

بررسی آزمایشگاهی سرباره کوره آهن گدازی و تراشه آسفالت بازیافتی بر مقاومت در برابر ضربه و مقاومت سایشی روسازی بتن غلتکی

سعید احمدی^{۱*}، رامین رضاپور کاریزبالا^۲

۱- هیئت علمی دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران
۲- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، به دلیل هزینه‌های زیاد ساخت روسازی و ملاحظات زیست‌محیطی، از مصالح ضایعاتی و بازیافتی مختلفی در رویه‌های بتنی استفاده شده است. در این پژوهش خصوصیات مکانیکی، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافتی و سرباره کوره آهن گدازی مورد بررسی قرار گرفته است. مخلوط‌های بتن غلتکی مورد استفاده در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر همزمان سرباره (ریز و درشت) و آسفالت بازیافتی (ریز و درشت) به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه طبیعی، به همراه سیمان سرباره‌ای که به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده گردیده است. در این پژوهش آزمایشگاهی، پانزده طرح اختلاط مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در آنها سیمان سرباره‌ای با مقادیر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد جایگزین سیمان، سرباره ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب به میزان ۵۰ و ۳۰ درصد جایگزینی سنگدانه طبیعی و آسفالت بازیافتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که مصالح بازیافتی اثرات متفاوتی بر خواص مکانیکی روسازی بتن غلتکی دارند، به نحوی که بیشترین مقاومت فشاری و خمشی در مقدار بهینه سیمان سرباره‌ای (۳۰ درصد) نسبت به نمونه شاهد ۲۴ و ۶ درصد افزایش داشته است. همچنین با افزایش مقدار سرباره، مقاومت سایشی بتن غلتکی در تمام سطوح جایگزینی (جایگزین سیمان، ریزدانه و درشت‌دانه) حداقل به میزان ۱۳ درصد افزایش یافته است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که سیمان سرباره‌ای، سرباره ریزدانه و آسفالت بازیافتی ریزدانه مقاومت در برابر ضربه نمونه‌ها را افزایش می‌دهند، این در حالی است که در نمونه‌های حاوی مواد بازیافتی درشت‌دانه کاهش مقاومت در برابر ضربه حاصل گردیده است.

کلمات کلیدی: بتن غلتکی، سرباره کوره آهن گدازی، آسفالت بازیافتی، خواص مکانیکی، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه

روسازی یک نوع سازه است که شامل لایه‌هایی از مصالح مختلف می‌شود و هدف اصلی از اجرای آن کاهش تنش ناشی از بارهای وارده خودروها می‌باشد. حمل و نقل یک خواسته اساسی انسان است و همچنین زیرساخت‌های روسازی پایدار و انعطاف‌پذیر برای چالش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی حیاتی است [۱]. بدیهی است که حمل و نقل بزرگراهی برای توسعه اقتصادی جهان اهمیت دارد. مهندسی روسازی نه تنها بخش مهمی از مهندسی بزرگراه است، بلکه عامل مهمی است که بر ظرفیت خدمات جاده تأثیر می‌گذارد. به دلیل رفتارهای واقعی ترافیک و شرایط محیطی، پیش‌بینی عمر سرویس روسازی پیچیده‌تر و پیچیده‌تر می‌شود و نیاز به دانش عمیق تجزیه و تحلیل مواد روسازی دارد [۲]. روسازی‌ها بر اساس مصالح تشکیل دهنده به سه نوع عمده روسازی‌های بتنی، روسازی‌های آسفالتی و روسازی‌های مرکب طبقه‌بندی می‌شوند. روسازی‌های بتن غلتکی (RCCP)^۱ به عنوان روسازی مقرون به صرفه و سریع شناخته می‌شوند و استفاده از آنها برای کاربردهای مختلف مانند پارکینگ‌ها، راه‌ها، مناطق پارکینگ هواپیما، محوطه کشتیرانی، اسکله بنادر و جاده‌های کم حجم و سنگین توصیه می‌شود [۳]. این فناوری بهترین گزینه برای اجرای سازه‌های چند لایه که در آنها نسبت سطح به ضخامت مانند سدها و روسازی جاده‌ها زیاد است [۴]. اخیراً شناخت بهتر RCCP، این نظریه را مطرح کرده است که فناوری RCCP باید بر مبنای دانه بندی سنگدانه‌ها و بهترین استفاده از مصالح ریزدانه و پرکننده در مفهوم مهندسی، برحسب سه مقوله کیفیت، ایمنی و قیمت پایه‌ریزی شود. آنچه موجب تسهیل کار با فناوری RCCP می‌شود استفاده از مصالح قابل دسترس در پروژه است. از آنجایی که عملیات مربوط به تعیین درصد مصالح مصرفی، ترکیب مواد اولیه و انتقال بتن به پای کار به کمک تجهیزات معمولی انجام می‌شود، استفاده از این روش باعث افزایش سرعت عملیات اجرای پروژه می‌شود. در فناوری RCCP در واقع از مصالح و تجهیزات متعارف اجرایی استفاده می‌شود [۵]. تفاوت‌های بتن غلتکی با روسازی بتنی متداول راهسازی این است که بتن غلتکی با غلتک متراکم شده و با استفاده از فینیشرهای مورد استفاده در اجرای آسفالت، پخش می‌شود. اما برخلاف بتن رایج عملیات روسازی جهت متراکم سازی نیاز به ویبراتور نمی‌باشد و اینکه بتن غلتکی دارای اسلامپ صفر است، در صورتی که مخلوط بتنی راهسازی دارای اسلامپ در محدوده ۲ تا ۱۰ سانتی‌متر بسته به نوع بتن‌ریزی می‌باشد. تنها ایرادی که می‌توان به بتن غلتکی گرفت، ترک خوردن بتن حین عمل‌آوری می‌باشد [۶]. RCCP به دلیل تولید نسبتاً ساده‌تر و مقرون به صرفه‌تر، جایگزین جذابی در روش‌های مرسوم راهسازی است [۷]. تخلخل و توزیع اندازه منافذ RCCP به نسبت آب به سیمان و مدت متراکم شدن بتن بستگی دارد. نسبت کم آب به سیمان مخلوط‌های RCCP یک ماتریس سیمانی با تخلخل کم ایجاد می‌کند که به مقاومت فشاری بالای بتن نیز کمک می‌کند. لازم به ذکر است که درصد هوای RCCP نباید بیش از ۳ درصد باشد [۸]. خواص سخت شده RCCP به انتخاب مناسب ترکیب سیمان و حجم آن، نسبت آب به سیمان و ویژگی‌های سنگدانه بستگی دارد و برای بتن معمولی، مقاومت به نسبت مخلوط بستگی دارد. با این حال، برای RCCP، استحکام علاوه بر نسبت مخلوط به سطح تراکم نیز وابسته است [۹]. میری و همکاران در پژوهشی، امکان استفاده از لوماشل که به فراوانی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان وجود دارد، به عنوان جایگزین بخشی از مصالح ریزدانه در ساخت بتن غلتکی مورد استفاده قرار دادند. همچنین تأثیر جایگزینی پوزولان تفتان و آهک زنده به جای مصالح سیمانی بر مقاومت‌های فشاری، کششی، نفوذپذیری و جذب آب نیز بررسی شده است. از میان طرح‌های اختلاط صورت گرفته، بهترین عملکرد در آزمایشات مقاومت فشاری و کششی در نمونه‌های حاوی ۵٪ آهک، در آزمایش نفوذ آب نمونه‌های حاوی ۲۰٪ پوزولان و در آزمایش جذب آب نمونه‌های ساخته شده با ریزدانه ماسه حاصل شد. نتایج آزمایشات مختلف نشان داد که بطور کلی امکان استفاده از لوماشل به عنوان مصالح ریزدانه در ساخت بتن غلتکی وجود دارد و این امکان می‌تواند کمک موثری به اقتصاد طرح‌های اجرایی در مناطق ساحلی باشد [۱۰].

گسترش شهرها، رشد جمعیت و توسعه شهری منجر به تولید بیشتر محصولات جانبی زائد شده که در محیط اطراف رها می‌شود. از دیدگاه حفاظت از محیط زیست، ذخیره این حجم از زباله در طبیعت به دلیل هزینه‌های بالا و مخاطرات زیست محیطی و همچنین زمین و فضای مورد نیاز توجیه پذیر نیست. اگرچه بخشی از ضایعات ناشی از مصالح ساختمانی نظیر کاشی، سرامیک، سیمان، شیشه، ملات، بتن و غیره در ساخت جاده‌ها، باند فرودگاه‌ها، خاکریزها و زهکشی‌ها استفاده می‌شود، مقادیر زیادی از آن هنوز در محیط زیست رها می‌شود و استفاده خاصی ندارند [۱۱]. تولید مواد زائد در صنایع و فعالیت‌های انسانی امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. این زباله‌ها در حال حاضر مهم‌ترین

¹ Roller Compacted Concrete Pavement

مسائل زیست محیطی و اقتصادی جهان امروز هستند. بتن یک ماده ایده‌آل برای بازیافت زباله یا محصولات جانبی صنعتی است. شناسایی جایگزینی برای سیمان یا مواد تجدید ناپذیر مانند گرانیت برای ساخت بتن مقرون به صرفه‌تر و سازگار با محیط زیست بسیار حیاتی است، زیرا تولید سالانه بیش از ۱۰ میلیارد تن بتن آن را به ضروری‌ترین مصالح ساختمانی تبدیل کرده است [۱۲].

بسیاری از مواد زائد که به محل دفن زباله ختم می‌شوند را می‌توان در تولید بتن استفاده نمود. سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده زمینی (GGBS)^۲، خاکستر پوسته برنج (RHA)^۳ و خاکستر بادی (FA)^۴ از جمله موادی هستند که می‌توانند در تولید بتن استفاده شوند. استفاده از مواد زائد ذکر شده به عنوان مواد سیمانی می‌تواند به طور بالقوه صنعت بتن را به سمت صنعت سبزتر و پایدارتر سوق دهد که می‌تواند آلودگی ناشی از انتشار گازها را کاهش دهد. مصالح بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه‌های ریز و درشت و نیز به عنوان افزودنی‌های سیمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. محصول فرعی که در ساخت آهن خام در کوره بلند در دمای ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد به صورت مذاب به دست می‌آید را سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBS) می‌نامند. این ماده در کارخانه‌های فولاد تولید شده و این زباله‌ها می‌تواند برای محیط زیست خطرناک باشد. سیمان پرتلند سرباره‌ای از طریق آسیاب کردن کلینکر سیمان پرتلند، گچ و سرباره دانه‌بندی شده یا ترکیب سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده آسیاب شده با سیمان پرتلند معمولی به وسیله مخلوط‌کن‌های مکانیکی تولید می‌شود. با تولید این نوع سیمان می‌توان از این زباله‌ها استفاده کرد. از مزایای این سیمان می‌توان به حداکثر کاهش گرمای هیدراتاسیون، استحکام نهایی بالا، نفوذ ناپذیری بالا و مقاومت در برابر حمله سولفات اشاره کرد [۱۳].

RCCP یک روسازی سازگار با محیط زیست است، زیرا محصولات جانبی صنایع را در خود جای داده است، ظرفیت بالقوه بالای RCCP برای استفاده از مواد زائد در مخلوط بتن غلتکی توسط محققان گزارش شده است [۱۴]. امروزه از GGBS برای جایگزینی سیمان در بتن غلتکی استفاده می‌شود. همچنین از دیگر کاربردهای این ماده می‌توان به استفاده از آن در مخلوط آسفالتی گرم، اساس و زیراساس روسازی، خاکریزها و در سیمان پرتلند اشاره نمود. کریشنا و همکاران اثر GGBS را بر خواص مکانیکی و مقاومت سایشی RCCP ارزیابی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که جایگزینی GGBS به عنوان سیمان در نمونه‌های مختلف سبب کاهش مقاومت RCCP در سنین اولیه (۳ روز) شده و در سنین ۷ و ۲۸ روز، مقادیر جایگزینی GGBS تا ۵۰ درصد سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری شده است. همچنین افزایش مقاومت سایشی RCCP در تمام مقادیر جایگزینی GGBS ملاحظه گردید. بنابراین جایگزینی ۴۰ درصد از GGBS با سیمان به عنوان مقدار بهینه در این پژوهش بدست آمده است [۱۵]. راثو و همکاران نشان دادند که جایگزینی سیمان با GGBS در درصدهای مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد)، باعث کاهش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی در سن ۳ روزه شد. اما بهبود مستمر و قابل توجهی در مقاومت‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده شد. مقاومت سایشی RCCP با GGBS به عنوان ماده افزودنی معدنی به شدت تحت تأثیر مقاومت آن صرف نظر از مقدار GGBS است [۱۶]. حداکثر مقاومت فشاری بتن غلتکی در ۴۰٪ جایگزینی سیمان توسط GGBS در روسازی‌های بتن غلتکی گزارش شده است [۱۷]. مقاومت سایشی که یکی از ویژگی‌های مهم روسازی‌های بتنی است، به نسبت مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. به طور کلی با استفاده از GGBS، نه تنها خواصی مانند مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش بهبود یافته است، بلکه به حفظ منابع طبیعی نیز کمک کرده است [۱۸]. سلوام و همکاران مطالعات منتشر شده بین سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۲۱ در مورد استفاده از مواد جایگزین برای RCCP گزارش کرده‌اند. سنگدانه‌های بازیافتی که به عنوان جایگزین در مخلوط بتن غلتکی نظر گرفته شده‌اند عبارتند از بتن بازیافتی، آسفالتی بازیافتی، خرده لاستیک و سنگدانه‌های سرباره فولادی. در این پژوهش، تأثیر این نوع مواد بازیافتی بر روی مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی، سایشی و نفوذپذیری بتن غلتکی ارزیابی شده است. به طور خلاصه، این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مواد بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی منجر به کاهش کیفیت مخلوط می‌گردد. تحقیقات نشان داد که در صورت جایگزینی بهینه مواد بازیافتی منجر به حصول نتایج قابل قبولی بر اساس الزامات آیین‌نامه‌ای می‌گردد [۱۹]. آقای ابوطالبی در مطالعه‌ای با بررسی اثر سیمان پرتلند پوزولانی بر خواص مکانیکی بتن غلتکی حاوی سرباره دانه بندی شده پارامترهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول الاستیسیته استاتیکی را مورد مطالعه قرار داده و نشان داد که استفاده از افزودنی مذکور منجر به کاهش تمامی پارامترها می‌گردد [۲۰]. در پژوهشی که

² Ground Granulated Blastfurnace Slag (GGBS)

³ Rice Husk Ash (RHA)

⁴ Fly Ash (FA)

توسط یاسین و همکاران انجام گرفت از سه افزودنی پودر آجر، پودر شیشه و سرباره فولاد به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در مخلوط بتن غلتکی استفاده گردید. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی نشان داد که استفاده از مواد بازیافتی ذکر شده منجر به کاهش خصوصیات مکانیکی مخلوط بتن غلتکی می‌گردد. از بین سه افزودنی به کار گرفته شده در این تحقیق، سرباره فولاد نسبت به سایر افزودنی‌ها عملکرد مناسب تری را ارائه داده که دلیل این امر را می‌توان بالا بودن سطح مخصوص ذرات سرباره فولاد دانست [۲۱].

بر اساس مطالعات قبلی استفاده از تراشه آسفالت در روسازی‌های بتنی غلتکی تأثیرات مختلفی بر خصوصیات مکانیکی و دوام آن دارد. در این راستا، سنگدانه های RAP^۵ چگالی کمتر و ویژگی های جذب آب بیشتری را در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی نشان می‌دهند. از نظر خواص مکانیکی به دلیل پوشش قیر کهنه موجود در سطح آن، ماده ای ضعیف به شمار می‌روند بطوری که جایگزینی بیشتر سنگدانه‌های طبیعی با RAP سبب کاهش خصوصیات مکانیکی روسازی می‌گردد [۲۲]. عوامل مختلفی مانند روش تهیه تراشه آسفالت، اندازه ذرات، سن روسازی و وجود ذرات آگلومره شده بر خواص مکانیکی مخلوط‌های RCCP-RAP تأثیر می‌گذارند. این به وجود یک لایه قیر قدیمی بر روی سطح سنگدانه RAP ارتباط داده می‌شود. که به ایجاد یک منطقه گذار بین سطحی ضعیف و متخلخل کمک می‌کند [۲۳]. پوشش قیر بیشتر روی سطح ذرات RAP نیز منجر به کاهش بیشتر خواص مکانیکی بتن غلتکی شده و در نتیجه، استفاده از RAP ریزدانه به کاهش بیشتر کمک کرده، زیرا حاوی قیر بیشتری در مقایسه با RAP درشت‌دانه است. وجود ذرات آگلومره شده منجر به ایجاد فضای خالی بیشتری شده و خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد. بطور کلی استفاده از سنگدانه های RAP تا ۵۰ درصد پیشنهاد شده و با در نظر گرفتن خواص مکانیکی RCC توصیه می‌گردد از این مصالح بیشتر در لایه‌های زیراساس و اساس روسازی راه‌های کم تردد و جاده‌های روستایی استفاده شود [۲۴]. آقای رام در مطالعه‌ای به بررسی بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافتی جایگزین سنگدانه پرداخت. نتایج نشان داد که استفاده از آسفالت بازیافتی به میزان ثابت ۵۰ درصد منجر به افزایش رطوبت بهینه مخلوط به میزان ۳ تا ۱۵ درصد می‌گردد، همچنین نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتن غلتکی حاکی از کاهش قابل توجه این پارامتر می‌باشند [۲۵]. آقای حسینی و همکاران با هدف استفاده از حداکثر مقدار مجاز مواد زائد در مخلوط بتن غلتکی از سرباره و آسفالت بازیافتی استفاده کردند. آزمون های مقاومت فشاری، خمشی و کشش غیرمستقیم برای ارزیابی عملکرد بتن غلتکی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزایش RAP باعث کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم و افزایش مقاومت خمشی نمونه ها می‌شود. علاوه بر این، افزایش RAP به میزان ۵۰ درصد، مقاومت فشاری را افزایش داده و در صورت افزایش میزان جایگزینی از مقدار ۵۰ درصد، کاهش مقاومت فشاری مشاهده گردید. از طرفی استفاده از سرباره در مخلوط بتن غلتکی باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم می‌گردد. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان مقدار ۵۰ درصد جایگزینی سرباره را به عنوان درصد بهینه در نظر گرفت [۲۶].

در پژوهش‌های پیشین، بررسی تأثیر استفاده جداگانه و ترکیبی سرباره کوره فولاد و خرده آسفالت بازیافتی بصورت جایگزین سنگدانه و سیمان سرباره‌ای بعنوان جایگزین خمیر سیمان بر خواص مکانیکی، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه روسازی بتن غلتکی مورد مطالعه و مقایسه قرار نگرفته است. در اکثر پژوهش‌های صورت گرفته خصوصیات مکانیکی و سایش رویه‌های بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفته و تحقیقات اندکی در رابطه با بررسی عملکرد بتن غلتکی در برابر ضربه صورت گرفته است. در این تحقیق، ضمن استفاده از خرده آسفالت ناشی از تخریب روسازی‌های قدیمی و رفع مشکلات ناشی از دفع این نوع مصالح در محیط زیست و همچنین استفاده از سرباره کارخانه‌های فولادسازی، که حجم انبوهی را در کارخانه‌ها به خود اختصاص می‌دهد، به عنوان جایگزینی مناسب برای سنگدانه و سیمان در بتن غلتکی، علاوه بر حفظ مسائل محیط زیستی، باعث کاهش استفاده از منابع طبیعی شن و ماسه می‌شود. همچنین، بررسی خواص مکانیکی بتن غلتکی با افزودن توأمان خرده آسفالت و سرباره فولاد و بررسی درصدهای بهینه مصالح و سیمان و تحلیل خصوصیات بهینه آنها یک رویکرد جدید خواهد بود.

⁵ Reclaim asphalt pavement

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح و طرح اختلاط

در این بخش به شرح مصالح بکار برده شده در ساخت بتن غلتکی مورد بررسی، بحث شده است. در این پژوهش از سیمان تیپ ۲ تهران استفاده شده است و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. مصالح سنگی بکار رفته در روسازی بتنی شامل مصالح سنگی درشت‌دانه (شن) و مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) از معادن تهران می‌باشد. بنا به پیشنهاد ACI ابعاد سنگدانه‌های مصرفی به ۱۹ میلیمتر محدود شده است. سرباره کوره آهن‌گدازی و آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین ریزدانه و درشت‌دانه، دیگر مصالح بکار رفته در این پژوهش می‌باشند. با توجه به آزمون XRD بر روی سیمان سرباره‌ای مورد استفاده در این پژوهش، ترکیبات شیمیایی سیمان سرباره‌ای که از کارخانه واقع در اصفهان تهیه شده، در جدول ۲ آورده شده است. همچنین خرده آسفالت بازیافتی از دیوی مصالح در شرق تهران تهیه شده که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. سیمان سرباره



شکل ۲. خرده آسفالت بازیافتی

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان تیپ ۲ تهران

ترکیبات شیمیایی	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Sr	MnO	K ₂ O
مقدار	۴/۱۷	۳/۵	۵/۹۳	۰/۳۱	۶۱/۱۹	۱۹/۲۴	۴/۳۹	۰/۰۹	۰/۲۴	۰/۸۸

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سیمان سرباره ای

ترکیبات شیمیایی	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Sr	MnO	K ₂ O
مقدار	۴/۶۹	۵/۱	۴/۵	۰/۴۱	۵۸/۳۸	۲۰/۹۲	۴/۸۴	—	۰/۳۱	۰/۸۶

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

سنگدانه	شن بادی	شن نخودی	ماسه
درصد رطوبت (%)	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۵۷
وزن مخصوص (Kg/m ³)	۱۶۳۴	۱۷۵۹	۲۰۶۳
چگالی اشباع با سطح خشک (gr/cm ³)	۲/۵۷	۲/۷۵	۳/۵۷۲
ظرفیت جذب آب (%)	۲/۱۰	۲/۱۵	۳/۴

جدول ۴. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های ریز و درشت

نوع مصالح	چگالی (Kg/m ³)	ظرفیت جذب آب (%)
آسفالت بازیافتی درشت‌دانه	۲۲۷۱	۱/۳۸
آسفالت بازیافتی ریزدانه	۲۱۲۰	۱/۸۲

جدول ۵. مشخصات فیزیکی سیمان سرباره‌ای

چگالی (Kg/m ³)	۲/۸۵ – ۲/۹۸
سطح ویژه (m ² /g)	۴۰۰ – ۶۰۰
اندازه ذرات (میکرون)	۰/۰۲ – ۰/۱۳

دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌ها در بتن غلتکی می‌تواند مخلوط‌هایی با کارایی و تراکم پذیری کافی فراهم کند و همچنین فضاهای خالی را به حداقل می‌رساند. آزمایش دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM C33 صورت گرفته است و در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده

اندازه الک (mm)	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۱/۱۸	۰/۱۵	۰/۰۷۵
حدود دانه‌بندی PCA	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۷۰-۹۰	۷۰-۸۵	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۶-۱۶	۲-۸
دانه بندی استفاده شده	۱۰۰	۹۳	۸۵	۷۲	۵۲	۲۳	۷	۴

مشخصات طرح اختلاط بتن در این پژوهش بر اساس جدول ۷ تنظیم شده است. در ساخت بتن، ابتدا مصالح خشک از قبیل سنگدانه، سیمان و سرباره به فراخور نیاز هر طرح، داخل میکسر در حال چرخش ریخته شد و عملیات ترکیب مصالح، به مدت ۲ دقیقه به طول انجامید. سپس بر اساس نیاز هر طرح آب به داخل میکسر در حال چرخش ریخته شده و فرآیند ترکیب مصالح، ۲ دقیقه دیگر (در مجموع ۴ دقیقه) به طول انجامید. به اختصار حروف C، F و G نیز به ترتیب مبین سنگدانه درشت دانه و ریزدانه می‌باشد. در طرح‌های ۱ تا ۳ سیمان سرباره‌ای با مقادیر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد جایگزین سیمان شده و در بقیه طرح‌ها، درصد جایگزینی سیمان ثابت است و سرباره جایگزین ریزدانه (۵۰ درصد) و جایگزین درشت‌دانه (۳۰ درصد) و آسفالت بازیافتی جایگزین ریزدانه (۵ درصد) و جایگزین درشت‌دانه (۱۵ درصد) شده است. درصدهای استفاده شده در جایگزینی ریزدانه و درشت‌دانه با بررسی مقالات معتبر انتخاب شده است [۳، ۲۷].

جدول ۷. طرح اختلاط

شماره طرح	مشخصات طرح	سیمان	آب	ریزدانه	درشت دانه	G-Cement	G-F	G-C	R-F	R-C
0	شاهد	350	140	970	980	0	0	0	0	0
1	Cement-10	315	140	970	980	35	0	0	0	0
2	Cement-30	245	140	970	980	105	0	0	0	0
3	Cement-50	175	140	970	980	175	0	0	0	0
4	Ce10-GF50	315	140	485	980	35	485	0	0	0
5	Ce30-GF50	245	140	485	980	105	485	0	0	0
6	Ce50-GF50	175	140	485	980	175	485	0	0	0
7	Ce10-GC30	315	140	970	686	35	0	294	0	0
8	Ce30-GC30	245	140	970	686	105	0	294	0	0

0	0	294	0	175	686	970	140	175	Ce50-GC50	9
0	48.5	0	0	35	980	921.5	140	315	Ce10-RF5	10
0	48.5	0	0	105	980	921.5	140	245	Ce30-RF5	11
0	48.5	0	0	175	980	921.5	140	175	Ce50-RF5	12
147	0	0	0	35	833	970	140	315	Ce10-RC15	13
147	0	0	0	105	833	970	140	245	Ce30-RC15	14
147	0	0	0	175	833	970	140	175	Ce50-RC15	15

۲-۲- زمان وی بی

روانی مخلوط بتن باید به میزانی باشد که بتوان آن را با سهولت کافی حمل کرد و در جایی ریخت بدون اینکه مراحل جداشدگی صورت گیرد. کارایی بتن با آزمایش اسلامپ و آزمایش وی بی نشان داده می‌شود. معمولاً از این روش برای تعیین کارایی بتن‌های با کارایی خیلی پایین یا سفت مانند بتن غلتکی استفاده می‌گردد. زمان وی بی مدت زمانی است که بعد از شروع ارتعاش سپری می‌گردد تا حلقه‌ای از دوغاب سیمان در لبه فوقانی یا انتهای قالب مشاهده گردد. مطابق با استاندارد ASTM C1170 مدت زمان تراکم هر نمونه طبق زمان وی بی بدست آمده برای هر نمونه تعیین می‌گردد [۲۸].

۲-۳- نمونه‌ها

در این پژوهش از قالب‌های ۱۰×۲۰ سانتیمتر استوانه‌ای جهت تعیین مقاومت فشاری، ۱۰×۱۰×۵۰ سانتیمتر تیر منشوری به منظور ارزیابی مقاومت خمشی و ۱۵×۳۰ سانتیمتر استوانه‌ای جهت بررسی مقاومت در برابر ضربه و سایش استفاده شده است.

۲-۴- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی در این پژوهش شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم، خمش سه نقطه‌ای، مقاومت سایشی، مقاومت در برابر ضربه می‌باشد. در پایان ترکیب مصالح، مخلوط بتن در قالب‌های فلزی روغن کاری شده از قبل ریخته شد و عملیات تراکم مخلوط بتن غلتکی درون قالب‌ها با استفاده از سربار، با توجه به شکل و ابعاد قالب بر روی میز ویبره انجام شده است. مدت زمان تراکم هر نمونه منطبق با زمان وی بی بدست آمده برای طرح اختلاط آن نمونه تعیین می‌گردد. مقدار سرباره برای استوانه استاندارد ۲۴×۲۰ آزمایش وی بی برابر ۲۲/۷ کیلوگرم و برای نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتیمتر، برابر ۹±۰/۲۵ کیلوگرم می‌باشد [۲۹]. تمامی نمونه‌ها درون حوضچه آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۸ عمل‌آوری شدند.

۲-۵- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری از مهمترین ویژگی‌های بتن سخت شده است که میزان کیفیت بتن را نشان می‌دهد. در واقع اهمیت مقاومت فشاری بتن آنقدر مهم است که از آن به عنوان معیاری برای ارزیابی اولیه تمام خواص بتن استفاده می‌کنند. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری بتن می‌توان از نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای استفاده کرد. در این تحقیق، برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، از نمونه‌های استوانه‌ای طبق استاندارد ASTM C39 استفاده شده است. نحوه انجام این آزمایش بدین گونه بود که پس از رسیدن نمونه به سن مورد نظر، نمونه‌های بتنی را در زیر جک فشاری قرار داده، سپس نیروی قائمی از سوی جک با نرخ بارگذاری ثابت به نمونه‌ها وارد شد تا نمونه در اثر بار فشاری وارد بر آن گسیخته شود.

۲-۶- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

این آزمایش به منظور تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم می‌باشد که به آزمایش برزیلی معروف است و بر اساس استاندارد ASTM C496 انجام می‌شود. برای انجام این تست، از نمونه‌های استوانه‌ای 10×20 استفاده شده است. نمونه استوانه‌ای به گونه‌ای در زیر جک فشاری قرار داده می‌شود که نیروی اعمالی از سوی جک در امتداد ارتفاع نمونه و بر سطح جانبی آن اعمال گردد. بار وارده از سوی جک به تدریج افزایش یافته تا آنجا که منجر به دو نیم شدن نمونه می‌شود. سپس بار نهایی گسیختگی توسط دستگاه قرائت و ثبت شد.

۲-۷- آزمایش مقاومت خمشی

مقاومت خمشی بتن مطابق با استانداردهای ASTM C78 (بارگذاری سه نقطه‌ای) تعیین می‌شود. در این آزمایش، مقاومت بتن در برابر نیروهای عمودی وارد بر آن سنجیده می‌شود. به طور ساده‌تر می‌توان گفت مقاومت بتن در برابر خم شدن اندازه‌گیری می‌شود و مهمترین پارامتر مورد استفاده در طراحی روسازی‌ها، مقاومت خمشی است.

۲-۸- آزمایش مقاومت سایشی

آزمایش مقاومت سایشی مطابق با استاندارد ASTM C944 انجام شده است. این آزمون یک شاخص از مقاومت نسبی ساییدگی ملات و بتن بر اساس آزمون نمونه‌های مغزه‌گیری شده ارائه می‌دهد [۳۰]. به منظور انجام آزمایش از نمونه‌های 15×30 سانتیمتری استوانه‌ای استفاده شده است. طبق استاندارد مذکور نمونه‌های استوانه‌ای به قطعات کوچکتر به ضخامت $6/4$ سانتی متر تقسیم شده تا آزمایش سایش بر روی آنها صورت گیرد. پس از انجام عملیات برش کاری، تعداد ۶۳ حلقه نمونه، مورد آزمایش سایش قرار گرفته و اختلاف جرمی آنها ثبت گردید. با توجه به استاندارد مورد اشاره، در انجام این آزمایش از سرباری با وزن حدودی ۱۰ کیلوگرم استفاده شده که باری معادل ۹۸ نیوتن را به نمونه اعمال می‌نماید. عملیات سایش هر نمونه، در سه نوبت انجام شده و هر نوبت به مدت ۲ دقیقه به طول می‌انجامد. در شکل ۳ و شکل ۴، نمونه‌های استوانه‌ای برش داده شده و نحوه انجام آزمایش سایش نشان داده شده است.



شکل ۳. نمونه‌های استوانه‌ای برش داده شده جهت انجام آزمایش سایش



شکل ۴. نحوه انجام آزمایش سایش

۲-۹- آزمایش مقاومت در برابر ضربه

مقاومت ضربه‌ای نمونه‌ها مطابق روش پیشنهاد شده در ACI544 تعیین و در شکل ۵ مشاهده می‌شود. به این منظور برای هر طرح اختلاط، یک نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد 30×15 ساخته شد و هر نمونه استوانه‌ای به وسیله تیغه های الماس به سه دیسک به طول $6/4$ سانتی‌متر تقسیم گردید. دیسک های بتنی بریده شده درون دستگاه قرار داده شدند و یک چکش به وزن $4/54$ کیلوگرم به طور مکرر از ارتفاع $45/7$ سانتی‌متر بر روی یک توپ فولادی رها می‌شود. تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک قابل رویت و انهدام نهایی دیسک بتنی می‌شود، ثبت گردید. در هر آزمایش تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک می‌شود به عنوان مقاومت اولین ترک و تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن انهدام نهایی نمونه می‌شود به عنوان مقاومت نهایی در نظر گرفته می‌شود.



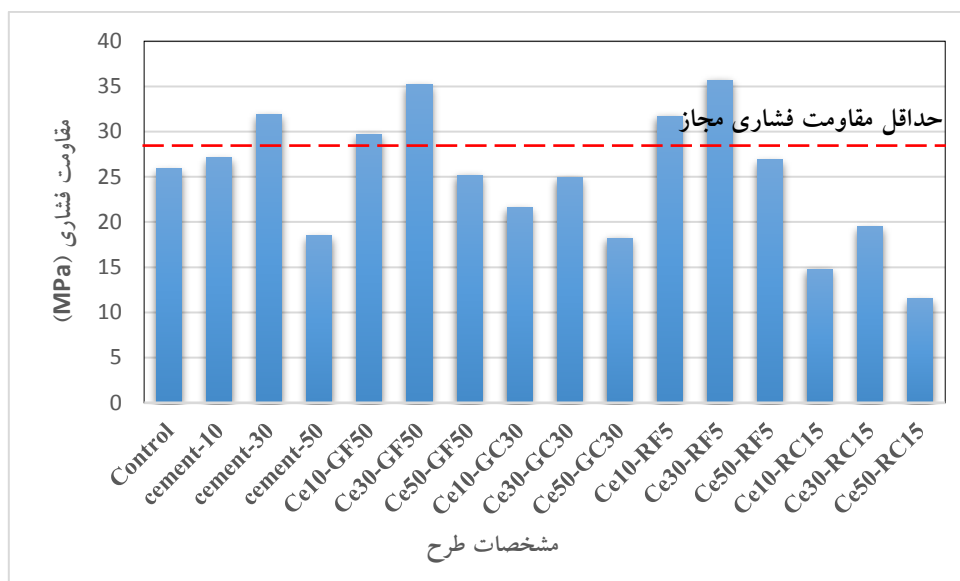
شکل ۵. دستگاه تست ضربه مطابق با استاندارد ACI544

۳- تحلیل نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه در شکل ۶ نشان داده شده است. از هر طرح اختلاط سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین این مقادیر در نظر گرفته شده است. خط ترسیم شده روی شکل بیانگر حداقل مقاومت مجاز (۲۷/۶ مگاپاسکال) مطابق استاندارد ACI می‌باشد [۳۱]. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با جایگزینی سیمان سربراه‌ای، مقاومت فشاری در درصد جایگزینی ۱۰ و ۳۰ افزایش یافته و در میزان درصد جایگزینی ۵۰، مقاومت فشاری کاهش یافته است. با توجه به واکنش سیمان پرتلند و سربراه با آب، تشکیل دو واکنش ساختاری هیدراتاسیون سیمان و واکنش پوزولانی سربراه منجر به تولید اکسید آلومینیوم شده و افزایش محتوای اکسید آلومینیوم باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود و کمبود اکسید کلسیم با اکسید منیزیم (MgO) جبران می‌گردد [۳۲]. تاثیر همزمان ۵۰ درصد سربراه به عنوان جایگزین بخش ریزدانه‌ای مخلوط بتن غلتکی و سیمان سربراه‌ای به عنوان جایگزین سیمان در درصدهای ۱۰ و ۳۰ باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده و نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد سربراه ریز و ۵۰ درصد سیمان سربراه‌ای، تغییر محسوسی نسبت به نمونه شاهد، به لحاظ مقاومت فشاری از خود نشان ندادند. فعالیت پوزولانی سربراه ریزدانه بسیار کم است، همچنین سختی و مقاومت بالای دانه‌های سربراه عامل مهمی است که باعث بهبود مقاومت بتن و ایجاد ریزساختار متراکم‌تر می‌شود. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سربراه ریز تا ۳۰ درصد جایگزینی افزایش می‌یابد. این پدیده به ویژگی‌های فیزیکی، تیز گوشه و زاویه‌دار بودن سنگدانه‌های سربراه نسبت داده می‌شود که باعث قفل شدن بهتر با خمیر سیمان می‌شود [۳۳]. تاثیر همزمان سربراه درشت‌دانه و سیمان سربراه‌ای باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است. افت مقاومت به دلیل بافت سطح شیشه‌ای و صاف و جذب آب کم سنگدانه‌های سربراه آهن است که باعث می‌شود آب اضافی در بتن باقی بماند [۳۴].

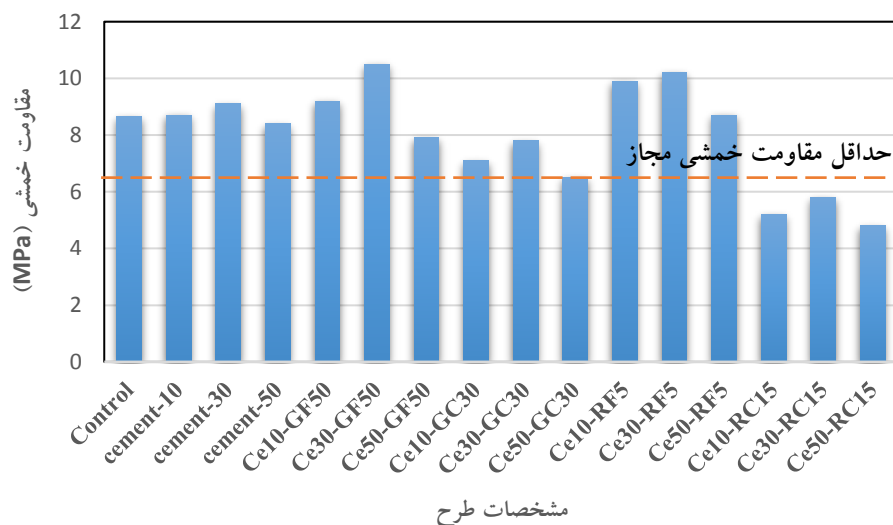
تاثیر همزمان آسفالت بازیافتی ریزدانه و سیمان سربراه‌ای باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است. افزودن آسفالت بازیافتی ریزدانه چسبندگی بین سنگدانه‌ها را بیشتر کرده و عدم حضور آسفالت بازیافتی درشت دانه، تاثیر منفی پیوندهای سست بین سنگدانه‌ها را کاهش می‌دهد و در حضور سیمان سربراه‌ای با درصدهای ذکر شده منجر به افزایش تراکم مخلوط نسبت به نمونه شاهد گشته و نتایج مطلوبی را از خود نشان می‌دهد [۳۵]. تاثیر همزمان آسفالت بازیافتی درشت‌دانه و سیمان سربراه‌ای باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است. این رفتار، با چسبندگی کمتر بین ملات سیمان و دانه‌های مصالح خرده آسفالت توجیه شده است. چسبندگی بین مصالح سنگی و ماتریس سیمان تحت تاثیر منفی حضور سنگدانه‌های درشت خرده آسفالتی در مخلوط‌های بتن غلتکی است و این می‌تواند کاهش مشاهده شده در مقاومت آنها را توجیه نماید [۳۶].



شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

۳-۲- مقاومت خمشی

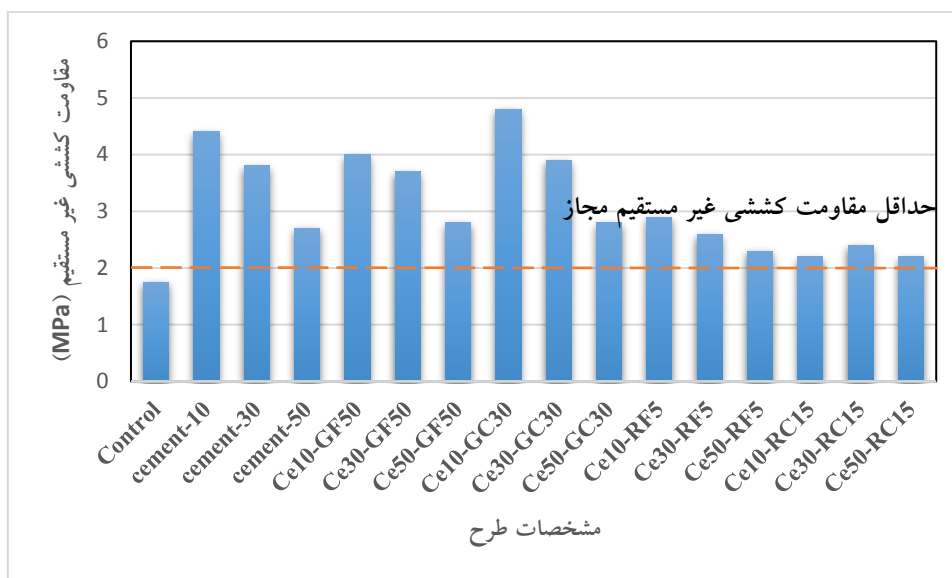
نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۸ روزه در شکل ۷ نشان داده شده است. از هر طرح اختلاط سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین این مقادیر در نظر گرفته شده است. خط ترسیم شده روی شکل بیانگر حداقل مقاومت خمشی مجاز (۶/۳ مگاپاسکال) مطابق اکثر دستورالعمل‌هاست [۳۷، ۳۸]. با توجه به نتایج، مشاهده می‌گردد که با افزودن سیمان سرباره‌ای به عنوان جایگزین سیمان با درصدهای ۱۰ و ۳۰، افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد حاصل گردیده و در ۵۰ درصد جایگزینی، کاهش مقاومت مشاهده گردیده است. واکنش بین سیمان سرباره‌ای و سیمان پرتلند منجر به واکنشی مشابه با اکسیداسیون در مخلوط شده که فرآورده آن آلومینیوم اکسید می‌باشد که پیوندی سبز رنگ است و منجر به سبز شدن رنگ سنگدانه‌ها گشته است، همچنین آلومینیوم اکسید باعث افزایش مقاومت خمشی می‌شود [۳۲]. در نمونه‌هایی که سرباره ریزدانه به مقدار ۵۰ درصد جایگزین ریزدانه و سیمان سرباره‌ای با درصدهای ۱۰ و ۳۰ جایگزین بخشی از سیمان شده‌اند، افزایش مقاومت خمشی و در نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد سرباره ریز و ۵۰ درصد سیمان سرباره‌ای، کاهش مقاومت خمشی مشاهده می‌گردد. دلیل بهبود خواص مقاومت خمشی، تعادلی است که بین آب آزاد جذب نشده توسط سرباره و آنچه برای تکمیل فرآیند هیدراتاسیون لازم است، برقرار شده است [۳۴]. بررسی تاثیر افزودن سرباره درشت‌دانه جایگزین مصالح درشت‌دانه بر روی مقاومت خمشی نمونه‌های بتن غلتکی نشان داد، این افزودنی‌ها منجر به کاهش مقاومت خمشی می‌گردند. مقدار این کاهش مقاومت، متناسب با افزایش درصد ماده بازیافتی برابر با ۱۸، ۱۰ و ۲۵ درصد می‌باشد. بررسی تاثیر افزودن آسفالت بازیافتی ریزدانه جایگزین سنگدانه ریز بر روی مقاومت خمشی نمونه‌های بتن غلتکی نشان داد که این افزودنی منجر به افزایش مقاومت خمشی بتن غلتکی می‌گردد. تاثیر مثبت استفاده از آسفالت بازیافتی ریزدانه در نتایج مقاومت فشاری، نمود بیشتری نسبت به نتایج حاصل از مقاومت خمشی داشته است، بطوریکه افزایش مقاومت خمشی متناسب با افزایش درصد ماده بازیافتی ریزدانه، ۱۵، ۱۸ و ۱ درصد بوده و افزایش مقاومت فشاری ۲۲، ۳۸ و ۴ درصد حاصل شده است. مصالح خرده آسفالتی ریزدانه، خصوصیات مقاومتی بهتری را نسبت به مخلوط حاوی مصالح خرده آسفالتی درشت‌دانه نشان می‌دهد. وجود مصالح خرده آسفالت بازیافتی ریزدانه، می‌تواند مقاومت چقرمگی و همچنین تراکم نمونه را افزایش دهد. دلیل این امر می‌تواند تمرکز تنش بسیار بالای مصالح بازیافتی در اطراف سنگدانه‌ها نسبت به نمونه مشابه با سنگدانه‌های بازیافتی ریزدانه باشد [۱۹]. بررسی تاثیر افزودن آسفالت بازیافتی درشت‌دانه جایگزین سنگدانه درشت نشان می‌دهد که استفاده از این افزودنی‌ها منجر به کاهش مقاومت خمشی می‌گردد. مقدار این کاهش مقاومت، متناسب با افزایش درصد ماده بازیافتی برابر با ۴۰، ۳۳ و ۴۵ درصد می‌باشد. در این نمونه‌ها، افزایش انعطاف‌پذیری حاصل از وجود قیر در مصالح خرده آسفالتی باعث ایجاد تمرکز تنش در نمونه شده و سبب از بین رفتن چسبندگی بین بتن و قیر می‌شود. [۳۹].



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

۳-۳- مقاومت کششی غیرمستقیم

در شکل ۸ نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه نشان داده شده است. خط ترسیم شده روی شکل بیانگر حداقل مقاومت کششی مجاز (۲ مگاپاسکال) مطابق استاندارد ACI است [۳۱]. خروجی‌های آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بیانگر افزایش قابل ملاحظه مقاومت کششی با جایگزینی سیمان سربره‌ای به عنوان بخشی از سیمان نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. هنگامی که سربره به تنهایی با آب واکنش می‌دهد، به ذرات کوچک تجزیه می‌شود و یک محلول قلیایی را تولید می‌کند که برای واکنش هیدراتاسیون سیمان مناسب است. پس از انجام یک واکنش پوزولانی، اکسید آلومینیوم تشکیل شده و باعث افزایش مقاومت می‌شود [۲۷]. با توجه به شکل مربوط به نتایج مقاومت کشش غیرمستقیم، مشاهده می‌گردد که سربره (ریزدانه و درشت‌دانه) رفتاری مشابه با سیمان سربره‌ای دارد. تاثیر همزمان سربره جایگزین سنگدانه و سیمان سربره‌ای جایگزین سیمان در نمونه‌های بتن غلتکی باعث افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد شده است. یکی از خواص مواد پوزولانی در بتن، تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته بیشتر و افزایش مقاومت دونیم شدگی در بتن می‌گردد. بیشتر بودن مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حاوی سربره فولاد نسبت به نمونه‌های شاهد عمدتاً مربوط به تفاوت سطح تماس مصالح سنگی و ماتریس سیمان بوده و این سطح برای بتن غلتکی دارای سربره، زیرتر است [۴۰]. افزودن آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزینی درشت‌دانه و ریزدانه منجر به افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شده است. با انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، می‌توان بر قابلیت بالای انرژی پذیری و تحمل بیشتر نمونه‌های حاوی آسفالت بازیافتی در حین متلاشی شدن و شکست نهایی آنها ملاحظه نمود. چرا که آنها همانند نمونه‌های شاهد بدون آسفالت بازیافتی، به سرعت و بطور ناگهانی به مرحله شکست و متلاشی شدن نمی‌رسند [۳].



شکل ۸. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم

۳-۴- مقاومت در برابر سایش

مقاومت سایشی یکی از پارامترهای مهم در روسازی بتن غلتکی است، زیرا سطح آن همیشه در معرض سایش ناشی از لاستیک‌های وسایل نقلیه خواهد بود. در این پژوهش، مقاومت سایشی مخلوط‌های مختلف با استفاده از تعیین افت وزنی مشخص شده است، به طوریکه هرچه درصد افت وزنی کمتر باشد، مقاومت سایشی بیشتر است. جدول ۸ نتایج آزمایش مقاومت سایشی نمونه‌های ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. با توجه به جدول مورد اشاره، مشاهده گردید که استفاده از درصد‌های مختلف سیمان سربراه‌ای (۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد) به عنوان جایگزین سیمان در نمونه‌های بتن غلتکی، تغییرات جرم ایجاد شده نسبت به جرم مشابه در نمونه شاهد، کاهش داشته است. به عبارتی می‌توان چنین گفت که با افزایش درصد سیمان سربراه‌ای در نمونه بتن غلتکی، مقاومت سایشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. سربراه در سنین پایین واکنش پوزولانی آهسته‌تری دارد و با افزایش سن نمونه باعث بهبود عملکرد پوزولانی می‌شود و از این رو در سنین بالاتر مقاومت سایشی افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت تا ۵۰ درصد است و در درصد‌های بالاتر باعث کاهش مقاومت شده و نقش فیلر را در مخلوط ایفا می‌کند [۴۱].

تاثیر همزمان سربراه به عنوان جایگزین سنگدانه (ریزدانه و درشت‌دانه) و سیمان سربراه‌ای به عنوان جایگزین سیمان مقاومت سایشی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج تغییرات جرم ایجاد شده توسط دستگاه سایش نسبت به جرم مشابه در نمونه شاهد، تقریباً کاهش داشته است، به عبارتی می‌توان چنین گفت که با افزایش مقدار سربراه در نمونه بتن غلتکی، مقاومت سایشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این بهبود عملکرد در مخلوط‌ها به دلیل ناحیه انتقال (ITZ) بالاتر، پیوند قوی بین خمیر سیمان و سربراه، و همچنین کیفیت بالای سربراه در برابر سایش می‌باشد. به دلیل چگالی بالای نمونه‌های حاوی سربراه، استفاده از سربراه بیشتر در مخلوط بتن غلتکی باعث افزایش مقاومت سایشی در آنها می‌گردد. دلیل این امر، بافت ناهموار سربراه فولاد، توانایی سربراه فولاد ریزدانه در افزایش واکنش پوزولانی و متراکم تر شدن سطح مشترک بین ماتریس سیمان و مصالح می‌باشد [۴۲]. در نمونه‌های حاوی آسفالت بازیافتی جایگزین سنگدانه (ریزدانه و درشت‌دانه) و سیمان سربراه‌ای جایگزین سیمان تغییرات جرم ایجاد شده نسبت به جرم مشابه در نمونه شاهد افزایش داشته است. به عبارتی می‌توان چنین گفت که با افزایش درصد آسفالت بازیافتی در نمونه بتن غلتکی، مقاومت سایشی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد که این کاهش مقاومت سایشی در نمونه‌های ساخته شده با افزودنی درشت دانه، به مراتب بیشتر است. کیفیت پایین سنگدانه‌های بازیافتی و همچنین وجود قیر بر روی سطح سنگدانه‌های آسفالتی که چسبندگی بین ملات سیمان و مصالح حاوی قیر را ضعیف می‌کند، دلیل کاهش مقاومت سایشی می‌باشد [۳۷].

جدول ۸. نتایج آزمایش سایش

شماره طرح	مشخصات طرح	جرم اولیه قبل از سایش (گرم)	جرم ثانویه بعد از سایش (گرم)	اختلاف جرم	درصد کاهش جرم نسبت به کاهش جرم نمونه شاهد تحت اثر سایش (%)
۰	شاهد	۲۸۶۹	۲۸۶۳	۸	۰
۱	Cement-10	۲۸۸۷	۲۸۸۰	۷	- ۱۲/۵
۲	Cement-30	۲۹۰۱	۲۸۹۵	۶	- ۲۵
۳	Cement-50	۲۸۹۰	۲۸۸۵	۵	- ۳۷/۵
۴	Ce10-GF50	۲۹۳۶	۲۹۳۱	۵	- ۳۷/۵
۵	Ce30-GF50	۲۹۳۱	۲۹۲۷	۴	- ۵۰
۶	Ce50-GF50	۲۹۴۰	۲۹۳۷	۳	- ۶۲/۵
۷	Ce10-GC30	۲۹۹۵	۲۹۸۶	۹	+ ۱۲/۵
۸	Ce30-GC30	۲۹۹۱	۲۹۸۴	۷	- ۱۲/۵
۹	Ce50-GC30	۳۰۰۰	۲۹۹۳	۷	- ۱۲/۵
۱۰	Ce10-RF5	۲۸۳۵	۲۸۲۱	۱۴	+ ۷۵
۱۱	Ce30-RF5	۲۸۴۲	۲۸۳۱	۱۳	+ ۶۲/۵
۱۲	Ce50-RF5	۲۸۴۷	۲۸۳۷	۱۰	+ ۲۵
۱۳	Ce10-RC15	۲۸۷۱	۲۸۵۴	۱۷	+ ۱۱۲/۵
۱۴	Ce30-RC15	۲۸۷۵	۲۸۶۰	۱۵	+ ۸۷/۵
۱۵	Ce50-RC15	۲۸۶۷	۲۸۵۵	۱۲	+ ۵۰

۳-۵- مقاومت در برابر ضربه

جدول ۹ نتایج آزمایش مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. سیمان سرباره‌ای در درصدهای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ به عنوان جایگزین سیمان در نمونه‌های بتن غلتکی استفاده شده که منجر به افزایش مقاومت در برابر ضربه شده است. مقدار ۳۰ درصد سیمان سرباره‌ای، نسبت به سایر درصدها، بیشترین افزایش مقاومت در برابر ضربه را از خود نشان داده که دلیل آن می‌تواند این باشد که افزایش سطح جایگزینی سیمان با سیمان سرباره‌ای باعث افزایش مقاومت ضربه‌ای می‌شود و همچنین سیمان سرباره‌ای شروع به واکنش با هیدروکسید کلسیم می‌کند و ژل CSH را تشکیل می‌دهد. به دلیل دانه‌بندی کوچکتر سرباره نسبت به سیمان، تمامی منافذ و شکاف‌ها پر شده این امر منجر به بهبود ساختار بتن می‌گردد [۱۳]. تاثیر همزمان سیمان سرباره‌ای جایگزین سیمان و سرباره ریزدانه جایگزین ۵۰ درصد سنگدانه، باعث افزایش مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های مذکور شده است. زاویه‌دار بودن و زبری سرباره باعث قفل شدن آن با سایر سنگدانه‌های

طبیعی شده و منجر به افزایش مقاومت ضربه‌ای می‌شود ولی در نمونه‌های حاوی سیمان سرباره و سرباره با ۳۰ درصد درشت‌دانه، پارامتر مقاومت ضربه‌ای در نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است که دلیل آن می‌تواند به سطح ویژه بالای سرباره نسبت داده شود. در واقع مقدار بیشتر سطح ویژه سرباره درشت‌دانه، احتمال رخ دادن پدیده شکست از ناحیه انتقال را افزایش می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت ترکیب سرباره درشت‌دانه در مخلوط بتن غلتکی منجر به کاهش مقاومت در برابر ضربه شده که عمدتاً به دلیل محتوای CaO آزاد شده بیشتر است که منجر به ایجاد ریز ترک‌های بیشتر در ناحیه انتقال می‌شود. [۴۳]. تاثیر همزمان سیمان سرباره‌ای و آسفالت بازیافتی ریزدانه منجر به افزایش قابل ملاحظه مقاومت در برابر ضربه در تمامی نمونه‌ها شده است. استفاده از آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین بخش ریزدانه مخلوط بتن غلتکی، منجر به تشکیل مخلوطی منسجم و متراکم گشته و از طرفی قابلیت جذب انرژی بالای مخلوط حاوی آسفالت بازیافتی، دلیل اصلی افزایش مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های حاوی سیمان سرباره‌ای و آسفالت بازیافتی ریز می‌باشد. در بررسی تاثیر همزمان آسفالت بازیافتی درشت دانه و سیمان سرباره‌ای، کاهش مقاومت در برابر ضربه مشاهده گردید. مصالح درشت‌دانه بازیافتی همواره تاثیرات منفی بر روی خصوصیات مقاومتی مخلوط بتن غلتکی می‌گذارد. آسفالت بازیافتی درشت‌دانه نسبت به آسفالت بازیافتی ریز، پیوندهای سست تری با دیگر اجزای مخلوط بتن غلتکی تشکیل می‌دهد [۱۹].

جدول ۹. نتایج آزمایش ضربه

شماره طرح	مشخصات طرح	تعداد ضربات منجر به ترک اول	تعداد ضربات منجر شکست	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد	اختلاف ضربات بین اولین ترک و شکست
۰	شاهد	۱۴۴	۱۴۹	۰	۵
۱	Cement-10	۱۵۰	۱۵۴	+ ۳/۲	۴
۲	Cement-30	۱۶۲	۱۶۸	+ ۱۲/۵	۶
۳	Cement-50	۱۵۷	۱۶۵	+ ۱۰/۱	۸
۴	Ce10-GF50	۱۶۵	۱۷۲	+ ۱۵	۷
۵	Ce30-GF50	۱۹۱	۲۰۳	+ ۳۶	۱۲
۶	Ce50-GF50	۱۷۶	۱۸۳	+ ۲۳	۷
۷	Ce10-GC30	۱۳۱	۱۳۹	- ۸	۸
۸	Ce30-GC30	۱۴۱	۱۴۶	- ۳	۵
۹	Ce50-GC50	۱۳۷	۱۴۴	- ۴	۷
۱۰	Ce10-RF5	۱۵۰	۱۵۹	+ ۷	۹
۱۱	Ce30-RF5	۱۵۹	۱۶۷	+ ۱۳	۸

۱۲	Ce50-RF5	۱۵۶	۱۶۴	+ ۱۰	۸
۱۳	Ce10-RC15	۱۱۹	۱۲۵	- ۱۶	۶
۱۴	Ce30-RC15	۱۳۵	۱۴۰	- ۷	۵
۱۵	Ce50-RC15	۱۲۳	۱۳۰	- ۱۳	۷

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش خصوصیات مکانیکی، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافتی و سرباره درشت دانه و ریزدانه و سیمان سرباره‌ای مورد بررسی قرار گرفته و منجر به نتایجی گردیده که در این بخش به آنها پرداخته شده است.

- افزودن سیمان سرباره‌ای به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، منجر به افزایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتن غلتکی در مقادیر ۱۰ و ۳۰ درصد می‌گردد و با افزایش مقدار جایگزینی سیمان سرباره‌ای به میزان ۵۰ درصد، مقاومت فشاری و خمشی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد سیمان سرباره‌ای (۱۰، ۳۰ و ۵۰) به عنوان جایگزین سیمان در نمونه بتن غلتکی، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
- تاثیر همزمان ۳۰ درصد سرباره درشت‌دانه و سیمان سرباره‌ای در مقادیر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی نسبت به نمونه شاهد شده است. با توجه به تاثیر همزمان سیمان سرباره‌ای و سرباره درشت‌دانه، مقاومت سایشی نمونه‌ها با افزایش مقدار سرباره تقریباً افزایش می‌یابد. استفاده از سرباره به عنوان جایگزین درشت‌دانه در مخلوط بتن غلتکی منجر به کاهش مقاومت در برابر ضربه نمونه‌ها شده است.
- تاثیر همزمان ۵۰ درصد سرباره ریزدانه و سیمان سرباره‌ای در مقادیر ۱۰ و ۳۰ درصد باعث افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی نسبت به نمونه شاهد و در مقدار ۵۰ درصد، باعث کاهش مقاومت شده است. استفاده از سرباره ریزدانه به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط بتن غلتکی منجر به افزایش مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه نمونه‌ها می‌گردد.
- تاثیر همزمان ۵ درصد آسفالت بازیافتی ریزدانه و سیمان سرباره‌ای در مقادیر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی نسبت به نمونه شاهد شده و با افزایش درصد آسفالت بازیافتی ریزدانه کاهش شدید مقاومت در برابر سایش و افزایش حدوداً ۱۰ درصدی مقاومت در برابر ضربه در نمونه‌های بتن غلتکی شده است.
- تاثیر همزمان ۱۵ درصد آسفالت بازیافتی درشت‌دانه و سیمان سرباره‌ای در مقادیر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی نسبت به نمونه شاهد شده و تاثیر همزمان سیمان سرباره‌ای و آسفالت بازیافتی درشت‌دانه، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه نمونه‌ها را کاهش داده است.
- به طور کلی، نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای سرباره در افزایش ویژگی‌های مقاومتی، به ویژه مقاومت در برابر ضربه و سایش مخلوط‌های بتن غلتکی است. علاوه بر این، جایگزینی این مواد به عنوان بخشی از سیمان به کاهش مصرف سیمان کمک می‌نماید. همچنین استفاده از سنگدانه‌های ریز در طرح اختلاط نتایج مطلوب تری را نسبت به استفاده از سنگدانه‌های درشت از لحاظ مقاومت در برابر ضربه و سایش از خود نشان می‌دهد. این درحالی است که با توجه به نتایج بدست آمده، به دلیل نبود الگوی مشخصی بین افزایش یا کاهش پارامترهای مختلف طی تغییرات درصد‌های مختلف آسفالت بازیافتی، اظهار نظر درمورد درصد بهینه آسفالت بازیافتی، کار مشکلی است.

- [1] R. Mariyappan, J.S. Palammal, S. Balu, Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications—a review, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16) (2023) 45587-45606.
- [2] J.E. Office, J. Chen, H. Dan, Y. Ding, Y. Gao, M. Guo, S. Guo, B. Han, B. Hong, Y. Hou, New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(6) (2021) 815-999.
- [3] D. Rambabu, S.K. Sharma, M.A. Akbar, A review on suitability of roller-compacted concrete for constructing high traffic resisting pavements, *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1) (2023) 20.
- [4] پاسداران انقلاب اسلامی، قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء آ. فرانسيسكورودريگس، ر. سيديجي، م. مهدي، م. سعيد، کاربرد بتن غلتکی، سپاه (ص)، ۱۳۹۳.
- [5] V. Khed, V. Gokulanadh, M. Latha, A Review on Recent Advancements in Roller Compacted Concrete, *International Journal of Inventive Engineering and Sciences (IJIES)*, 5.
- [6] P. Shafigh, M. Hashemi, B. Hyun Nam, I. Asadi, Laboratory comparison of roller-compacted concrete and ordinary vibrated concrete for pavement structures, *Gradevinar*, 72(02.) (2020) 127-137.
- [7] C. Khoury, K.B. Acheampong, K. Ofori-Awuah, Mix design of roller compacted concrete pavement using steel slag By-products, in: *Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2019, pp. 391-401.
- [8] T. Kuzu, Freeze-Thaw Durability of Roller-Compacted Concrete, in: *Proceedings of annual symposium of JCI*, 1990, pp. 697-702.
- [9] T. Sok, S.J. Hong, Y.K. Kim, S.W. Lee, Saw cutting (or not) of joint spacing in roller-compacted concrete pavement, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Transport*, Thomas Telford Ltd, 2020, pp. 195-206.
- [10] م. میری، ع.ا. وطنی اسکوئی، ا. عبیری، بررسی امکان استفاده از لوماشل به عنوان جایگزین مصالح سنگی در ساخت بتن غلتکی، مهندسی سازه و ساخت، ۵ (شماره ویژه ۴) (۲۰۱۹) ۱۷۶-۱۹۲.
- [11] E. Sheikh, S.R. Mousavi, I. Afshoon, Producing green Roller Compacted Concrete (RCC) using fine copper slag aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 368 (2022) 133005.
- [12] N. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, (2014).
- [13] A. Aghaeipour, M. Madhkhan, Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on mechanical properties of roller-compacted concrete pavement, *Journal of Testing and Evaluation*, 48(4) (2020) 2786-2802.
- [14] J. De Brito, N. Saikia, Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste, Springer Science & Business Media, 2012.
- [15] S.K. Rao, P. Sravana, T.C. Rao, Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4) (2016) 289-301.
- [16] S.K. Rao, P. Sravana, T.C. Rao, Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS, *Construction and Building Materials*, 114 (2016) 925-933.
- [17] T.R. Naik, Y.-M. Chun, R.N. Kraus, S.S. Singh, L.-L.C. Pennock, B.W. Ramme, Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 6(4) (2001) 154-165.
- [18] R.K. BAV, Performance evaluation of sustainable materials in roller compacted concrete pavements: A state of art review, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1) (2022) 78.
- [19] M. Selvam, S. Debbarma, S. Singh, X. Shi, Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements—A state-of-the-art review, *Construction and building materials*, 317 (2022) 125838.
- [20] M.A. Esfahani, Study of the effect of pozzolanic Portland cement-basic oxygen furnace slag on the mechanical properties of roller compacted concrete, *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2) (2023) 2078976.
- [21] M.H. Yaseen, S.F.S. Hashim, E.T. Dawood, M.A.M. Johari, Mechanical properties and microstructure of roller compacted concrete incorporating brick powder, glass powder, and steel slag, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 33(1) (2024) 20220307.
- [22] X. Shi, Z. Grasley, J. Hogancamp, L. Brescia-Norambuena, A. Mukhopadhyay, D. Zollinger, Microstructural, mechanical, and shrinkage characteristics of cement mortar containing fine reclaimed asphalt pavement, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(4) (2020) 04020050.
- [23] A. Mukhopadhyay, X. Shi, Microstructural characterization of portland cement concrete containing reclaimed asphalt pavement aggregates using conventional and advanced petrographic techniques, in: *Symposium on Advances in Cement Analysis and Concrete Petrography*, ASTM International, 2019, pp. 187-206.
- [24] X. Shi, D.G. Zollinger, A.K. Mukhopadhyay, Punchout study for continuously reinforced concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement using pavement ME models, *International Journal of Pavement Engineering*, 21(10) (2020) 1199-1212.

-
- [25] B. Ram Kumar, G. Ramakrishna, Sustainable use of red mud and reclaimed asphalt pavement wastes in roller compacted concrete, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 17(2) (2024) 291-305.
- [26] M. Hajiebrahimi, S.A. Hosseini, M.R. Fariman, Experimental Evaluation of Mechanical Characteristics of Roller-Compacted Concrete Containing Crumb Rubber, RAP and Slag, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (2024) 1-13.
- [27] S. Saluja, S. Goyal, B. Bhattacharjee, Strength properties of roller compacted concrete containing GGBS as partial replacement of cement, *Journal of Engineering Research*, 7(1) (2019).
- [28] S.D. Tayabji, T.W. Sherman, W.L. Arent, S. Kohn, R.W. Piggott, J.R. Berry, R.L. Larsen, S.A. Ragan, L. Cole, R.W. Lopez, Report on Roller-Compacted Concrete Pavements, (1995).
- [29] A. Standard, C1176/C1176M-13, Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table, West Conshohocken, PA: ASTM International, (2013).
- [30] S. Pavan, S.K. Rao, Effect of fly ash on strength characteristics of roller compacted concrete pavement, *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, 11(6) (2014) 4-8.
- [31] J. Berry, S. Tayabji, Report on roller-compacted concrete pavements, Farmington Hills, MI: ACI committee report, (2001).
- [32] A. Aghaeipour, M. Madhkhan, Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability, *Construction and Building Materials*, 141 (2017) 533-541.
- [33] N. Gupta, R. Siddique, Strength and micro-structural properties of self-compacting concrete incorporating copper slag, *Construction and Building Materials*, 224 (2019) 894-908.
- [34] R. Sharma, R.A. Khan, Durability assessment of self compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates, *Construction and Building Materials*, 155 (2017) 617-629.
- [35] S. Debbarma, G. Ransinchung RN, Using artificial neural networks to predict the 28-day compressive strength of roller-compacted concrete pavements containing RAP aggregates, *Road Materials and Pavement Design*, 23(1) (2022) 149-167.
- [36] M. Fakhri, E. Amoosoltani, The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement, *Construction and Building Materials*, 137 (2017) 470-484.
- [37] S. Debbarma, S. Singh, G.R. RN, Laboratory investigation on the fresh, mechanical, and durability properties of roller compacted concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates, *Transportation Research Record*, 2673(10) (2019) 652-662.
- [38] A. Lopez-Uceda, F. Agrela, M. Cabrera, J. Ayuso, M. López, Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates, *Road Materials and Pavement Design*, 19(1) (2018) 36-55.
- [39] S. Pranav, S. Aggarwal, E.-H. Yang, A. Kumar Sarkar, A. Pratap Singh, M. Lahoti, Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review, *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117609.
- [40] E. Ouellet, Formulation and study of the mechanical behaviour of the Roller Compacted Concrete, Master's theses, University of Laval, Canada, (1998) 123-172.
- [41] B. Li, G. Ke, M. Zhou, Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete, *Construction and Building Materials*, 25(10) (2011) 3849-3853.
- [42] A. Goli, H. Emadi, P. Sadeghi, Investigating the effect of using steel slag on abrasion resistance of roller-compacted concrete pavement, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(5) (2022) 297.
- [43] H. Rooholamini, R. Sedghi, B. Ghobadipour, M. Adresi, Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete, *Construction and building materials*, 211 (2019) 88-98.