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

فاطمه آینه چی [۱]، هاشم شریعتمدار [۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت ساخت، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- shariatmadar@um.ac.ir

۲- fatemeh.ayenehchi@mail.um.ac.ir

چکیده:

با توجه به شرایط لرزه‌خیز کشور ایران و خسارات زیادی که در نتیجه آن به وجود می‌آید ،تغییر در عملکرد فعلی طراحی سازه‌ای برای دستیابی به عملکرد بهتر در سیستم لرزه‌ای ضروری می‌باشد. از سوی دیگر نگرانی‌های زیست‌محیطی، مهندسان عمران را بر آن داشته است تا روش‌های مناسب استفاده مجدد از ضایعات ساختمانی را شناسایی کنند. هدف این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی رفتار بتن ساخته‌شده با مصالح بازیافتی به عنوان پی گسترده ای است که برای ساختمان های با ارتفاع کم یا متوسط نقش جداساز لرزه ای دارد. در این پژوهش، تاثیر گرانول لاستیک و سنگدانه بتن بازیافتی بر روی بتن، مورد بررسی قرار گرفت. چهار طرح اختلاط متفاوت به ترتیب فاقد مصالح بازیافتی، ٪۴۰، ٪۵۰ و ٪۶۰ سنگدانه بتن بازیافتی جایگزین درشت دانه طراحی و ساخته شده است. نتایج حاصل از طرح ها نشان‌دهنده این است که تغییر درصد سنگدانه بتن بازیافتی به‌جای درشت‌دانه سبب کاهش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی و افزایش چشمگیر مقاومت برشی شده است.

واژگان کلیدی:

بتن، پی جداساز، لاستیک زائد، سنگدانه بتن بازیافتی،مقاومت مکانیکی

* هاشم شریعتمدار ، استاد دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد.

ایمیل: shariatmadar@um.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

ویراستاری نشده

Investigating the mechanical behavior of concrete containing recycled concrete and rubber materials as a foundation isolator

F. Ayenehchi [۱], H. Shariatmadar [۲]

۱- Master Student of Construction Engineering Management of Ferdowsi University of Mashhad, Iran
۲- Professor, Faculty of Engineering of Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Abstract:

Considering the seismic conditions of Iran and the many damages that occur as a result, it is necessary to change the current performance of structural design to achieve better performance in the seismic system. On the other hand, environmental concerns have prompted civil engineers to identify appropriate methods of reusing construction waste. The purpose of this research is to investigate the behavior of concrete made with recycled materials as a wide foundation, which has the role of seismic isolation for low or medium height buildings. In this research, the effect of crumb rubber and recycled concrete aggregate on concrete was examined in a laboratory. The design basis of its resistance is ۳۰ MPa. The first mixture, as a control mixture, does not contain rubber granules, Forta fibers and recycled concrete aggregate. In the other three mixtures the difference in the amount of recycled concrete aggregate is ٤۰٪, ٥۰٪ and ٦۰٪ instead of coarse aggregate, also the percentage of rubber granules is constant and about ۱٥٪ of the total volume, and the amount of Forta fibers is about ۰٫٥٪ of the total volume. Compressive strength, Flexural strength and Shear strength tests were performed on the ٤ mentioned mixtures at the age of ۲۸ days in a laboratory. The results of the compressive strength test showed that the addition of recycled concrete aggregate, rubber granules and Forta fibers has significantly reduced the compressive strength value. The results of the flexural strength test indicated that the additives cause a noticeable reduction in the flexural strength and this reduction intensifies with the change of recycled concrete aggregate percentage. The results of the shear strength test represented a considerable increase with the increase in the percentage of recycled concrete aggregate. Based on the test results, it is concluded that this type of composition material can be used as a foundation isolator, which showed a favorable shear behavior.

Keywords: Concrete, Foundation Isolator, Crumb Rubber, Recycled Concrete Aggregate, Mechanical Strength.

ویرایش شده

۱ ـ مقدمه و تاریخچه تحقیقات

ایران در منطقه فعال لرزه‌ای قرار دارد و ما اغلب شاهد تلفات و خسارات سنگین ناشی از زلزله‌های ویرانگر در کشور هستیم. از این جهت مردم در طول تاریخ تلاش نموده‌اند تا با استفاده از تکنیک های مختلف با خطر طبیعی مقابله کنند، کاربرد تکنیک جداسازی در ایران به صدها سال پیش و حتی دوران باستان بازمی‌گردد. استفاده از سنگ‌های تخته چند لایه و نصب الوارهای از چوب بین پی و دیوارهای خانه‌ها ازجمله تکنیک‌های ساخت مقاوم در برابر زلزله بوده که در گذشته در برخی مناطق ایران به‌کارگرفته شده‌است. با این‌حال، تا چند سال اخیر از فناوری جدید جداسازی لرزه‌ای در ایران استفاده نشده بود. یک دلیل مهم برای این تاخیر طولانی می‌تواند به این واقعیت مربوط شود که تغییر ذهنیت سازندگان از روش جاری ساخت به یک فناوری توسعه‌یافته جدید مشکل است [۱].

در علم مهندسی زلزله نوین به‌جای افزایش ظرفیت باربری جانبی، با تجهیز سازه به سیستم‌های محافظتی نیاز وارد از طرف زلزله تا یک سطح قابل‌قبول کاهش داده می‌شود. این سیستم‌ها که از طول عمر اختراع آن‌ها بیش‌از چند دهه نمی‌گذرد به سه دسته کلی جداسازهای لرزه‌ای، سیستم‌های اتلاف انرژی (میراگرها) و سیستم‌های کنترل لرزه ای فعال و نیمه‌فعال نیز تقسیم شوند. در سیستم جداسازی لرزه‌ای با تعبیه تجهیزات جداسازی لرزه‌ای در پایین‌ترین تراز ممکن در پای ساختمان، سازه از نیروی جانبی و خسارات وارده از طرف زلزله جدا می‌شود. این امر با کاهش سختی جانبی و درنتیجه افزایش زمان تناوب اصلی سازه و افزایش میرایی سازه و به‌عبارت‌دیگر افزایش ظرفیت اتلاف انرژی مجموعه میسر می‌شود [۲].

یکی از اهداف جداسازلرزه ای، افزایش دوره‌ی تناوب طبیعی سازه است که براساس طیف‌های طراحی، سبب کاهش شتاب ورودی به سازه گشته و از طرفی دیگر با توجه به آن که دوره تناوب حاکم اکثر زلزله‌های به‌وقوع‌پیوسته عددی بین ۰/۱ تا ۱ ثانیه است، سبب دور شدن سازه از میدان تشدید می‌گردد. این افزایش دوره تناوب، بسته به انعطاف رو سازه و نیاز طراحی، می‌تواند تا بیش‌از ۳ ثانیه نیز باشد. علت دیگر بهره‌گیری از جداسازی‌های لرزه‌ای، تامین مکانیزمی برای افزایش میرایی سازه و استهلاک انرژی زلزله است [۳].

جداسازی لرزه‌ای عبارت است از جدا کردن کل یا بخشی از سازه از زمین یا قسمت‌های دیگری از سازه با مصالحی انعطاف‌پذیر یا جزئیات لغزان، به‌منظور کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه یا بخشی از آن در زمان رویداد زلزله. ایده طراحی سازه‌های جداسازی شده بر اساس کنترل قدرت تخریبی این زمین‌لرزه‌ها از طریق ممانعت از ورود ارتعاشات زمین به سازه بناشده است. در جداسازی لرزه دوره تناوب اصلی سازه به کمک تجهیزاتی که بین روسازه و زیرسازه قرار می‌گیرد، افزایش می‌یابد و با جابجایی پریود سازه از ناحیه پرشتاب طیف طرح به ناحیه کم شتاب آن، شتاب زلزله موثر بر سازه و نیروهای ناشی از آن کاهش می‌یابند. به دلیل انعطاف‌پذیری جداسازها و تغییر مکان ناشی از آن‌ها، کاهش تغییر مکان در سازه‌های جداسازی شده امری ضروری است. در حال حاضر جداسازی پایه، به‌عنوان یک تکنیک و تکنولوژی مؤثر جهت کاهش خرابی اعضای سازه‌ای و غیر سازه‌ای در هنگام زمین‌لرزه پذیرفته‌شده است و تعداد روبه‌رشد ساختمان‌ها و پل‌های ساخته شده با استفاده از این تکنولوژی بیانگر پذیرش می‌باشد [۴].

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

از طرفی فعالیت‌های مهندسی، ضایعات زیادی را تولید می‌کند که منجر به آلودگی محیط زیست می‌شود و نگرانی‌هایی را برای مهندسان به وجود آورده است. بنابراین امروزه مهندسان تمایل بیشتری دارند تا برای پروژه‌های خود از روش‌های مناسب استفاده مجدد از ضایعات استفاده کنند. لاستیک‌های زائد منبع خوبی از ضایعات با کیفیت بالا و پایدار است که می‌تواند از طریق فناوری-های 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 وجود دارد، به‌کارگیری ضایعات تخریبی آن‌ها مانند سنگدانه‌های حاصل از بتن بازیافتی می‌تواند از نظر اقتصادی به‌صرفه باشد.

با توجه به مطالعات انجام‌گرفته، ضرورت این تحقیق بررسی رفتار جداساز لرزه‌ای ساخته‌شده با مصالح لاستیک زائد و سنگدانه‌های بتن بازیافتی است که برای توسعه سیستم فونداسیون ساختمان‌های مسکونی با ارتفاع کم یا متوسط می‌باشد.

براین اساس در ابتدا پژوهش‌های انجام‌شده روی لاستیک بازیافتی، سپس سنگدانه بتن بازیافتی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی ها بدین جهت است که پی بتنی ساخته شده با مصالح فوق الذکر بتواند رفتار انعطاف پذیر و مستهلک کننده انرژی داشته باشد، بنابراین برای صحت طرح مورد نظر آزمایش های مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت برشی انجام شده است و در انتها نتایج حاصل بررسی شده است.

۱ ـ ۱ ـ لاستیک زائد(تایر)

لاستیک زائد، به دلیل افزایش جمعیت و به دنبال آن، افزایش استفاده از وسایل حمل و نقل جاده‌ای و شهری، یک معضل جهانی برای محیط‌زیست، به جهت دفن زباله‌های ناشی از آن و آلودگی-های فراوانی که به وجود می‌آورد، به شمار می‌رود. در سال ۱۹۹۸ پس از آن‌که کاهش منابع طبیعی به دلیل گسترش صنایع مرتبط با ساخت‌وساز، پررنگ شد، تلاش‌های تحقیقاتی در خصوص استفاده از محصولات زائد قابل بازیافت، مانند لاستیک های قراضه به عنوان جایگزین برای مواد تجدید ناپذیر سرعت بخشیده شد و مورد حمایت مقامات کشورهای مختلف قرار گرفت [۶].

بنازوک و همکاران در سال ۲۰۰۳ خواص دوام لاستیک بازیافتی را مورد تحقیق، بررسی و نتیجه‌گیری قرار دادند. نتایج بیانگر عملکرد ضعیف ذرات لاستیکی بازیافتی و به تبع آن، کاهش دوام نمونه‌های مورد بررسی بود [۷]. محققان برای غلبه بر این چالش، راه های مختلفی برای بهبود عملکرد پیوند ذرات لاستیکی و بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن لاستیکی امتحان کردند. به عنوان مثال آلبانو و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی و مقایسه تاثیر اندازه ذرات لاستیک بر خاصیت دوام لاستیک بازیافتی و لاستیک عادی پرداختند. درنتیجه تحقیق این پژوهشگران معین گردید اندازه ذرات لاستیک مرتبط با میزان دوام لاستیک ساخته‌شده می-باشد [۸].

برای کشورهایی که نزدیک به لبه‌های صفحات تکتونیکی هستند، همواره فعالیت‌های لرزه‌ای، حساس بوده است؛ چراکه باعث تخریب فاجعه‌آمیز ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها می‌شود. اجزای سازه‌ای عموما جهت حفظ پایداری سازه قرار داده می‌شوند و در آیین نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی مربوطه، به صورت ضوابط و دستورالعمل مقرر شده‌اند. جهت تکمیل این اجزاء، تحقیقات درخصوص زیرساخت‌ها گسترش یافت. درنتیجه این تحقیقات، سیستمی به نام جداسازی لرزه‌ای معرفی شد. تسانگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ دریافتند در سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای که به عنوان جداسازی پایه نیز شناخته می‌شوند، یک رابط منعطف یا لغزنده بین سازه و زیرسازه وجود دارد. این مجموعه عناصر به تثبیت حرکت افقی تجربه‌شده در زمین (از نظر فعالیت لرزه‌ای) کمک می-کند. در حقیقت اثر حرکت افقی واردآمده از طرف فعالیت لرزه‌ای را بر سازه کاهش می‌دهد. آنها با مطالعه تأثیر استفاده از لاستیک زباله مخلوط با خاک به عنوان رابط بین فونداسیون و سازه برای افزایش مقاومت در برابر نیروهای ناشی از زلزله به تأیید این گفته پرداختند. آنها بر اساس مقادیر ورودی از پیش تعیین‌شده، دریافتند که مخلوط‌های لاستیک و خاک در مقایسه با خاک مرجع، ۶۰ تا ۷۰ درصد کاهش شتاب افقی و عمودی زمین را به همراه دارند [۹].

اویکونومو و ماوریدو در سال ۲۰۰۹ اذعان داشتند که فراوانی روزافزون لاستیک های زباله و فقدان چارچوب پردازش یا بازیافت هماهنگ، نگرانی درخصوص مدیریت این مواد را افزایش می‌دهد. با توجه به شناخت اخیر جهانی و آگاهی قوی زیست محیطی، بسیاری از مقامات، قوانین و مقررات سختگیرانه‌ای در مورد این محصول پسماند، جهت جلوگیری از انبار بیش از حد و عملیات دفن زباله وضع کرده‌اند. با اعمال این تحریم‌ها، فرصت مناسبی برای پژوهشگران فراهم شده‌است تا اقدامات پایدار و استفاده‌های جایگزین برای لاستیک‌های زباله را بررسی کنند. استفاده جایگزین زباله های لاستیکی بیش از ۳۰ سال است که در مهندسی عمران مورد بررسی قرار گرفته‌است [۱۰].

در سال ۲۰۱۲، آزودو و همکاران به بررسی و مقایسه تاثیر میزان سدیم هیدروکسید بر خاصیت مکانیکی لاستیک بازیافتی و لاستیک عادی پرداختند. درنتیجه تحقیق این پژوهشگران معین گردید؛ جهت بهبود خاصیت مکانیکی لاستیک بازیافتی و نزدیک

شدن خواص مکانیکی آن به لاستیک عادی، درصد سدیم هیدروکسید باید به ٪۴ محدود گردد [۱۱].

در سال ۲۰۱۴ لی و همکاران به بررسی تفاوت مقاومت در برابر ترک‌خوردن بین دو نمونه بتنی ساخته‌شده با لاستیک بازیافتی و لاستیک طبیعی پرداختنده و نتایج نشان داد هرچه عمر نمونه بتنی مورد بررسی بیشتر باشد، بتن ساخته‌شده با لاستیک بازیافتی رفتار بهتری در برابر فشار و ترک‌خوردن از خود نشان می‌دهد و اولین ترک‌ها در اثر فشار در زمان دیرتری در نمونه نمایان می‌گردد [۱۲].

مشیری و همکاران در سال ۲۰۱۵ به جمع‌آوری داده‌های آماری از کارگاه های مادر و نیز داده‌های آماری سازمان‌های مربوطه، در خصوص میزان تولید سالیانه لاستیک در سطح جهان پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد تولید سالانه لاستیک‌های ضایعاتی، بر حسب تقاضای مطرح شده و برآورده‌کردن نیاز صنایع مختلف و عوام مردم، در سراسر جهان به ۱/۵ میلیارد لاستیک کامل می‌رسد. این لاستیک‌ها دارای ویژگی‌های منحصر به فرد بسیاری می‌باشند. از جمله ویژگی‌های لاستیک‌های ضایعاتی می‌توان به چگالی کم، خواص عایق خوب، قابلیت زه‌کشی بالا و دوام طولانی‌مدت پس از استفاده پی‌درپی اشاره کرد [۱۳].

در سال ۲۰۱۵ ریواس و همکاران به بررسی تفاوت مقاومت در برابر ضربه بین دو نمونه بتنی ساخته‌شده با لاستیک بازیافتی و لاستیک طبیعی پرداختند. از این پژوهش برداشت می‌شود استفاده از لاستیک بازیافتی در نمونه بتنی، ازنظر مقاومت در برابر ضربه نیز همانند مقاومت در برابر ترک‌خوردن، به صرفه‌تر از نمونه بتنی ساخته‌شده با لاستیک عادی می‌باشد [۱۴].

یوسف و همکاران در سال ۲۰۱۵ رفتار لرزه‌ای ستون‌های بتن-مسلح ساخته‌شده از خرده بتن لاستیکی (CRC) را بررسی کردند. در این پژوهش در مجموع، سه ستون، یکی به صورت CRC و دو ستون دیگر ساخته‌شده از بتن معمولی، با بارهای محوری متنوع ساخته شدند. برای ارزیابی خواص میرایی، قبل از آزمایش چرخه‌ای هر ستون، یک آزمایش برگشت سریع انجام شد. به دست‌آمده بدین شرح است: الف) با افزودن خرده لاستیک به نمونه، تغییر قابل توجهی بر شکل‌پذیری و استحکام جانبی نهایی مشاهده نشد. ب) در مقطع ستون CRC در مقایسه با ستون‌های معمولی انحنا به وجود آمد. ج) آسیب ستون‌های بتنی تحت بارگذاری لرزه‌ای از طریق خرده لاستیک کاهش داده‌شده و یا به تاخیر می‌افتد [۱۵].

استراکار و همکاران در سال ۲۰۱۹ بیان کردند بدیهی است که سنگدانه‌های لاستیکی ضایعاتی را می‌توان به عنوان جایگزینی جزئی برای سنگدانه‌های درشت و دانه‌های ریز استفاده کرد. نتایج تحقیقات نشان می دهد که جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه لاستیک بازیافتی در بتن، باعث ایجاد عناصر ساختاری با رفتار بهبود یافته می شود از جمله؛ افزایش ظرفیت تغییر شکل (شکل پذیری)، اتلاف بهتر انرژی و میرایی بیشتر، در مقایسه با بتن استاندارد ساخته شده با سنگدانه های معمولی با این حال، افزایش محتوای لاستیک در بتن نیز اثرات منفی دارد، به عنوان مثال کاهش فشار و کشش و همچنین کاهش مدول الاستیسیته یانگ [۱۶].

نتایج لی و همکاران در سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که افزایش محتوای لاستیک می‌تواند مقاومت در برابر نفوذ کلرید، مقاومت در برابر حمله 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٪ اثر بهبود قابل‌توجهی دارد. لاستیک جایگزین سنگدانه های ریز بهترین طرح برای دوام است. علاوه بر این، اندازه ذرات لاستیکی توصیه شده ۰ تا ۳ میلی متر است. با این حال، ذرات لاستیک اثرات نامطلوبی بر مقاومت در برابر سایش، نفوذ ناپذیری، مقاومت در برابر جذب آب و مقاومت در برابر کربناته دارد [۱۷].

۱ ـ ۲ ـ سنگدانه بتن بازیافتی

هانسن در سال ۱۹۸۶ به بررسی تفاوت سنگدانه بتن بازیافتی در مقایسه با سنگدانه طبیعی درخصوص جذب آب و خشک‌شدگی نمونه پرداخت. نتایج حاکی از آن است که سنگدانه بتن بازیافتی در مقایسه با سنگدانه طبیعی، جذب آب بالاتر، مقاومت فشاری پایین‌تر و تاخیر در خشک‌شدگی دارد [۱۸].

بر اساس گزارشات ژیائو و همکاران در سال ۲۰۱۲، در دهه-های اخیر در مناطق شهری قدیمی چین، بازسازی گسترده‌ای انجام شده‌است. درنتیجه این بازسازی‌های انجام شده، افزایش چشمگیر میزان زباله‌های ساختمانی و تخریبی (حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد زباله های جامد شهرداری) مشاهده شده است [۱۹].

دوان و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی درصدهای مختلف ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه بتن بازیافتی پرداختند. نتایج حاکی از آن است که درصد پایین ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه بتن بازیافتی، منجربه افزایش جذب آب، شاخص خردشدگی و شاخص سایش می‌گردد. در نتیجه عملکرد بتن حاوی سنگدانه بازیافتی ضعیف‌تر از بتن حاوی سنگدانه طبیعی است. آنها یک روش نسبتا ارزشمند، به نام طرح اختلاط دو مرحله ای، جهت تقویت سنگدانه بتن بازیافتی ارائه دادند. مزیت این روش، مقرون به صرفه بودن و قابلیت بالای اجرا با صرف کمترین زمان می‌باشد و از این جهت مورد تایید جامعه مهندسی قرار گرفته است [۲۰].

ویرا و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی مقاومت فشاری و کششی و مقاومت خمشی نمونه بتنی با سنگدانه بتن بازیافتی پرداختند. نتایج نشان‌دهنده آن است که میزان کاهش مقاومت فشاری و کششی و همینطور از دست‌دادن مقاومت خمشی بتن در ترکیب سنگدانه طبیعی بسیار بیشتر از بتن با ترکیب سنگدانه بازیافتی بوده است. آن‌ها دریافتند در بتن با ترکیب سنگدانه بازیافتی به علت میزان جذب آب و به دنبال آن رعایت دقیق نسبت آب به سیمان، بتن با کیفیت مطلوب و مناسب تولید می‌گردد و استفاده از سنگدانه بازیافتی را به دلیل کاربرد یکسان و کیفیت مناسب‌تر اعلام کردند. به عنوان مثال، تکنیک‌های مختلف آماده-سازی بتن را می‌توان برای تنش‌های متفاوت در فرآیند ساخت‌وساز به کارگرفت. آن‌ها همچنین دریافتند؛ تا محدوده خاصی با برخی فرایند های ساده و کم هزینه مانند تنظیم نسبت آب به سیمان، محتوای آب اضافه‌شده و روش مخلوط‌کردن می‌توان در جهت بهبود بتن گام برداشت و آن را به کیفیت مطلوب رساند [۲۱].

دچر در سال ۲۰۱۹ به جمع‌آوری داده‌های آماری درخصوص حجم بتن تولیدشده، از کارخانه‌های معتبر و سازمان‌های مربوطه پرداخت. وی پس از بررسی های لازم اعلام کرد؛ تولید جهانی بتن در دو دهه گذشته از ۱/۱ میلیارد تن به ۳/۷ میلیارد تن (افزایش ۳ برابر) رسیده است که این افزایش منجر به نگرانی بابت افزایش تولید آلاینده‌ها می‌گردد [۲۲].

بای و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی روابط کمی محتوای ملات متصل به سنگدانه بتن بازیافتی و تاثیر آن بر عملکرد بتن پرداختند. آن‌ها دریافتند کندن لایه‌های متصل به سنگدانه بتن بازیافتی تنها راه بهبود عملکرد بتن بازیافتی نمی‌باشد. با این حال، روش‌های مناسب دیگری نیز وجود دارد. به عنوان مثال 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 و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی فرایند بازیافت و استفاده مجدد بتن، روند ساخت بتن با سنگدانه بازیافتی و تفاوت روند ساخت بتن با سنگدانه بازیافتی با روند ساخت بتن با سنگدانه طبیعی پرداختند. آن‌ها پس از بررسی کامل خواص شیمیایی و فیزیکی و همچنین عملکرد بلندمدت بتن ساخته شده با سنگدانه بتن بازیافتی به مزایای کاهش تخلخل در بتن و حذف لایه 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 الاستیسیته و منحنی تنش کرنش سنگدانه بتن بازیافتی پرداختند [۲۴].

تحقیقات ساهو و همکاران در سال ۲۰۲۲ مقایسه ای از خواص مکانیکی و دوام تازه بین بتن معمولی و بازیافتی را با جایگزینی سنگدانه های طبیعی ریز و درشت با سنگدانه های بتن بازیافتی ارائه می دهد. نتایج نشان می دهد که خواص فیزیکی و دوام سنگدانه های بتن بازیافتی ریز و درشت به دلیل ملات متصل قدیمی و طبیعت متخلخل، نتایج کمتری نسبت به سنگدانه‌های بکر نشان می‌دهد و کارایی بتن در جایگزینی های مختلف سنگدانه های بتن بازیافتی نسبت به بتن معمولی از ۰ تا ۴۰ درصد افزایش یافته است لذا افزودن مواد افزودنی شیمیایی و معدنی مناسب می توان مقاومت سنگدانه بتن بازیافتی را تا ۲۰ درصد نسبت به بتن معمولی افزایش داد [۲۵].

۲ ـ مصالح و برنامه آزمایشگاهی

تعیین مشخصات مصالح مورد نیاز و مقادیر آن‌ها، طریقه ساخت و ابعاد نمونه‌ها، تعیین شرایط و مراحل انجام آزمایشات به محقق کمک می‌کند تا به نتایج قابل اعتمادتری برسد.

۲ ـ ۱ ـ مصالح مصرفی

پیش‌از ساخت نمونه‌های بتنی، انتخاب صحیح نوع سیمان از ملزومات است. سیمان پرتلند معمولی(نوع ۱) 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 می‌باشد. در این تحقیق از سیمان تیپ ۵۲۵-۱ بجنورد استفاده شده است که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) ارائه شده است.

آب مصرفی این پژوهش، آب شرب (لوله کشی) است. ماسه مورد استفاده نیز، ماسه شسته‌شده در محل دپوی آزمایشگاه سازه دانشگاه می‌باشد که از کارخانه های شن‌شویی خریداری شده است، که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۲) ارائه شده است. جهت ساخت و تهیه نمونه‌های بتنی، از شن موجود در محل دپوی آزمایشگاه سازه دانشگاه استفاده شده است. شن مصرفی مورد استفاده در این پژوهش، به صورت شکسته می‌باشد، مشخصات فیزیکی شن مصرفی به شرح جدول(۳) می‌باشد. تهیه سنگدانه‌های بتن بازیافتی از باکس ضایعات آزمایشگاه سازه دانشگاه می باشد که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

آزمایشات فیزیکی		نتایج
وزن مخصوص (تن بر متر مکعب)		۳/۱۸۵
درصد آب غلظت طبیعی		۲۵/۸۰
زمان گیرش با سوزن ویکات	گیرش اولیه (دقیقه)	۱۵۰/۰۰
	گیرش نهایی (ساعت)	۲:۵۰
سلامت سیمان (انبساط)		
درصد انبساط آزمایش اتوکلاو		۰/۰۲
انبساط آزمایش لوشاتلیه (میلی متر)		۱/۰۰
درصد انبساط سولفات ۱۴ روزه		۰/۰۳
نرمی		
سطح مخصوص. بلین (سانتی متر مربع بر گرم)		۳۷۵۰/۰۰
درصد باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون		۴/۶۰
آزمایشات فیزیکی		نتایج
وزن مخصوص (تن بر متر مکعب)		۳/۱۸۵
درصد آب غلظت طبیعی		۲۵/۸۰

زمان گیرش با سوزن ویکات	گیرش اولیه (دقیقه)	۱۵۰/۰۰
	گیرش نهایی (ساعت)	۲:۵۰
سلامت سیمان (انبساط)		
درصد انبساط آزمایش اتوکلاو		۰/۰۲
انبساط آزمایش لوشاتلیه (میلی متر)		۱/۰۰
درصد انبساط سولفات ۱۴ روزه		۰/۰۳
نرمی		
سطح مخصوص. بلین (سانتی متر مربع بر گرم)		۳۷۵۰/۰۰
درصد باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون		۴/۶۰

جدول ۲: مشخصات فیزیکی ماسه مصرفی

وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	مدول نرمی	درصد جذب آب
۱/۶۵	۲/۴۴	۳/۸۰

جدول ۳: مشخصات فیزیکی شن مصرفی

درصد سایش	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد جذب آب
۱۰/۲۱	۱/۷۰	۱/۳۸

جدول ۴: مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های بتن بازیافتی

درصد سایش	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد جذب آب
۲۶/۵۰	۲/۴۰	۲/۱۰

گرانول و پودر لاستیک بازیافتی با هماهنگی دانشکده مهندسی دانشگاه و سازمان مدیریت پسماند از کارخانه مربوط به بازیافت مواد تهیه شده است، اندازه ذرات لاستیک‌های خردشده بین ۰/۰۷۵ میلی متر تا ۴/۷۵۰ میلی متر می‌باشد و چگالی آن ۰/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. با توجه به اینکه الیاف فولادی بازیافتی موجود در تایر لاستیکی، توسط آهنربا جدا شده است، گرانول‌های لاستیکی عاری از هرگونه الیاف فولادی هستند. قبل از اختلاط بتن جهت پاک‌شدن پودر و گرانول لاستیک از هرگونه ناخالصی و گرد و غبار، ذرات لاستیک با محلول ٪۴ سدیم هیدروکسید ، به منظور افزایش چسبندگی رابط لاستیک و سیمان، شسته شد [۱۱].

برای جلوگیری از گسترش ترکها از الیاف فورتافرو استفاده شده است. این الیاف از کوپلیمر و پلی‌پروپیلن ۱۰۰٪ خالص ساخته شده و به شکل الیاف نازک درهم تابیده شده و الیاف شبکه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. الیاف فورتا فرو در محیط‌های اسیدی و قلیایی مقاومت بسیار بالایی دارد. مشخصات الیاف فورتا مصرفی در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵: خواص فیزیکی الیاف فورتافرو

وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	طول الیاف (میلی متر)	قطر الیاف (میلی متر)	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)
۹۱۰/۰۰	۵۴/۰۰	۰/۳۴	۴/۷۰

۲ ـ ۲ ـ ساخت نمونه های بتنی

برای طراحی طرح اختلاط بتن، از روش حجمی در این تحقیق استفاده شده است. هدف از این طرح $ACI-211-1$ استاندارد دستیابی به یک پی گسترده به جهت جداساز لرزه‌ای می‌باشد.

در این طرح جهت برآورده ساختن شباهت بالا به جداساز معمولی، از بیشترین مقدار مجاز لاستیک و الیاف استفاده شده است. طبق نشریه شماره ۵۲۳ تلاش بر آن بوده تا مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به ۱۰ مگا پاسکال برسد [۲۶]، لذا برای ساخت چنین بتن سبکی از مصالح سنگی سبکی استفاده شده است، از آنجایی که گرانول لاستیک و سنگدانه بتن بازیافتی هر دو منجر به کاهش مقاومت فشاری می شوند، مبنای مقاومت فشاری این طرح ۳۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است، تا در نهایت به ۱۰ مگاپاسکال ذکر شده . طراحی مذکور شامل ۴ طرح زیر است؛ طرح نخست، طرح شاهد بتن معمولی عاری از گرانول لاستیک و الیاف فورتا و سنگدانه‌های بتن بازیافتی می‌باشد که جهت مقایسه با سه طرح دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. سه طرح دیگر حاوی درصدهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سنگدانه‌های بتن بازیافتی جایگزین درصد حجمی درشت دانه مورد طراحی و بررسی قرار گرفته است. در این سه طرح درصد گرانول لاستیک ثابت و حدود ۱۵٪ حجم کل و میزان الیاف فورتا فور مصرفی حدود ۰/۵ درصد حجم کل می‌باشد. جدول (۶) طرح اختلاط را نشان می دهد.

جدول ۶: طرح‌های اختلاط پی جداساز

نام	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	نسبت آب به سیمان	ریزدانه (کیلوگرم بر متر مکعب)	درشت‌دانه (کیلوگرم بر متر مکعب)	سنگدانه بتن بازیافتی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مقدار فورتا (کیلوگرم بر متر مکعب)	گرانول لاستیک (کیلوگرم بر متر مکعب)
شاهد	۳۷۲/۰۰	۰/۵۵	۷۴۳/۰۰	۷۴۳/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
٪۴۰	۳۷۲/۰۰	۰/۵۵	۷۴۳/۰۰	۵۵۹/۰۰	۵۲۴/۰۰	۵/۳۰	۱۱۳/۰۰
٪۵۰	۳۷۲/۰۰	۰/۵۵	۷۴۳/۰۰	۴۶۶/۰۰	۶۵۵/۰۰	۵/۳۰	۱۱۳/۰۰
٪۶۰	۳۷۲/۰۰	۰/۵۵	۷۴۳/۰۰	۳۷۱/۰۰	۷۸۶/۰۰	۵/۳۰	۱۱۳/۰۰

نامگذاری موجود در بخش نتایج آزمایشگاه به شرح جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۷: نام طرح‌های اختلاط در بخش نتایج

نام	نامگذاری در بخش نتایج
شاهد	Foundation.ref
۴۰٪	40%RCA + 0.5%FF + 15%CR
۵۰٪	50%RCA + 0.5%FF + 15%CR
۶۰٪	60%RCA + 0.5%FF + 15%CR

برای ساخت بتن از میکسر با ظرفیت ۶۰ لیتر استفاده شده است. به دلیل استفاده از سنگدانه‌های بتن بازیافتی، جهت بهبود شرایط بتن، از روش طرح اختلاط دو مرحله ای برای اختلاط استفاده گردید [۲۷]. بتن ساخته‌شده طی دو مرحله در قالب‌های آغشته به روغن ریخته می‌شود. عمل تراکم، با کوبیدن ۲۵ ضربه میله به درون بتن و با استفاده از چکش پلاستیکی برای متراکم کردن مخلوط در گوشه‌های قالب انجام می‌شود. طبق استاندارد $ASTMC192$ خارج‌کردن نمونه‌ها از قالب، ۸±۲۴ ساعت بعد از قالب‌گیری نمونه‌ها امکان‌پذیر است.

۲ ـ ۳ ـ خصوصیات مکانیکی

آزمون مقاومت فشاری بر اساس استاندارد $ASTMC39$ ، روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی متر و با استفاده از دستگاه تمام اتوماتیک کالیبره‌شده انجام می‌گیرد. در این آزمایش، سرعت بارگذاری بر روی نمونه‌ها ۰/۵±۰/۲۵ مگاپاسکال می‌باشد. برای این منظور، یک روز پیش از انجام آزمایش، نمونه ها را از حوضچه عمل‌آوری خارج کرده تا کاملا خشک شوند. برای اینکه بارگذاری به طور یکنواخت اعمال شود، لازم است سطح نمونه‌ها قبل انجام آزمایش، کاملا صاف شود. بیشترین تنش فشاری نمونه های بتن، طبق رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (۱)$$

در رابطه فوق:

F: مقدار نیروی شکست برحسب نیوتن (N)

A_c: سطح بارگذاری برحسب میلی متر مربع (mm^2)

f_c: مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال (MPa) می‌باشد.

در آزمون ذکرشده، هر طرح با سه نمونه استوانه‌ای در سن ۲۸ روز انجام پذیرفته‌است که مقاومت فشاری نهایی، بر اساس میانگین مقاومت فشاری سه نمونه محاسبه می‌شود.

آزمون مقاومت خمشی بتن، مطابق استاندارد $ASTMC78-10$ به صورت بارگذاری بر روی یک سوم دهانه تیر ساده، بر روی نمونه‌های منشوری ۴۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی متر و در سن ۲۸ روزگی انجام‌گرفته‌است. نمونه‌ها یک روز قبل از انجام آزمایش از حوضچه خارج شده تا کاملا خشک شوند. همچنین جهت توزیع مناسب نیرو، سطح نمونه‌ها پس از خشک‌شدن، ساب زده‌شده‌است. درصورتی که محل شکستگی در یک سوم وسط دهانه تیر باشد، محاسبه مقاومت خمشی، بر اساس رابطه (۲) صورت می‌پذیرد.

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (۲)$$

در این رابطه:

R: مقاومت خمشی بتن برحسب مگاپاسکال (MPa)

P: نیروی وارده برحسب نیوتن (N)

L: طول نمونه برحسب میلی متر (mm)

b: عرض میانگین تیر برحسب میلی متر (mm)

d: ارتفاع میانگین تیر برحسب میلی متر (mm) می‌باشد.

برای انجام آزمایش مقاومت برشی، از روش آزمون انجمن مهندسی عمران ژاپن $(JSCE)$ به دلیل عدم وجود روش استاندارد برای تست مقاومت برشی در $ASTM$ و CSA استفاده شده‌است. به علت عدم دسترسی به سیستم پیشنهادشده برای انجام آزمایش برشی بر اساس $JSCEG533$ ، به ساخت تجهیزات خاص آزمایش مربوطه پرداخته شد. در ابتدا طرح‌های موجود برای آزمایش به آزمایشگاه CAD/CAM دانشگاه ارجاع داده شد و پس از بررسی های فنی بر استاندارد مربوطه در مورد ابعاد قطعات، طراحی فنی جزئیات قطعات صورت گرفت. طبق طراحی‌های فنی انجام‌شده، قطعات فولادی توسط دستگاه CNC تراش و آماده‌سازی گردید.

تنظیمات آزمایش برشی مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده‌شده‌است [۲۸]. ابعاد نمونه بر اساس استاندارد $JSCEG533$ ، ۲۴۵×۷۵×۷۵ میلی متردر نظر گرفته‌شده‌است.

حداکثر مقاومت برشی تیر بر اساس رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

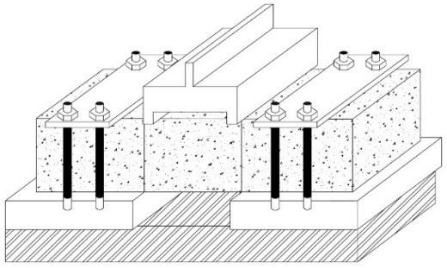
$$\tau_{Max} = \frac{P_{Max}}{2A} \quad (۳)$$

در رابطه بالا:

τ_{Max} : مقدار مقاومت برشی برحسب مگاپاسکال (MPa)

P_{Max} : نیروی تحمل شده توسط نمونه بر حسب نیوتن (N)

A: مساحت موثر صفحه برشی در هر طرف نمونه می‌باشد بر حسب میلی متر مربع (mm^2) ، که با توجه به ایجاد بریدگی در محل برش، این سطح بعد از تست باید به صورت دقیق اندازه‌گیری شود.



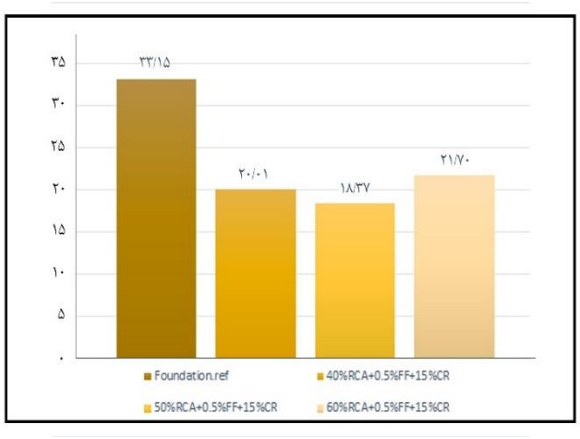
شکل ۱: تنظیمات آزمایش برشی

۳ ـ نتایج آزمایشگاه

۳ ـ ۱ ـ مقاومت فشاری

نمونه بتنی درون دستگاه جک هیدرولیکی در شکل (۲) نشان داده شده است. نتایج حاصل از این آزمایش مطابق شکل (۳) می باشد.

شکل ۲: نمونه بتنی درون جک جهت انجام مقاومت فشاری



شکل ۳: نمودار مقایسه مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه برحسب مگاپاسکال

مشاهده می‌شود با افزایش میزان سنگدانه بتن بازیافتی از ۰ به ٪۴۰ روند مقاومت فشاری کاهشی می‌شود که علت این موضوع را می‌توان ناهماهنگی ابعاد سنگدانه بتن بازیافتی و ایجاد فضای خالی در ماتریس بتن دانست.

با افزودن سنگدانه بتن بازیافتی از ٪۴۰ تا ٪۵۰ همچنان روند کاهشی ادامه دارد اما با افزایش متغیر مذکور تا ٪۶۰ مقاومت فشاری روند افزایشی به خود می‌گیرد تا جایی که بتن حاوی ٪۶۰ سنگدانه بتن بازیافتی بهترین مقاومت فشاری را نسبت به بقیه طرح‌های حاوی سنگدانه بتن بازیافتی نشان می‌دهد.

علت این امر این است که در بتن حاوی ٪۶۰ سنگدانه بتن بازیافتی اسلامپ کمتر از دو حالت قبل است و در واقع بتن با روانی کمتری است، بدیهی است اسلامپ نمونه ی بتنی از مهم ترین عوامل تاثیر گذار بر مقاومت فشاری آن می باشد.

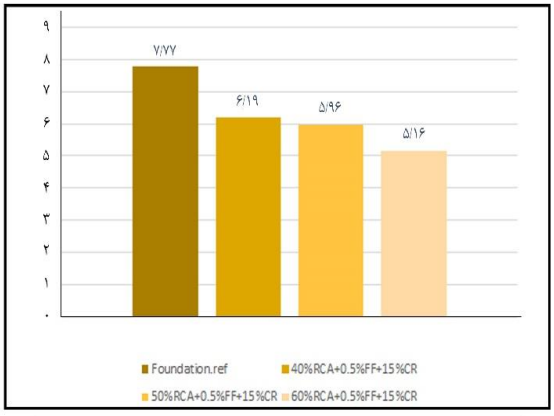
بنابراین مقدار مقاومت فشاری از تغییرات درصد سنگدانه بتن بازیافتی تاثیر می‌پذیرد.

۳ ـ ۲ ـ مقاومت خمشی

برای محاسبه مقاومت خمشی به روش بارگذاری سه نقطه‌ای با به‌کارگیری بلوک تکیه‌گاهی به صورت بارگذاری بر روی یک سوم دهانه تیر ساده، مقدار بار بیشینه از دستگاه قرائت شده است. در شکل (۴) نمونه بتنی تحت خمش نمایش داده شده است. نتایج حاصل از این آزمایش مطابق شکل (۵) می باشد.

رویا تاری نشده

شکل ۴: نمونه بتنی تحت خمش



شکل ۵: نمودار مقاومت خمشی نمونه‌های مورد بررسی برحسب مگاپاسکال

از شکل (۵) برداشت می‌شود که مقاومت نمونه بتنی بدون سنگدانه بتن بازیافتی ۷/۷۷ مگاپاسکال می‌باشد که با افزودن ٪۴۰ سنگدانه بتن بازیافتی، مقاومت نمونه بتنی به۶/۱۹ مگاپاسکال می‌رسد. با افزودن ٪۵۰ سنگدانه بتن بازیافتی به نمونه بتنی، مقاومت آن به ۵/۹۶ مگاپاسکال رسیده و مقاومت خمشی نمونه بتنی با ٪۶۰ سنگدانه بتن بازیافتی به ۵/۱۶ مگاپاسکال کاهش یافته است. از طرفی نتایج نشان می‌دهد افزایش ٪۴۰ سنگدانه بتن بازیافتی به نمونه بتنی، موجب کاهش مقاومت خمشی به میزان ٪۲۰ می‌شود. همچنین با افزایش ٪۵۰ و ٪۶۰ سنگدانه بتن بازیافتی به نمونه بتنی، مقاومت خمشی به میزان ٪۲۳ و ٪۳۳ کاهش می‌یابد.

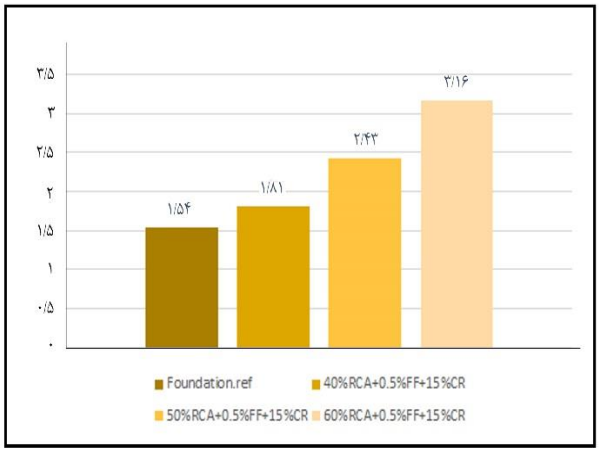
علت این امر این است که بتن ساخته‌شده با سنگدانه‌های بتن بازیافتی، به مراتب کیفیت کمتری نسبت به بتن ساخته‌شده با سنگدانه‌های طبیعی دارد؛ چراکه این نوع سنگدانه، حاصل بازیافت ضایعات ناشی از تخریب و استفاده مجدد از آن است. بنابراین نمونه بتنی با سنگدانه‌های بتن بازیافتی، طاقت خمشی کمتری نسبت به نمونه شاهد دارد.

۳ـ۳ـ مقاومت برشی

آزمایش مقاومت برشی طبق شکل (۶)، با هدف محاسبه بیشینه تنش برشی نمونه‌های بتنی با درصد سنگدانه بتن بازیافتی متفاوت انجام شده است.

شکل ۶: نمونه بتنی تحت اعمال نیروی برشی

پس از محاسبه تنش برشی برای نمونه‌های ۲۸ روزه ،میانگین مقاومت برشی سه نمونه موجود محاسبه شده و نتایج به شرح شکل (۷) می‌باشد:



شکل ۷: مقایسه مقاومت برشی نمونه‌های مورد بررسی برحسب مگاپاسکال

با بررسی شکل فوق مشاهده می‌شود تنش برشی نمونه شاهد ۱/۵۴ مگاپاسکال بوده و پس از افزودن ٪۴۰ سنگدانه بتن بازیافتی

، مقدار تنش برشی نمونه ٪۱۷ افزایش یافته، با ادامه روند افزایش سنگدانه بتن بازیافتی به ٪۵۰، مقدار تنش برشی نمونه٪۵۸ افزایش یافته و در نهایت با افزایش ٪۶۰ سنگدانه بتن بازیافتی به نمونه، میزان تنش برشی نمونه به طور متوسط ٪۱۰۵ افزایش یافته است. علت این امر واردشدن عملکرد سنگدانه بتن بازیافتی، قبل از ایجاد میکروترک‌ها در بتن و درنتیجه آن افزایش مقاومت برشی نمونه می‌باشد. نتایج حاصل از این آزمایش، افزایش تنش برشی به ازای افزایش هرچه بیشتر سنگدانه بتن بازیافتی به نمونه بتنی را نشان می‌دهد.

همچنین می‌توان دریافت نرخ افزایش تنش برشی با افزودن سنگدانه بتن بازیافتی، یکسان نبوده و با افزایش سنگدانه بتن بازیافتی از ٪۴۰ به ٪۵۰ نرخ افزایش تنش برشی، تصاعدی و با افزایش سنگدانه بتن بازیافتی از ٪۵۰ به ٪۶۰ نرخ افزایش تنش برشی،نسبت به حالت قبل نزولی می‌باشد. از این مهم می‌توان نتیجه گرفت افزایش سنگدانه بتن بازیافتی تا حد معینی به صرفه می‌باشد؛ به نحوی که افزودن آن، بیش از حد به دست آمده، جهت افزایش تنش برشی، صرفه اقتصادی ندارد. به این ترتیب در این پژوهش نمونه بتنی با٪۵۰ سنگدانه بتن بازیافتی ، نمونه بهینه می-باشد.

افزودن سنگدانه بتن بازیافتی کمتر از این درصد، منجر به تنش برشی پایین می‌شود و افزودن سنگدانه بتن بازیافتی بیش از ٪۵۰، به نسبت افزایش تنش برشی آن، صرفه اقتصادی ندارد.

۴ ـ نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش ها به طور خلاصه به شرح زیر است:

- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز نشان داد که افزودن سنگدانه بتن بازیافتی، گرانول لاستیک و الیاف فورتا باعث کاهش چشمگیر مقدار مقاومت فشاری شده است.
- نتایج آزمایش مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزگی برای پی جداساز نشان داد که افزودنی‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت خمشی ایجاد می‌کنند و با تغییر درصد سنگدانه بتن بازیافتی این کاهش شدت می‌یابد.
- نتایج آزمایش مقاومت برشی در سن ۲۸ روزگی این طرح افزایش چشم‌گیری را با افزایش درصد سنگدانه بتن بازیافتی نشان داد. روند افزایش مقاومت برشی صعودی می‌باشد.

لازم به ذکر است، جهت استفاده از این نوع جداساز لرزه ای به عنوان پی گسترده که موضوع اصلی پژوهش انجام شده می باشد، بایستی مقاومت و رفتار برشی مطلوبی کسب شود، لذا آزمایشات انجام‌شده نشان داد که مقاومت برشی کسب شده با استفاده از گرانول لاستیک و سنگدانه بتن بازیافتی منجر به مقاومتی در حد مقاومت لازم برای پی ساختمانهای با ارتفاع کوتاه یا متوسط می باشد. به‌طورکلی می‌توان گفت استفاده از مواد بازیافتی می‌تواند توانمندی برشی و استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد، بنابراین از این نوع بتن میتوان به‌عنوان پی هایی که استهلاک انرژی انجام می‌دهند، استفاده کرد.

در ادامه پژوهش پیش رو میتوان توصیه هایی برای تکمیل و ادامه ی این تحقیق به شرح زیر ارائه کرد:

۱) مقایسه رفتار پی جداساز با رفتار جداساز معمولی
۲) بررسی زهکشی و تراوش آب در زمین حین استفاده از این نوع جداساز
۳) مدل‌سازی لرزه‌ای پی‌جداساز

منابع

[۱] Naderzadeh, A. (۲۰۰۹). "Application of siesmic base isolation technology in Iran". Menhin, ٦٣(٢), ٤٠-٤٧,JSSI, Japan.

[۲] Ghodrati, G., Namiranian, P., Shams, M. (۲۰۰۹). " Achieving higher levels using a seismic isolator". Publication No. ٥٢٤. (In Persian).

[۳] Skinner, RI., Kelly, TE., Robinson,WH. (۲۰۱۱). "Seismic isolation for designers and structural engineers." Robinson Siesmic Ltd: New Zealand,

[٤] Villaverde, R. "Recent advances in base isolation technology", ٦th International conference on siesmology and earthquake engineering, ٢٠١١,Tehran, Iran.

[٥] Hernández, E., Palermo, A., Granello, G., Chiaro, G., Banasiak, L. (٢٠٢٠) “Eco-rubber Seismic-Isolation Foundation Systems : A Sustainable Solution for the New Zealand Context”. vol. ٨٦٦٤, ٢٠٢٠, doi: ١٠,١٠٨٠/١٠١٦٨٦٦٤,٢٠١٩,١٧٠٢٤٨٧.

[٦] ASTM, ١٩٩٨. "Standard Practice for the Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications". West Conshohocken. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.

[٧] Benazzouk, A., Mezreb, K., Doyen, G., Goullieux, A., & Quéneudec, M. (٢٠٠٣). "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, ٢٥(٧), ٧١١-٧٢٠.

[٨] Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J. L., & Hernández, M. (٢٠٠٥). "Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing". Composite structures, ٧١(٣-٤), ٤٣٩-٤٤٦.

[٩] Tsang, H. H., Sheikh, M. N., & Lam, N. (٢٠٠٧). "Rubber-soil cushion for earthquake protection".

[١٠] Oikonomou, N., & Mavridou, S. (٢٠٠٩). "The use of waste tyre rubber in civil engineering works". In Sustainability of construction materials (pp. ٢١٣-٢٣٨). Woodhead Publishing.

[١١] Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., De Aguiar, J. B., & Camões, A. F. (٢٠١٢). "Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes". Construction and building materials, ٣٤, ١٨٦-١٩١.

[١٢] Li, L., Ruan, S., & Zeng, L. (٢٠١٤). "Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles". Construction and Building Materials, ٧٠, ٢٩١-٣٠٨.

[١٣] Mashiri, M.S., Vinod, J.S., Sheikh, M.N., Tsang, H.-H., ٢٠١٥. "Shear strength and dilatancy behaviour of sand–tyre chip mixtures". Soils Found. ٥٥, ٥١٧–٥٢٨.

[١٤] Rivas-Vázquez, L. P., Suárez-Orduña, R., Hernández-Torres, J., & Aquino-Bolaños, E. (٢٠١٥). "Effect of the surface treatment of recycled rubber on the mechanical strength of composite concrete/rubber". Materials and Structures, ٤٨(٩), ٢٨٠٩-٢٨١٤.

[١٥] Youssf, O., ElGawady, M. A., & Mills, J. E. (٢٠١٥, August). "Experimental investigation of crumb rubber concrete columns under seismic loading". In Structures (Vol. ٣, pp. ١٣-٢٧). Elsevier.

[١٦] Strukar, K., Šipoš, T. K., Miličević, I., & Bušić, R. (٢٠١٩). "Potential use of rubber as aggregate in structural reinforced concrete element–A review". Engineering Structures, ١٨٨, ٤٥٢-٤٦٨.

[١٧] Li, Y.; Chai, J.; Wang, R.; Zhou, Y.; Tong, X. (٢٠٢٢). "A Review of the Durability-Related Features of Waste Tyre Rubber as a Partial Substitute for Natural Aggregate in Concrete". Buildings ٢٠٢٢, ١٢, ١٩٧٥. https:// doi.org/١٠,٣٣٩٠/buildings١٢١١١٩٧٥

[١٨] Hansen, T. C. (١٩٨٦). "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments ١٩٤٥–١٩٨٥". Materials and structures, ١٩(٣), ٢٠١-٢٤٦.

[١٩] Xiao, J., Li, W., Fan, Y., & Huang, X. (٢٠١٢). "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (١٩٩٦–٢٠١١)". Construction and building materials, ٣١, ٣٦٤-٣٨٣.

[٢٠] Duan, Z. H., & Poon, C. S. (٢٠١٤). "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars". Materials & Design, ٥٨, ١٩-٢٩.

[٢١] Vieira, T., Alves, A., De Brito, J., Correia, J. R., & Silva, R. V. (٢٠١٦). "Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware". Materials & design, ٩٠, ٧٦٧-٧٧٦.

[٢٢] Verein Deutscher, Zementwerk., ٢٠١٩. "Global cement production from ١٩٩٠ to ٢٠٣٠"(inmillionmetrictons)[٠٧.Mar]Availablefrom. https://www.statista.com/statistics/ ٣٧٣٨٤٥/global-cement-production-forecast/.

[٢٣] Bai, G, , Zhu ,C., Liu, C., Liu, B. (٢٠٢٠). "An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties". Construction and Building Materials, ٢٤٠, ١١٧٩٧٨.

[۲٤] Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (۲۰۲۱). "A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete". Resources, Conservation and Recycling, ۱۷۱, ۱۰۵۵٦۵.

[۲۵] Sahu, A., Kumar, S., & Srivastava, A. K.L. (۲۰۲۲). "Comparative Study on Natural and Recycled Concrete Aggregate in Sustainable Concrete: A Review". Recent Advances in Sustainable Environment, Lecture Notes in Civil Engineering ۲۸۵, https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۹۸۱-۱۹-۵۰۷۷-۳_۱۲

[۲٦] O. of D. for S. Supervision, B. of T. E. System, and Http://tec.mporg.ir, "Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings No. ۵۲۳.Pdf."

[۲۷] Vivian W. Y. Tam and C. M. Tam. "Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach", no. ۲۰۰۷, pp. ۳۵۹۲–۳٦۰۲, ۲۰۱۰, doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۸۵۳-۰۰٦-۰۳۷۹-y.

[۲۸] Mostafazadeh, M. "Shear Behavior of Synthetic Fiber Reinforced Concrete Box Culverts", PhD Dissertations, University of Texas at Arlington, (۲۰۱۷).

بازیابی شده