

بررسی رفتار مکانیکی بتن حاوی مصالح بازیافتی بتن و لاستیک به عنوان پی جداساز

فاطمه آینه‌چی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

هاشم شریعتمدار* (استاد)

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۳)
دوره ۴۰، شماره ۱، صص. ۱۵۹-۱۶۷، (پنداشت ش)

با توجه به شرایط لرزه‌خیز کشور ایران و خسارت‌های زیادی که در نتیجه آن به وجود می‌آید، تغییر در عملکرد فعلی طراحی سازه‌ی برای دستیابی به عملکرد بهتر در سیستم لرزه‌ی ضروری است. از سوی دیگر، نگرانی‌های زیست‌محیطی، مهندس‌های عمران را بر آن داشته است تا روش‌های مناسب استفاده‌ی مجدد از ضایعات ساختمانی را شناسایی کنند. هدف پژوهش حاضر، بررسی آزمایشگاهی رفتار بتن ساخته شده با مصالح بازیافتی به عنوان پی گسترده‌ی است که برای ساختمان‌های با ارتفاع کم یا متوسط نقش جداساز لرزه‌ی دارد. در پژوهش حاضر، تأثیر گرانول لاستیک و سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی بر روی بتن بررسی و چهار طرح اختلاط متفاوت به ترتیب فاقد مصالح بازیافتی، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی جایگزین درشت‌دانه، طراحی و ساخته شده است. یافته‌ها نشان داده‌اند که تغییر درصد سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی به جای درشت‌دانه، سبب کاهش مقاومت‌های فشاری و خمشی و افزایش چشمگیر مقاومت برشی شده است.

واژگان کلیدی: بتن، پی جداساز، لاستیک زائد، سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، مقاومت مکانیکی.

fatemeh.ayenehchi@mail.um.ac.ir
shariatmadar@um.ac.ir

۱. مقدمه و تاریخچه‌ی پژوهش

دهه نمی‌گذرد، به سه دسته‌ی کلی جداسازهای لرزه‌ی، سیستم‌های اتلاف انرژی (میراگرها) و سیستم‌های کنترل لرزه‌ی فعال و نیمه‌فعال تقسیم می‌شوند. در سیستم جداسازی لرزه‌ی با تعبیه‌ی تجهیزات جداسازی لرزه‌ی در پایین‌ترین تراز ممکن در پای ساختمان، سازه از نیروی جانبی و خسارت‌های وارده از طرف زلزله جدا می‌شود. این امر با کاهش سختی جانبی و در نتیجه افزایش زمان تناوب اصلی سازه و افزایش میرایی سازه و به عبارت دیگر، افزایش ظرفیت اتلاف انرژی مجموعه میسر می‌شود.^[۱]

یکی از اهداف جداساز لرزه‌ی، افزایش دوره‌ی تناوب طبیعی سازه است، که براساس طیف‌های طراحی، سبب کاهش شتاب ورودی به سازه می‌شود. از طرفی دیگر، با توجه به آنکه دوره‌ی تناوب حاکم بیشتر زلزله‌های به‌وقوع پیوسته، عددی بین ۰/۱ تا ۱ ثانیه است، سبب دور شدن سازه از میدان تشدید می‌شود. افزایش دوره‌ی تناوب طبیعی سازه بسته به انعطاف روسازه و نیاز طراحی، می‌تواند تا بیش از ۳ ثانیه نیز باشد. علت دیگر بهره‌گیری از جداسازی‌های لرزه‌ی، تأمین مکانیزمی برای افزایش میرایی سازه و استهلاک انرژی زلزله است.^[۲]

جداسازی لرزه‌ی عبارت از جدا کردن کل یا بخشی از سازه از زمین یا قسمت‌های

ایران در منطقه‌ی فعال لرزه‌ی قرار دارد و اغلب تلفات و خسارت‌های سنگین ناشی از زلزله‌های ویرانگر در کشور مشاهده می‌شود. لذا مردم در طول تاریخ تلاش کرده‌اند تا با استفاده از روش‌های مختلف با خطر طبیعی مقابله کنند. کاربرد روش جداسازی در ایران به صدها سال پیش و حتی دوران باستان باز می‌گردد. استفاده از سنگ‌های تخته‌ی چندلایه و نصب الوارهایی از چوب بین پی و دیوارهای خانه‌ها، از جمله: روش‌های ساخت مقاوم در برابر زلزله بوده است، که در گذشته در برخی مناطق ایران استفاده شده است. با این حال، تا چند سال اخیر از فناوری جدید جداسازی لرزه‌ی در ایران استفاده نشده است؛ که یک دلیل مهم برای آن می‌تواند به این واقعیت مربوط شود که تغییر ذهنیت سازندگان از روش جاری ساخت به یک فناوری توسعه‌یافته‌ی جدید مشکل است.^[۱]

در علم مهندسی زلزله‌ی نوین، به جای افزایش ظرفیت باربری جانبی، با تجهیز سازه به سیستم‌های محافظتی نیاز وارد از طرف زلزله تا یک سطح قابل قبول کاهش داده می‌شود. سیستم‌های مذکور، که از طول عمر اختراع آنها بیش از چند

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۱۰، اصلاحیه ۱۴۰۲/۲/۱۹، پذیرش ۱۴۰۲/۳/۲۸.

استناد به این مقاله:

آینه‌چی، فاطمه و شریعتمدار، هاشم، ۱۴۰۳. بررسی رفتار مکانیکی بتن حاوی مصالح بازیافتی بتن و لاستیک به‌عنوان پی جداساز. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۱)، صص. ۱۵۹-۱۶۷.

DOI:10.24200/J30.2023.61549.3183

دیگری از سازه با مصالحی انعطاف‌پذیر یا جزئیات لغزان، به منظور کاهش پاسخ لرزه‌یی سازه یا بخشی از آن در زمان رویداد زلزله است. ایده‌ی طراحی سازه‌های جداسازی شده براساس کنترل قدرت تخریبی زمین‌لرزه‌های اخیر، از طریق ممانعت از ورود ارتعاش‌های زمین به سازه بنا شده است. در جداسازی لرزه‌یی، دوره‌ی تناوب اصلی سازه به کمک تجهیزاتی که بین روسازه و زیرسازه قرار می‌گیرد، افزایش می‌یابد و با جابجایی دوره‌ی تناوب سازه از ناحیه‌ی پرشتاب طیف طرح به ناحیه‌ی کم شتاب آن، شتاب زلزله‌ی مؤثر در سازه و نیروهای ناشی از آن کاهش می‌یابد. به دلیل انعطاف‌پذیری جداسازها و تغییرمکان ناشی از آنها، کاهش تغییرمکان در سازه‌های جداسازی شده امری ضروری است. در حال حاضر، جداسازی پایه، به‌عنوان یک روش و تکنولوژی مؤثر جهت کاهش خرابی اعضای سازه‌یی و غیرسازه‌یی در هنگام زمین‌لرزه پذیرفته شده و تعداد رو به رشد ساختمان‌ها و پل‌های ساخته شده با استفاده از تکنولوژی جداسازی پایه بیانگر پذیرش است.^[۴]

استفاده از جداسازهای لرزه‌یی اغلب برای ساختمان‌های مرتفع و پروژه‌های بزرگ مقرون به صرفه است، همچنین ساختمان‌های با ارتفاع متوسط و یا کم، با توجه به قرارگیری در منطقه‌ی لرزه‌خیز، برای پیشگیری از خسارت جبران‌ناپذیر آتی نیاز به جداساز لرزه‌یی دارند.^[۵]

از طرفی فعالیت‌های مهندسی، ضایعات زیادی را تولید می‌کنند، که منجر به آلودگی زیست‌محیطی می‌شوند و نگرانی‌هایی را برای مهندس‌ها به وجود می‌آورد. بنابراین، امروزه مهندسان تمایل بیشتری دارند تا برای پروژه‌های خود از روش‌های مناسب استفاده‌ی مجدد از ضایعات استفاده کنند. لاستیک‌های زائد، منبع خوبی از ضایعات با کیفیت بالا و پایدار است، که می‌تواند از طریق فناوری‌های جدید قابل دسترس و مقرون به صرفه باشد.

همچنین از آنجایی که عمر مفید سازه‌های زیربنایی کشور رو به اتمام است و نیاز به تخریب دارند به‌کارگیری ضایعات تخریبی آن‌ها، مانند سنگ‌دانه‌های حاصل از بتن بازیافتی، می‌تواند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد.

با توجه به مطالعات انجام‌گرفته، ضرورت پژوهش حاضر، بررسی رفتار جداساز لرزه‌یی ساخته شده با مصالح لاستیک زائد و سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی است، که برای توسعه‌ی سیستم فونداسیون ساختمان‌های مسکونی با ارتفاع کم یا متوسط است.

بر این اساس، در ابتدا پژوهش‌های انجام‌شده روی لاستیک بازیافتی و سپس روی سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی بررسی شده‌اند. بررسی‌ها بدین جهت بوده است که پی بتنی ساخته‌شده با مصالح ذکرشده بتواند رفتار انعطاف‌پذیر و مستحکم‌کننده‌ی انرژی داشته باشد، بنابراین برای راستی‌آزمایی طرح موردنظر، آزمایش‌های مکانیکی شامل: مقاومت‌های فشاری، خمشی، و برشی انجام و در انتها نتایج حاصل بررسی شده‌اند.

۱.۱. لاستیک زائد (تایر)

لاستیک زائد، به دلیل افزایش جمعیت و به دنبال آن، افزایش استفاده از وسایل حمل و نقل جاده‌یی و شهری، یک معضل جهانی برای محیط زیست، به جهت دفن زباله‌های ناشی از آن و آلودگی‌های فراوانی که به وجود می‌آورد، به‌شمار می‌رود. در سال ۱۹۹۸، پس از آنکه کاهش منابع طبیعی به دلیل گسترش صنایع مرتبط با ساخت‌وساز، پررنگ شد؛ تلاش‌های پژوهشی درخصوص استفاده از محصولات زائد قابل بازیافت، مانند لاستیک‌های قراضه به‌عنوان جایگزین برای مواد تجدیدناپذیر سرعت بخشیده شد و مورد حمایت مقام‌های کشورهای مختلف قرار گرفت.^[۶]

بناروک^۱ و همکاران (۲۰۰۳)، با بررسی خواص دوام لاستیک بازیافتی دریافتند که عملکرد ضعیف ذرات لاستیکی بازیافتی سبب کاهش دوام نمونه‌های مورد بررسی شده است.^[۷] پژوهشگران برای غلبه بر چالش اخیر، راه‌های مختلفی برای بهبود عملکرد پیوند ذرات لاستیکی و بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن لاستیکی امتحان کرده‌اند. مثلاً آلبانو^۲ و همکاران (۲۰۰۵)، در بررسی و مقایسه‌ی تأثیر اندازه‌ی ذرات لاستیک در خاصیت دوام لاستیک‌های بازیافتی و عادی دریافتند که اندازه‌ی ذرات لاستیک مرتبط با میزان دوام لاستیک ساخته شده است.^[۸]

برای کشورهایی که نزدیک به لبه‌های صفحه‌های تکتونیکی قرار دارند، همواره فعالیت‌های لرزه‌یی، حساس بوده است؛ چرا که باعث تخریب فاجعه‌آمیز ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها می‌شود. اجزاء سازه‌یی عموماً جهت حفظ پایداری سازه قرار داده می‌شوند و در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی مرتبط، به‌صورت ضوابط و دستورالعمل مقرر شده‌اند. جهت تکمیل اجزاء سازه‌یی، مطالعات درخصوص زیرساخت‌ها گسترش یافته است. در نتیجه‌ی مطالعات اخیر، سیستمی به نام جداسازی لرزه‌یی معرفی شد. تسانگ^۳ و همکاران (۲۰۰۷) دریافتند در سیستم‌های جداسازی لرزه‌یی، که به عنوان جداسازی پایه نیز شناخته می‌شود، یک رابط منعطف یا لغزنده بین سازه و زیرسازه وجود دارد، که به تثبیت حرکت افقی شده در زمین (از نظر فعالیت لرزه‌یی کمک می‌کند. در حقیقت، اثر حرکت افقی وارد آمده از طرفی فعالیت لرزه‌یی بر سازه را کاهش می‌دهد. ایشان با مطالعه‌ی تأثیر استفاده از لاستیک زباله‌ی مخلوط با خاک به‌عنوان رابط بین فونداسیون و سازه برای افزایش مقاومت در برابر نیروهای ناشی از زلزله به تأیید گفته‌ی اخیر پرداختند و براساس مقادیر ورودی از پیش تعیین شده، دریافتند که مخلوط‌های لاستیک و خاک در مقایسه با خاک مرجع، کاهش ۶۰ الی ۷۰ درصدی شتاب‌های افقی و عمودی زمین را به همراه دارند.^[۹]

او یکنومو و ماوردو^۴ (۲۰۰۹) نیز اذعان داشتند که فراوانی روزافزون لاستیک‌های زباله و فقدان چارچوب پردازش یا بازیافت هماهنگ، نگرانی درخصوص مدیریت مواد اخیر را افزایش می‌دهد. با توجه به شناخت اخیر جهانی و آگاهی قوی زیست‌محیطی، بسیاری از مقامات، قوانین و مقررات سختگیرانه‌یی در مورد محصول‌های پسماند اخیر، جهت جلوگیری از انبار بیش از حد و عملیات دفن زباله وضع کرده‌اند؛ که با اعمال آنها، فرصت مناسبی برای پژوهشگران فراهم شده است تا اقدام‌های پایدار و استفاده‌های جایگزین برای لاستیک‌های زباله را بررسی کنند. استفاده‌ی جایگزین زباله‌های لاستیکی بیش از ۳۰ سال است که در مهندسی عمران بررسی شده است.^[۱۰]

آزودو^۵ و همکاران (۲۰۱۲)، در بررسی و مقایسه‌ی تأثیر میزان سدیم هیدروکسید در خاصیت مکانیکی لاستیک‌های بازیافتی و عادی دریافتند که جهت بهبود خاصیت مکانیکی لاستیک بازیافتی و نزدیک شدن خواص مکانیکی آن به لاستیک عادی، درصد سدیم هیدروکسید باید به ۴٪ محدود شود.^[۱۱]

لی و همکاران (۲۰۱۴)، در بررسی تفاوت مقاومت در برابر ترک خوردن بین دو نمونه‌ی بتنی ساخته‌شده با لاستیک بازیافتی و لاستیک طبیعی نشان دادند که هر چه عمر نمونه‌ی بتنی بررسی‌شده بیشتر باشد، بتن ساخته‌شده با لاستیک بازیافتی رفتار بهتری در برابر فشار و ترک خوردن از خود نشان می‌دهد و اولین ترک‌ها در اثر فشار در زمان دیرتری در نمونه نمایان می‌شود.^[۱۲]

مشیری و همکاران (۲۰۱۵) هم به جمع‌آوری داده‌های آماری از کارگاه‌های مادر و نیز داده‌های آماری سازمان‌های مرتبط، درخصوص میزان تولید سالانه‌ی لاستیک در سطح جهان پرداختند و دریافتند که تولید سالانه‌ی لاستیک‌های ضایعاتی، بر حسب تقاضای مطرح‌شده و برآورده‌کردن نیاز صنایع مختلف و عوام مردم، در سراسر

دوان^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۴)، در بررسی درصد‌های مختلف ملات قدیمی چسبیده به سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی دریافتند که درصد پایین ملات قدیمی چسبیده به سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، منجر به افزایش جذب آب، شاخص خردشدگی، و شاخص سایش می‌شود. در نتیجه، عملکرد بتن حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی ضعیف‌تر از بتن حاوی سنگ‌دانه‌ی طبیعی است. همچنین ایشان یک روش نسبتاً ارزشمند، به نام طرح اختلاط دو مرحله‌ی، جهت تقویت سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی ارائه دادند، که مزیت آن، مقرون به صرفه بودن و قابلیت بالای اجرا با صرف کمترین زمان بوده و از این جهت به تأیید جامعه‌ی مهندسی رسیده است.^[۲۰]

ویرا^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۶)، در بررسی مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ی بتنی با سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی نشان دادند که میزان کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی و همچنین از دست دادن مقاومت خمشی بتن در ترکیب سنگ‌دانه‌ی طبیعی بسیار بیشتر از بتن با ترکیب سنگ‌دانه‌ی بازیافتی بوده است. ایشان همچنین دریافتند که در بتن با ترکیب سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به علت میزان جذب آب و به دنبال آن، رعایت دقیق نسبت آب به سیمان، بتن با کیفیت مطلوب و مناسب تولید می‌شود و استفاده از سنگ‌دانه‌ی بازیافتی را به دلیل کاربرد یکسان و کیفیت مناسب‌تر اعلام کردند. مثلاً، روش‌های مختلف آماده‌سازی بتن را می‌توان برای تنش‌های متفاوت در فرآیند ساخت‌وساز به‌کار گرفت. آن‌ها همچنین دریافتند که تا محدوده‌ی خاصی با برخی فرایندهای ساده و کم‌هزینه، مانند: تنظیم نسبت آب به سیمان، محتوای آب اضافه شده، و روش مخلوط‌کردن می‌توان در جهت بهبود بتن گام برداشت و آن را به کیفیت مطلوب رساند.^[۲۱]

دچر^{۱۳} (۲۰۱۹)، نیز به جمع‌آوری داده‌های آماری در خصوص حجم بتن تولید شده از کارخانه‌های معتبر و سازمان‌های مرتبط پرداخت و پس از بررسی‌های لازم اعلام کرد که تولید جهانی بتن در دو دهه‌ی گذشته از ۱/۸۱ به ۳/۷ میلیارد تن (افزایش ۳ برابری) رسیده است، که این افزایش منجر به نگرانی بابت افزایش تولید آلاینده‌ها شده است.^[۲۲]

بای^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۰)، در بررسی روابط کمی محتوای ملات متصل به سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی و تأثیر آن در عملکرد بتن پرداختند و دریافتند کندن لایه‌های متصل به سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، یگانه راه بهبود عملکرد بتن بازیافتی نیست. با این حال، روش‌های مناسب دیگری نیز وجود دارد. مثلاً با ارزیابی برخی روش‌های ساده و اقتصادی، مانند: کنترل نسبت آب به سیمان، تنظیم رطوبت، و روش اختلاط مختلف می‌توان عملکرد بتن بازیافتی را بهبود بخشید تا نیاز به کیفیت مطلوب بتن به لحاظ خواص دینامیکی و دوام آن برآورده شود.^[۲۳]

وانگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی فرآیند بازیافت و استفاده‌ی مجدد بتن، روند ساخت بتن با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی و تفاوت روند ساخت بتن با سنگ‌دانه‌ی بازیافتی با روند ساخت بتن با سنگ‌دانه‌ی طبیعی پرداختند و پس از بررسی کامل خواص شیمیایی و فیزیکی و همچنین عملکرد بلندمدت بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی به مزایای کاهش تخلخل در بتن و حذف لایه‌ی ملات قدیمی بر روی سطح بتن پی بردند. همچنین با استفاده از مدل‌های مبتنی بر رگرسیون فعلی و هوش مصنوعی به بازنگری مقاومت فشاری، مدول کشسانی و منحنی تنش کرنش سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی پرداختند.^[۲۴]

در مطالعات ساهو^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۲)، در مقایسه‌ی خواص مکانیکی و دوام تازه بین بتن معمولی و بتن بازیافتی با جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی ریزو درشت با سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی نشان داد که خواص فیزیکی و دوام سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی ریزو درشت به دلیل ملات متصل قدیمی و طبیعت متخلخل، نتایج کمتری نسبت به سنگ‌دانه‌های بکر نشان داده و کارایی بتن در جایگزینی‌های

جهان به ۱/۵ میلیارد لاستیک کامل می‌رسد. لاستیک‌های کامل دارای ویژگی‌های منحصراً به فرد بسیاری، از جمله: ویژگی‌های لاستیک‌های ضایعاتی هستند، که می‌توان به چگالی کم، خواص عایق خوب، قابلیت زهکشی بالا، و دوام طولانی مدت پس از استفاده‌ی پی‌درپی اشاره کرد.^[۱۳]

ریواس^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۵)، در بررسی تفاوت مقاومت در برابر ضربه بین دو نمونه‌ی بتنی ساخته‌شده با لاستیک‌های بازیافتی و طبیعی نتیجه گرفتند که استفاده از لاستیک بازیافتی در نمونه‌ی بتنی، از نظر مقاومت در برابر ضربه نیز همانند مقاومت در برابر ترک خوردن، به صرفه‌تر از نمونه‌ی بتنی ساخته‌شده با لاستیک عادی است.^[۱۴]

یوسف و همکاران (۲۰۱۵)، برای بررسی رفتار لرزه‌ی ستون‌های بتن مسلح ساخته‌شده از خرده بتن لاستیکی (CRC) ^{۱۷}، در مجموع، سه ستون، یکی به صورت CRC و دو ستون دیگر ساخته شده از بتن معمولی با بارهای محوری متنوع ساختند. برای ارزیابی خواص میرایی، قبل از آزمایش چرخه‌ی هر ستون، یک آزمایش برگشت سریع انجام دادند و این نتایج را به دست آوردند: الف) با افزودن خرده لاستیک به نمونه، تغییر قابل توجهی در شکل‌پذیری و استحکام جانبی نهایی مشاهده نشده است؛ ب) در مقطع ستون CRC در مقایسه با ستون‌های معمولی انحنا به‌وجود آمده است؛ ج) آسیب ستون‌های بتنی تحت بارگذاری لرزه‌ی از طریق خرده لاستیک کاهش یافته و یا به تأخیر افتاده است.^[۱۵]

استراکار^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند بدیهی است که سنگ‌دانه‌های لاستیکی ضایعاتی را می‌توان به عنوان جایگزینی جزئی برای سنگ‌دانه‌های درشت و دانه‌های ریز استفاده کرد؛ زیرا نتایج پژوهش‌های ایشان نشان داد که جایگزینی سنگ‌دانه‌ی طبیعی با سنگ‌دانه‌ی لاستیک بازیافتی در بتن، باعث ایجاد عناصر ساختاری با رفتار بهبود یافته، از جمله: افزایش ظرفیت تغییرشکل (شکل‌پذیری)، اتلاف بهتر انرژی و میرایی بیشتر در مقایسه با بتن استاندارد ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌ی معمولی شده است. با این حال، افزایش محتوای لاستیک در بتن نیز آثار منفی مانند کاهش: فشار، کشش، و مدول کشسانی پانگ دارد.^[۱۶]

نتایج لی و همکاران (۲۰۲۲) نشان داده است که افزایش محتوای لاستیک می‌تواند مقاومت در برابر نفوذ کلرید، مقاومت در برابر حمله‌ی اسید و سولفات، مقاومت در برابر انجماد-ذوب، و مقاومت در برابر آسیب واکنش قلیایی - سیلیکا بتن را بهبود بخشد و محتوای ۵ تا ۲۰ درصد اثر بهبود قابل توجهی دارد. لاستیک جایگزین سنگ‌دانه‌های ریز بهترین طرح برای دوام است. علاوه بر این، اندازه‌ی ذرات لاستیکی توصیه شده ۰ تا ۳ میلی‌متر بوده است. با این حال، ذرات لاستیک آثار نامطلوبی در مقاومت در برابر سایش، نفوذناپذیری و نیز مقاومت در برابر جذب آب و کربناته شدن دارد.^[۱۷]

۲.۱. سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی

هانسن^{۱۹} (۱۹۸۶)، در بررسی تفاوت سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی با سنگ‌دانه‌ی طبیعی در خصوص جذب آب و خشک‌شدگی نمونه نشان داد که سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی در مقایسه با سنگ‌دانه‌ی طبیعی، جذب آب بالاتر، مقاومت فشاری پایین‌تر و تأخیر در خشک‌شدگی دارد.^[۱۸]

براساس گزارش‌های ژیاو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۲)، در دهه‌های اخیر در مناطقی شهری قدیمی چین، بازسازی گسترده‌ی انجام شده است؛ که سبب افزایش چشمگیر میزان زباله‌های ساختمانی و تخریبی (حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد زباله‌های جامد شهرداری) شده است.^[۱۹]

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی.

نتایج	آزمایش‌های فیزیکی
۳,۱۸۵	وزن مخصوص (ton/m^3)
۲۵,۸۰	درصد آب غلظت طبیعی
۱۵۰/۰۰	زمان گیرش با سوزن و بیکات
۲:۵۰	گیرش اولیه (دقیقه)
	گیرش نهایی (ساعت)
	سلامت سیمان (انقباض)
۰/۰۲	درصد انقباض آزمایش اتوکلاو
۱/۰۰	انقباض آزمایش لوشاتایه (mm)
۰/۰۳	درصد انقباض سولفات ۱۴ روزه
	نرمی
۳۷۵۰/۰۰	سطح مخصوص. بلین (cm^2/gr)
۴/۶۰	درصد باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون
نتایج	آزمایش‌های فیزیکی
۳,۱۸۵	وزن مخصوص (ton/m^3)
۲۵,۸۰	درصد آب غلظت طبیعی
۱۵۰/۰۰	زمان گیرش با سوزن و بیکات
۲:۵۰	گیرش اولیه (دقیقه)
	گیرش نهایی (ساعت)
	سلامت سیمان (انقباض)
۰/۰۲	درصد انقباض آزمایش اتوکلاو
۱/۰۰	انقباض آزمایش لوشاتایه (mm)
۰/۰۳	درصد انقباض سولفات ۱۴ روزه
	نرمی
۳۷۵۰/۰۰	سطح مخصوص. بلین (cm^2/gr)
۴/۶۰	درصد باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون

جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه‌ی مصرفی.

وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	مدول نرمی	درصد جذب آب
۱,۶۵	۲,۴۴	۳,۸۰

جدول ۳. مشخصات فیزیکی شن مصرفی.

درصد سایش	وزن مخصوص (gr/cm^3)	درصد جذب آب
۱۰/۲۱	۱,۷۰	۱,۳۸

جدول ۴. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی.

درصد سایش	وزن مخصوص (gr/cm^3)	درصد جذب آب
۲۶,۵۰	۲,۴۰	۲,۱۰

جدول ۵. خواص فیزیکی الیاف فورتافرو.

وزن مخصوص (kg/m^3)	طول الیاف (mm)	قطر الیاف (mm)	مدول کشسانی (mm)
۹۱۰/۰۰	۵۴,۰۰	۰,۳۴	۴,۷۰

همچنین، جهت ساخت و تهیه‌ی نمونه‌های بتنی، از شن موجود در محل دپوی آزمایشگاه سازی و به‌صورت شکسته استفاده و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۳ ارائه شده است. تهیه‌ی سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی از باکس ضایعات آزمایشگاه سازی دانشگاه بوده است، که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۴ ارائه شده است. گرانول و پودر لاستیک بازیافتی با هماهنگی دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه و سازمان مدیریت پسماند از کارخانه‌ی مربوط به بازیافت مواد تهیه شده است. اندازه‌ی ذرات لاستیک‌های خردشده بین ۰/۰۷۵ میلی‌متر تا ۴/۷۵ میلی‌متر و چگالی آن ۰/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است. با توجه به اینکه الیاف فولادی بازیافتی موجود در تیر لاستیکی، توسط آهن‌ربا جدا شده است، گرانول‌های لاستیکی عاری از هرگونه الیاف فولادی بوده‌اند. قبل از اختلاط بتن جهت پاک شدن پودر و گرانول لاستیک از هرگونه ناخالصی و گرد و غبار، ذرات لاستیک با محلول ۴٪ سدیم‌هیدروکسید، به‌منظور افزایش چسبندگی رابط لاستیک و سیمان، شسته شده‌اند.^[۱۱]

برای جلوگیری از گسترش ترک‌ها از الیاف فورتافرو استفاده شده است، که از کولیمرو پلی‌پروپیلن ۱۰٪ خالص ساخته و به شکل الیاف نازک درهم تابیده شده و به‌صورت الیاف شبکه‌ی استفاده شده است. الیاف فورتافرو در محیط‌های اسیدی و قلیایی مقاومت بسیار بالایی دارد. مشخصات الیاف فورتا مصرفی در جدول ۵ ارائه شده است.

۲.۲. ساخت نمونه‌های بتنی

در پژوهش حاضر، برای طراحی طرح اختلاط بتن، از روش حجمی استاندارد ۱-۲۱۱ ACI استفاده شده است. هدف از طرح اخیر، دستیابی به یک پی‌گسترده به جهت جداساز لرزه‌ی بوده و در آن، برای برآورده ساختن شباهت بالا به جداساز معمولی، از بیشترین مقدار مجاز لاستیک و الیاف استفاده شده است. طبق نشریه‌ی شماره‌ی ۵۲۳، تلاش بر آن بوده است تا مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به ۱۰ مگاپاسکال برسد.^[۱۶] لذا برای ساخت چنین بتن سبکی از مصالح سنگی سبک استفاده شده است. از آنجایی که گرانول لاستیک و سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی هر دو منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شوند، مبنای مقاومت فشاری طرح مذکور، ۳۰

مختلف سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی نسبت به بتن معمولی از ۰ تا ۴۰ درصد افزایش یافته است؛ لذا با افزودن مواد افزودنی شیمیایی و معدنی مناسب می‌توان مقاومت سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی را تا ۲۰٪ نسبت به بتن معمولی افزایش داد.^[۲۵]

۲. مصلح و برنامه‌ی آزمایشگاهی

تعیین مشخصات مصلح موردنیاز و مقادیر آن‌ها، روش ساخت و ابعاد نمونه‌ها، تعیین شرایط و مراحل انجام آزمایش‌ها به پژوهشگر کمک می‌کند تا به نتایج قابل اعتمادتری برسد.

۱.۲. مصلح مصرفی

پیش از ساخت نمونه‌های بتنی، انتخاب صحیح نوع سیمان از ملزومات است. سیمان پرتلند معمولی (نوع I) برای مصرف در کارهای ساختمانی عمومی در مواقعی که بتن با سولفات‌های محلول در آب موجود در خاک و یا آب‌های سطحی مواجه نشود، مناسب است. در پژوهش حاضر، از سیمان تیپ ۱-۵۲۵ بجنورد استفاده شده است، که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

آب مصرفی پژوهش حاضر، آب شرب (لوله‌کشی) بوده است. ماسه‌ی استفاده شده نیز، ماسه‌ی شسته شده در محل دپوی آزمایشگاه سازی دانشگاه است، که از کارخانه‌های شن‌شویی خریداری و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۶. طرح‌های اختلاط پی جداساز.

نام طرح پی جداساز	شاهد	%۴۰	%۵۰	%۶۰
سیمان (kg/m^3)	۳۷۲,۰۰	۳۷۲,۰۰	۳۷۲,۰۰	۳۷۲,۰۰
نسبت آب به سیمان	۰,۵۵	۰,۵۵	۰,۵۵	۰,۵۵
ریزدانه (kg/m^3)	۷۴۳,۰۰	۷۴۳,۰۰	۷۴۳,۰۰	۷۴۳,۰۰
درشت‌دانه (kg/m^3)	۷۴۳,۰۰	۵۵۹,۰۰	۴۶۶,۰۰	۳۷۱,۰۰
سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی (kg/m^3)	۰,۰۰	۵۲۴,۰۰	۶۵۵,۰۰	۷۸۶,۰۰
مقدار فورتا (kg/m^3)	۰,۰۰	۵,۳۰	۵,۳۰	۵,۳۰
گرانول لاستیک (kg/m^3)	۰,۰۰	۱۱۳,۰۰	۱۱۳,۰۰	۱۱۳,۰۰

جدول ۷. نام طرح‌های اختلاط در بخش نتایج.

نام	نام‌گذاری در بخش نتایج
شاهد	Foundation Ref
%۴۰	%۴۰ RCA + %۰/۵ FFF + %۱۵ CR
%۵۰	%۵۰ RCA + %۰/۵ FFF + %۱۵ CR
%۶۰	%۶۰ RCA + %۰/۵ FFF + %۱۵ CR

اینکه بارگذاری به‌طور یکنواخت اعمال شود، لازم بود تا سطح نمونه‌ها قبل انجام آزمایش، کاملاً صاف شود. بیشترین تنش فشاری نمونه‌های بتن، طبق رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

که در آن، F مقدار نیروی شکست بر حسب نیوتن (N)؛ A_c سطح بارگذاری بر حسب میلی‌متر مربع (mm^2) و مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها بر حسب مگاپاسکال (MPa) است.

در آزمون مقاومت فشاری، هر طرح با سه نمونه‌ی استوانه‌یی در سن ۲۸ روزه انجام و مقاومت فشاری نهایی، براساس میانگین مقاومت فشاری سه نمونه محاسبه شده است.

آزمون مقاومت خمشی بتن، مطابق استاندارد ASTM C78 به‌صورت بارگذاری بر روی یک سوم دهانه‌ی تیر ساده، بر روی نمونه‌های منشوری $100 \times 100 \times 400$ میلی‌متر و در سن ۲۸ روزه انجام شده است. نمونه‌ها یک روز قبل از انجام آزمایش از حوضچه‌ی عمل‌آوری خارج شدند تا کاملاً خشک شوند. همچنین جهت توزیع مناسب نیرو، سطح نمونه‌ها پس از خشک‌شدن، ساب زده شده‌اند. در صورتی که محل شکستگی در یک سوم وسط دهانه‌ی تیر باشد، محاسبه‌ی مقاومت خمشی، براساس رابطه‌ی ۲ انجام می‌شود:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$

که در آن، F مقاومت خمشی بتن بر حسب مگاپاسکال (MPa)؛ P نیروی وارده بر حسب نیوتن (N)؛ L طول نمونه بر حسب میلی‌متر (mm)؛ b عرض میانگین تیر بر حسب میلی‌متر (mm)؛ d ارتفاع میانگین تیر بر حسب میلی‌متر (mm) است. برای انجام آزمایش مقاومت برشی، از روش آزمون انجمن مهندسی عمران ژاپن (JSCE) به‌دلیل نبود روش استاندارد برای آزمون مقاومت برشی در ASTM و CSA استفاده شده است. به‌علت عدم دسترسی به سیستم پیشنهادی برای انجام آزمایش برشی براساس JSCE G533، به ساخت تجهیزات خاص آزمایش مرتبط پرداخته شده است. در ابتدا طرح‌های موجود برای آزمایش به آزمایشگاه CAD/CAM دانشگاه ارجاع داده شدند و پس از بررسی‌های فنی در استاندارد مرتبط، در مورد ابعاد قطعات، طراحی فنی جزئیات قطعات صورت گرفت. طبق طراحی‌های فنی انجام شده، قطعات فولادی توسط دستگاه CNC تراش و آماده‌سازی شدند.

تنظیم‌های آزمایش برشی استفاده‌شده در پژوهش حاضر در شکل ۱ مشاهده

مگاپاسکال در نظر گرفته شده است، تا در نهایت به 10 مگاپاسکال برسد. طراحی اخیر شامل این 4 طرح است:

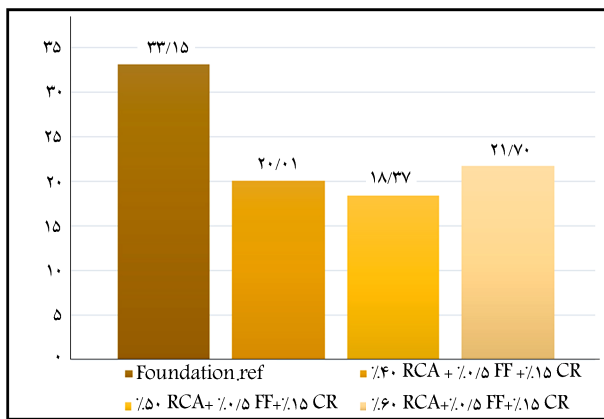
طرح نخست، طرح شاهد بتن معمولی عاری از گرانول لاستیک و الیاف فورتافور و سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی بوده است، که جهت مقایسه با 3 طرح دیگر بررسی شده است. سه طرح دیگر حاوی 40 ، 50 و 60 درصد سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی جایگزین درصد حجمی درشت‌دانه طراحی و بررسی شده‌اند. در سه طرح ذکر شده، درصد گرانول لاستیک ثابت و حدود 15% حجم کل و میزان الیاف فورتافور مصرفی حدود $5/0\%$ حجم کل بوده است. در جدول ۶، طرح‌های اختلاط پی جداساز ارائه شده است.

نام‌گذاری موجود در بخش نتایج آزمایشگاه به شرح جدول ۷ بوده است:

برای ساخت بتن از میکسر با ظرفیت 60 لیتر استفاده شده است. به‌دلیل استفاده از سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی، جهت بهبود شرایط بتن از روش طرح اختلاط دو مرحله‌یی برای اختلاط استفاده شده است.^[۲۷] بتن ساخته شده طی دو مرحله در قالب‌های آغشته به روغن ریخته شده و عمل تراکم، با کوبیدن 25 ضربه‌ی میله به درون بتن و با استفاده از چکش پلاستیکی برای متراکم کردن مخلوط در گوشه‌های قالب انجام شده است. طبق استاندارد ASTM C 19، خارج کردن نمونه‌ها از قالب، 8 ± 24 ساعت بعد از قالب‌گیری نمونه‌ها ممکن بوده است.

۳.۲. خصوصیات مکانیکی

آزمون مقاومت فشاری براساس استاندارد ASTM C39، روی نمونه‌های استوانه‌یی به ابعاد 100×200 میلی‌متر و با استفاده از دستگاه تمام اتوماتیک کالیبره‌شده انجام شده است. در آزمایش مقاومت فشاری، سرعت بارگذاری بر روی نمونه‌ها $0/25 \pm 0/5$ مگاپاسکال بوده است. برای این منظور، یک روز پیش از انجام آزمایش، نمونه‌ها از حوضچه‌ی عمل‌آوری خارج شدند تا کاملاً خشک شوند. برای



شکل ۳. نمودار مقایسه‌ی مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه برحسب مگاپاسکال.



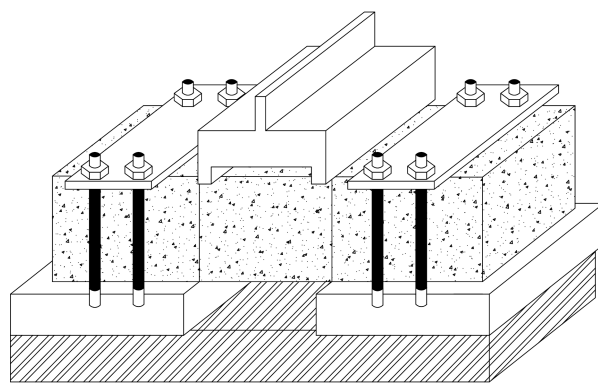
شکل ۴. نمونه‌ی بتنی تحت خمش.

روند مقاومت فشاری کاهش یافته است، که علت آن را می‌توان ناهمبندی ابعاد سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی و ایجاد فضای خالی در ماتریس بتن دانست. با افزودن سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی از ۴۰ تا ۵۰ درصد، همچنان روند کاهش به خود گرفته است؛ تا آنجا که بتن حاوی ۶۰٪ سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، بهترین مقاومت فشاری را نسبت به بقیه‌ی طرح‌های حاوی سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی نشان داده است. چرا که اسلامپ در بتن حاوی ۶۰٪ سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی نسبت به دو حالت قبل کمتر بوده و در واقع بتن، روانی کمتری داشته است. بدیهی است اسلامپ نمونه‌ی بتنی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مقاومت فشاری آن است. بنابراین، مقدار مقاومت فشاری از تغییرات درصد سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی تأثیر می‌پذیرد.

۲.۳. مقاومت خمشی

برای محاسبه‌ی مقاومت خمشی به روش بارگذاری سه نقطه‌یی با به‌کارگیری بلوک تکیه‌گاهی به‌صورت بارگذاری بر روی یک سوم دهانه‌ی تیر ساده، مقدار بار بیشینه از دستگاه قرائت شده است. در شکل ۴، نمونه‌ی بتنی تحت خمش و در شکل ۵، نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۵، مقاومت نمونه‌ی بتنی بدون سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، ۷۷٫۷ مگاپاسکال است، که با افزودن ۴۰٪ سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، مقاومت نمونه‌ی بتنی به ۱۹٫۶ مگاپاسکال رسیده است. با افزودن ۵۰٪ سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی به نمونه‌ی بتنی، مقاومت آن به ۹۶٫۵ مگاپاسکال رسیده و مقاومت خمشی



شکل ۱. تنظیم‌های آزمایش برشی.



شکل ۲. نمونه‌ی بتنی درون جک جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری.

می‌شود. [۲۸] ابعاد نمونه براساس استاندارد JSCEG533، $75 \times 75 \times 245$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

بیشینه‌ی مقاومت برشی تیر براساس رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\tau_{Max} = \frac{P_{Max}}{2A} \quad (3)$$

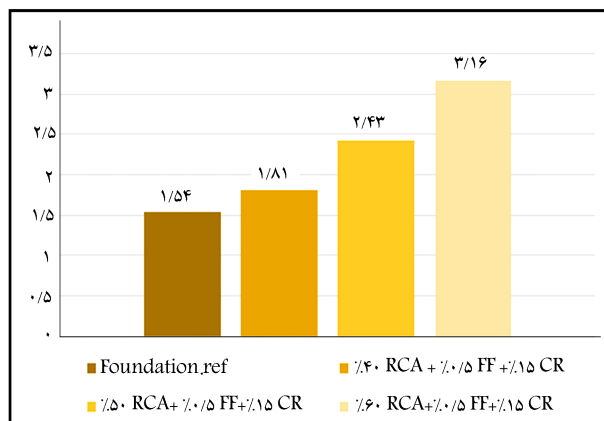
که در آن، τ_{Max} مقدار مقاومت برشی بر حسب مگاپاسکال (MPa)؛ P_{Max} نیروی تحمل شده توسط نمونه بر حسب نیوتن (N)؛ A مساحت مؤثر صفحه‌ی برشی در هر طرف نمونه بر حسب میلی‌متر مربع (mm^2) است؛ که با توجه به ایجاد بریدگی در محل برش، سطح برش بعد از آزمون باید دقیقاً اندازه‌گیری شود.

۳. نتایج آزمایشگاه

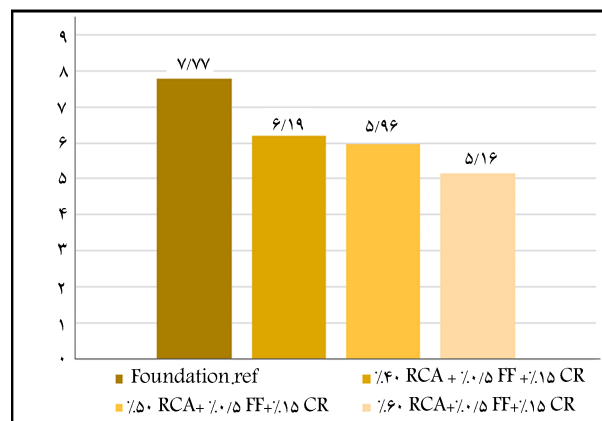
۳.۱. مقاومت فشاری

نمونه‌ی بتنی درون دستگاه جک هیدرولیکی در شکل ۲ و نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۳ مشاهده می‌شوند.

مشاهده می‌شود با افزایش میزان سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی از ۰ به ۴۰ درصد،



شکل ۷. مقایسه‌ی مقاومت برشی نمونه‌های بررسی شده بر حسب مگاپاسکال.



شکل ۵. نمودار مقاومت خمشی نمونه‌های بررسی شده بر حسب مگاپاسکال.



شکل ۶. نمونه‌ی بتنی تحت اعمال نیروی برشی.

بتن بازیافتی به نمونه، میزان تنش برشی نمونه به طور متوسط ۱۵٪ افزایش یافته است. که علت آن، وارد شدن عملکرد سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی قبل از ایجاد میکروتکرک‌ها در بتن و در نتیجه‌ی آن، افزایش مقاومت برشی نمونه بوده است. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت برشی، افزایش تنش برشی به ازاء افزایش هر چه بیشتر سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی به نمونه‌ی بتنی را نشان می‌دهد.

همچنین می‌توان دریافت که نرخ افزایش تنش برشی با افزودن سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، یکسان نبوده و با افزایش سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی از ۴۰ به ۵۰ درصد، نرخ افزایش تنش برشی به صورت تصاعدی و با افزایش سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی از ۵۰ به ۶۰ درصد، نرخ افزایش تنش برشی نسبت به حالت قبل نزولی بوده است. از این مهم می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی تا حد معینی به صرفه است؛ به نحوی که افزودن آن بیش از حد به دست آمده برای افزایش تنش برشی، صرفه‌ی اقتصادی ندارد. به این ترتیب در پژوهش حاضر، نمونه‌ی بتنی با ۵۰٪ سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، نمونه‌ی بهینه است و افزودن سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی کمتر از ۵۰٪، منجر به تنش برشی پایین می‌شود و افزودن سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی بیش از ۵۰٪، به نسبت افزایش تنش برشی آن، صرفه‌ی اقتصادی ندارد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌ها به طور خلاصه به این شرح است:

- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نشان داد که افزودن سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، گرانول لاستیک، و الیاف فورتافور باعث کاهش چشمگیر مقدار مقاومت فشاری شده است؛
- نتایج آزمایش مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه برای پی جداساز نشان داد که افزودنی‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ی در مقاومت خمشی ایجاد می‌کنند و با تغییر درصد سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، میزان کاهش آن شدت می‌یابد؛
- نتایج آزمایش مقاومت برشی در سن ۲۸ روزه‌ی طرح حاضر، افزایش چشمگیری را با افزایش درصد سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی به صورت صعودی نشان داده است. لازم به ذکر است که جهت استفاده از جداساز لرزه‌ی ذکر شده به عنوان پی گسترده، که موضوع اصلی پژوهش حاضر است، باید مقاومت و رفتار برشی مطلوبی کسب شود؛ لذا آزمایش‌های انجام شده نشان داد که مقاومت برشی کسب شده با استفاده از

نمونه‌ی بتنی با ۶۰٪ سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی به ۵/۱۶ مگاپاسکال کاهش یافته است. از طرفی نتایج نشان می‌دهند که افزایش ۴۰٪ سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی به نمونه‌ی بتنی، موجب کاهش مقاومت خمشی به میزان ۲۰٪ شده است. همچنین با افزایش ۵۰ و ۶۰ درصد سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی به نمونه‌ی بتنی، مقاومت خمشی به میزان ۲۳ و ۳۳ درصد کاهش یافته است؛ که علت آن کیفیت کمتر بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی نسبت به بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های طبیعی است. چرا که سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی، حاصل بازیافت ضایعات ناشی از تخریب و استفاده‌ی مجدد از آن است. بنابراین نمونه‌ی بتنی با سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی، طاقت خمشی کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد دارد.

۳.۳. مقاومت برشی

آزمایش مقاومت برشی طبق شکل ۶، با هدف محاسبه‌ی بیشینه‌ی تنش برشی نمونه‌های بتنی با درصد سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی متفاوت انجام شده است. پس از محاسبه‌ی تنش برشی برای نمونه‌های ۲۸ روزه، میانگین مقاومت برشی سه نمونه‌ی موجود محاسبه شده است، که نتایج آن در شکل ۷ مشاهده می‌شود. با بررسی شکل اخیر مشاهده می‌شود که تنش برشی نمونه‌ی شاهد، ۱/۵۴ مگاپاسکال بوده و پس از افزودن ۴۰٪ سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی، مقدار آن، ۱/۱۷٪ افزایش یافته است. با ادامه‌ی روند افزایش سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی به ۵۰٪، مقدار تنش برشی نمونه به میزان ۵/۵۸٪ افزایش یافته و در نهایت با افزایش ۶۰٪ سنگ‌دانه‌ی

در ادامه، می‌توان توصیه‌هایی برای تکمیل و ادامه‌ی پژوهش حاضر به این شرح ارائه کرد:

۱. مقایسه‌ی رفتار پی جداساز با رفتار جداساز معمولی؛
۲. بررسی زهکشی و تراوش آب در زمین حین استفاده از پی جداساز؛
۳. مدل‌سازی لرزه‌ی پی جداساز.

گرانول لاستیک و سنگ‌دانه‌ی بتن بازیافتی منجر به مقاومتی در حد مقاومت لازم برای پی ساختمان‌های با ارتفاع کوتاه یا متوسط شده است. به‌طورکلی می‌توان گفت استفاده از مواد بازیافتی می‌تواند توانمندی برشی و استهلاک انرژی را افزایش دهد؛ بنابراین، از بتن بازیافتی مذکور می‌توان به‌عنوان پی‌هایی که استهلاک انرژی انجام می‌دهند، استفاده کرد.

پانوشتها

1. Benazzouk
2. Albano
3. Tsang
4. Oikonomou & Mavridou
5. Azevedo
6. Rivas
7. Crumb Rubber Concrete
8. Strukar
9. Hansen
10. Xiao
11. Duan
12. Vieira
13. Deutscher
14. Bai
15. Wang
16. Sahu

منابع (References)

1. Naderzadeh, A., 2009. Application of seismic base isolation technology in Iran. *Menhin*, 63(2), pp.40-47. JSSI, Japan.
2. Ghodrati, G., Namiranian, P., Shams, M. (2009). Achieving higher levels using a seismic isolator. Publication No. 524. (In Persian).
3. Skinner R.L., Robinson W.H. and Kelly T.E., 2011. Robinson seismic Ltd and holmes consulting group. Seismic isolation for designers and structural engineers. Review. version. Robinson Seismic Ltd.?: Holmes Consulting Group. March 9 2024.
4. Villaverde, R. 2011. Recent advances in base isolation technology, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 13(3,4), pp.209-218.
5. Hernández, E., Palermo, A., Granello, G., Chiaro, G. and Banasiak, L., 2020. Eco-rubber seismic-isolation foundation systems : A sustainable solution for the new zealand context. 8664, <https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1702487>.
6. ASTM., 1998. Standard practice for the use of scrap tires in civil engineering applications. West Conshohocken. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania. www.astm.org.
7. Benazzouk, A., Mezreb, K., Doyen, G., Goullieux, A. and Quéneudec, M. 2003. Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), pp.711-720. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00067-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00067-7).
8. Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J.L. and Hernández, M. 2005. Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing. *Composite Structures*, 71(3-4), pp.439-446. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.09.037>.
9. Tsang, H.H., Sheikh, M.N. and Lam, N., 2007. Rubber-soil cushion for earthquake protection. <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2435&context=engpapers>.
10. Oikonomou, N. and Mavridou, S., 2009. The use of waste tyre rubber in civil engineering works. *In Sustainability of construction materials*, (pp. 213-238). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845695842.213>.
11. Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., De Aguiar, J. B. and Cañes, A.F. 2012. Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes. *Construction and building materials*, 34, pp.186-191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.062>.
12. Li, L., Ruan, S. and Zeng, L., 2014. Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles. *Construction and Building Materials*, 70, pp.291-308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.105>.
13. Mashiri, M.S., Vinod, J.S., Sheikh, M.N. and Tsang, H., 2015. Shear strength and dilatancy behaviour of sand-tyre chip mixtures. *Soils Found*, 55, pp.517-528. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.04.004>.
14. Rivas-Vázquez, L.P., Suárez-Orduña, R., Hernández-Torres, J. and Aquino-Bolaños, E. 2015. Effect of the surface treatment of recycled rubber on the mechanical strength of composite concrete/rubber. *Materials and Structures*, 48(9), 2809-2814. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0355-y>.
15. Youssf, O., ElGawady, M.A. and Mills, J.E., 2015. Experimental investigation of crumb rubber concrete columns under seismic loading. *In Structures*, 3, pp.13-27. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.02.005>.

16. Strukar, K., Šipoš, T.K., Miličević, I. and Bušić, R. 2019. Potential use of rubber as aggregate in structural reinforced concrete element: A review. *Engineering Structures*, 188, pp.452-468. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.031>.
17. Li, Y., Chai, J., Wang, R., Zhou, Y. and Tong, X., 2022. A review of the durability-related features of waste tyre rubber as a partial substitute for natural aggregate in concrete. *Buildings*, 12, 1975. <https://doi.org/10.3390/buildings12111975>.
18. Hansen, T.C., 1986. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments (1945-1985). *Materials and Structures*, 19(3), pp.201-246. <https://doi.org/10.1007/BF02472036>.
19. Xiao, J., Li, W., Fan, Y. and Huang, X., 2012. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). *Construction And Building materials* 31, pp.364-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074>.
20. Duan, Z.H. and Poon, C.S. 2014. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials Design*, 58, pp.19-29. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.044>.
21. Vieira, T., Alves, A., De Brito, J., Correia, J.R. and Silva, R.V., 2016. Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. *Materials and Design*, 90, pp.767-776. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.023>.
22. Verein Deutscher, Zementwerk., 2019. Global cement production from 1990 to (inmillionmetrictons)[07.Mar] Available from. 2030 <https://www.statista.com/statistics/373845/global-cement-production-forecast>.
23. Bai, G., Zhu, C., Liu, C. and Liu, B., 2020. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 240, 117978. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117978>.
24. Wang, B., Yan, L., Fu, Q. and Kasal, B. 2021. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, p.105565. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>.
25. Sahu, A., Kumar, S. and Srivastava, A.K.L., 2022. Comparative study on natural and recycled concrete aggregate in sustainable concrete: A Review. *Recent Advances in Sustainable Environment, Lecture Notes in Civil Engineering*, 285, https://doi.org/10.1007/978-981-19-5077-3_12.
26. Assistant for the strategic supervision of the executive technical system office., 2010. Guideline for design and practice of base isolation systems in buildings code. 523.[In Persian]. <https://tec.mprog.ir>.
27. Vivian W.Y. Tam. and C.M. Tam. 2007. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. 2007, pp. 3592-3602, 2010, <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0379-y>.
28. Mostafazadeh, M. and Abolmaali, A., 2016. Shear behavior of synthetic fiber reinforced concrete. *Advances in Civil Engineering Materials*, 5(1), pp.371-386. <http://dx.doi.org/10.1520/ACEM20160005>