر FESEM بتن خاکی خودمتراکم نشان می‌دهد، که با افزایش میزان درصد خاک رس، میزان محصولات هیدراتاسیون نظیر ژل CSH و CH کاهش یافته و میزان فضای خالی و ترک افزایش می‌یابد. افزایش فضای خالی و ریز ترک‌ها با افزایش میزان رس، به دلیل وجود Ettringite به عنوان یک عامل انبساط کننده، انطباق مناسبی با نتایج مقاومت های مکانیکی داشته است. همچنین، خاک رس با تشکیل پیوندهای داخلی موجب شکل گیری فازهای محدود CSH، CH جهت چسبندگی بین سنگدانه‌ها و ایجاد ناحیه انتقال سطحی (ITZ) ضعیف، نسبت به نمونه شاهد (REF-C0) می‌شود.

7. نتایج آزمایش ترموگراویمتری نشان داد که مقدار حداکثر تغییر جرمی که در 100 درجه سانتی‌گراد به دلیل تجزیه Ettringite و ژل CSH رخ می‌دهد، در نمونه شاهد REF-C0 بیشترین مقدار و در SCEC-C100 کمترین مقدار را دارا می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج، تجزیه CaCO_3 که در دمای حدود 750 درجه سانتی‌گراد با افزایش محتوای خاک رس، افزایش می‌یابد که نشان دهنده توانایی بالای طرح‌های اختلاط بتن خاکی خودمتراکم در نگه داشتن CaCO_3 و عدم تبدیل آن به CO_2 می‌باشد.

8. بر اساس نتایج چرخه عمر، نقش محتوای سیمان در تولید گاز CO_2 ، قابل توجه می‌باشد و این مقدار در بتن شاهد به 94٪ کل تولید CO_2 می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد، درصد کاهش تولید گاز CO_2 در بتن‌های خاکی خودمتراکم پیشنهادی در این پژوهش در محدوده 33٪ تا 88٪ می‌باشد. با توجه به گرمایش زمین و نقش 8 درصدی صنعت سیمان در تولید گازهای گلخانه‌ای، پیشنهاد استفاده از بتن خاکی و کاهش میزان وابستگی به سیمان در صنعت ساختمان می‌تواند نقش عمده‌ای در کاهش گازهای گلخانه‌ای نظیر CO_2 داشته باشد.

بر اساس نتایج این تحقیق، طرح‌های پیشنهادی بتن خودمتراکم خاکی علاوه بر رفع ضعف‌های مقاومتی، اجرایی و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای بتن‌های معمولی می‌توانند، در ساخت المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای (پرکننده) استفاده گردند. بر اساس نتایج مقاومت‌های مکانیکی و انطباق آن‌ها با تحلیل‌های ریزساختاری، می‌توان نتیجه گرفت که طرح اختلاط SCEC-C50 می‌تواند با کاهش بیش از 44٪ تولید گاز CO_2 و بر خورداری از مقاومت فشاری 28 روزه در حدود 20 MPa، به عنوان بتن سازه‌ای پیشنهاد گردد، مضاف بر اینکه طرح SCEC-C50 شکل پذیری المان را در برابر بارهای جانبی وارده نظیر زلزله و باد افزایش خواهد داد. بتن‌های SCEC-C60، SCEC-C70، SCEC-C80 با داشتن مزایای محیط زیستی فراوان و مقاومت‌های افزون بر 2 MPa، می‌توانند در نقش بتن‌های غیر سازه‌ای و پرکننده که مسئولیت حمل بار را بر عهده نداشته باشند، استفاده نمود. در مجموع، با استفاده از بتن‌های خاکی خودمتراکم علاوه بر کاهش خطر گرمایش زمین، اجرایی راحت تر و بتنی ارزان تر در اختیار خواهیم داشت. در ادامه پیشنهاد می‌گردد، پژوهشگران در بحث استفاده از این نوع بتن در المان‌های سازه‌ای نظیر تیرها و ... که تحت بارگذاری چرخه ای قرار دارد، تحقیق کنند. همچنین چرخه عمر مالی این بتن‌ها هم می‌تواند در این بحث راهگشا باشد.

قدردانی

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

مراجع

- [1] Pan, J. Wang, B. Wang, Q. Ling, X. Fang, R. Liu, et al. (2023). *Thickness of the shear band of silty clay-concrete interface based on the particle image velocimetry technique*. Construction and Building Materials, Elsevier. Vol. 388, pp. 131712.
- [2] Harvey, F. (2017). *Calls for greater fossil fuel divestment at anniversary of Paris climate deal*. The Guardian.
- [3] IPCC. (2022). *Global Warming of 15 °C*, Cambridge University Press. p. 1-24.
- [4] Rostan, P. Rostan, A. (2023). *The benefit of the Covid-19 pandemic on global temperature projections*. Journal of Forecasting, Wiley Online Library. Vol. 42, pp. 2079–98.
- [5] 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.
- [6] Davis, S. Lewis, N. Shaner, M. Aggarwal, S. Arent, D. Azevedo, I. et al. (2018), *Net-zero emissions energy systems*. Science, American Association for the Advancement of Science. Vol. 360, pp. 9793.
- [7] Miller, S. Horvath, A. Monteiro, P. (2016). *Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%*. Environmental Research Letters, IOP Publishing. Vol. 11, pp. 74029.
- [8] Saidi, M. Cherif, A.S. Zeghami, 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.
- [9] Samimi, K. Farahani, M. Pakan, M. Shirzadi Javid, 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, Springer. Vol. 46, pp. 1153–75.
- [10] 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
- [11] Xue, Z. Guo, J. Wu, S. Xie, W. Fu, Y. Zhao, X. et al. (2023). *Co-thermal in-situ reduction of inorganic carbonates to reduce carbon-dioxide emission*. Science China Chemistry, Springer. Vol. 66, pp. 1201–10.
- [12] Samimi, K. and Zareechian, M. (2022). *Chemical resistance of synthesized graphene-modified cement paste containing natural pozzolans to acid attack*. Journal of Building Engineering, Elsevier. Vol. 60, pp. 105174.
- [13] 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.
- [14] Van Damme, H. and Houben, H. (2018). *Earth concrete. Stabilization revisited*. Cement and Concrete Research, Elsevier. Vol. 114, pp. 90–102.
- [15] 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.
- [16] Samimi, K. Pakan, M. Eslami, J. (2023). *Investigating the compressive strength and microstructural analysis of mortar containing synthesized graphene and natural pozzolan in the face of alkali-silica reactions*. Journal of Building Engineering, Elsevier. Vol. 68, pp. 106126.
- [17] 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. 27, pp. 4026-4045.

- [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] Pachideh, G. Toufigh. V. (2021). *Strength of SCLC recycle springs and fibers concrete subject to high temperatures*. Structural Concrete, Wiley-Blackwell. Vol. 23, pp. 285-299.
- [20] Pachideh, G. Gholhaki, M. Rezaifar, O. (2021). *Experimental study on engineering properties and microstructure of expansive soils treated by lime containing silica nanoparticles under various temperatures*. Geotechnical and Geological Engineering, Springer. Vol. 114, pp. 90–102.
- [21] Imanzadeh, S. Jarno, A. Hibouche, A. Bouarar, A. Taibi, S. (2020). *Ductility analysis of vegetal-fiber reinforced raw earth concrete by mixture design*. Construction and Building Materials, Elsevier. Vol. 239, pp. 117829.
- [22] Fardoun, H. Saliba, J. Saiyouri, N. (2022). *Evolution of acoustic emission activity throughout fine recycled aggregate earth concrete under compressive tests*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Elsevier. Vol. 119, pp. 103365.
- [23] Kohandelnia, M. Hosseinpoor, M. Yahia, A. Belarbi, R. (2023). *Hygrothermal and microstructural characterization of self-consolidating earth concrete (SCEC)*. Journal of Building Engineering, Elsevier. Vol. 69, pp. 106287.
- [24] 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.
- [25] Shamas, Y. Nithin, H.C. 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.
- [26] Ouellet-Plamondon, C.M. Habert, G. (2016). *Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC): Proof-of-concept*. Journal of Cleaner Production, Elsevier. Vol. 117, pp. 160–8.
- [27] Huang, Z. Deng, W. Zhao, X. Zhou, Y. Xing, F. Hou, P. et al. (2023). *Shear design and life cycle assessment of novel limestone calcined clay cement reinforced concrete beams*. Struct. Concr. p. 5063–85.
- [28] ASTM D2487-17. (2017). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. p. 10.
- [29] ASTM C150. (2020). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM Int. p. 1–8.
- [30] ASTM C31 / C31M - 21a. (2021). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. ASTM International, Philadelphia. p. 1–7.
- [31] 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.
- [32] EFNARC, (2002). *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Farnham. UK. www.efnarc.org
- [33] ASTM C109 / C109M-21. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. ASTM International, Philadelphia. p. 17.
- [34] ASTM C39. (2016). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM. p. 3-4.
- [35] Hamada, H. Al-Attar, A. Tayeh, B. Yahaya, F. (2022). *Optimizing the concrete strength of lightweight concrete containing nano palm oil fuel ash and palm oil clinker using response surface method*. Case Studies in Construction Materials, Vol. 16, pp. e01061
- [36] ASTM C 597. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete*; American Society for Testing and Materials. p. 11.
- [37] 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.
- [38] Kirthika, M. Surya, S. K. Singh. (2019). *Effect of clay in alternative fine aggregates on performance of concrete*. Constr. Build. Mater. vol. 228. P 25.

- [39] Association Française du Génie Civil (AFGC). (2002). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. AFGC-SETRA. p. 11.
- [40] Bui, T. Le, M. Nguyen, T. Nguyen, X. Bui, T. Sarhosis, V. (2022). *Mechanical behaviour of novel "earth concrete" walls*. International Journal of Masonry Research and Innovation, Inderscience Publishers. Vol. 7, pp. 435–56.
- [41] González-López, J. Juárez-Alvarado, C. Ayub-Francis, B. Mendoza-Rangel, M. (2018). *Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks*. Construction and Building Materials, Elsevier Ltd. Vol. 163, pp. 179–88.
- [42] BIS 13311. (1992). *Non-destructive testing of concrete—Methods of Test-Part 1: Ultrasonic pulse velocity*. Bureau of Indian Standards New Delhi. pp. 21
- [43] Sasanipour, H. Aslani, F. (2019). *Effect of specimen shape, silica fume, and curing age on durability properties of self-compacting concrete incorporating coarse recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials, Elsevier Ltd. Vol. 228, pp. 117054.
- [44] 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.
- [45] Kim, Y.J. Ji, Y. (2017). *Axial Load-Bearing Concrete Confined with CFRP Sheets in Acidic Environment*. ACI Structural Journal, Vol. 114.
- [46] Nematzadeh, M. Baradaran-Nasiri, A. (2018). *Residual properties of concrete containing recycled refractory brick aggregate at elevated temperatures*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE. Vol. 30, pp. 4017255.
- [47] Youssf, O. Hassanli, R. Mills, J.E. (2017). *Mechanical performance of FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete containing high rubber content*. Journal of Building Engineering, Vol. 11, pp. 115–26.
- [48] Samimi, K. Kamali, K. Maghsoudi, A. (2018). *Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment*. Construction and Building Materials, Vol. 27, pp. 12–02.
- [49] Samimi, K. Pakan, M. Eslami, J. 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. 9, pp. 11–21.
- [50] Ecoinvent Centre, E. data v3. (2016). Switzerland.