



Semnan University



Research Article

Laboratory Evaluation of the Application of Recycled Asphalt and Fly Ash on Abrasion Resistance and Impact Resistance of Rolled Compacted Concrete Pavement

Farid Firuzi^{a*}, Saeed Ahmadi^b, Mohammad Fayyaz^c

^a MSc. Student, Faculty of Civil Engineering, Water and Energy, Imam Hossein (AS) University, Tehran, I. R. Iran.

^b Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Water and Energy, Imam Hossein (AS) University, Tehran, I. R. Iran.

^c Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Water and Energy, Imam Hossein (AS) University, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-04-06

Revised: 2024-06-16

Accepted: 2024-06-17

Keywords:

Roller compacted concrete,
Recycled asphalt,
flyash,
Abrasion resistance,
Impact resistance.

ABSTRACT

In recent years, due to the high costs of pavement construction and environmental considerations, various recycled materials have been used in the roller compacted concrete pavements. On the other hand, due to the increase in the price of bitumen in flexible pavements, the use of roller concrete in the construction of pavements seems to be more economical. In this research, the mechanical properties, abrasion resistance and impact resistance of rolled compacted concrete containing recycled asphalt and fly ash have been investigated. A total of 15 mixture design were studied with replacement amounts of 10%, 20% and 30% of fly ash as a substitute for cement and 5%, 10% and 15% of fine-grained recycled asphalt as a substitute for aggregate. In order to determine the optimal amount of fly ash, first, compressive and bending strength tests were performed on 7-day samples containing 10%, 20% and 30% of fly ash, and the optimal percentage was obtained. Therefore, in mixtures 4 to 6, the amount of fly ash to replace cement for all mixtures was considered the optimal value (10%). It should be noted that for more accuracy, the 28-day samples containing different amounts of fly ash were also examined. Results of this research showed that the use of fine-grained recycled materials at the rate of 5%, 10% and 15% along with 10% of fly ash led to an increase in compressive strength by 20%, 12% and 4%, bending strength by an average of 10% and tensile strength on the average is about 40% compared to control sample. However, all samples containing recycled asphalt have shown a significant decrease in abrasion resistance.

Corresponding author.

E-mail address: faridcivileng9424@gmail.com

How to cite this article: Firuzi, F., Fayyaz, M., & Ahmadi, S. (2024). Laboratory evaluation of the application of recycled asphalt and fly ash on abrasion resistance and impact resistance of rolled compacted concrete pavement. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(2), 1-22.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.33647.1669>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

ارزیابی آزمایشگاهی کاربرد تراشه آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی بر مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه روسازی بتن غلتکی

فرید فیروزی^{۱*}، سعید احمدی^۲، محمد فیاض^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

^۲استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

^۳استاد، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸	در سال‌های اخیر، به دلیل هزینه‌های زیاد ساخت روسازی و ملاحظات زیست‌محیطی، از مصالح بازیافتی مختلفی در رویه‌های بتن غلتکی استفاده شده است. از طرفی، با توجه به افزایش قیمت قیر در روسازی‌های انعطاف‌پذیر، استفاده از بتن غلتکی در ساخت روسازی اقتصادی‌تر به نظر می‌رسد. در این پژوهش، خصوصیات مکانیکی، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی مورد بررسی قرار گرفته است. در مجموع، تعداد ۱۵ طرح اختلاط با مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی خاکستر بادی جایگزین سیمان و ۵، ۱۰ و ۱۵ درصدی آسفالت بازیافتی ریزدانه به عنوان جایگزین سنگدانه مورد مطالعه قرار گرفت. جهت تعیین مقدار بهینه خاکستر بادی، ابتدا آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی روی نمونه‌های ۷ روزه حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بادی، انجام شد و درصد بهینه آن به دست آمد. بنابراین، در طرح‌های ۴ تا ۶، میزان خاکستر بادی جایگزین سیمان برای تمامی مخلوط‌ها مقدار بهینه (۱۰ درصد) لحاظ گردید. لازم به ذکر است که به منظور دقت بیشتر، نمونه‌های ۲۸ روزه حاوی مقادیر مختلف خاکستر بادی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مصالح بازیافتی ریزدانه به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به همراه ۱۰ درصد خاکستر بادی، منجر به افزایش مقاومت فشاری به میزان ۲۰، ۱۲ و ۴ درصد، مقاومت خمشی به طور میانگین حدود ۱۰ درصد و مقاومت کششی به طور میانگین حدود ۴۰ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است. این در حالی است که تمامی نمونه‌های حاوی آسفالت بازیافتی کاهش قابل ملاحظه‌ای از لحاظ مقاومت سایشی از خود نشان داده‌اند.
واژگان کلیدی:	
بتن غلتکی، آسفالت بازیافتی، خاکستر بادی، مقاومت سایشی، مقاومت در برابر ضربه.	

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: faridcivileng9424@gmail.com

استناد به این مقاله: فیروزی، فرید، فیاض، محمد & احمدی، سعید. (۱۴۰۳). ارزیابی آزمایشگاهی کاربرد تراشه آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی بر مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه روسازی بتن غلتکی. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۱۰(۲)، ۱-۲۲.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.33647.1669>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

با توجه به اینکه در صنعت ساخت بزرگراه‌ها، هر ساله چندین میلیون تن خرده آسفالت تولید می‌شود و معمولاً میزان بسیار زیادی از این مواد غیرقابل استفاده، حجم زیادی از زمین را اشغال می‌کند، استفاده مناسب از این مواد گریزناپذیر است. هر چند استفاده از خرده آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی امری معمول شده، اما هنوز استفاده از آنها در روسازی بتن غلتکی آنطور که باید، مورد توجه قرار نگرفته است. استفاده از مصالح پسماند برای تولید آسفالت، بتن و مصالح ساختمانی، در طی چند دهه اخیر رونق پیدا کرده است (عموزاده عمرانی و همکاران، ۲۰۲۳).

در ۵۰ سال اخیر که از مصالح سنتی مکمل به طور گسترده در آمریکا استفاده شده، حدود ۱۵ میلیون تن خاکستر بادی در ساخت و ساز به کار رفته است (چوبدار و همکاران، ۲۰۲۱). در دهه‌های اخیر، تحقیقات انجام گرفته حاکی از آن است که مقدار بیشتر خاکستر بادی (%۴۰ الی %۶۰) را می‌توان در ساخت برخی المان‌های سازه‌ای و نیز به منظور ساخت بتن با ویژگی‌های مکانیکی و دوام خوب مورد استفاده قرار داد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که به واسطه جایگزینی خاکستر بادی به جای درصدی از سیمان، می‌توان به کارایی، مقاومت فشاری و بهبود کیفیت سطح تمام شده بتن، همچنین کاهش حرارت هیدراتاسیون دست یافت (سیف‌اللهی و محمدی، ۲۰۲۰). کائو و همکاران (۲۰۰۰) در پژوهشی، مقاومت خمشی بتن غلتکی با افزودنی خاکستر بادی با حجم زیاد را مورد بررسی قرار دادند. مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل سیمان پرتلند، خاکستر بادی، شن و ماسه رودخانه‌ای به عنوان

سنگدانه ریز با چگالی اسمی ۲۶۵۰، دولومیت خرد شده به عنوان درشت‌دانه و محلول کاهنده آب و آب آشامیدنی نیز استفاده شد. نتایج نشان داد که در سنین کم بتن غلتکی، با افزودن خاکستر بادی، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. ولی با افزایش سن بتن، مقاومت خمشی بهبود یافت (کائو و همکاران، ۲۰۰۰). آدامو و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی، به بررسی و توسعه بتن غلتکی سازگار با محیط‌زیست پرداختند و از خاکستر بادی با حجم زیاد، خرده لاستیک و نانوسیلیس به عنوان افزودنی استفاده نمودند. بررسی‌ها نشان داد که افزودن نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت‌های سایشی، خمشی و فشاری شده، ولی همین مشخصات با افزودن خرده لاستیک کاهش می‌یابد. آتیش (۲۰۰۵) با جایگزینی ۵۰ تا ۷۰ درصد خاکستر بادی به جای سیمان، نتیجه گرفت که با جایگزینی ۷۰ درصد خاکستر بادی، مقاومت سایشی افزایش می‌یابد. اما با افزودن ۵۰ درصد خاکستر بادی تغییری در این پارامتر ایجاد نمی‌شود. از طرفی، کریشنارائو و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر جایگزینی سیمان با خاکستر بادی به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد در بتن غلتکی را در چند پژوهش مختلف مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مقاومت‌های سایشی، کششی و فشاری در ابتدا کاهش و سپس با افزایش سن نمونه‌ها، بیشتر می‌شود. تأثیر خاکستر بادی بر خصوصیات ناحیه انتقال بتن غلتکی نیز در سال ۲۰۱۳ توسط مردانی آقابگلو و همکاران (۲۰۱۳) بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان از بهبود خصوصیت انتقال مخلوط حاوی خاکستر بادی داشت. در سال ۲۰۲۲، آشتیات و همکاران طی پژوهشی، از آسفالت بازیافتی و سنگدانه‌های بتن بازیافتی و همین‌طور از سیلیکا فوم به

آسفالت بازیافتی بوده و با افزودن گل قرمز، مشخصات مکانیکی نمونه‌ها به طور قابل توجهی بهبود یافت.

۲. جنبه‌های نوآوری تحقیق

امروزه، حجم زیادی از تراشه آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی سبب نگرانی مسئولان محیط‌زیست گردیده است. بنابراین، این تحقیق از اهمیت زیادی برخوردار است. حال آنکه در این تحقیق در مورد مقادیر مختلف خاکستر بادی و همچنین درصد‌های مختلف آسفالت بازیافتی در ابعاد درشت‌دانه و ریزدانه بررسی آزمایشگاهی گسترده‌ای انجام شده است. با توجه به اختلاف بهای نسبتاً زیاد بین اجرای دو نوع روسازی و قیمت نازل آسفالت بازیافتی (از مرحله تراش تا اجرا برای هر متر مکعب ۶۰۰۰۰۰ ریال)، استفاده از مواد بازیافتی را به عنوان جایگزین مواد ارزشمند موجود در بتن غلتکی متعارف، توجیه‌پذیر می‌کند. از طرفی، وجود خلأ پژوهشی در زمینه بررسی مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه بتن غلتکی، از جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر می‌باشد. در این پژوهش، جهت ارزیابی و مقایسه تأثیر درصد‌های مختلف خاکستر بادی و آسفالت بازیافتی بر بتن غلتکی، از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی و ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد آسفالت بازیافتی استفاده شده است (سلووم و همکاران، ۲۰۲۲).

۳. برنامه آزمایشگاهی

۳-۱. مشخصات مصالح و طرح اختلاط

مصالح سنگی به کار رفته در روسازی بتن غلتکی شامل مصالح سنگی درشت‌دانه (شن) و مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) از معادن تهران می‌باشد. شن به عنوان درشت‌دانه

عنوان افزودنی‌های روسازی بتن غلتکی استفاده نمودند. پس از انجام آزمایش‌ها مشاهده شد که استفاده از سیلیکا فوم منجر به بهبود مشخصات مکانیکی روسازی می‌شود. از طرفی، استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی منجر به کاهش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته می‌شود. رضایی و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی، چهار طرح اختلاط با درصد‌های مختلف آسفالت بازیافتی جایگزین بخش درشت‌دانه و ریزدانه را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که استفاده از آسفالت بازیافتی منجر به کاهش مقاومت فشاری، کششی و خمشی از ۲۰ تا ۸۰ درصد می‌گردد. شارما و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی از ۵۰٪ آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه (ریزدانه و درشت‌دانه) و ۱۵ درصد سیلیکافوم به عنوان جایگزین سیمان استفاده کردند و شاهد کاهش ۱۴ تا ۲۴ درصدی مقاومت فشاری و خمشی بودند. آقایان و همکاران (۲۰۲۱) طی تحقیقات روی اثر افزودن آسفالت بازیافتی به روسازی بتن غلتکی نتیجه گرفتند که جایگزینی آسفالت بازیافتی بجای سنگدانه طبیعی در مخلوط بتن غلتکی منجر به کاهش مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود. از طرفی، نشان دادند که جایگزینی ۶۰ درصدی آسفالت بازیافتی بجای مصالح طبیعی، از بابت حصول مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۱/۶ مگاپاسکال مشکلی ایجاد نمی‌نماید. رام کومار و راماکریشنا در سال ۲۰۲۴ طی پژوهشی، اثر استفاده از آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه و گل قرمز به عنوان جایگزین بخشی از سیمان را مورد بررسی قرار دادند. بالا رفتن رطوبت بهینه مخلوط تازه و روند نزولی مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدن و مقاومت خمشی از نتایج استفاده از

بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه و درشت‌دانه استفاده شده است. به این ترتیب، بعد از عملیات تراش آسفالت توسط ماشین‌آلات مخصوص، مصالح به دست آمده در محلی دپو شده و توسط الک نمره ۴ به دو قسمت ریزدانه و درشت‌دانه تقسیم شده است (جدول ۲ و شکل ۲). همچنین، در این پژوهش، از سیمان تیپ ۲ تهران استفاده شده که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۳ آورده شده است. خاکستر بادی مورد استفاده در این پژوهش، از کارخانه‌ای واقع در اصفهان تهیه شده است که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۴ ذکر شده است.

نقش بسیار مهمی در تحمل بارهای وارده بر بتن دارد. لذا، به‌کارگیری دانه‌های شن با مقاومت بیشتر، نظیر دانه‌های گرانیتی، در افزایش مقاومت بتن تأثیر به‌سزایی دارد. همچنین، ماسه به عنوان ریزدانه جهت پر نمودن فضای خالی بین درشت‌دانه‌ها به‌کار گرفته می‌شود. به منظور حصول سطحی صاف در روسازی بتن غلتکی، بنا به پیشنهاد ACI بهتر است ابعاد سنگدانه‌ها به ۱۹ میلی‌متر محدود گردد. آزمایش دانه‌بندی جهت تعیین نحوه توزیع اندازه دانه‌های سنگی به‌کار گرفته می‌شود که از طریق جدایش به کمک الک بر اساس استاندارد ASTM C33 صورت گرفته است (جدول ۱ و شکل ۱). همانطور که در مطالب فوق نیز اشاره شد، در این تحقیق از آسفالت

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

سنگدانه	۱۸ تا ۳۲ میلی‌متر	۵ تا ۱۸ میلی‌متر	صفر تا ۵ میلی‌متر
رطوبت (%)	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۵۷
وزن مخصوص (Kg/m ³)	۱۶۳۴	۱۷۵۹	۲۰۶۳
شکستگی (%)	۸۷	۷۷	۳۰
ظرفیت جذب آب (%)	۲/۱۰	۲/۱۷	۳/۳۹
چگالی اشباع با سطح خشک (gr/cm ³)	۲/۵۶	۲/۷۵۲	۲/۵۶۷

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های بازیافتی ریز و درشت

نوع مصالح	چگالی (Kg/m ³)	ظرفیت جذب آب (%)
آسفالت بازیافتی درشت	۲۲۶۳	۱/۴
آسفالت بازیافتی ریز	۲۱۱۴	۱/۸

آسفالت بازیافتی تغییر کرده است. طرح‌های شماره ۷ تا ۱۵، به صورت ترکیبات مختلفی از خاکستر بادی با مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد و آسفالت بازیافتی ترکیبی (ریزدانه و درشت‌دانه) با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد می‌باشند. نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها ۰/۴ و مقاومت مشخصه بتن غلتکی ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

۲-۳. زمان وی بی

به منظور تعیین مدت زمان وی بی برای نمونه‌ها، از استاندارد ASTM C1170 استفاده شد که به طور میانگین، زمان وی بی به‌دست آمده در حدود ۲۸ تا ۳۰ ثانیه ثبت گردید. 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 (تیاجی و همکاران، ۱۹۹۵). سنجش کارایی بتن با آزمایش وی بی بسیار مشابه آزمایش اسلامپ می‌باشد، با این تفاوت که میزان پخش بتن تازه را در هنگام لرزش دستگاه اندازه‌گیری می‌کند. دستگاه، با ایجاد لرزش سینوسی، مخلوط بتن ریخته شده در داخل استوانه را به ارتعاش در می‌آورد و باعث پخش شدن آن می‌گردد.

۳-۳. نمونه‌ها

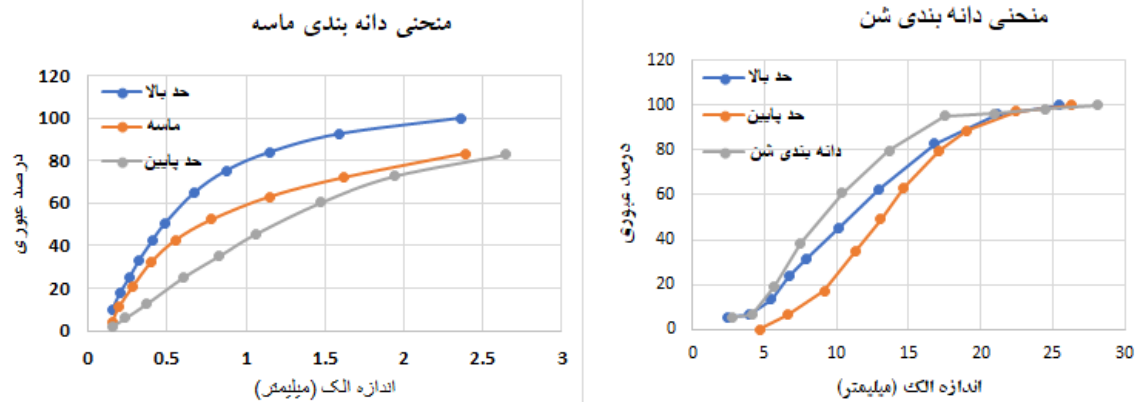
در این تحقیق، از قالب‌های ۱۰×۲۰ سانتی‌متر استوانه‌ای جهت تعیین مقاومت فشاری، ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر تیر منشوری به منظور ارزیابی مقاومت خمشی و ۱۵×۳۰ سانتی‌متر استوانه‌ای جهت بررسی مقاومت در برابر ضربه و سایش استفاده شده است.

به منظور دستیابی به ترکیب‌های متفاوت با خواص مختلف و جهت بررسی تأثیر افزودن خاکستر بادی و مصالح بازیافتی، سه درصد ۵، ۱۰ و ۱۵، مقادیر آسفالت بازیافتی ریزدانه به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه و سه درصد ۱۰، ۲۰ و ۳۰، مقادیر خاکستر بادی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان انتخاب گردید.

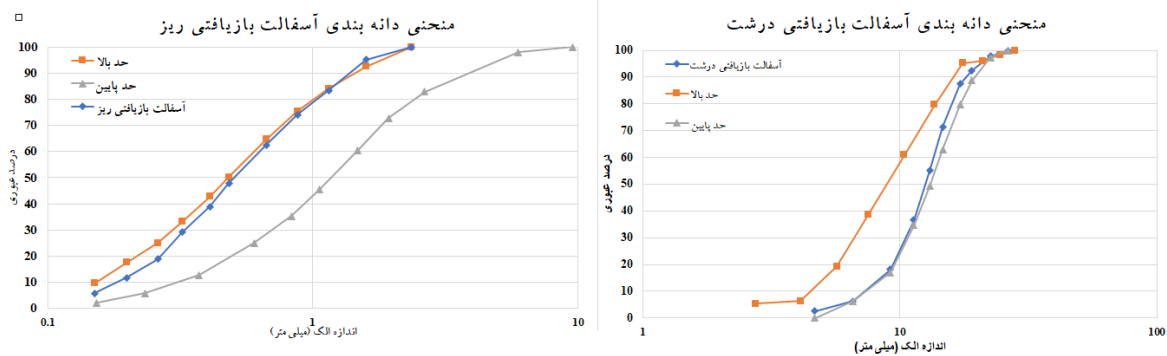
با توجه به بررسی افزودنی‌ها به صورت مجزا و همچنین تأثیر هردو افزودنی به صورت هم‌زمان، مجموعاً ۱۵ طرح اختلاط بر مبنای زمان وی بی و بر اساس ASTM C1170 مورد بررسی قرار گرفت. ذکر این نکته ضروری است که طرح اختلاط نمونه‌ها با احتساب رطوبت بهینه نمونه‌ها صورت گرفته است و تعیین طرح اختلاط بهینه از اهداف این تحقیق نبوده است. به منظور مخلوط نمودن مصالح، ابتدا شن و ماسه را با یکدیگر مخلوط نموده و سپس ۲۰٪ از آب موجود برای به اشباع رساندن سطح سنگدانه‌ها اضافه می‌شود. سپس سیمان و خاکستر بادی را در میکسر ریخته و در انتها پس از مخلوط شدن مصالح، باقیمانده آب به مصالح اضافه گردیده است.

در جدول ۵ انواع طرح اختلاط‌های مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. حروف FA، RF و R در این جدول به ترتیب بیانگر خاکستر بادی، آسفالت بازیافتی ریزدانه و آسفالت بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه به صورت ترکیبی است. طرح‌های شماره ۴ تا ۶ بر اساس نتایج آزمایش ۷ روزه مخلوط‌های ۱ تا ۳ به‌دست آمده است. به این صورت که از بین درصدهای مختلف خاکستر بادی جایگزین سیمان، مقداری که بیشترین مقاومت فشاری و خمشی را در مدت ۷ روز از خود نشان داده است به عنوان درصد ثابت در طرح‌های ۴ تا ۶ ملاک عمل قرار گرفته و صرفاً مقادیر درصدهای

ارزیابی آزمایشگاهی کاربرد تراشه آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی بر مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه روسازی بتن غلتکی



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه های ریزدانه و درشت دانه



شکل ۲. منحنی دانه بندی آسفالت بازیافتی ریزدانه و درشت دانه

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی سیمان تیپ ۲ تهران

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	ترکیبات شیمیایی
۲۱/۸۴	۴/۷۲	۳/۷۷	۱/۱۵	۶۱/۱۴	۰/۴۴	۲/۲۳	۰/۶۵	مقدار (%)

جدول ۴. ترکیبات شیمیایی خاکستر بادی

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	ترکیبات شیمیایی
۸۸/۱۵	۴/۲۴	۱/۸۲	۱/۶	۰/۰۸	مقدار (%)
MgO	k ₂ O	SO ₃	TiO ₂	L.O.I	ترکیبات شیمیایی
۰/۱۸	۰/۵۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۳/۲۳	مقدار (%)

جدول ۵. طرح اختلاط

شماره نمونه	نام طرح	سیمان	آب	ریزدانه	درشت‌دانه	خاکستر بادی	آسفالت بازیافتی ریزدانه	آسفالت بازیافتی درشت‌دانه
۰	شاهد	۳۵۰	۱۴۰	۹۷۰	۹۸۰	۰	۰	۰
۱	FA10	۳۱۵	۱۴۰	۹۷۰	۹۸۰	۳۵	۰	۰
۲	FA20	۲۸۰	۱۴۰	۹۷۰	۹۸۰	۷۰	۰	۰
۳	FA30	۲۴۵	۱۴۰	۹۷۰	۹۸۰	۱۰۵	۰	۰
۴	FA10RF5	۳۱۵	۱۴۰	۹۲۱/۵	۹۸۰	۳۵	۴۸/۵	۰
۵	FA10RF10	۳۱۵	۱۴۰	۸۷۳	۹۸۰	۳۵	۹۸	۰
۶	FA10RF15	۳۱۵	۱۴۰	۸۲۴/۵	۹۸۰	۳۵	۱۴۵/۵	۰
۷	FA10 R5	۳۱۵	۱۴۰	۹۲۱/۵	۹۳۱	۳۵	۴۸/۵	۴۹
۸	FA10 R10	۳۱۵	۱۴۰	۸۷۳	۸۸۲	۳۵	۹۷	۹۸
۹	FA10 R15	۳۱۵	۱۴۰	۸۲۴/۵	۸۳۳	۳۵	۱۴۵/۵	۱۴۷
۱۰	FA20 R5	۲۸۰	۱۴۰	۹۲۱/۵	۹۳۱	۷۰	۴۸/۵	۴۹
۱۱	FA20 R10	۲۸۰	۱۴۰	۸۷۳	۸۸۲	۷۰	۹۷	۹۸
۱۲	FA20 R15	۲۸۰	۱۴۰	۸۲۴/۵	۸۳۳	۷۰	۱۴۵/۵	۱۴۷
۱۳	FA30 R5	۲۴۵	۱۴۰	۹۲۱/۵	۹۳۱	۱۰۵	۴۸/۵	۴۹
۱۴	FA30 R10	۲۴۵	۱۴۰	۸۷۳	۸۸۲	۱۰۵	۹۷	۹۸
۱۵	FA30 R15	۲۴۵	۱۴۰	۸۲۴/۵	۸۳۳	۱۰۵	۱۴۵/۵	۱۴۷

۳-۴. ساخت نمونه، تراکم و عمل‌آوری

قبل از ساخت نمونه‌های بتن غلتکی، قالب‌ها به طور مناسب تمیز شده و سطح آنها به منظور جلوگیری از چسبیدن بتن به قالب به روغن آغشته گردیده است. سپس قالب‌ها برای هر یک از طرح‌های اختلاط، پس از ۲۴ ساعت باز شده و نمونه‌ها درون حوضچه آب به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. دمای آب حوضچه‌های عمل‌آوری، توسط دماسنج دیجیتالی متصل به المنت داخل حوضچه تنظیم شده و از کاهش بیش از حد دمای آب جلوگیری به عمل آمده است. مطابق با استاندارد ASTM C1170 مدت زمان تراکم هر نمونه طبق زمان وی بی به‌دست آمده برای هر نمونه تعیین می‌گردد. به‌طوری که این مقدار برای استوانه استاندارد ۲۰×۲۴ آزمایش وی بی

برابر ۲۲/۷ کیلوگرم و برای نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متر، مقدار سربار برابر 9 ± 0.25 کیلوگرم می‌باشد (استاندارد، ۲۰۱۳). عملیات تراکم مخلوط بتن غلتکی درون قالب‌ها با استفاده از سربارهای اشاره شده، با توجه به شکل و ابعاد قالب روی میز ویبره انجام شده است. مدت زمان تراکم هر نمونه منطبق با زمان وی بی به‌دست آمده برای طرح اختلاط آن نمونه تعیین می‌گردد.

۳-۵. آزمایش مقاومت فشاری

این آزمایش یکی از متداول‌ترین آزمایش‌هایی است که به‌منظور ارزیابی مقاومت بتن در برابر تنش‌های ناشی از فشار (به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی بتن) انجام می‌شود. به‌طور کلی،

ارزیابی آزمایشگاهی کاربرد تراشه آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی بر مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه روسازی بتن غلتکی

استوانه‌های شکل توصیه شده است (گلدشتاین و شیرر، ۱۹۴۱). در این تحقیق، همانطور که قبلاً اشاره شد، از انواع مختلف نمونه‌های استوانه‌ای طبق استاندارد ASTM C39 برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری استفاده شده است.

دو نوع نمونه آزمایش فشاری به کار برده می‌شود که عبارتند از مکعب و استوانه. در انگلیس و آلمان و بسیاری از کشورهای اروپایی نمونه‌های مکعبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در استانداردهای آمریکا، فرانسه و استرالیا نمونه‌های



شکل ۳. سربار نمونه‌های منشوری



شکل ۴. سربار نمونه‌های استوانه‌ای

این آزمایش که به آزمایش برزیلی نیز معروف می‌باشد جهت تعیین مقاومت کششی دو نیم شدن بتن بر اساس استاندارد ASTM C496 به کار برده می‌شود. بدین منظور، از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده است. نمونه استوانه‌ای پس از قرار گرفتن در گیره نگهدارنده، 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 اعمالی از سوی جک به تدریج افزایش یافته تا آنجا که منجر به دو نیم شدن نمونه گردد. سپس بار

۳-۶. آزمایش مقاومت خمشی

مهم‌ترین پارامتر مورد استفاده در ارزیابی مقاومت روسازی‌ها، مقاومت خمشی می‌باشد. مقاومت خمشی بتن مطابق با استاندارد ASTM C78 (بارگذاری سه‌نقطه‌ای) تعیین می‌شود. نرخ بارگذاری بایستی ۰/۸۶ تا ۱/۱۲ مگاپاسکال بر دقیقه باشد که در این پژوهش مقدار ۰/۹۵ مگاپاسکال بر دقیقه اعمال گردید.

۳-۷. مقاومت کششی غیرمستقیم

۱۵×۳۰ سانتی متری استوانه‌ای استفاده شده است. طبق استاندارد مذکور، نمونه‌های استوانه‌ای به قطعات کوچکتر به ضخامت ۶/۴ سانتی متر تقسیم شده تا آزمایش سایش 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 ASTM C944 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 شکل‌های ۵ تا ۷، نحوه برش نمونه‌های استوانه‌ای جهت انجام آزمایش ضربه و سایش قابل مشاهده است.

نهایی گسیختگی توسط دستگاه قرائت و ثبت شده است. در پایان آزمایش، مقاومت کششی غیرمستقیم توسط رابطه (۱) محاسبه شده است.

$$f_t' = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

۳-۸. آزمایش مقاومت سایشی

آزمایش مقاومت سایشی بر اساس ASTM C944 انجام گرفته است. این استاندارد یک شاخص از مقاومت نسبی سایدگی ملات و بتن را بر اساس آزمون نمونه‌های مغزه-گیری شده ارائه می‌دهد (پاوان و راثو، ۲۰۱۴). به منظور انجام آزمایش، همانطور که قبلاً نیز اشاره شده است از نمونه‌های



شکل ۵. برش نمونه‌های استوانه‌ای به ضخامت ۶/۴ سانتی متر

ارزیابی آزمایشگاهی کاربرد تراشه آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی بر مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه روسازی بتن غلتکی



شکل ۶. نمونه‌های برش داده شده به منظور تست مقاومت در برابر سایش و ضربه

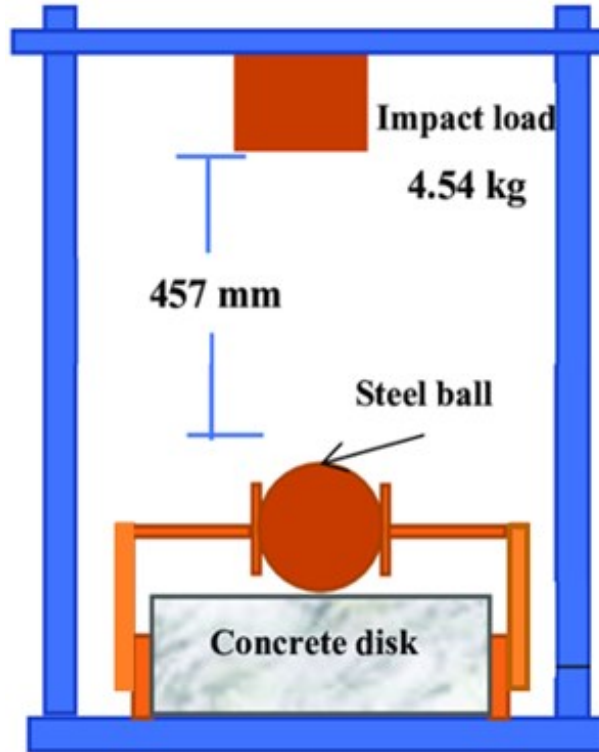


شکل ۷. دستگاه تست سایش (ASTMC944)

۳-۹. آزمایش ضربه

آزمایش ضربه بر اساس استاندارد ACI 544 انجام گرفته است. به منظور آماده سازی نمونه‌ها، همانند آزمایش سایش، باید نمونه‌های استوانه‌ای به حلقه‌هایی با ضخامت $\frac{6}{4}$ سانتی‌متر برش داده شده و مورد آزمایش قرار گیرند. در این

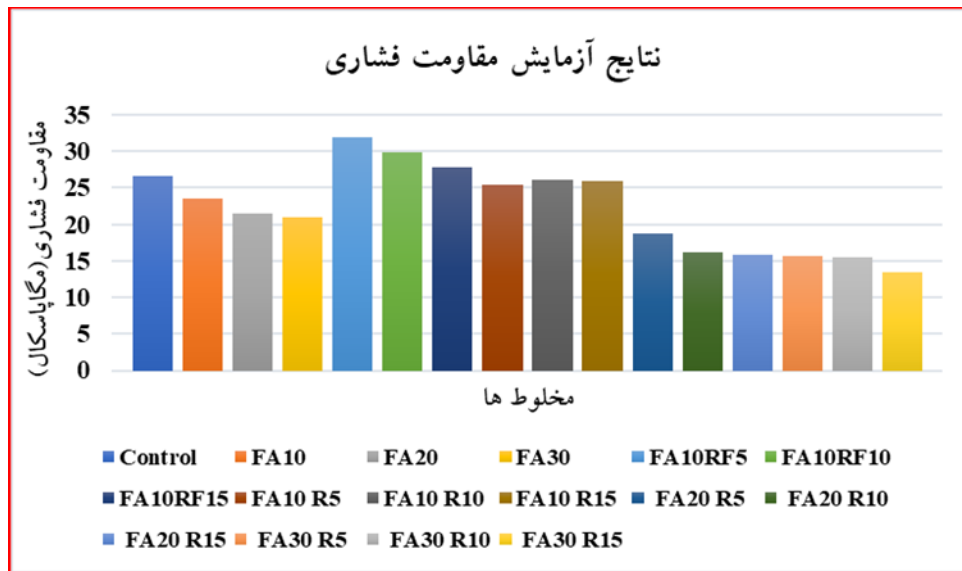
آزمایش، تعداد ۶۳ حلقه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و تعداد ضربات منجر به اولین ترک و تعداد ضربات منجر به شکست نمونه ثبت گردید. در شکل و شکل، تصاویری از دستگاه تست ضربه نمایش داده شده است.



شکل ۸. شماتیک دستگاه تست ضربه مطابق ACI544



شکل ۹. دستگاه تست ضربه مطابق با استاندارد ACI544



شکل ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

۴. نتایج و بحث

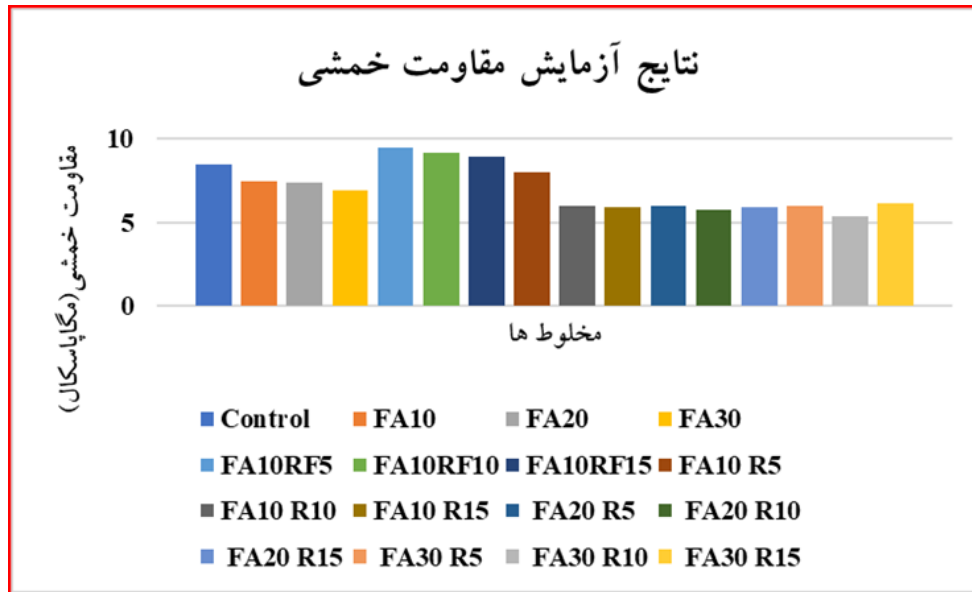
۴-۱. مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های ۲۸ روزه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. از هر طرح اختلاط، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین این مقادیر در نظر گرفته شده است. با افزایش مقدار خاکستر بادی جایگزین سیمان در نمونه‌های بتن غلتکی، از ۱۰ تا ۳۰ درصد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است که مقدار این کاهش با افزایش درصد خاکستر بادی از ۱۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب ۱۱/۴، ۱۹/۲ و ۲۱/۴ درصد می‌باشد. با توجه به دیرگیر بودن افزودنی‌های پوزولانی، از جمله خاکستر بادی، و کاهش روند هیدراتاسیون مخلوط با پایین آوردن حرارت هیدراتاسیون، منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در کوتاه‌مدت می‌گردد (مردانی آقابگلو و همکاران، ۲۰۱۳). با ثابت نگه داشتن میزان خاکستر بادی به میزان ۱۰ درصد و تغییرات ۵، ۱۰ و ۱۵ درصدی آسفالت بازیافتی جایگزین بخش ریزدانه، مقاومت فشاری هر سه مخلوط، نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد و این افزایش مقاومت به ترتیب ۲۰، ۱۲ و ۴ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که

جایگزینی فقط در بخش ریزدانه انجام گرفته است. افزودن آسفالت بازیافتی ریزدانه، چسبندگی بین سنگدانه‌ها را بیشتر کرده و عدم حضور آسفالت بازیافتی درشت‌دانه، تأثیر منفی پیوندهای سست بین سنگدانه‌ها را کاهش می‌دهد و در حضور خاکستر بادی به میزان ۱۰ درصد، منجر به افزایش تراکم مخلوط نسبت به نمونه شاهد گشته و نتایج مطلوبی را از خود نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، با ثابت نگه داشتن درصد خاکستر بادی به میزان ۱۰ درصد و اعمال تغییرات در مقادیر آسفالت بازیافتی در هر سه درصد ۵، ۱۰ و ۱۵ از آسفالت بازیافتی، کاهش بسیار کم مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد مشاهده شده که این میزان کاهش به ترتیب برابر ۴/۷، ۲/۲ و ۳ درصد می‌باشد. با ادامه همین روند، با افزایش مقدار خاکستر بادی به ۲۰ درصد و تغییرات در درصد‌های آسفالت بازیافتی، کاهش ۲۹، ۳۹ و ۴۰ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد برای درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ از آسفالت بازیافتی حاصل گردید. در نهایت، همانگونه که قابل پیش‌بینی نیز بود، برای نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد خاکستر بادی و میزان متغیری از آسفالت بازیافتی، کاهش مقاومت نسبتاً زیادی به دست آمد و مقدار کاهش در نمونه حاوی ۳۰ درصد خاکستر بادی و ۱۵ درصد

کیفیت نامطلوب مصالح آسفالت بازیافتی، کاهش قابل توجه مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ترکیبات مختلف خاکستر بادی و آسفالت بازیافتی ملاحظه گردید.

آسفالت بازیافتی به میزان ۵۰ درصد نسبت به نمونه شاهد گزارش گردید. همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید، به دلیل کاهش روند هیدراتاسیون با افزودن خاکستر بادی و همچنین



شکل ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

مصالح خرده آسفالتی ریزدانه، خصوصیات مقاومتی بهتری را نسبت به مخلوط حاوی مصالح خرده آسفالتی درشت‌دانه و مخلوط حاوی مصالح خرده آسفالتی ترکیبی نشان می‌دهد. این موضوع برخلاف تصور عمومی است. وجود مصالح بازیافتی ریزدانه، می‌تواند مقاومت چقرمگی و همچنین تراکم نمونه را افزایش دهد. در بررسی ترکیبات مختلف خاکستر بادی و آسفالت بازیافتی، مشخص شد که با افزودن ۱۰ درصدی خاکستر بادی جایگزین سیمان و ثابت نگه داشتن این مقدار و تغییر دادن درصد آسفالت بازیافتی جایگزین بخش درشت‌دانه و ریزدانه مخلوط بتن غلتکی به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد حاصل گردید، که میزان این کاهش به ترتیب برای درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵، به ترتیب برابر ۴، ۲۹ و ۳۰ درصد می‌باشد. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد که میزان کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد با افزودن ۱۰

۲-۴. مقاومت خمشی

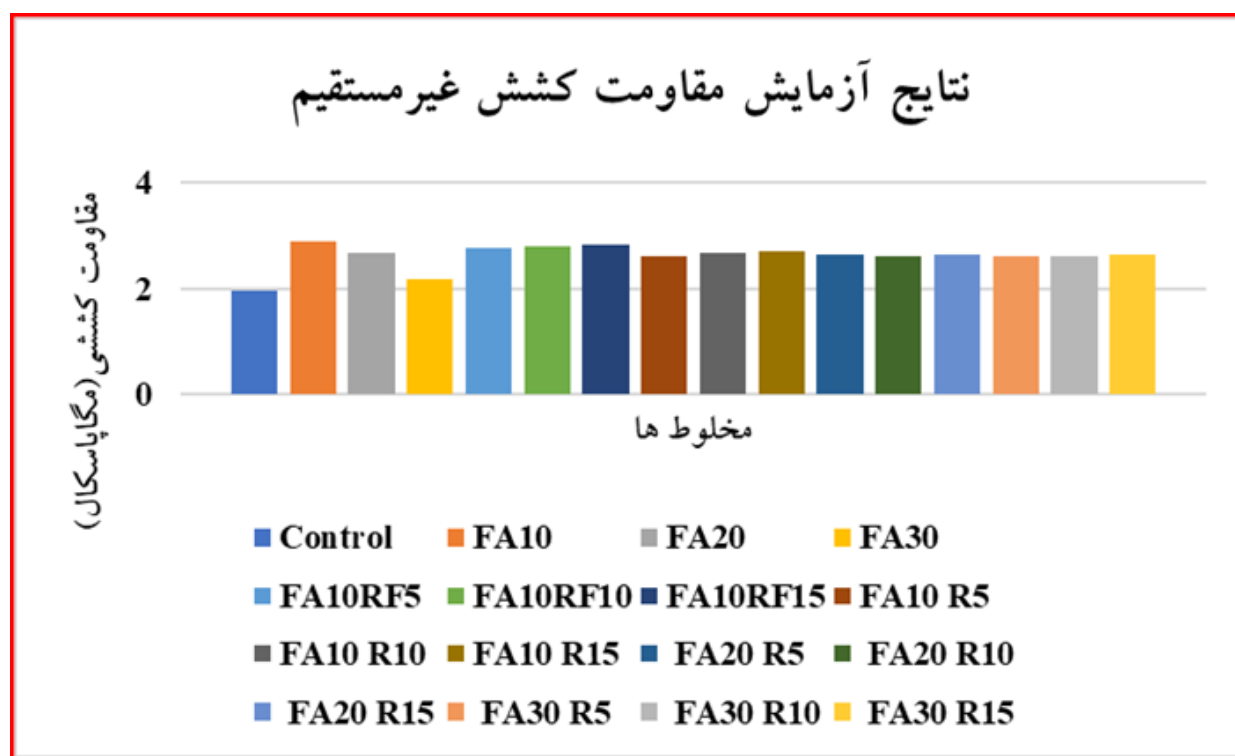
نتایج آزمایش مقاومت خمشی روی نمونه‌های ۲۸ روزه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزودن خاکستر بادی به عنوان جایگزین سیمان، مقداری کاهش در مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد حاصل گردید و این کاهش مقاومت با افزایش درصد خاکستر بادی بیشتر می‌گردد. دلیل این امر می‌تواند کندی سرعت واکنش‌های پوزولانی باشد. از طرفی، سهم بزرگی از این واکنش‌ها بعد از ۲۸ روز آغاز می‌گردد. همچنین، سن ۲۸ روز زمان مناسبی برای تخمین کاهش خلل و فرج بتن، ناشی از واکنش پوزولانی نیست (مردانی آقابگلو و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به شکل ۱۱، مشاهده می‌گردد که با درصد ثابتی از خاکستر بادی (۱۰٪) و مقادیر مختلف آسفالت بازیافتی ریزدانه (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد)، افزایش تقریباً ۱۰ درصدی مقاومت خمشی برای هر سه نمونه حاصل گردیده است.

غیرمستقیم روی نمونه‌های استوانه 10×20 ، بیانگر افزایش قابل ملاحظه مقاومت کششی با جایگزینی خاکستر بادی به عنوان بخشی از سیمان نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزایش درصد جایگزینی از ۱۰ درصد تا ۳۰ درصد، به ترتیب ۴۷، ۳۶ و ۱۰ درصد افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد حاصل گردید. یکی از خواص مواد پوزولانی در بتن، تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته بیشتر بوده که منجر به افزایش مقاومت دو نیم‌شدگی در بتن می‌گردد که نتایج مشابه در پژوهش وحیدی و مرادی (۲۰۱۶) مشاهده شده است. همچنین، مشاهده می‌گردد که نمونه‌های ساخته شده حاوی خاکستر بادی و آسفالت بازیافتی نسبت به نمونه شاهد، مقاومت کششی بیشتری از خود نشان می‌دهند که این افزایش مقاومت کششی برای تمامی ترکیبات مورد استفاده در این پژوهش تقریباً مقداری یکسان می‌باشد.

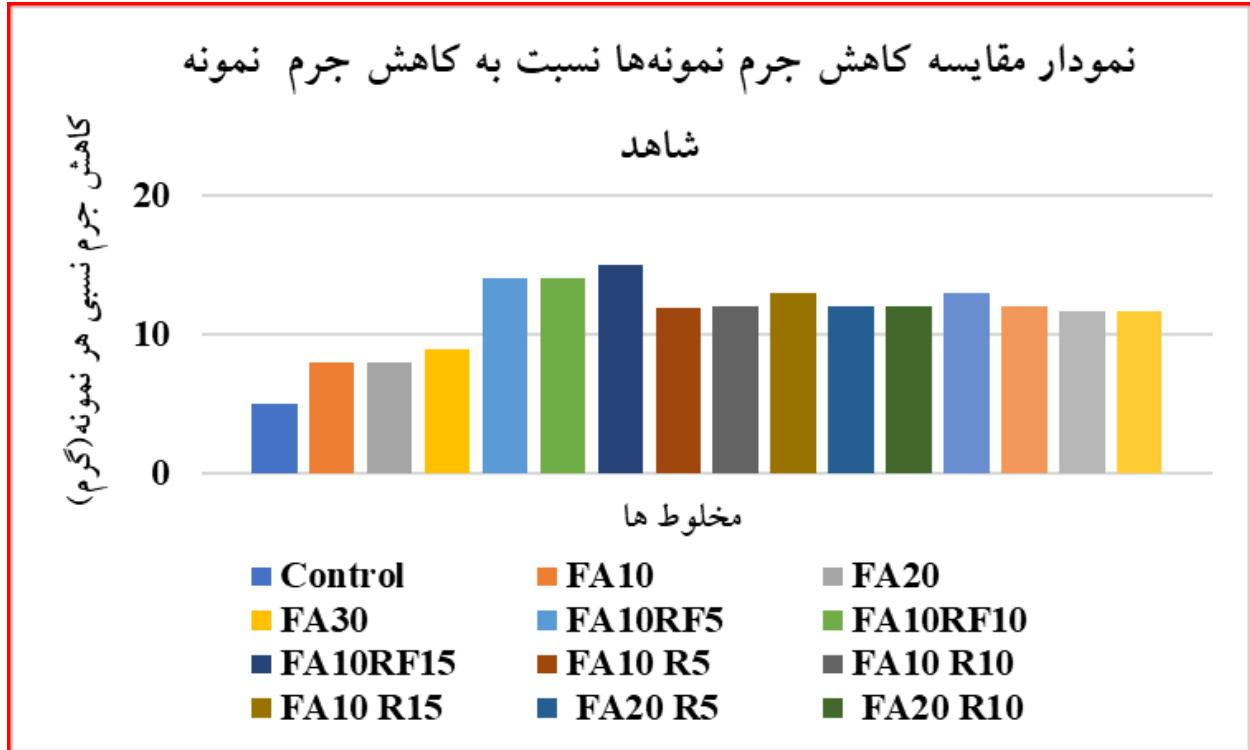
درصد خاکستر بادی و ۵ درصد آسفالت بازیافتی بسیار ناچیز است. با ادامه روند فوق و بررسی مخلوط‌هایی با ۲۰ درصد خاکستر بادی و درصدهای مختلف آسفالت بازیافتی کاهش مقاومت خمشی به میزان تقریبی ۳۰ درصد برای هر سه نمونه به دست آمده است. همچنین، با افزودن ۳۰ درصد خاکستر بادی و درصدهای مختلف آسفالت بازیافتی نیز کاهش مقاومت خمشی هر سه نمونه در حدود ۳۴ درصد به دست آمد. چسبندگی بین مصالح سنگی و ماتریس سیمان، تحت تأثیر منفی حضور سنگدانه‌های مصالح آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی در مخلوط‌های بتن غلتکی، کاهش مقاومت آنها را توجیه نموده است.

۳-۴. مقاومت کششی غیرمستقیم

برخلاف نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی، با توجه به خروجی‌های آزمایش مقاومت کششی



شکل ۱۲. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم



شکل ۱۳. نتایج مقاومت در برابر سایش

۴-۴. مقاومت در برابر سایش

نتایج آزمایش مقاومت در برابر سایش روی نمونه‌های ۲۸ روزه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. ملاحظه گردید که استفاده از درصد‌های مختلف خاکستر بادی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) به عنوان جایگزین سیمان در نمونه‌های بتن غلتکی، کاهش جرم ایجاد شده توسط دستگاه سایش نسبت به کاهش جرم مشابه در نمونه شاهد، افزایش قابل توجهی داشته است. به عبارت دیگر، می‌توان بیان نمود که با افزایش درصد خاکستر بادی در نمونه بتن غلتکی، مقاومت سایشی نمونه‌ها کاهش یافته و درصد این کاهش برای نمونه‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی به ترتیب برابر ۶۰، ۶۰ و ۸۰ درصد می‌باشد. به دلیل حضور کمتر سیمان در این مخلوط‌ها، حفرات موئینه بیشتری به وجود آمده که عدم تکمیل واکنش پوزولانی (شکل‌گیری کم ژل C-S-H) می‌تواند دلیل آن باشد (لام و همکاران، ۲۰۱۸). با ثابت نگه داشتن مقدار خاکستر بادی (۱۰٪) و افزودن آسفالت بازیافتی ریزدانه به عنوان

جایگزین سنگدانه مخلوط بتن غلتکی با درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵، مقاومت سایشی نمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که مقدار کاهش مقاومت سایشی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد به طور میانگین در هر شش نمونه حدوداً ۲۱۶ درصد بوده است. شایان ذکر است که انجام عملیات سایش با تولید گرمای بسیار زیادی روی سطح بتن (ناحیه‌ای که در تماس با کاتر چرخان می‌باشد) همراه است. بنابراین، در هنگام انجام آزمایش سایش روی نمونه‌های بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافتی، بعد از اتمام هر دوره سایش (هر دوره شامل ۲ دقیقه سایش و هر تست سایش شامل سه دوره می‌باشد) و جدا کردن کاتر چرخان از سطح نمونه، پدیده‌ای همچون ذوب شدن سطح با توجه به شکل ۱۴ مشاهده گردید که با ترک خوردگی سطحی و پاشش ذرات بتن به اطراف همراه است. از طرفی، بعد از شروع دوره بعدی، لایه سرد شده سطح نمونه به راحتی توسط کاتر چرخان متلاشی می‌گردد. پدیده مذکور منجر به کاهش چشمگیر مقاومت

هم‌زمان) و سیمان منجر به کاهش قابل توجه مقاومت سایشی نمونه‌های بتن غلتکی می‌گردد. کیفیت نامناسب سنگدانه‌های بازیافتی و همچنین وجود قیر روی سطح سنگدانه‌های آسفالتی و همچنین تأثیرات منفی خاکستر بادی جایگزین بخشی از سیمان، منجر به افت پیوستگی بین سنگدانه‌ها شده و مقاومت سایشی نمونه‌های مذکور را در حدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ درصد کاهش می‌دهد.

سایشی نمونه‌های حاوی آسفالت بازیافتی نسبت به نمونه شاهد می‌گردد. به طور کلی، می‌توان کیفیت نامناسب سنگدانه‌های بازیافتی و همچنین وجود قیر روی سطح سنگدانه‌های آسفالتی را دلیل چنین پدیده‌ای دانست. بررسی طرح‌های حاوی ترکیبات مختلف از آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی (طرح‌های شماره ۷ تا ۱۵) حاکی از آن است که استفاده از آسفالت بازیافتی و خاکستر بادی به عنوان جایگزین به ترتیب سنگدانه (درشت و ریز به صورت



شکل ۱۴. نواحی ذوب شده از سطح نمونه طی عملیات سایش

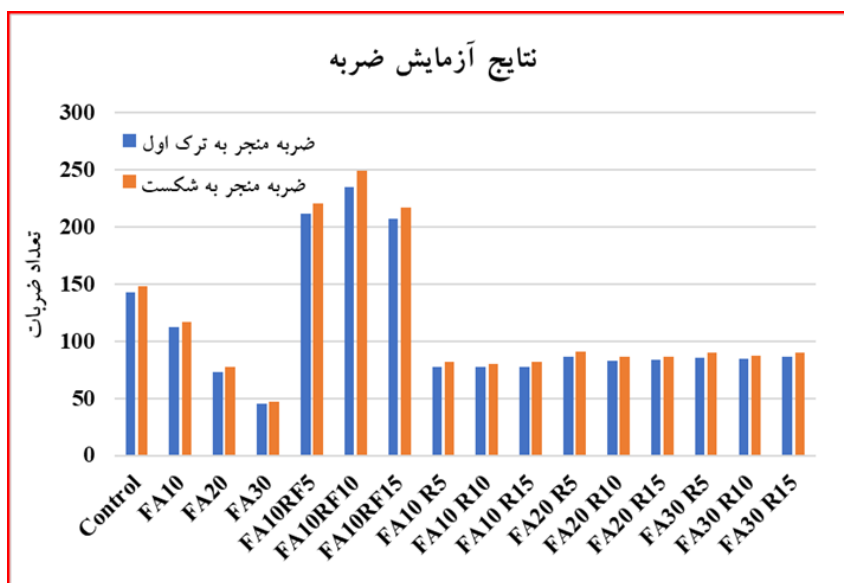
برای مخلوط‌های با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ریزدانه بازیافتی، به ترتیب افزایش ۵۱، ۶۷ و ۴۴ درصدی مقاومت در برابر ضربه به دست آمد. استفاده از آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین بخش ریزدانه مخلوط بتن غلتکی منجر به تشکیل مخلوطی منسجم و متراکم گشته و از طرفی قابلیت جذب انرژی زیاد مخلوط حاوی آسفالت بازیافتی، دلیل اصلی افزایش مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های حاوی خاکستر بادی و آسفالت بازیافتی می‌باشد. مشاهده می‌گردد که افزودن هم‌زمان ترکیبات خاکستر بادی و آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سیمان و سنگدانه (ریزدانه و درشت‌دانه به صورت هم‌زمان)، منجر به کاهش مقاومت نمونه‌ها در برابر ضربه می‌گردد و الگوی خاصی بین نتایج مخلوط‌های مختلف ملاحظه

۴-۵. مقاومت در برابر ضربه

نتایج آزمایش مقاومت در برابر ضربه روی نمونه‌های ۲۸ روزه در شکل ۱۵ نشان داده شده است. استفاده از خاکستر بادی به عنوان جایگزین بخش سیمانی مخلوط بتن غلتکی به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد منجر به کاهش به ترتیب ۲۱، ۴۸ و ۶۸ درصدی مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های بتن غلتکی می‌گردد که دلیل آن را می‌توان کم بودن مقادیر پارامتر (روداوسکا و همکاران، ۲۰۲۳). استفاده از ریزدانه به عنوان جایگزین سنگدانه مخلوط بتن غلتکی به همراه ۱۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان، منجر به افزایش قابل ملاحظه مقاومت در برابر ضربه تمامی نمونه‌ها گشته که به تفکیک

(گائو و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، دلایل کاهش مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های مذکور را می‌توان با دلایل فوق توجیه نمود. به طور میانگین، در نمونه‌های ۷ تا ۱۵، کاهش ۴۰ درصدی مقاومت در برابر ضربه مشاهده شده است.

نمی‌گردد. در تحلیل نتایج به دست آمده می‌توان بیان نمود که استفاده از آسفالت بازیافتی منجر به افزایش تخلخل مخلوط می‌گردد (حسن و همکاران، ۲۰۰۰) و از سویی دیگر مطالعات نشان داده که مخلوط‌های بتنی حاوی خاکستر بادی، مدول الاستیسیته کمتری نسبت به نمونه‌های معمولی دارند



شکل ۱۵. نتایج آزمایش ضربه



شکل ۱۶. الف) نمونه بعد از شکست تحت بار ضربه‌ای و ب) ظهور اولین ترک روی نمونه تحت بار ضربه‌ای

۴-۶. تعیین درصدهای مجاز

جدول ۶. نتایج تحلیل رگرسیون خطی تک متغیره

شماره طرح	حالت استفاده	R	R ²	AR	F	t	B	β
طرح های ۱ تا ۳	FA	۰/۵۸۵	۰/۳۴۲	۰/۵۴۰	۷/۲۹۱	- ۲/۷	-۰/۳۵۲	-۰/۵۸۵
طرح های ۴ تا ۶	FA10 + RF	۰/۵۴۶	۰/۲۹۸	۰/۲۴۸	۵/۹۳۸	۱۵/۳	۰/۷۱۰	۰/۵۴۶
طرح های ۷ تا ۱۵	FA + R	۰/۵۶۳	۰/۳۱۷	۰/۲۶۸	۶/۴۹	-۲/۵۴۸	-۰/۵۳۸	-۰/۵۶۳

جدول ۷. معادلات رگرسیون خطی (تک متغیره) و محدوده مجاز استفاده از مواد بازیافتی

شماره طرح	معادله رگرسیون خطی تک متغیره	مقدار مجاز افزودنی بر اساس مقاومت فشاری حداقل بتن غلتکی بر اساس ACI 325
طرح های ۱ تا ۳	$f'c = 28.795 - 0.352 FA$	$FA \leq \%4$
طرح های ۴ تا ۶	$f'c = 20.862 + 0.710 RF$	$RF \leq \%10$
طرح های ۷ تا ۱۵	$f'c = 25.223 - 0.538 R$	$R \leq \%5$

پیش بینی مدل توانسته اند برای طرح های ۱ تا ۳، ۴ تا ۶ و ۷ تا ۱۵ به ترتیب ۵۴، ۲۴ و ۲۶ درصد از واریانس ملاک را پیش بینی کنند و به عبارتی ۵۴ درصد از سهم واریانس متغیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه ناشی از متغیر پیش بینی درصد خاکستر بادی است. برای سایر دسته ها نیز می توان چنین تفسیری انجام داد. با توجه به نتایج آزمون تحلیل واریانس، سطح معنی داری تمامی دسته ها از مقدار ۰/۰۵ کمتر بوده و لذا مدل به دست آمده معنی دار بوده است. همچنین، ضریب F بیانگر این است که متغیرهای پیش-بینی توانسته اند به طور معنی داری تغییرات متغیر ملاک را پیش بینی کنند. از مهمترین ضرایب جدول رگرسیون می توان به ضریب B اشاره نمود که شاخصه تشکیل معادله رگرسیونی می باشد.

۵. نتیجه گیری

- افزودن خاکستر بادی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان به میزان ۱۰ درصد، بیشترین مقاومت را نسبت به سایر نمونه ها از خود نشان داد. به طوری که منجر به

تحلیل رگرسیون، یک فرایند آماری برای برآورد روابط بین متغیرها می باشد. این روش شامل تکنیک های زیادی برای مدل سازی و تحلیل متغیرهای خاص و منحصر به فرد، با تمرکز بر رابطه بین متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل است. تحلیل رگرسیون مرحله بعد از همبستگی است. این نوع تحلیل هنگامی استفاده می شود که بخواهیم مقادیر یک متغیر را از روی مقادیر متغیر(یا متغیرهای) دیگر پیش بینی نماییم.

پس از حصول نتایج آزمایش ها، معادلات رگرسیونی به منظور تعیین درصد مجاز افزودنی ها بر مبنای مقاومت فشاری طرح تشکیل شد. معادلات رگرسیون به صورت خطی بوده و با استفاده از نرم افزار SPSS انجام پذیرفته است. نتایج مربوطه در جداول ۶ و ۷ آمده است. با توجه به جداول فوق، ضریب همبستگی چندگانه (R) و ضریب تعیین (R²) برای تمامی طرح ها بر اساس نوع استفاده افزودنی در آنها به دست آمده است. مقدار ضریب تعیین تعدیل شده (AR) نیز برای سه دسته مختلف مشخص شده است و بدین معناست که متغیرهای

درصد منجر به افزایش مقاومت در برابر ضربه نمونه‌ها به میزان تقریبی ۵۰ تا ۶۰ درصد می‌گردد که بیشترین افزایش مقاومت در برابر ضربه مربوط به نمونه حاوی ۱۰ درصد خاکستر بادی و ۱۰ درصد آسفالت بازیافتی ریزدانه می‌باشد.

- استفاده از ترکیبات مختلف خاکستر بادی و آسفالت بازیافتی به صورت ترکیبی (ریزدانه و درشت‌دانه) در بتن غلتکی منجر به کاهش شدید مقاومت سایشی در حدود ۱۴۰ تا ۱۷۰ درصد و همچنین به طور میانگین، ۴۰ درصد کاهش مقاومت در برابر ضربه می‌گردد.

- در میان تمامی نمونه‌ها با استفاده از ترکیب-های مختلفی از آسفالت بازیافتی (جایگزین هم‌زمان درشت‌دانه و ریزدانه) و خاکستر بادی، استفاده از ۱۰ درصد خاکستر بادی نتایج مطلوب‌تری حاصل نمود. این در حالی است که با توجه به نتایج به دست آمده، به دلیل نبود الگوی مشخصی بین افزایش یا کاهش پارامترهای مختلف طی تغییرات درصدهای مختلف آسفالت بازیافتی، اظهار نظر در مورد درصد بهینه آسفالت بازیافتی، کار مشکلی است.

کاهش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری و خمشی نسبت به نمونه شاهد و افزایش مقاومت کششی به میزان ۴۷ درصد می‌گردد.

- افزودن ۱۰ درصد خاکستر بادی به همراه آسفالت بازیافتی جایگزین بخش ریزدانه با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب منجر به افزایش ۲۰، ۱۲ و ۴ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی می‌گردد. از طرفی، استفاده از ترکیب مذکور منجر به افزایش ۱۰ درصدی مقاومت خمشی و ۴۰ درصدی مقاومت کششی می‌گردد.

- با افزایش درصد آسفالت بازیافتی ریزدانه در مخلوط‌های حاوی ۱۰ درصد خاکستر بادی، کاهش شدید مقاومت در برابر سایش نمونه‌های بتن غلتکی به میزان حدوداً ۲۰۰ درصد حاصل می‌گردد. لازم به ذکر است که بیشترین مقاومت در برابر سایش مربوط به نمونه حاوی ۱۰ درصد خاکستر بادی و ۵ درصد آسفالت بازیافتی ریزدانه می‌باشد.

- استفاده از مقادیر ثابتی از خاکستر بادی (۱۰ درصد) و افزودن آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین بخش ریزدانه مخلوط‌های بتن غلتکی به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵

۶. مراجع

- Adamu, M., Mohammed, B. S. and Liew, M. S. 2018. "Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica". *Constr. Build. Mater.*, 171: 521-538.
- Aghayan, I., Khafajeh, R. and Shamsaei, M. 2021. "Life cycle assessment, mechanical properties, and durability of roller compacted concrete pavement containing recycled waste materials". *Int. J. Pavement Res. Tech.*, 14: 595-606.
- Amouzadeh Omrani, M., Hassan Nezhad, A. and Shahbazi, V. 2023. "Investigating the possibility of using recycled asphalt pavement (RAP) and steel slag as a substitute for part of the materials in roller compacted concrete (RCC) pavements". *J. Concrete Struct. Mater.*, 7(1): 5-22.
- Ashteyat, A., Obaidat, A., Kirgiz, M. and AlTawallbeh, B. 2022. "Production of roller compacted concrete made of recycled asphalt pavement aggregate and recycled concrete aggregate and silica fume". *Int. J. Pavement Res. Tech.*, 1-16 .
- Atiş, C. D. 2005. "Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition". *Cement Concrete Res.*, 35(6): 1112-1121.
- Cao, C., Sun, W. and Qin, H. 2000. "The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash". *Cement Concrete Res.*, 30(1): 71-75.
- Choubdar, A., Farajollahi, A. and Ameli, A. 2021. "Evaluation of the use of macro fibers on performance properties of roller compacted concrete (RCC) pavement". *J. Transport. Res.*, 18(1): 135-144.
- Debbarma, S. and Ransinchung, G. 2021. "Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates-state of the art review". *J. Clean. Prod.*, 287: 125078.
- Debbarma, S., Ransinchung, G. and Singh, S. 2019. "Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement". *Constr. Build. Mater.*, 199: 508-525.
- Fakhri, M. and Amoosoltani, E. 2017. "The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement". *Constr. Build. Mater.*, 137: 470-484.
- Fardin, H. E. and dos Santos, A. G. 2020. "Roller compacted concrete with recycled concrete aggregate for paving bases". *Sustain.*, 12(8): 3154.
- Gao, Y., Hu, C., Zhang, Y., Li, Z. and Pan, J. 2018. "Investigation on microstructure and microstructural elastic properties of mortar incorporating fly ash". *Cement Concrete Compos.*, 86: 315-321.
- Goldstein, K. and Scheerer, M. 1941. "Abstract and concrete behavior an experimental study with special tests". *Psychol. Monogr.*, 53(2).
- Harith, I. K., Amanah, B. H. and Naser, M. H. 2022. "Effect of proposed accelerated curing method on high volume fly ash concrete". *Key Eng. Mater.*, 924: 213-222.
- Hassan, K. E., Brooks, J. J. and Erdman, M. 2000. "The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete". *Waste Manag. Series*, 1: 121-128.
- Karimi Goghari, M., Hasani, A. and Safarnia Kapteh, T. 2015. "Introducing a linear regression model to predict allowable ratio of recycled asphalt pavement (RAP) used as a substitution of aggregate in roller compacted concrete". *J. Transport. Eng.*, 6(4): 671-684.
- Lam, M. N. T., Le, D. H. and Jaritngam, S. 2018. "Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash". *Constr. Build. Mater.*, 191: 912-922.
- Luo, W., Li, B., Yang, G., Xu, M., Pang, C., Kow, K. W. and Wu, T. 2024. "Utilisation of electrolytic manganese residue as a sulphate activator in producing concrete blocks with high-volume fly ash". *J. Clean. Prod.*, 434: 139813.
- Mardani-Aghabaglou, A. and Ramyar, K. 2013. "Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method". *Constr. Build. Mater.*, 38: 356-364.
- Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakir, Ö. and Ramyar, K. 2013. "Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method". *Cement Concrete Compos.*, 37: 259-266.
- Pavan, S. and Rao, S. K. 2014. "Effect of fly ash on strength characteristics of roller compacted concrete pavement". *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, 11(6): 4-8.
- Ram Kumar, B. and Ramakrishna, G. 2024. "Sustainable use of red mud and reclaimed asphalt pavement wastes in roller compacted concrete". *Int. J. Pavement Res. and Tech.*, 17(2): 291-305.
- Rao, S. K., Sravana, P. and Rao, T. C. 2015. "Strength and compaction characteristics of fly ash roller compacted concrete". *Int. J. Sci. Res. Knowl.*, 3(10): 0260-0269.

- Rao, S. K., Sravana, P. and Rao, T. C. 2016. "Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of fly ash roller compacted concrete (FRCC)". *Constr. Build. Mater.*, 118: 352-363.
- Rezaei, M. R., Abdi Kordani, A. and Zarei, M. 2022. "Experimental investigation of the effect of micro silica on roller compacted concrete pavement made of recycled asphalt pavement materials". *Int. J. Pavement Eng.*, 23(5): 1353-1367.
- Rudawska, A., Szabelski, J., Miturska-Barańska, I. and Doluk, E. 2023. "Biological reinforcement of epoxies as structural adhesives". In: *Structural Adhesives: Properties, Characterization and Applications*, pp. 31-104.
- Seifollahi, F. and Mohammadi, Y. 2020. "The effects of nano silica and steel fibers on mechanical properties of roller-compacted concrete pavement". *Concrete Res.*, 13(2): 31-43.
- Selvam, M., Debbarma, S., Singh, S. and Shi, X. 2022. "Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements-A state-of-the-art review. *Constr. Build. Mater.*, 317: 125838.
- Sharma, P., Sharma, S. K., Rambabu, D. and Reddy, B. S. P. 2023. "A detailed laboratory investigation on evolving the mix design of roller compacted concrete containing RAP aggregates and SCMs". *Innov. Infrastruct. Solut.*, 8(11): 284.
- Standard, A. 2013. C1176/C1176M-13. "Standard practice for making roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating table". West Conshohocken, PA: ASTM Int.
- Tayabji, S. D., Sherman, T. W., Arent, W. L., Kohn, S., Piggott, R. W., Berry, J. R., Larsen, R. L., Ragan, S. A., Cole, L. and Lopez, R. W. 1995. "Report on roller-compacted concrete pavements". ACI 325. 10R-95.
- Vahidi, E. K. and Moradi, N. 2016. "Experimental investigation on compressive strength of cement mortar using nano clay and fly ash". *J. Struct. Constr. Eng.*, 3(1): 38-48 .