

Investigating the response of structural elements constructed of earth concrete under cyclic loading

Afshin Khodaparast¹, Kianoosh Samimi^{2*}

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

ABSTRACT

The use of self-compacting earth concrete can reduce greenhouse gas emissions, as well as increase the efficiency and speed of construction in the construction industry. Using a specific loading protocol, experiments were conducted to investigate the effects of earthquake loading on the behavior of intact and damaged reinforced beams made of self-compacting earth concrete. Loading involves two general steps. Initially, beams are subjected to harmonic loading; after damage, they receive uniform loading. Under uniform harmonic loading, the first stage simulates an earthquake, whereas the second stage shows post-earthquake behavior. For beam construction, two design mixtures were chosen: RE (reference mixture) and C50 (concrete with 50% earth replaced for cement). Compared to the RE mixture, the C50 mixture yield displacement was reduced. Additionally, replacing earth with cement increased the beam reduction rate. Furthermore, there is a smaller difference between the uniform and harmonic ultimate displacements of the damaged C50 mix design beam specimens than the damaged RE design mix beam specimens. As compared with the RE mixture, the C50 mixture had an increased yield displacement. According to this study, this concrete is suitable as a building material, especially in earthquake areas.

ARTICLE INFO

Receive Date: 25 December 2024

Revise Date: 05 March 2025

Accept Date: 02 May 2025

Keywords:

Greenhouse gases
Self-compacting earth concrete
Earthquake
Reinforced beams
Loading protocol

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.485472.3552

*Corresponding author: Kianoosh Samimi

Email address: k_samimi@sbu.ac.ir

بررسی نحوه پاسخ المان‌های سازه‌ای ساخته شده از بتن خاکی تحت بارگذاری چرخه‌ای افشین خداپرست^۱، کیانوش صمیمی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

استفاده از بتن خاکی خود متراکم می‌تواند رویکردی نوآورانه در جهت کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و نیز ساخت و سازی مقرون به‌صرفه و سریع را در صنعت ساختمان امکان‌پذیر نماید. همچنین، ارزیابی لرزه‌ای آن محدود بوده و پروتکل‌های موجود توانایی در نظر گرفتن تعداد چرخه‌های بالا، و تغییر مکان‌های بزرگ را ندارند. همچنین، ارزیابی رفتار لرزه‌ای المان‌های سازه‌ای در حین زلزله‌های متوالی انجام‌نیافته است. در این پژوهش، آزمون‌های آزمایشگاهی با استفاده از پروتکل بارگذاری پیشنهادی برای تعیین تأثیر بارگذاری لرزه‌ای بر رفتار نمونه‌های سالم و آسیب دیده از زلزله تیرهای مسلح ساخته شده از بتن خاکی خود متراکم انجام پذیرفته است. نحوه اعمال بارگذاری شامل دو مرحله کلی می‌باشد. نمونه‌های تیر، در مرحله اول تحت بارگذاری هارمونیک و پس از آسیب در مرحله دوم تحت بارگذاری یکنواخت قرار گرفتند. مرحله اول آسیب تجمعی زلزله را تحت بارگذاری هارمونیک یکنواخت شبیه‌سازی می‌کند، در حالی که مرحله دوم رفتار یکنواخت پس از زلزله را نمایش می‌دهد. دو طرح اختلاط برای ساخت تیرها انتخاب گردید: RE (مخلوط مرجع) و C50 (بتن حاوی ۵۰٪ خاک جایگزین سیمان). نتایج نشان داد که جایجایی تسلیم (Δy) در مخلوط C50 در مقایسه با مخلوط RE، به میزان ۲۰٪ کاهش یافته است. نتایج همچنین نشان داد، تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای کاهش مقاومت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصدی نمونه حاوی ۵۰٪ سیمان در شدت بارگذاری شدید، به ترتیب ۴۴/۴، ۱۰/۰۱ و ۶۸/۸۸٪ کاهش یافته است. علاوه بر این، تفاوت کمتری بین جایجایی نهایی ناشی از بارگذاری یکنواخت و هارمونیک (Δu) در نمونه‌های تیر مخلوط طرح C50 آسیب دیده از زلزله در مقایسه با نمونه‌های طرح اختلاط RE وجود دارد. با این حال، افزایش Δu در مخلوط C50 در مقایسه با مخلوط RE مشاهده گردید. این مطالعه نشان داد که پتانسیل استفاده از بتن خاکی خود متراکم به عنوان بتن سازه‌ای، بخصوص در مناطق لرزه‌خیز با خطر نسبی پایین امکان‌پذیر می‌باشد.

کلمات کلیدی: گازهای گلخانه‌ای، بتن خاکی خود متراکم، زلزله، تیر مسلح، پروتکل بارگذاری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.485472.3552	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.485472.3552	۱۴۰۴/۱۰/۳۰	۱۴۰۴/۰۲/۱۲	۱۴۰۴/۰۲/۱۲	۱۴۰۳/۱۲/۱۵	۱۴۰۳/۱۰/۰۴
کیانوش صمیمی k_samimi@sbu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

از قرن‌ها پیش تا به امروز، خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مصالح به‌طور گسترده در صنعت ساختمان در سراسر جهان استفاده شده است. ترکیبات خاکی مانند خاک رس و سیلت در ساخت عناصر ساختمانی به‌ویژه در کشورهای دارای ذخایر غنی از این مواد استفاده شده است [۱]. این ترکیبات به‌عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند^۱ در طرح‌های اختلاط بتن برای کاهش اثرات زیست‌محیطی سیمان انتخاب گردید، زیرا سیمان مسئول تولید ۷ تا ۸٪ از انتشار گاز دی‌اکسید کربن مختص به صنعت ساخت و ساز در جهان می‌باشد [۲]. ذخایر بسیار زیاد خاک در نقاط مختلف دنیا فضای گسترش این نوع بتن را تسریع می‌نماید، زیرا تخمین زده می‌شود که میلیاردها تن از انواع مختلف زمین مانند کائولینیت در سرتاسر جهان ذخیره شده است [۳]. جنبه‌های دیگر از این نوع مواد در مقالات مورد توجه قرار گرفته است و مزایای متعددی از جمله سازگاری با محیط‌زیست، مقرون به‌صرفه بودن، بهره‌وری بهتر انرژی، کاهش کمتر منابع، ظرفیت حرارتی بالاتر، قابلیت تنفس قوی‌تر، غیرسمی بودن و سهم غیرآلاینده گزارش شده است. [۴ و ۵]. اگر چه سازگاری با محیط‌زیست چنین موادی در ادبیات محققین تایید شده است، اما کاهش مقاومت‌های مکانیکی استفاده از این مواد در بتن نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد. ترکیبات خاک به دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی، مقاومت مکانیکی بتن را کاهش داده و خواص حالت تازه آن‌ها را محدود می‌کند، که موجب عدم استقبال شرکت‌های ساختمانی و عوامل اجرایی از اجرای سازه‌های مبتنی بر خاک می‌باشد [۶ و ۷].

با این حال، تحقیقات متعددی برای توضیح ویژگی‌های بتن خاکی انجام شده که به‌طور هم‌زمان باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهبود عملکرد آن شده‌اند. اخیراً پیشرفت‌های قابل‌توجهی در مورد ترکیب بتن خاکی با سایر انواع بتن مانند بتن خودمتراکم (SCC)^۲ صورت پذیرفته است. به این ترتیب، بتن خاکی خودمتراکم (SCEC)^۳ از ویژگی‌های بتن خاکی بهره می‌برد و هم‌زمان برخی از معایب بتن SCC معمولی، مانند سرعت اجرای کم و الزامات تراکم مازاد را مرتفع می‌نماید. در تحقیقات گذشته، چندین جنبه از مشخصات بتن خاکی از جمله مشخصات دوام [۸ و ۹] خواص مکانیکی [۱۰ و ۱۱] و لرزه‌ای [۱۲ و ۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. در این رابطه اشرف و همکاران [۱۴] روشی برای تولید بتن بادوام و پایدار با ترکیب خاک، سیمان و آب ارائه کردند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی در ۷ روز نگهداری به میزان ۱۷ MPa اندازه‌گیری شد. افزایش مقاومت اولیه این نوع بتن عمدتاً به تشکیل هیدروکلوامیت نسبت داده می‌شود. با افزایش زمان نگهداری، C-A-S-H، ژل ژئوپلیمر و اترینگایت نیز تشکیل شده‌است. مضاف بر این، نمونه‌های حاوی ۵۰ تا ۷۵٪ کائولینیت از نظر مقاومت فشاری و سرعت واکنش بهتر از نمونه‌های دارای کائولینیت ۱۰۰٪ بودند. همچنین لی و همکاران [۱۵] اثرات مکانیکی و محیطی تولید یک مخلوط بتن سبز را با استفاده از جایگزینی تا حدود ۴۰٪ خاک با سیمان واکنش‌پذیر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد، مقاومت فشاری نمونه‌ها حدود ۴۰٪ افزایش یافته است و نتایج چرخه عمر (LCA)^۴ نشان داد که میزان پتانسیل گرمایش جهانی ۵۰٪ کاهش یافته‌است. کهندل نیا و همکاران [۱۱] راه‌حل‌های بالقوه‌ای را در جهت توسعه SCEC با بهبود عملکرد مختلف برای ساخت و ساز سبتر را توصیه کردند. نتایج نشان داد که عملکرد این ماده جدید به دلیل یک سیستم ریزساختاری متفاوت با بتن خاکی معمولی متفاوت می‌باشد. خدایپرست و همکاران [۱۰]، نیز در تحقیقی اقدام به ساخت بتن‌های خاکی حاوی ۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ جایگزینی با سیمان پرتلند پرداختند. نتایج نشان داد، مقاومت فشاری با ۵۰٪ جایگزینی سیمان با خاک در ۲۸ روز نگهداری ۲۰ MPa می‌باشد. علاوه بر این، نتایج آنها نشان داد که جایگزینی ۵۰٪ خاک به جای سیمان نسبت چقرمگی^۵ بتن را تا ۴۳٪ در مقایسه با مخلوط حاوی ۱۰۰٪ سیمان کاهش می‌دهد. همچنین مشخص گردید، میزان فوق‌روان‌کننده با افزایش جایگزینی خاک به جای سیمان به دلیل ویژگی‌های جذب آب ذاتی خاک افزایش یافته است.

همچنین، برآوردهای جهانی نشان می‌دهد که یک‌سوم از جمعیت جهان در خانه‌های خاکی زندگی می‌کنند که این میزان در کشورهای در حال توسعه به بیش از ۵۰٪ می‌رسد [۱۶]. لازم به ذکر است که سازه‌های خاکی در زمین لرزه‌های گذشته متحمل آسیب یا

^۱ Portland Cement^۲ Self-Compact Concrete^۳ Self-Compact Earth Concrete^۴ Life Cycle Analysis^۵ Toughness

فروریختن کامل شده‌اند که منجر به تلفات جانی و خسارات اقتصادی عمده‌ای گردیده است [۱۷]. لذا، اجزای سازه‌ای ساختمان‌های خاکی، یعنی تیرها، دیوارها و غیره باید از منظر عملکرد لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرند. رفتار اعضای سازه تحت الگوهای بارگذاری مختلف در چند سال گذشته به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا النبوچ و همکاران [۱۸]، عملکرد لرزه‌ای سازه‌های خاکی را با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی بررسی کردند. بر اساس طیف یوروکد ۸، نقاط عملکرد، بر اساس جابجایی تعیین گردید. گزارش شده است که اجزای خاکی با خاک نوع A (سنگ یا سایر سازندهای زمین‌شناسی سنگ‌مانند) عملکرد لرزه‌ای مناسبی در مناطق با خطر لرزه‌خیزی بسیار کم تا متوسط داشته‌اند. یک آزمایش مهم دیگر توسط مارد و همکاران انجام شد [۱۹]. در این تحقیق از پروتکل‌های بارگذاری دو مرحله‌ای برای بررسی آسیب تیرها در زلزله‌های قبلی استفاده گردید. تاریخچه جابجایی زلزله در مرحله اول برای تیرهای بتن مسلح (RC) و بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی بر روی تیرهای آسیب دیده در مرحله دوم اعمال شد. مشخص گردید که تخریب توسط زمین لرزه‌های قبلی ظرفیت باقیمانده عناصر سازه را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، مفید و همکاران با بررسی رفتار پس از زلزله نمونه‌های تیر با سه سطح آسیب نشان دادند که با افزایش سطح آسیب، تفاوت بین رفتارهای یکنواخت و چرخه‌ای تیرهای آسیب دیده از زلزله نیز افزایش می‌یابد [۲۰]. با این حال، هیچ مطالعه‌ای در بررسی ادبیات مربوط به رفتار لرزه‌ای اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای بتن خاکی انجام نشده است.

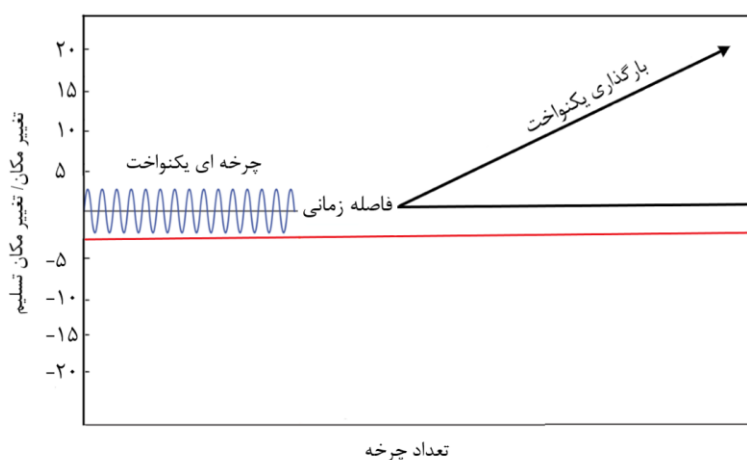
شایان ذکر است، بواسطه افزایش گرمای زمین و افزایش تلاش‌ها برای کاهش نقش صنعت ساختمان در انتشار گازهای گلخانه‌ای، تحقیق و توسعه بتن‌های کم کربن افزایش یافته است. لذا، تقویت مزایا و کاهش معایب این نوع بتن‌ها در مقطع کنونی اجتناب ناپذیر می‌باشد. تحقیقاتی متعددی در مورد رفتار بتن خاکی در گذشته انجام شده است، بیشتر تحقیقات بر مشخصات مصالح بتن متمرکز شده‌اند، درحالی که توجه کمی به عملکرد لرزه‌ای عناصر سازه‌ای شده است؛ از طرفی، تاثیر زلزله‌های متوالی و تاثیر آن بر سازه‌ها خصوصاً بر روی مصالح خاکی اهمیت بالایی دارد. بنابراین، بررسی رفتار لرزه‌ای اجزای سالم و آسیب‌دیده SCEC که بتواند عملکرد لرزه‌ای مطلوب، ایمنی جانی و مالی انسان‌ها، و کاهش آلودگی ناشی از ساخت بتن را فراهم نماید، اجتناب‌ناپذیر است. علاوه بر آن، لازم به ذکر است که پروتکل‌های بارگذاری چرخه‌ای مرسوم بواسطه ضعف‌های بنیادی نظیر در نظر نگرفتن نرخ بارگذاری بالا، عدم در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ و ... نمی‌توان برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای عناصر سازه‌ای سالم استفاده نمود. از منظر دیگر، مجموعه تحقیقات نشان می‌دهد که زلزله‌های متعدد می‌توانند بر عملکرد سازه‌های RC تأثیر نامطلوب بگذارند، اما بیشتر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای فرض را بر این می‌گذارند که سازه‌های RC تنها برای مقاومت در برابر زلزله اصلی طراحی شده است و توجهی به اثرات پس‌لرزه‌ها ندارند [۲۱ و ۲۲]؛ لذا، معرفی پروتکل بارگذاری کامل‌تری برای ارزیابی رفتار عناصر سازه‌ای در حین و پس از زلزله ضروری است.

از جنبه‌های نوآوری این تحقیق می‌توان به در نظر گرفتن نرخ بارگذاری بالا، لحاظ نمودن تغییر شکل‌های بزرگ و اثر زوال مقاومت حاصل از بارگذاری چرخه‌ای زلزله‌ها بر روی تیرهای SCEC سالم و آسیب‌دیده است. تحقیقات مختلف بیشتر بر روی مشخصات مکانیکی این نوع بتن‌ها تمرکز نموده‌اند و مباحث لرزه‌ای کمتر بررسی شدند. نوآوری این تحقیق عمدتاً بر دو هدف مهم متکی می‌باشد. اول، تلاش گردیده است تا یک تیر سازه‌ای سازگار با محیط‌زیست SCEC ساخته شود که تا به امروز تحقیقات در این زمینه در محدوده تکنولوژی بتن بوده است. دوم، بررسی رفتار لرزه‌ای نمونه‌های تیرهای SCEC سالم و آسیب‌دیده از زلزله اصلی و مقایسه آن با بتن مرجع. بدین منظور، ابتدا بارگذاری مونوتونیک^۷ بر روی هر نمونه تیرهای مسلح برای تعیین به جابه‌جایی حاصل از ترک خوردگی اعمال شد. سپس بارگذاری هارمونیک با دامنه یکنواخت بر روی نمونه سالم انجام شد و پس از یک فاصله زمانی مشخص، بارگذاری یکنواخت به طور جداگانه برای ارزیابی رفتار پس از زلزله اعمال گردید. در نهایت، رفتار لرزه‌ای نمونه‌های دست‌نخورده و آسیب‌دیده به واسطه مراحل مختلف بارگذاری برای ارزیابی امکان‌سنجی استفاده از SECE در کاربردهای سازه‌ای در مناطق لرزه‌ای مقایسه گردید.

۱- ۲. پروتکل بارگذاری پیشنهادی

^۱ Reinforced Concrete
^۲ Monotonic

در شکل ۱، نمای کلی از پروتکل بارگذاری استفاده شده برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای عناصر سازه‌ای ارائه شده است. این پروتکل از دو مرحله اصلی تشکیل شده است. در مرحله ۱ بارگذاری هارمونیک با دامنه یکنواخت انجام شده و پس از یک فاصله زمانی کوتاه بارگذاری یکنواخت در مرحله ۲ اعمال می‌گردد و رفتار تیر آسیب دیده در برابر زلزله ارزیابی می‌شود. لازم به ذکر می‌باشد که پروتکل های بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیک معمولی نمی‌توانند ظرفیت باقیمانده سازه را پس از زلزله به طور کامل ارزیابی کنند، با این حال، می‌توانند یک نشانه نسبی ارائه دهند. بر اساس شکل ۱، پروتکل شامل دو مرحله تغییر مکان-کنترل می‌باشد. هدف از مرحله اول محاسبه جابجایی تسلیم (Δy) می‌باشد که در مرحله دوم استفاده می‌شود. پاسخ چرخه‌ای عناصر در مرحله دوم با استفاده از چرخه‌های افزایشی متعدد (معمولاً Δy تا $3\Delta y$)، به دنبال Δy به دست آمده در مرحله اول ارزیابی می‌شود. دامنه بارگذاری برای الگوی اول $1\Delta y$ است که نشان دهنده رفتار تسلیم تیر است. برای الگوی دوم، دامنه بارگذاری $2\Delta y$ و برای الگوی سوم، دامنه های بارگذاری $3\Delta y$ انتخاب شد که نشان دهنده رفتار پلاستیک نمونه‌ها می‌باشد. از منظر مهندسی زلزله، این دامنه‌ها می‌توانند سطوح آسیب‌های مختلفی را از یک زلزله شدید بیان نمایند.



شکل ۱. پروتکل بارگذاری پیشنهادی [۲۰].

۲- ۱.۲ بارگذاری یکنواخت

بارگذاری یکنواخت برای دستیابی به چهار هدف اصلی بر روی نمونه‌ها اعمال گردید: (۱) شناسایی جابجایی تسلیم با پیدا کردن نقطه شروع اولین ترک. (۲) اندازه گیری دامنه بارگذاری هارمونیک. (۳) مقایسه منحنی هیستریزس^۱ و منحنی یکنواخت. (۴) مقایسه منحنی فشار یکنواخت و چرخه‌ای. برای حذف اثرات دینامیکی شتاب در بارگذاری یکنواخت، دامنه بار در سرعت ثابت (شتاب صفر) افزایش می‌یابد.

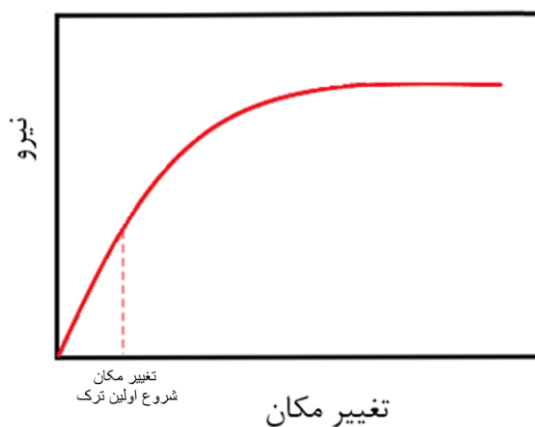
۳- ۲.۲ بارگذاری هارمونیک

روش معادل سازی اثرات زلزله با بارگذاری هارمونیک یکنواخت برای اولین بار توسط Seed و همکاران برای شبیه سازی اثرات زلزله بر روانگرایی خاک ارائه گردید [۲۳]. عناصر RC تحت اثر بارگذاری هارمونیک یکنواخت، در مطالعات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است [۲۴]. با در نظر گرفتن مزایای ذیل، بارگذاری هارمونیک به راحتی می‌تواند آسیب تجمعی زلزله را شبیه سازی نماید: (۱) دامنه ثابت بارگذاری هارمونیک، مشاهده آسان افت در هر سیکل (۲) تنظیم سطح آسیب با تنظیم تعداد چرخه‌ها یا دامنه‌ها (۳) قابلیت بارگذاری هارمونیک با سرعت و فرکانس ثابت. بخش‌های فرعی زیر سه پارامتر دامنه (A)، تعداد سیکل‌ها (Nh) و نرخ بارگذاری (R) مورد نیاز برای تعیین ویژگی‌های بارگذاری هارمونیک را ارائه می‌کنند.

^۱ hysteresis

۴- ۱.۲.۲. دامنه

دامنه ثابت بارگذاری هارمونیک (A)، به منظور ایجاد خسارت تجمعی زلزله در تعداد مشخصی از چرخه‌ها انتخاب گردید. مطابق مطالعه محققین، میزان ناحیه پیش از تسلیم (منطقه الاستیک) به طور قابل توجهی از تعداد چرخه‌های فزاینده متأثر نخواهد بود [۲۵]. از این رو، دامنه A باید در پس از تسلیم در نظر گرفته شود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، جابجایی در نقطه شروع اولین ترک (Δ_{cr})، تغییر مکان تسلیم تیر (Δy) را تعیین می‌نماید. برای تعیین جابجایی ترک، از بارگذاری یکنواخت استفاده می‌شود. در آزمایش بارگذاری یکنواخت، اهداف مورد بررسی عبارتند از: (۱) مشاهده اولین ترک برای تسلیم اولیه تیر. (۲) برآورد دامنه بار هارمونیک. (۳) اندازه‌گیری شکل پذیری نمونه‌ها پس از زلزله. و (۴) مقایسه منحنی فشار یکنواخت و چرخه‌ای. برای تعیین نقطه شروع اولین ترک در وجه کششی تیر، از ابزارهای تصویربرداری دیجیتال شناسایی استفاده شده است. همچنین، این آزمایش چندین بار تکرار گردید تا بتوان دقت ارزیابی Δ_{cr} را افزایش داد. در این تحقیق، دو نمونه تیر از هر طرح مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت قرار گرفتند و نتایج متوسط آنها برای اندازه‌گیری جابجایی ترک خوردگی Δ_{cr} و دامنه بارگذاری هارمونیک اعمال گردید.



شکل ۲. نمودار نیرو-جابجایی جهت تعیین اولین ترک [۲۴].

۵- ۲.۲.۲. تعداد چرخه‌ها

تعیین تعداد سیکل‌ها بر اساس معیار شکست ضروری می‌باشد. از طرف دیگر، هر چه دامنه بار بزرگ‌تر باشد، سیکل‌های کمتری برای رسیدن به درجه خاصی از تخریب مورد انتظار است. همچنین، بر اساس مطالعات قبلی [۲۴] شکست، به عنوان نقطه‌ای توصیف می‌شود که در آن مقاومت نمونه به ۲۰٪ از مقدار اوج مقاومت خود کاهش یابد. در این پژوهش نیز، شاخص خسارت با استفاده از معیار شکست مشابه آزمایش‌های قبلی محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری نرخ کاهش مقاومت نمونه‌ها، سه نمونه از هر طرح اختلاط تحت بارگذاری کامل هارمونیک بارگذاری گردیدند. تعداد چرخه‌ها از تحلیل نتایج به دست آمد و سه سطح آسیب کم، متوسط و شدید به ترتیب ۱۰، ۱۴ و ۲۰٪ کاهش مقاومت با توجه به حداکثر مقاومت آنها تعریف گردیدند.

۶- ۳.۲.۲. نرخ بارگذاری

به‌طور کلی، انجام تست‌های چرخه‌ای در سرعت‌های کم دارای چندین مزیت مهم است. اولاً، از آنجایی که نمونه دارای حداقل نیروی لختی هستند، اندازه‌گیری نیرو دقیق‌تر است. دوماً، زمان کافی را برای مشاهده و مستندسازی آسیب‌ها و الگوهای ترک در نمونه‌ها در نقاط بحرانی فراهم می‌نماید. سوماً، آزمایش‌های چرخه‌ای آهسته معمولاً به فشار هیدرولیک مضاعف و الگوریتم‌های کنترل محرک اضافی نیاز ندارند، زیرا محرک به‌کندی انجام می‌پذیرد. محدودیت اصلی سرعت کم، در نظر گرفتن اثرات نرخ بارگذاری زلزله است. لازم به ذکر است که عناصر سازه‌ای تحت تأثیر بارهای زلزله با نرخ‌های مختلف قرار می‌گیرند. بر اساس پیشنهاد فن و همکاران [۲۶]، نرخ بارگذاری

لرزه‌ای از $3^{-1.0}$ تا $10^{1.5}$ Hz متغیر است. نرخ بارگذاری هارمونیک $3/0$ Hz از آزمایش‌های قبلی توسط نویسندگان [۲۴] تعیین گردید که با نرخ کرنش زلزله قابل مقایسه است؛ لذا، تمام بارهای هارمونیک در مرحله ۱ با فرکانس $3/0$ Hz انجام شده است. فرکانس‌های بارگذاری همه نمونه‌ها نیز در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق جدول ۱، سرعت بارگذاری برای مرحله ۲، ۴۰۰ میلی‌متر در دقیقه است. سرعت انتخاب شده بر اساس نتایج آزمایش‌های قبلی [۲۵]، نشان می‌دهد نرخ بارگذاری در دامنه‌های بیشتر از Δy تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد. علاوه بر این، دستگاه سرعت‌های بارگذاری بالای ۴۰۰ میلی‌متر در دقیقه را غیرفعال می‌نماید. براین اساس، تمام الگوهای بارگذاری با سرعت ۴۰۰ میلی‌متر در دقیقه رخ داده است.

جدول ۱: مشخصات بارگذاری نمونه‌ها

	RE				C50			
	دامنه	تغییر مکان (mm)	فرکانس (Hz)	سرعت (mm/min)	دامنه	تغییر مکان (mm)	فرکانس (Hz)	سرعت (mm/min)
مرحله ۱	۱Δy	۱/۵	۰/۳	۱۳۳	۱Δy	۱/۲	۰/۳	۱۳۳
	۲Δy	۳	۰/۳	۲۶۶	۲Δy	۲/۴	۰/۳	۲۶۶
	۳Δy	۴.۵	۰/۳	۴۰۰	۳Δy	۶/۳	۰/۳	۴۰۰
مرحله ۲	۱Δy	۱/۵۰	۰/۹۰	۴۰۰	۱Δy	۱/۲	۰/۹۰	۴۰۰
	۲Δy	۳	۰/۴۵	۴۰۰	۲Δy	۲/۴	۰/۴۵	۴۰۰
	۳Δy	۴/۵	۰/۳۰	۴۰۰	۳Δy	۳/۶	۰/۳۰	۴۰۰
	۴Δy	۶	۰/۲۳	۴۰۰	۴Δy	۴/۸	۰/۲۳	۴۰۰
	۵Δy	۷/۵	۰/۱۸	۴۰۰	۵Δy	۶	۰/۱۸	۴۰۰
	۶Δy	۹	۰/۱۵	۴۰۰	۶Δy	۷/۲	۰/۱۵	۴۰۰
	۷Δy	۱۰/۵	۰/۱۳	۴۰۰	۷Δy	۴/۸	۰/۱۳	۴۰۰
	۸Δy	۱۲	۰/۱۱	۴۰۰	۸Δy	۹/۶	۰/۱۱	۴۰۰
	۹Δy	۱۳/۵	۰/۱۰	۴۰۰	۹Δy	۱۰/۸	۰/۱۰	۴۰۰
	۱۰Δy	۱۵	۰/۰۹	۴۰۰	۱۰Δy	۱۲	۰/۰۹	۴۰۰
	۱۲Δy	۱۸	۰/۰۸	۴۰۰	۱۲Δy	۱۴/۴	۰/۰۸	۴۰۰
	۱۴Δy	۲۱	۰/۰۶	۴۰۰	۱۴Δy	۱۶/۸	۰/۰۶	۴۰۰
	۱۶Δy	۲۴	۰/۰۶	۴۰۰	۱۶Δy	۱۹/۲	۰/۰۶	۴۰۰
	۱۸Δy	۲۷	۰/۰۵	۴۰۰	۱۸Δy	۲۱/۶	۰/۰۵	۴۰۰
	۲۰Δy	۳۰	۰/۰۵	۴۰۰	۲۰Δy	۲۴/۰.۱	۰/۰۵	۴۰۰

۷-۳. برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه، نمونه‌های تیر RC با طرح‌های اختلاط پیشنهادی با ابعاد هندسی و مشخصات آرماتور یکسان ساخته شدند. این روند در بخش‌های آتی به تفصیل توضیح داده شده است.

۸-۳.۱. مصالح و طرح اختلاط بتن

خاک انتخاب شده برای تهیه بتن خاکی خودمتراکم از شهرستان قائم‌شهر (شمال ایران) می‌باشد که توسط سیستم طبقه‌بندی خاک (USCS) به عنوان خاک با پلاستیسیته متوسط طبقه‌بندی شده است [۲۷]. علاوه بر این، سیمان پرتلند نوع II مطابق با آیین‌نامه ASTM-C150 [۲۸] برای ساخت انواع طرح اختلاط انتخاب گردید. نتایج تجزیه و تحلیل فیزیکی و شیمیایی سیمان و خاک در جدول ۲ ارائه شده است. در طرح‌های مخلوط بتن از سنگدانه‌ها در اندازه‌های اسمی ۰-۴ و ۶-۱۲ میلی‌متر به عنوان ماسه و شن استفاده شده است. در شکل ۳، اندازه دانه بندی خاک، شن و ماسه نشان داده شده است. همچنین برای جلوگیری از افزایش مصرف آب، فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اثر (SP^۹) تولید شرکت سیکا با $PH 1 \pm 7$ و وزن مخصوص ۱.۱۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب نیز به مخلوط‌ها اضافه شد. در این تحقیق از دو طرح اختلاط بتن RE و C50 مطابق جدول ۳ نشان داده است. علاوه بر این، طرح‌های اختلاط دارای نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴ هستند. علاوه بر یکسان بودن وزن مصرفی شن و ماسه در طرح اختلاط، در محدوده استاندارد بودن نتایج آزمایش‌های حالت تازه بتن نظیر آزمایش جریان اسلامپ و جعبه L، جهت معرفی این بتن به عنوان بتن خودمتراکم اجتناب ناپذیر می‌باشد. مطابق تحقیقات خدایرست و همکاران [۱۰]، نتایج حالت تازه طرح اختلاط حاوی ۵۰٪ خاک در محدوده استاندارد بوده است. همچنین، میزان فوق‌روان‌کننده مصرفی

^۹ Super plasticizer

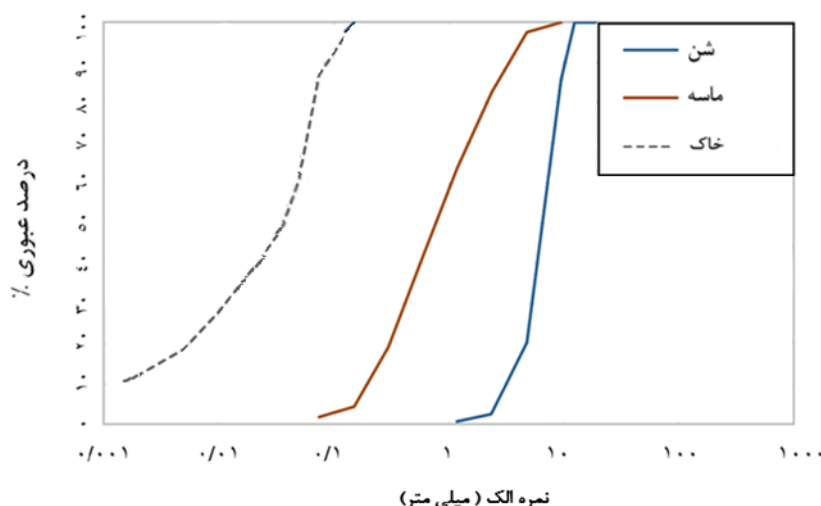
برای دستیابی به جریان اسلامپ استاندارد (۶۵۰-۷۵۰ میلی متر) مطابق استاندارد AFGC 2002، انتخاب شدند [۲۹]. مقاومت فشاری ۲۸ روزه انواع طرح اختلاط نیز در جدول ۳ ارائه داده شده است.

جدول ۲: تحلیل شیمیایی و فیزیکی سیمان، خاک و روان کننده

روان کننده	خاک رس	سیمان پرتلند (نوع II)	عناصر %
-	۵۲/۹۸	۱۸/۸۸	SiO ₂
-	۱۴/۲۴	۴/۰۱	Al ₂ O ₃
-	۴/۷۶	۳/۴۵	Fe ₂ O ₃
-	۱۰/۳۵	۶۳/۲۳	CaO
-	۳/۴۹	۳/۲۶	MgO
-	۰/۱۲	۴/۱۲	SO ₃
-	۰/۶۱	۰/۳۱	TiO ₂
-	۰/۱۵	۰/۲۵	MnO
۱/۵ >	۱/۱۶	۰/۱۱	Na ₂ O
-	۲/۵۶	۰/۸۲	K ₂ O
-	۰/۰۵	۰/۲۸	Ba
۰/۱ >	۰/۰۳	۰/۰۲	Cl
-	۰/۰۲	-	Zr
-	۰/۰۱	۰/۰۱	Cu
-	٪۲۹	-	Liquid Limit (LL)
-	٪۱۱	-	Plastic Limit (PL)
-	۱۸	-	PI
۷/۰	۸/۶۱	-	PH
-	۹/۱۳	۱/۰۷	Loss of ignition
-	-	۲۹۰	مدول نرمی (kg/m ²)
۱/۰۶	۱/۸۳	۳/۱۵	وزن مخصوص (gr/cm ³)

جدول ۳: نسبت طرح اختلاط بتن های مصرفی

مقاومت فشاری (MPa)	نسبت آب به سیمان	روان کننده (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	خاک رس (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	طرح اختلاط
۴۲/۲	۰/۴	۴/۱۳	۱۸۰	۷۹۰	۷۹۰	۰	۴۵۰	Ref-C0
۲۱	۰/۴	۹/۷۷	۱۸۰	۷۹۰	۷۹۰	۲۲۵	۲۲۵	SCEC-C50



شکل ۳: اندازه سنگدانه‌ها و خاک‌های رس مورد استفاده در این پژوهش

در این آزمایش نیز از دو نوع آرماتور فولادی استفاده شد: آرماتورهای فولادی Ø10 برای استفاده به‌عنوان آرماتور طولی و میلگردهای فولادی Ø8 برای آرماتور برشی (خاموت). مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی میلگردها با آزمایش کشش مستقیم طبق آیین نامه ASTM-E8 [۳۰] تعیین گردید. میانگین نتایج نمونه‌ها نشان دادند که مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی میلگردهای طولی به ترتیب برابر با ۴۰۵ و ۶۱۰ MPa و برای میلگرد عرضی به ترتیب ۳۷۰ و ۵۸۱ MPa می‌باشد.

۹- ۳.۲ فرآیند ساخت بتن

کلیه طرح‌های اختلاط بتن در یک مخلوط کن ۱۵۰ لیتری تهیه شدند. ابتدا، سنگدانه‌های شن و ماسه در مخلوط کن قرار داده شد و سپس به مدت ۳ 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 ۲ دقیقه مخلوط شدند. اطراف دهانه مخلوط کن با یک پوشش پلاستیکی پوشانده شد تا از تبخیر آب جلوگیری گردد. سرعت مخلوط در هر مرحله ۱۴۰ دور در دقیقه ثابت نگه داشته شد. تهیه نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای مطابق با آیین‌نامه‌های ASTM C31 و ASTM C511 انجام گردید [۳۱] و [۳۲].

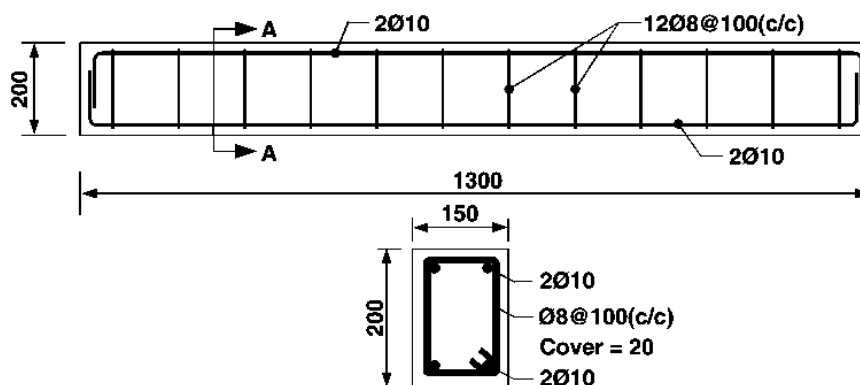
۱۰- ۳.۳ نگهداری نمونه‌های بتن خودمتراکم خاکی

تمام نمونه‌ها در سه لایه بتن‌ریزی شدند. طبق توصیه تحقیقات گذشته [۳۵]، نمونه‌ها در دمای کنترل شده اتاق و رطوبت ± 1 به مدت ۲۴ ساعت بدون تماس مستقیم با آب، قالب برداری و نگهداری شدند. آزمایش همه نمونه‌های مورد مطالعه در ۲۸ روز نگهداری انجام شده است. برای تعیین مقاومت فشاری بتن، سه نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر از هر طرح اختلاط بتن (با نسبت ارتفاع به قطر ۲) مورد بررسی قرار گرفتند.

۱۱- ۳.۴ جزئیات نمونه‌ها

تیرهای RC مطابق با آیین‌نامه ACI 318 [۳۴] ساخته شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، تمامی نمونه‌ها دارای ابعاد اسمی یکسان ۲۰۰×۱۵۰ میلی‌متر مربع و طول ۱۳۰۰ میلی‌متر بودند. شایان ذکر است که با توجه به محدودیت‌های تکیه‌گاه‌ها و همچنین ظرفیت دستگاه بارگذاری، این ابعاد انتخاب شده است. دو آرماتور Ø10 به صورت طولی در بالا و پایین تیر قرار گرفته‌اند. در همه نمونه‌ها، خاموت‌ها به عنوان آرماتور برشی استفاده شدند. برای جلوگیری از لغزش میلگرد، دو سر آرماتور طولی 90° در ۱۲۰ میلی‌متر خم

شد و خم‌های رکاب 135° در 130 میلی‌متر خم شد. مطابق با توصیه آیین نامه فوق، خم‌های 135° در گوشه‌های مختلف در طول تیر بریده شدند. همچنین پوشش بتنی 20 میلی‌متری نیز روی آرماتورهای فولادی در قالب در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. جزئیات تیر ساخته شده در نمای طولی و عرضی

۱۲- ۳.۵ راه اندازی و آزمایش دستگاه بارگذاری

شکل شماره ۵، دستگاه بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده در این مقاله را نشان داده است. غلتک‌ها و پین‌ها از هر دو انتهای نمونه‌ها ثابت شده است. یک دستگاه تست با ظرفیت 120 KN برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای در وسط تیر استفاده شد. برای ثبت جابجایی دهانه میانی و نیروی تیرها از اندازه گیرهای مختلف استفاده شده است. داده‌ها به طور خودکار برای هر آزمون توسط یک سیستم جمع‌آوری داده‌های رایانه‌ای ثبت می‌شود. یک جفت ورق فولادی (با ابعاد $10 \times 60 \times 200$ میلی‌متر مکعب) به منظور جلوگیری از خرابی موضعی استفاده شده است. از چهار پیچ برای تثبیت صفحات به تیر بالا و پایین استفاده شده است. همچنین برای جلوگیری از شل شدن در اثر جابجایی‌های چرخه‌ای، پیچ‌ها با مهره‌های فولادی کمی پیش تنیده شدند.



شکل ۵. دستگاه بارگذاری و اجرای تکیه گاه‌ها.

۱۳- ۳.۶ پروتکل بارگذاری

مشخصات بارگذاری مطابق جدول ۴ بصورت یکسان برای تیرهای RC اعمال شده است. یک مقدار متوسط برای هر مخلوط بر اساس آزمایش دو نمونه محاسبه گردید. ابتدا برای نیل به مقادیر مورد نیاز برای بارگذاری هارمونیک، نمونه‌های هر طرح اختلاط به صورت مونوتونیک بارگذاری شدند. برای محاسبه تغییر مکان حاصل از ترک خوردگی، اقدام به مشاهده و تعیین تغییر مکانی که منجر به اولین ترک در تیر گردید، شده است. در هر طرح اختلاط، نمونه‌ها تحت بارگذاری هارمونیک کامل با دامنه های یکنواخت $1\Delta y$ ، $2\Delta y$ و $3\Delta y$ بارگذاری شدند. این نمونه‌ها به ترتیب HAR-RE-S، HAR-C50-S، HAR-RE-M، HAR-C50-M، HAR-RE-E و HAR-C50-E و نامگذاری گردیدند. علاوه بر این، ۳ نمونه از هر طرح مخلوط به صورت هارمونیک و سپس یکنواخت بارگذاری شدند (HAR-MON-RE-S، HAR-MON-C50-S، HAR-MON-RE-M، HAR-MON-C50-M، HAR-MON-RE-E، HAR-MON-C50-E). جزئیات بارگذاری نمونه در جدول ۴ ارائه شده است. بارهای هارمونیک براساس شدت بارگذاری مطابق جدول ۴ به سه دسته طبقه بندی کم، متوسط و شدید که به ترتیب با پارامترهای S، M و E نشان داده شده‌اند، طبقه‌بندی گردیدند. این طبقه‌بندی با هدف ارزیابی رفتار پس از آسیب یک تیر در سه درجه آسیب می‌باشد.

جدول ۴: فرآیند بارگذاری

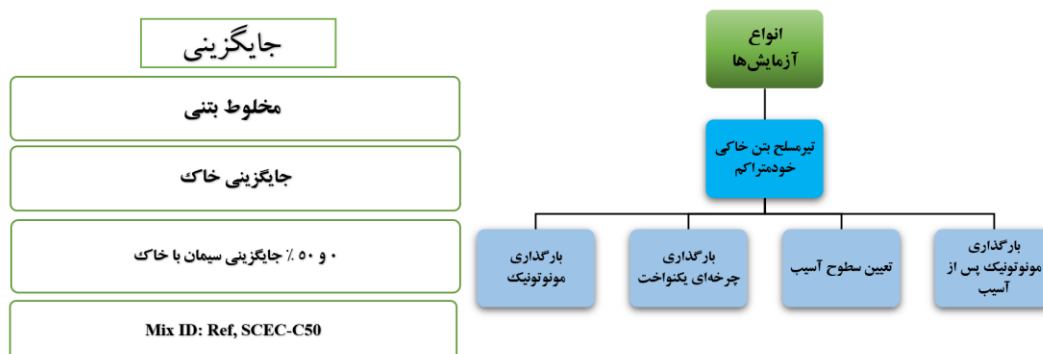
نمونه	مرحله ۱			فاصله زمانی (sec)	مرحله ۲
	بارگذاری هارمونیک				
	A	N_H	Rate (Hz)		
MON-RE	-	-	-	-	-
MON-C50	-	-	-	-	-
HAR-RE-S	$1\Delta y$	-	$0/3$	-	-
HAR-RE-M	$2\Delta y$	-	$0/3$	-	-
HAR-RE-E	$3\Delta y$	-	$0/3$	-	-
HAR-C50-S	$1\Delta y$	-	$0/3$	-	-
HAR-C50-M	$2\Delta y$	-	$0/3$	-	-
HAR-C50-S	$3\Delta y$	-	$0/3$	-	-
HAR-MON-RE-S	$1\Delta y$	۱۰۰	$0/3$	۱۴۰	بارگذاری یکنواخت
HAR-MON-RE-M	$2\Delta y$	۱۰۰	$0/3$	۱۴۰	بارگذاری یکنواخت
HAR-MON-RE-E	$3\Delta y$	۱۰۰	$0/3$	۱۴۰	بارگذاری یکنواخت
HAR-MON-C50-S	$1\Delta y$	۱۰۰	$0/3$	۱۴۰	بارگذاری یکنواخت
HAR-MON-C50-M	$2\Delta y$	۱۰۰	$0/3$	۱۴۰	بارگذاری یکنواخت
HAR-MON-C50-E	$3\Delta y$	۱۰۰	$0/3$	۱۴۰	بارگذاری یکنواخت

۱۴- ۳.۷ پروتکل بارگذاری

بررسی کلی مطالعه حاضر در شکل شماره ۶ ارائه شده است که به‌طور جامع مراحل اصلی تحقیق را نشان می‌دهد. این نمودار شماتیک به وضوح فرآیند سیستماتیک را که برای دستیابی به اهداف علمی و تحقیقاتی این مطالعه اتخاذ شده است، به تصویر می‌کشد.

روند کلی آزمایش‌های رساله

بتن خاکی خودمتراکم (SCEC)

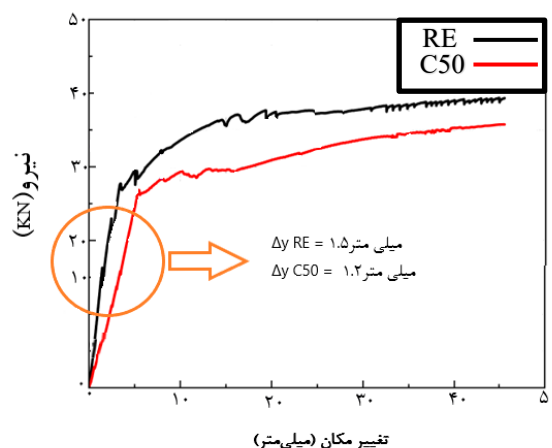


شکل ۶. نمای کلی از روند جایگزینی و آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق.

۱۵- ۴. نتایج و بحث

۱۶- ۱.۴. بارگذاری یکنواخت

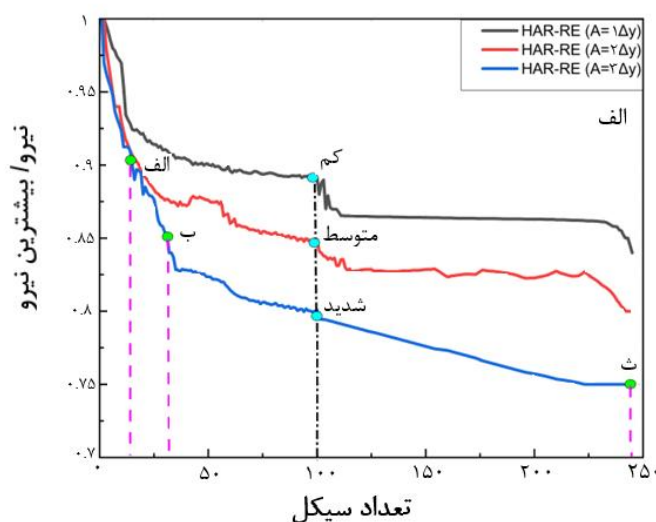
همان‌طور که عنوان شد، بارگذاری یکنواخت برای هر طرح اختلاط برای اندازه‌گیری دامنه بارگذاری اعمال گردید. در این راستا، میانگین رفتار هر نمونه تحت بارگذاری یکنواخت در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، اولین ترک‌ها در نمونه‌های RE و C50 به ترتیب در ۱.۵ میلی‌متر و ۱.۲ میلی‌متر مشاهده شد. نتایج نشان داد که میزان Δy در نمونه C50 در مقایسه با نمونه RE ۲۰٪ کاهش یافته است. کاهش محتوای سیمان مدول الاستیسیته بتن را کاهش می‌دهد و منجر به انتقال سریع نمودار تنش-کرنش به فاز پلاستیک می‌گردد. همچنین، کاهش مقدار Δy عمدتاً به دلیل جذب ذاتی آب توسط اجزای خاک در مخلوط C50 است که برای هیدراتاسیون سیمان در نظر گرفته شده بود. این نتیجه با یافته‌های سایر مطالعات [۱۱ و ۱۰] مطابقت دارد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، ظرفیت بار نهایی نمونه تا $\Delta y 30$ ادامه یافته است.

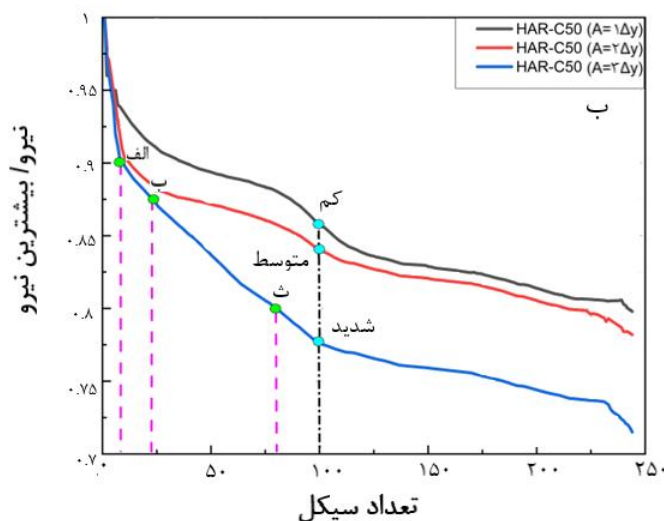


شکل ۷. میانگین پاسخ نمونه‌های RE و C50 تحت بار یکنواخت.

۱۷- ۲.۴. بارگذاری هارمونیک کامل

بارگذاری چرخه‌ای هارمونیک برای ۳ نمونه از هر طرح اختلاط به ترتیب با دامنه های $1\Delta y$ ، $2\Delta y$ و $3\Delta y$ انجام گردید. چرخه‌های هارمونیک تا شکست نمونه‌ها ادامه یافتند. پاسخ نیرو/تعداد چرخه نمونه‌ها تحت بارگذاری هارمونیک انواع طرح‌های اختلاط در شکل ۸ ارائه شده‌است. این شکل یک منحنی مقیاس شده را برای هر نمونه با حداکثر نیرو را نشان می‌دهد که برای تعیین سطوح آسیب استفاده می‌گردد. سطح آسیب را می‌توان با استفاده از منحنی شکل ۸، از طریق سه روش تعیین کرد. در روش ۱، دامنه (A) و تعداد چرخه‌ها (N) ثابت فرض می‌شوند. همانطور که در شکل ۸ (الف) نشان داده شده است، منحنی HAR-RE-3 نشان داد که کاهش مقاومت ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ به ترتیب در چرخه های ۱۸، ۳۳، و ۲۴۱ رخ داده است. لذا، سه سطح آسیب توسط نقاط الف، ب، و ث در شکل نشان داده شده است. همچنین، مطابق شکل ۸ (ب)، درصدهای کاهش مقاومت ذکر شده در نمونه‌های HAR-C50-3 در چرخه‌های ۱۰، ۳۰ و ۷۵ رخ داده است. در مقایسه با نمونه HAR-RE-3، تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای کاهش مقاومت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصدی نمونه HAR-C50-3 به ترتیب ۴۴/۴، ۱۰/۰۱ و ۶۸/۸۸٪ کاهش یافته است. در مقایسه با نمونه HAR-RE-3، نمونه حاوی ۵۰٪ خاک (HAR-C50-3) سریع‌تر به فاز غیرخطی رسیده است و مقاومت خود را از دست داد. این به دلیل کاهش محتوای سیمان در طرح اختلاط و در نتیجه کاهش مقاومت مکانیکی بتن می‌باشد. بر اساس روش ۲، تعداد چرخه‌ها (N) ثابت در نظر گرفته می‌شود، در حالی که دامنه (A) تغییر می‌کند. از شکل ۸ (الف) می‌توان دریافت که در چرخه $N=100$ ، منحنی‌های HAR-RE-1، HAR-RE-2، HAR-RE-3 دارای کاهش مقاومت به ترتیب ۱۰.۸۶، ۱۵.۰۱، و ۱۹.۹۱٪ می‌باشند. بنابراین، این نقاط به ترتیب سطوح آسیب کم، متوسط و زیاد را نشان می‌دهند. علاوه بر این، مطابق شکل ۸ (ب)، منحنی‌های HAR-C50-1، HAR-C50-2، HAR-C50-3 و HAR-C50-3 به ترتیب ۱۴.۲۶، ۱۵.۹۴ و ۲۲.۳۶٪ کاهش مقاومت را تجربه کردند. کاهش استحکام در $N=100$ نمونه‌های C50 در سطوح آسیب دیده کم، متوسط و زیاد به ترتیب ۳/۳۱، ۱۹/۶ و ۳/۱۲٪ در مقایسه با نمونه RE افزایش یافت. بنابراین، بر اساس نتایج، با کاهش مقدار سیمان نرخ کاهش مقاومت نمونه را بر اساس روش ۲ افزایش می‌یابد. دلیل این نتیجه ممکن است مربوط به محتوای ناکافی سیمان باشد که موجب کاهش هم‌بستگی بین سنگدانه‌ها و پیوستگی ضعیف بین آن‌ها گردد. از سوی دیگر، می‌توان هم دامنه (A) و هم تعداد چرخه‌ها (N) را در روش ۳ متغیر دانست. به طور کلی، روش ۳ به تعداد زیادی آزمایش نیاز دارد. همچنین روش ۲ در مقایسه با روش ۱ دارای استقلال زمانی می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که هر سه سطح آسیب به طور همزمان رخ می‌دهد. از این رو، در این مطالعه، روش ۲ انتخاب گردید و کاهش مقاومت به میزان ۱۰، ۱۴ و ۲۰٪ به عنوان سه سطح آسیب (کم، متوسط و شدید) مطابق با پیشنهاد محققان تعریف گردید [۳۴].

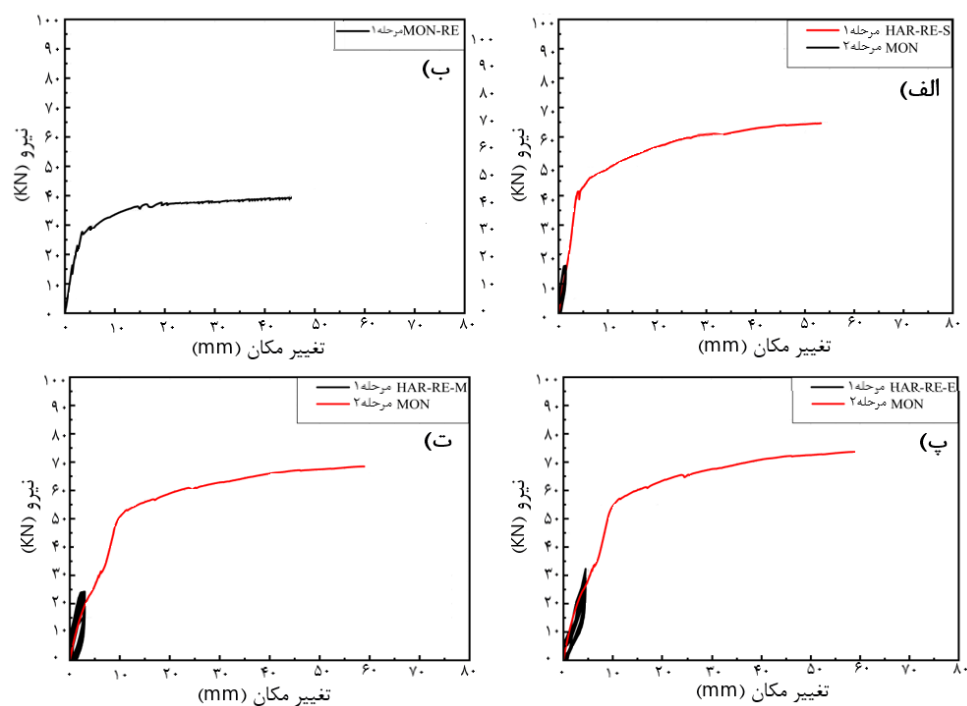




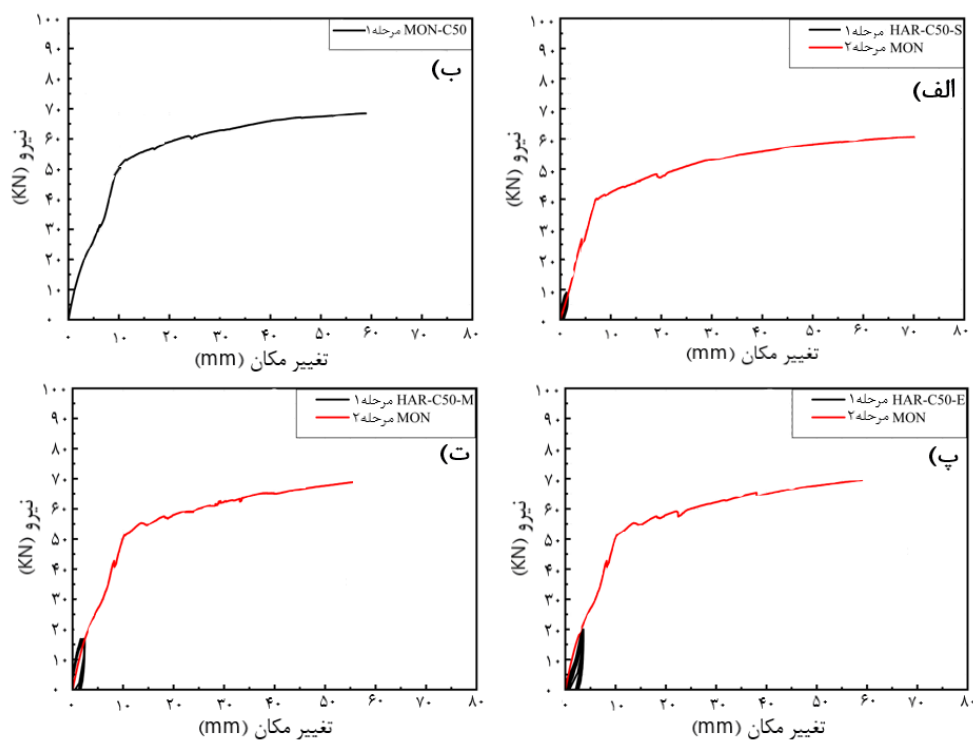
شکل ۸. منحنی نیرو/سیکل برای بارهای هارمونیک: الف) مخلوط RE و ب) مخلوط C50.

۱۸- ۳.۴ پاسخ یکنواخت پس از زلزله

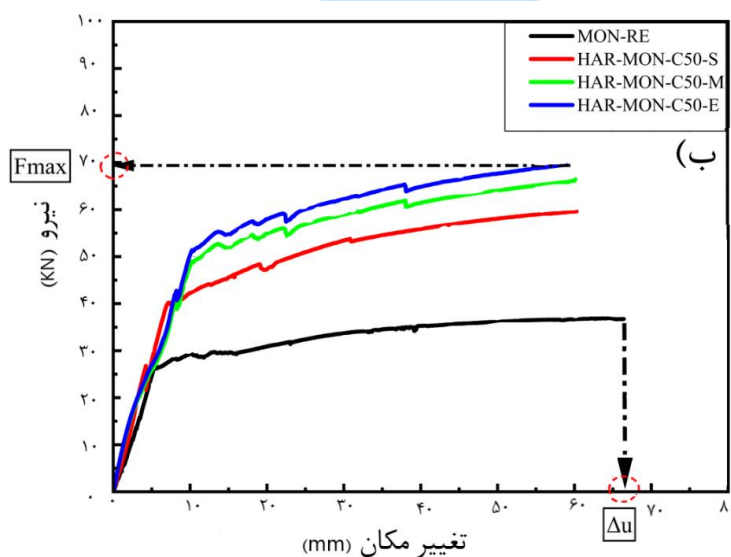
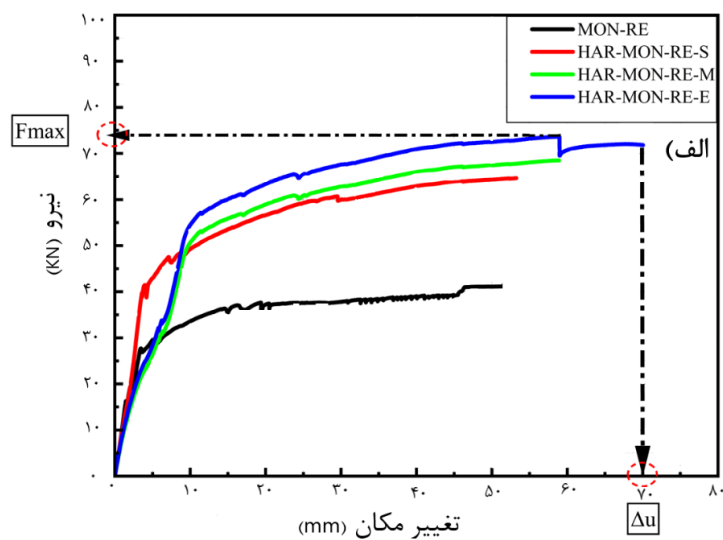
از پاسخ یکنواخت تیر برای تعیین شکل پذیری انواع نمونه‌ها در این بخش استفاده گردید. شکل پذیری به‌طور کلی به‌عنوان توانایی مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک تحت بار قبل از شکست تعریف می‌گردد [۳۵]. شکل پذیری به صورت $(\mu = \Delta u / \Delta y)$ تعریف می‌شود که Δu جابجایی نهایی و Δy جابجایی تسلیم می‌باشد. پاسخ‌های نیرو-جابجایی یکنواخت پس از زلزله (آسیب دیده) نمونه‌های RE و C50 در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه‌های مذکور تحت بارگذاری یکنواخت نیز در شکل ۱۱ ارائه شده است. پارامترهای حداکثر نیرو، F_{max} سختی اولیه، K ، و جابجایی نهایی، Δu ، از طریق نمودارها محاسبه گردیده و در جدول ۵ گزارش شده است. بر اساس جدول ۵، نمونه MON-RE دارای بیشترین سختی اولیه می‌باشد. بر اساس نتایج، سختی هر دو طرح اختلاط با افزایش سطح آسیب کاهش یافته است. از سوی دیگر، سختی نمونه‌های HAR-MON-RE-S، HAR-MON-RE-M، HAR-MON-RE-E و HAR-MON-RE-E به ترتیب ۱۴/۴۷، ۲۸/۵۷ و ۴۹/۵۲٪ نسبت به MON-RE کاهش یافت. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، با جایگزینی ۵۰٪ از محتوای سیمان با خاک، سختی نمونه C50 در مقایسه با نمونه RE ۲۳/۶۲٪ کاهش یافت. این به دلیل جایگزینی خاک با سیمان می‌باشد که منجر به عدم همگنی و افزایش فضای خالی در ماتریس چسبندگی بتن می‌گردد. علاوه بر این، با افزایش سطح آسیب، F_{max} تمام نمونه‌های RE نیز افزایش یافته است. در مقایسه با MON-RE، F_{max} نمونه‌های HAR-MON-RE-S، HAR-MON-RE-M و HAR-MON-RE-E به ترتیب ۸/۳۷، ۲۸/۸۶ و ۳۲/۱۰٪ افزایش یافته است. از سوی دیگر، کاهش شکل‌پذیری نمونه‌های آسیب‌دیده از زلزله HAR-MON-RE-S، HAR-MON-RE-M و HAR-MON-RE-E نسبت به نمونه‌های سالم (MON-RE)، به ترتیب ۲۳/۷۷، ۳/۳۴ و ۴۵/۹۷٪ می‌باشد. علاوه بر این، نمونه‌های آسیب‌دیده ناشی از زلزله HAR-MON-C50-S، HAR-MON-C50-M و HAR-MON-C50-E به ترتیب ۳۳/۲۷، ۵۱/۹۷ و ۶۶/۳۷٪ نسبت به نمونه‌های سالم کاهش یافتند. مطابق با نتایج مطالعات مفید و همکاران [۲۰]، مشاهده گردید که شکل‌پذیری نمونه با افزایش سطح آسیب کاهش می‌یابد. همچنین همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، با جایگزینی سیمان با خاک، میزان کاهش شکل‌پذیری نیز افزایش می‌یابد. مطابق نتایج تحقیقات گذشته [۱۰]، افزایش خاک در بتن‌های خاکی خودمترکم موجب افزایش کرنش قابل تحمل بتن گردیده و شکل‌پذیری را افزایش داده است. لذا، این افزایش موجب کاهش زوال چرخه‌ای در برابر بارهای مکرر می‌گردد و می‌تواند در هنگام زلزله خصوصاً زلزله‌های متوالی پاسخ‌های مطلوب‌تری نسبت به بتن‌های سنتی ارائه دهد.



شکل ۹. پاسخ‌های نیرو-جابجایی نمونه RE برای بارگذاری یکنواخت مرحله دوم، الف) نمونه سالم ب) آسیب دیده- شدت کم، پ) آسیب دیده- شدت متوسط، ت) آسیب دیده- شدت زیاد.



شکل ۱۰. پاسخ‌های نیرو-جابجایی نمونه C50 برای بارگذاری یکنواخت مرحله دوم، الف) نمونه سالم ب) آسیب دیده- شدت کم، پ) آسیب دیده- شدت متوسط، ت) آسیب دیده- شدت زیاد.



شکل ۱۱. مقایسه منحنی های ستون فقرات نیرو-جابجایی نمونه های الف (RE) و ب (C50)، تحت بارگذاری یکنواخت.

جدول ۵: نتایج آزمایش برای نمونه های یکنواخت

نمونه	K (KN/mm)	Fmax (KN)	Δu (mm)	$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta_y}$
MON-RE	۱۰/۵	۵۴/۳۶	۴۳/۰۳	۳۹/۳۳
HAR-MON-RE-S	۸/۹۸	۵۸/۹۱	۶۴/۶۵	۲۹/۹۸
HAR-MON-RE-M	۷/۵	۷۰/۰۵	۶۸/۴۵	۲۴/۳۵
HAR-MON-RE-E	۵/۳	۷۱/۸۱	۷۱/۸۱	۲۱/۳۵
MON-C50	۸/۰۲	۳۶/۷۵	۶۶/۴۲	۴۸/۳۳
HAR-MON-C50-S	۶/۲۵	۶۰/۱۳	۶۴/۱۵	۳۲/۲۵
HAR-MON-C50-M	۵/۱۲	۶۶/۴۴	۶۰/۱۲	۲۳/۲۱
HAR-MON-C50-E	۴/۹۸	۶۹/۵۴	۵۹/۰۱	۱۶/۳۵

۱۹- ۵. نتیجه گیری

در این مطالعه پتانسیل استفاده از تیرهای بتنی خاکی خودتراکم مسلح در اجزای سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بتن خاکی خودتراکم با جایگزینی سیمان با مصالح کم‌کربن مانند خاک، با کاهش میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و رفع معایب اجرای بتن‌های سنتی رویکرد نوینی در صنعت ساخت و ساز ارائه می‌نماید. در این راستا، با انتخاب پروتکل بارگذاری لرزه‌ای مشخص، تاثیر آن را بر روی رفتار نمونه‌های تیر سالم و آسیب دیده مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش بر اساس مطالعات تکنولوژی بتن گذشته و تعیین حداکثر میزان جایگزینی خاکم با سیمان، اقدام به ساخت تیرهای مسلح بتن خاکی خودتراکم حاوی ۵۰٪ خاک نموده و با بتن مرجع مقایسه شده است. در این راستا، پس از تعیین تغییر مکان حاصل از ترک خوردگی با انجام آزمایش مونوتونیک بر روی انواع تیرها، نمونه‌ها تحت آزمایش چرخه‌ای یکنواخت و پس از آن، بررسی پس از زلزله اصلی نیز صورت پذیرفته است. بر ادامه، تیرهای ساخته شده از طرح‌های اختلاط مشخص تحت بارهای کنترل شده با جابجایی بر اساس سه سطح آسیب کم (S)، متوسط (M) و شدید (E) مورد آزمایش قرار گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان به موارد زیر دست یافت:

۱. جایگزینی ۵۰٪ سیمان با خاک (C50) موجب کاهش ۲۰ درصدی Δy در مقایسه با مخلوط RE گردید. از سوی دیگر، کاهش Δy در C50 بواسطه جذب ذاتی آب اجزای خاک می‌باشد که منجر به کاهش مدول الاستیسیته بتن و انتقال سریع به فاز پلاستیک می‌گردد.

۲. با توجه به نتایج بارگذاری هارمونیک کامل، تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای کاهش مقاومت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصدی نمونه‌های RE با جایگزینی خاک به جای سیمان (C50) کاهش یافت. بر اساس نتایج، نمونه HAR-C50-3 سریع‌تر به فاز غیرخطی وارد می‌شود و کاهش مقاومت با سرعت بیشتری نسبت به نمونه HAR-RE-3 رخ می‌دهد. این به دلیل کاهش مقدار کلینکر و در نتیجه کاهش مقاومت مکانیکی بتن می‌باشد.

۳. از سوی دیگر، کاهش مقاومت نمونه‌های C50 در سطوح آسیب دیده کم، متوسط و شدید به ترتیب ۳/۳۱، ۱۹/۶ و ۳/۱۲٪ در مقایسه با نمونه‌های RE در تعداد چرخه‌های ثابت (N=100) افزایش یافت. این نتیجه به دلیل محتوای ناکافی سیمان می‌باشد که در چسبندگی بین سنگدانه‌ها و ماتریس بایندر را تضعیف می‌نماید.

۴. نتایج پاسخ‌های یکنواخت بر روی نمونه آسیب دیده نشان می‌دهد که افزایش سطوح آسیب باعث کاهش سختی هر دو طرح RE و C50 می‌گردد. نتایج نشان داد که سختی نمونه C50 در مقایسه با نمونه RE به میزان ۶۲/۲۳٪ کاهش یافته است. این نتیجه به واسطه جایگزینی خاک به جای سیمان حاصل می‌گردد که موجب عدم همگنی و ایجاد فضاهای خالی می‌شود. همچنین، شکل پذیری نمونه با افزایش سطح آسیب کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد، با جایگزینی سیمان با خاک، شکل پذیری نیز سریع‌تر کاهش می‌یابد.

قدردانی

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] Van Damme, H. and Houben, H. (2018). *Earth concrete. Stabilization revisited*. Cement and Concrete Research, Elsevier. Vol. 114, pp. 90–102.
- [2] Juenger, M.C.G., Snellings, R., Bernal, S.A., (2019). *Supplementary cementitious materials: new sources, characterization, and performance insights*. Cement and Concrete Research. Vol.122, 257–273.
- [3] Gomaa, M., Schade, S., Bao, K., Xie, Y., (2023). *Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect*. Journal of Cleaner Production. Vol. 2, 123–21.

- [4] 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. 254, 1193-15.
- [5] Samimi, K., Pakan, M. and 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. Vol. 424, 118561.
- [6] Abdulkader, M., Khalid, H.R., Ibrahim, M., Adekunle, S.K., Al-Osta, M.A., Ahmad, S., Sajid, M., (2023). *Physicochemical properties of limestone calcined clay cement (LC₃) concrete made using Saudi clays*. Journal of Materials Research and Technology. Vol. 25, 2769–2783.
- [7] 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, pp.1153-1175.
- [8] 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. 79, 107644.
- [9] Samimi, K. and Pakan, M., (2023). *Study of mechanical properties and microstructure of cement paste containing graphene based on surfactant*. Journal of Structural and Construction Engineering. Vol. 16, 670.
- [10] khodaparast, afshin, Samimi, K., Pakan, Mahyar, (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, Vol. 39, 107694.
- [11] Kohandelnia, M., Hosseinpour, M., Yahia, A., Belarbi, R., (2023). *Multiscale investigation of self-consolidating earthen materials using a novel concrete-equivalent mortar approach*. Construction and Building Materials. Vol. 370, 130700.
- [12] Zhou, Y., Fan, L., Xing, F., Lin, W., Hu, R., Guo, M., Zhu, Z., (2024). *Effect of nano-SiO₂ modification on the seismic performance of recycled aggregate concrete shear walls*. Engineering Structures. Vol. 307, 117945.
- [13] Coccia, S., Como, M., (2024). *Out-of-plane dynamical strength of masonry walls under seismic Actions*. Journal of Earthquake Engineering. Vol. 213, P22–42.
- [14] Ashraf, W., Borno, I.B., Khan, R.I., Siddique, S., Haque, M.I., Tahsin, A., (2022). *Mimicking the cementation mechanism of ancient Roman seawater concrete using calcined clays*. Applied Clay Science. Vol. 230, 106696.
- [15] Li, J., Zhang, W., Li, C., Monteiro, P.J.M., (2019). *Green concrete containing diatomaceous earth and limestone: Workability, mechanical properties, and life-cycle assessment*. Journal of cleaner production. Vol. 223, 662–679.
- [16] Houben, H., Guillaud, H., (1994). *Earth construction: a comprehensive guide*. Vol. 121, 662–222.
- [17] Lourenço, P.B., Ciocci, M.P., Greco, F., Karanikoloudis, G., Cancino, C., Torrealva, D., Wong, K., (2019). *Traditional techniques for the rehabilitation and protection of historic earthen structures: The seismic retrofitting project*. International Journal of Architectural Heritage. Vol. 13, 15–32.
- [18] El-Nabouch, R., Bui, Q.-B., Plé, O., Perrotin, P., (2017). *Assessing the in-plane seismic performance of rammed earth walls by using horizontal loading tests*. Engineering Structures. Vol. 145, 153–161.
- [19] Marder, K.J., Motter, C.J., Elwood, K.J., Clifton, G.C., (2018). *Effects of variation in loading protocol on the strength and deformation capacity of ductile reinforced concrete beams*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Dyn. Vol. 47, 2195–2213.
- [20] Mofid, T., Tavakoli, H.R., (2020). *Experimental investigation of post-earthquake behavior of RC beams*. Journal of Building Engineering. Vol. 32, 101673.

- [21] Massumi, A., Sadeghi, K., Ghaedi, H., (2021). *The effects of mainshock-aftershock in successive earthquakes on the response of RC moment-resisting frames considering the influence of the vertical seismic component*. Ain Shams Engineering Journal. Vol. 12, 393–405.
- [22] Di Sarno, L., Pugliese, F., (2021). *Effects of mainshock-aftershock sequences on fragility analysis of RC buildings with ageing*. Engineering Structures. Vol. 232, 111837.
- [23] Seed, H.B., Martin, P.P., Lysmer, J., (1976). *Pore-water pressure changes during soil liquefaction*. Journal of the geotechnical engineering division. Vol. 102, 323–346.
- [24] Tavakoli, H.R., Mahmoudi, S., Goltabar, A.R., Jalali, P., (2017). *Experimental evaluation of the effects of reverse cyclic loading rate on the mechanical behavior of reinforced SCC beams*. Construction and Building Materials. Vol. 131, 254–266.
- [25] Nojavan, A., (2015). *Performance of full-scale reinforced concrete columns subjected to extreme earthquake loading*. University of Minnesota, Vol. 122, 1-236.
- [26] Fan, G., Song, Y., Wang, L., (2014). *Experimental study on the seismic behavior of reinforced concrete beam-column joints under various strain rates*. Journal of Reinforced Plastics and Composites. Vol. 33, 601–618.
- [27] ASTM D2487-17. (2017). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. p. 10.
- [28] ASTM:C150-04a, (2004). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International. Vol. 1–8.
- [29] Association Française du Génie Civil (AFGC). (2002). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. AFGC-SETRA. p. 11.
- [30] ASTM E8, (2013). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, American Society for Testing and Materials. P-12
- [31] ASTM C31 / C31M - 21a. (2021). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. ASTM International, Philadelphia. p. 1–7.
- [32] 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.
- [33] Ngo, D.C., (2018). *Développement d'un nouveau éco-béton à base de sol et fibres végétales: étude du comportement mécanique et de durabilité*. HAL Open Sci. P-160-200
- [34] ACI 318, (1994). *“Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”*, in: ACI Structural Journal. American Concrete Institute, p. 503.
- [35] 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. 239