

بررسی جامع کاربرد مصالح جایگزین در روسازی بتن غلتکی با رویکرد توسعه پایدار

مقاله علمی - پژوهشی

محمد رضا خاکباز*، دانشجوی دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
فهیم فاریابی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
سروش قادری، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمود عامری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mohammadreza_Khakbaz@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۱۳۶-۱۱۳

چکیده

با توجه به افزایش نیاز به روسازی‌های مقاوم و پایدار در راه‌ها، روسازی بتن غلتکی به عنوان یک گزینه مطلوب برای ترافیک‌های سنگین در نظر گرفته شده است. این نوع روسازی به دلیل ویژگی‌هایی چون استحکام بالا و دوام مناسب، به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای راه‌ها و محوطه‌های بنادر با ترافیک سنگین شناخته می‌شود. علاوه بر این، با توجه به تکرانی‌های فزاینده درباره آثار منفی زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های صنعتی و ساخت‌وساز، استفاده از مصالح جایگزین در روسازی‌های بتن غلتکی به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش آثار زیست‌محیطی و ارتقای پایداری پروژه‌ها در نظر گرفته می‌شود. این مقاله به بررسی جامع کاربرد مصالح جایگزین در روسازی بتن غلتکی با تأکید بر ابعاد زیست‌محیطی و توسعه پایدار می‌پردازد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک کند و در صورتی که این مصالح جایگزین در نسبت‌های بهینه به کار روند، می‌توان روسازی بتن غلتکی با خواص مکانیکی قابل قبول تولید کرد.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتن غلتکی، مصالح جایگزین، آسفالت بازیافتی، توسعه پایدار، محیط‌زیست

۱- مقدمه

اجرای بیشتری دارد. این نوع روسازی در مناطقی که ترافیک سنگین، و سرعت وسایل نقلیه کم است، کاربرد بیشتری دارد. به همین سبب در سال‌های اخیر استفاده از بتن غلتکی در بزرگراه‌ها و خیابان‌های درون‌شهری افزایش یافته است. روسازی بتن غلتکی (RCCP)^(۱)، دارای مزایای رقابتی مانند مقاومت فشاری

بتن غلتکی نوعی بتن با اسلامپ صفر است که مواد و مصالح تشکیل دهنده آن همانند بتن معمولی است. استفاده از بتن غلتکی در چند دهه اخیر به‌ویژه در ساخت روسازی‌ها افزایش یافته است. استفاده از بتن غلتکی در ساخت روسازی‌ها هزینه ساخت کمتری را به همراه داشته و در مقایسه با روسازی آسفالتی معمولی، سرعت

می‌رود در شکل ۱ نشان داده شده است. به طور کلی، استفاده از روسازی بتن غلتکی در دو لایه اساس و رویه متداول است. بتن غلتکی هنگامی که در لایه اساس استفاده می‌شود، سیمان مورد نیاز آن تقریباً شبیه به بتن‌های اقتصادی سازگار با محیط‌زیست و بتن مگر خشک است. همچنین در صورت کاربرد آن به عنوان یک لایه رویه در روسازی، مقاومت فشاری بالاتری در محدوده ۲۸ تا ۴۱ مگاپاسکال در سن ۲۸ روزه (عمل‌آوری شده با آب) باید برای آن در نظر گرفته شود (Chhabra, Ransinchung & Islam, 2021; Greene, Nazef & Choubane, 2011; Kasu, Manupati & Muppireddy, 2020; Singh et al., 2018; Singh, Ransinchung & Monu, 2019).

در سال‌های اخیر، توجه به مباحث زیست‌محیطی و توسعه پایدار در روش ساخت روسازی‌ها جایگاه ویژه‌ای دارد. بهینه‌سازی طراحی مخلوط، اتخاذ راه‌حل‌های نوآورانه در طرح و اجرای روسازی، کاهش نیاز به مصالح بکر و استفاده از مصالح بازیافتی راه‌حل‌های بروزی در جهت حرکت به سمت توسعه پایدار و توجه به مباحث زیست‌محیطی ساخت روسازی‌ها است (Chan et al., 2011; Mohammed, ElKady & Abdel-Gawwad, 2021; Nodehi & Taghvaei, 2022; Nodehi & Aguayo, 2021; Nodehi, 2021; Nodehi & Taghvaei, 2022). کاهش استفاده از سنگدانه‌های بکر و استفاده از سنگدانه‌های جایگزین رایج‌ترین روش برای حرکت به سمت توسعه پایدار ساخت روسازی است. از جمله سنگدانه‌های جایگزین مورد استفاده در مخلوط روسازی‌های بتن غلتکی می‌توان به سنگدانه‌های بتنی بازیافتی (RCA)، سنگدانه‌های بتنی بازیافتی مخلوط (MRCA)، آسفالت بازیافتی (RAP)، سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی (EAFSS) و خرده لاستیک اشاره کرد. استفاده از سنگدانه‌های جایگزین در ساخت روسازی‌ها می‌تواند به بهبود روند ساخت کاهش هزینه‌ها کمک کند. از جمله مزایای استفاده از سنگدانه‌های جایگزین می‌توان به کاهش هزینه در تهیه مصالح سنگی، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل مواد اولیه، حذف مسائل مربوط به دفع پسماند، کاهش میزان انتشار کربن و توجه به مسائل توسعه پایدار اشاره کرد. از این رو، توجه به استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی به عنوان یک راهکار پایدار و موثر در ساخت روسازی‌ها، امری بسیار مهم به‌شمار می‌رود (Shi, Mukhopadhyay & Zollinger, 2018; Piao et al., 2021).

بالا، دوام مناسب، هزینه تعمیر و نگهداری پایین و عمر طولانی‌تر نسبت به روسازی‌های آسفالتی است. همچنین این روسازی به دلیل هزینه کمتر و اجرای سریع‌تر نسبت به روسازی‌های بتنی ساده درزدار (JPCP)، به عنوان یک گزینه مناسب در روسازی‌های بتنی در سراسر جهان در حال توسعه است (Aghaeipour & Madkhan, 2020; Harrington et al., 2010; Salimi, Kamboozia & Aliha, 2024; Khayat & Libre, 2014; Shamran & Abbas, 2024). تحلیل‌های اقتصادی نشان می‌دهند که روسازی بتن غلتکی اقتصادی‌تر از روش‌های روسازی آسفالتی گرم و بتنی معمولی است. این نوع روسازی علاوه بر داشتن استحکام و دوام بیشتر، برای پروژه‌هایی مانند پارکینگ‌ها، بنادر، مناطق نظامی و شانه‌های جاده که نیاز به استحکام بالا دارند، مناسب است. به‌طور کلی، استفاده از روسازی بتن غلتکی به عنوان یک روش کارآمد و اقتصادی برای ساخت روسازی‌ها توجیه‌پذیر و قابل رقابت با سایر روش‌ها است (Hesami et al., 2016; Harrington et al., 2010).

یکی از روش‌های متداول طرح اختلاط بتن غلتکی، استفاده از مباحث مربوط به تراکم خاک است (ACI-327R, 2014). ویژگی‌های منحصر به فرد در طرح اختلاط و اجرای روسازی بتن غلتکی، این روسازی را به یک گزینه مناسب به لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی تبدیل کرده است (Harrington et al., 2010; Lee, Cho & Park, 2014; Gauthier, 2005). روسازی بتن غلتکی، مشابه روسازی‌های بتنی ساده درزدار است، با این تفاوت که اختلاط روسازی‌های بتن غلتکی به روش تراکم خاک بوده و مقدار ریزدانه بیشتری دارد. همچنین مخلوط بتن مورد استفاده در آن، میزان آب و سیمان کمتری نسبت به روسازی بتنی ساده درزدار جهت دستیابی به خواص مکانیکی و مقاومتی مشابه دارد (Harrington et al., 2010). از سوی دیگر، در اجرای روسازی بتن غلتکی مشابه با روسازی آسفالتی از دستگاه فینیشر جهت پخش مصالح بر روی بستر خاکی استفاده می‌شود. پس از پخش بتن، همانند اجرای روسازی آسفالتی، با استفاده از غلتک‌های ارتعاشی یا چرخ لاستیکی متداول، تراکم صورت می‌گیرد (Harrington et al., 2010; Chhabra, Ransinchung & Islam, 2021; Lee, Cho & Park, 2014). تجهیزات متداولی که برای اختلاط، اجرا و تراکم مصالح روسازی بتن غلتکی بکار



شکل ۱. ماشین آلات و تجهیزات مورد استفاده جهت اجرای روسازی بتن غلتکی (Ameri, Kamboozia & Khakbaz, 2023)

مجدد قرار می‌گیرد، اما همه آن قابل بازیافت نیست. بطور مثال آسفالت بازیافتی مازاد پیمانکاران راهسازی ایالات متحده تا سال ۲۰۱۵ حدود ۸۵ میلیون تن گزارش شده است (Shi, Mukhopadhyay & Zollinger, 2018). بنابراین، مدیریت مناسب این ضایعات و استفاده موثر از آسفالت‌های بازیافتی مازاد در روسازی‌های بتنی توسط محققان و کارشناسان این حوزه پیشنهاد شده است. تحقیقات آزمایشگاهی نشان دادند که آسفالت بازیافتی می‌تواند در ساخت روسازی‌های بتنی و آسفالتی استفاده شود. اما بایستی نسبت بهینه آسفالت بازیافتی بر اساس رفتار حالت تازه و سخت شده مخلوط بتن در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گیرد (Singh, Monu & Ransinchung, 2020). استفاده از آسفالت بازیافتی در بتن، علی‌رغم کاهش نسبی مقاومت فشاری، دارای مزایای متعددی مانند بهبود شکل‌پذیری، افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و افزایش مقاومت در برابر بار ناشی از ترافیک در مقایسه با بتن ساخته شده از مصالح بکر است (Shi, Mukhopadhyay & Zollinger, 2018; Shi et al., 2019). مباحث مکانیک شکست در موده‌های مختلف بارگذاری در روسازی بتن غلتکی نیز بسیار اهمیت دارد. در این زمینه نتایج محققان نشان می‌دهد استفاده از خرده‌لاستیک بازیافتی در بتن علی‌رغم کاهش نسبی مقاومت، می‌تواند باعث بهبود چقرمگی شکست بتن شود. (Fakhri & Amoosoltani, 2017; Khakbaz, Kamboozia & Aliha., 2024; Fakhri et al., 2017; Fakhri, Amoosoltani & Aliha., 2017). علاوه بر این استفاده از سنگدانه درشت سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی نیز

علاوه بر استفاده از سنگدانه‌های جایگزین، استفاده از مواد پوزولانی به جای خمیر سیمان معمولی می‌تواند راهکار دیگری در جهت حرکت به سمت توسعه پایدار باشد. برای سالیان طولانی، سیمان پرتلند گزینه مناسبی برای استفاده در روسازی بتن غلتکی بود. اما در سال‌های اخیر، با توجه به تاکید بیش از پیش دستورالعمل‌ها پیرامون توجه به مسائل زیست محیطی در فرآیند تولید سیمان، محققان ترغیب به استفاده از سایر مواد به جای سیمان در روسازی‌های بتنی شدند. چرا که در طول فرآیند تولید سیمان، مقدار زیادی سوخت فسیلی برای تامین انرژی تولید سیمان مصرف می‌شود. به گونه‌ای که تخمین زده می‌شود گاز کربن دی اکسید تولید شده در طی این فرآیند، حدود ۸ درصد از مجموع گازهای تولید شده به وسیله فعالیت‌های انسانی است (Harrington et al., 2010;)

استفاده از مصالح بازیافتی در روسازی بتن غلتکی محدودیت‌ها و مشکلاتی نیز با خود به همراه دارد. به عنوان مثال، در برخی موارد استفاده از سنگدانه‌های بتنی بازیافتی ممکن است باعث کاهش قابل‌توجه مقاومت بتن گردد (Safiuddin et al., 2013). به طور مشابه، انرژی پیوند سطحی بین سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی پوشش داده شده با قیر و ملات سیمان بسیار کم است که منجر به افت شدید مقاومت بتن می‌گردد (Brand & Roesler, 2017a; Brand & Roesler, 2017b). امروزه استفاده مجدد از آسفالت بازیافتی یک روش متداول در راستای توسعه پایدار است. اگرچه آسفالت بازیافتی در روسازی‌های آسفالتی مورد استفاده

بتن اهمیت دارد. به عنوان مثال، سنگدانه‌های بتنی بازیافتی و سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی ویژگی‌های متفاوتی دارند؛ زیرا سنگدانه بتنی بازیافتی معمولاً با لایه‌ای از ملات قدیمی پوشیده است (Tu, Chen & Hwang, 2006). به طور مشابه، سنگدانه‌های بتنی بازیافتی مخلوط، حاوی لایه‌ای از ملات قدیمی چسبیده متخلخل و بخش بیشتری از ذرات سرامیکی هستند که به دلیل ظرفیت جذب آب بالاتر، آب بیشتری به همراه دارند (Lopez-Uceda et al., 2020). در حالی آسفالت بازیافتی حاصل تراش دادن و آسیاب کردن روسازی‌های آسفالتی آسیب دیده است که مشخصاً سنگدانه‌های آن توسط یک پوشش نازک قیری آبریز احاطه شده‌اند (Shi, Mukhopadhyay & Liu, 2017; Dubey et al., 2020). مقدار ملات باقی‌مانده در سنگدانه‌های بتنی بازیافتی معمولاً در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درصد است و وزن مخصوص سنگدانه بتنی بازیافتی معمولاً عددی بین ۲/۱ تا ۲/۵ است (Safiuddin et al., 2013). اما از طرفی مقدار قیر در آسفالت بازیافتی ممکن است عددی بین ۲ تا ۷/۵ درصد باشد و وزن مخصوص گزارش شده آن معمولاً مقداری بین ۱/۸ تا ۲/۶ است. ظرفیت جذب سنگدانه بتنی بازیافتی به دلیل ملات متخلخل چسبیده معمولاً بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است، در حالی که لایه آبریز در آسفالت بازیافتی محدودکننده جذب آب است (Singh, Ransinchung RN & Kumar, 2018; Singh et al., 2020). همچنین سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی محصول جانبی تولید فولاد است و خواص مکانیکی بسیار مناسبی دارد. این محصول ظاهر سنگی سیاه رنگی دارد و دارای بافت سطحی زیر و خشن است (Abu-Eishah, El-Dieb & Bedir, 2012; Rooholamini et al., 2019). در مقایسه با سنگدانه بتنی بازیافتی و آسفالت بازیافتی، سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی دارای وزن مخصوص نسبتاً بالایی در حدود ۲/۹ تا ۳/۴ است و همچنین دارای استحکام سایشی بالا و مقاومت بسیار بالا در برابر خردشدگی است. این ویژگی‌ها سبب می‌شود که کاربرد سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی در بتن غلتکی مناسب باشد. با این حال، این ماده مصنوعی ممکن است به دلیل وجود آهک و منیزیم اکسید آزاد منبسط شود که این موضوع ممکن است منجر به ناپایداری حجمی آن شود (Rooholamini et al., 2019). کاهش این اثر منفی می‌تواند سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی

می‌تواند بر اساس زبری و زاویه سطح آن، افزایش یا کاهش مقاومت فشاری بتن را به همراه داشته باشد. رفتار مکانیکی روسازی بتن غلتکی در سنین مختلف عمل‌آوری تا حد زیادی به نوع و اندازه سنگدانه‌ها، دانه‌بندی، نسبت آب به سیمان و مواد افزودنی بستگی دارد (Rooholamini et al., 2019; Selvam et al., 2022). استفاده از مواد پوزولانی در کنار سنگدانه‌های بازیافتی می‌تواند مقاومت فشاری و دوام خمیر سیمان را بهبود بخشد و عملکرد بتن غلتکی را افزایش دهد. واکنش‌پذیری این مواد به اندازه ذرات، مقدار ذرات آمورف و ترکیبات شیمیایی آن‌ها بستگی دارد. استفاده از پوزولان‌ها علاوه بر کاهش هزینه‌ها و انرژی دفع مواد زائد، مزایای زیست‌محیطی نیز دارد. پوزولان‌ها به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند و مزیت اصلی آن‌ها هیدراتاسیون آهسته و تولید حرارت کم است که به کاهش مشکلات گردان حرارتی در بتن کمک می‌کند. پوزولان‌های مصنوعی مانند دوده سلیس، سرباره و خاکستر بادی تاثیر چشمگیری بر ویژگی‌های بتن دارند (Harrington et al., 2010; Tavakoli, Fakharian & de Brito, 2022). تمرکز این مطالعه بر ارزیابی استفاده از مصالح جایگزین در روسازی بتن غلتکی است. در روسازی بتن غلتکی، حجم اشغال شده توسط سنگدانه‌ها ۱۰ تا ۱۵ درصد بیشتر از بتن معمولی است. بنابراین استفاده از سنگدانه‌های جایگزین می‌تواند گزینه بهتری باشد. این مصالح مزایایی مانند کاهش تقاضا برای سنگدانه‌های طبیعی، کاهش مشکلات دفع ضایعات و انتشار کربن دارند، اما نگرانی‌هایی درباره کاهش مقاومت و مسائل فنی وجود دارد. هدف این مقاله، بررسی جامعی از مزایا و معایب استفاده از مصالح بازیافتی در روسازی بتن غلتکی با توجه به مسائل زیست‌محیطی و توسعه پایدار است.

۲- خصوصیات مصالح جایگزین در مخلوط بتن غلتکی

در انتخاب مصالح جایگزین برای بتن، باید به خواص ساختاری و مکانیکی آن‌ها توجه کرد تا بتن نهایی استانداردهای مورد نظر را برآورده کند. این مصالح ممکن است ویژگی‌های متفاوتی داشته باشند. بنابراین انتخاب صحیح ضروری است. برای انتخاب سنگدانه‌های جایگزین، تطابق آن‌ها با خصوصیات مکانیکی و دوام

می‌شوند. اگرچه این مواد از نظر منبع تهیه، خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتند، همه آن‌ها از طریق فعالیت‌های پوزولانی یا هیدرولیکی خواص بتن را تغییر می‌دهند. فعالیت پوزولانی این مصالح به ترکیب شیمیایی، شرایط فرآوری، ساختار و اندازه ذرات بستگی دارد و می‌تواند بر کیفیت و عملکرد بتن تأثیرگذار باشد. شناخت این عوامل به مهندسان کمک می‌کند تا ترکیبات بهینه برای افزایش مقاومت، دوام و کارایی بتن ایجاد کنند و هزینه‌ها را کاهش دهند (Firdous, Stephan & Djobo, 2018; Tailby & MacKenzie, 2010; Ayub et al., 2021).

را به یکی از سنگدانه‌های جایگزین بالقوه برای ساخت مخلوط بتن غلتکی تبدیل کند. جدول ۱ سنگدانه‌های جایگزین مورد مطالعه به همراه مشخصات کلی آن‌ها را نشان می‌دهد (Palankar, Shankar & Mithun, 2016; Courard, Michel & Delhez, 2010).

تحقیقات بسیاری به تحلیل عوامل تأثیرگذار بر استفاده از سنگدانه‌های جایگزین پرداخته‌اند. پوزولان‌ها ذرات ریز اکسید سیلیسیم و آلومینیوم هستند که به تنهایی خاصیت چسبندگی ندارند، اما در مجاورت رطوبت و کلسیم هیدروکسید، ترکیباتی مشابه با سیمان پرتلند تولید می‌کنند. این ترکیبات موجب متراکم شدن ساختار بتن و بهبود خصوصیات ناحیه انتقال بین سطحی

جدول ۱. مشخصات سنگدانه‌های مورد استفاده در روسازی بتن غلتکی

(Palankar, Shankar & Mithun, 2016; Courard, Michel & Delhez, 2010).

شکل سنگدانه	سنگدانه آسفالت بازیافتی	سنگدانه بتن بازیافتی	خرده لاستیک	سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی
وزن مخصوص	۱/۸۱ الی ۲/۴۹	۲/۱ الی ۲/۵	۰/۶ الی ۱/۵	۲/۹ الی ۳/۴
جذب آب	۰/۴ الی ۲/۰۳ درصد	۳ الی ۱۲ درصد	حدود ۰/۵ درصد	۱/۹ الی ۲/۷ درصد
شکل و بافت	زاویه‌دار با سطح صاف	زاویه‌دار با سطح ناهموار	زاویه‌دار با سطح ناهموار	زاویه‌دار با سطح ناهموار

۳- تأثیر مصالح جایگزین بر خواص روسازی بتن غلتکی

۳-۱- خواص بتن تازه حاوی مصالح جایگزین

نیز بررسی می‌شود که این مورد نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. این موارد نشان‌دهنده اهمیت بررسی دقیق خواص بتن تازه حاوی مصالح جایگزین است تا بتوان بهینه‌سازی فرایند تهیه بتن را به خوبی انجام داد.

در این بخش، به بررسی خواص بتن تازه حاوی مصالح جایگزین پرداخته می‌شود. یکی از خصوصیات مهم بتن، میزان رطوبت بهینه آن است که در دستیابی به خواص بهینه بتن بسیار حائز اهمیت است. همچنین، حداکثر چگالی خشک بتن تازه با مصالح جایگزین

۳-۱- میزان رطوبت بهینه

از آنجایی که مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی باید با غلتک‌های استاتیکی یا ارتعاشی متراکم شوند، طراحی اختلاط آن‌ها اغلب به شیوه تراکم خاک انجام می‌شود. در این روش درصد رطوبت برای دستیابی به حداکثر تراکم بایستی کافی باشد. روش پروکتور اصلاح شده، مطابق با استاندارد ASTM-D1557، مطلوب‌ترین و مناسب‌ترین روش برای تعیین درصد رطوبت بهینه مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی است. اما در مورد سنگدانه‌های ضعیف، روش پروکتور استاندارد مطابق با استاندارد ASTM-D698 را می‌توان اتخاذ کرد. همچنین برخی محققان از روش تراکم چرخشی سوپریو^۶ به دلیل توانایی بهتر آن در شبیه‌سازی و بازتولید شرایط واقعی تراکم عملیات میدانی در آزمایشگاه، برای تعیین درصد رطوبت بهینه و تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده کردند (Williams, 2013; Sengun et al., 2021; Şengün et al., 2019; LaHucik & Roesler, 2017). به طور معمول، درصد رطوبت بهینه مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی مقداری بین ۵ تا ۸ درصد جرم کل مصالح خشک است. اما در مورد مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی حاوی سنگدانه بتنی بازیافتی، زمانی که سنگدانه بتنی بازیافتی به نسبت ۵ تا ۳۰ درصد استفاده می‌شود، درصد رطوبت بهینه به طور کلی در حدود ۱/۶ تا ۵/۱ درصد بیشتر از حالت معمول است (Fardin & Santos, 2020). در سطوح بالاتر جایگزینی سنگدانه بتنی بازیافتی یعنی ۵۰ الی ۱۰۰ درصد جایگزینی، می‌تواند باعث افزایش درصد رطوبت بهینه به میزان ۲۵ الی ۳۵ درصد نسبت به روسازی بتن غلتکی معمولی شود (Lopez-Uceda et al., 2018). این افزایش درصد رطوبت بهینه، عمدتاً به دلیل وجود ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه‌های بتنی بازیافتی است که باعث جذب آب بیشتر می‌گردد. همچنین، ترکیب سنگدانه بتنی بازیافتی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر خواص بتن تازه داشته باشد. به عنوان مثال، نوعی از بتن بازیافتی ساخته شده از مخلوط نخاله‌های ساختمانی می‌تواند منجر به افزایش درصد رطوبت بهینه به میزان ۳۵ تا ۵۳ درصد شود. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود مقدار بیشتری از ضایعات سرامیکی (۱۱/۴ تا ۲۳/۴ درصد) در مخلوط سنگدانه بتنی بازیافتی باشد که مستلزم آب بیشتر برای دستیابی به حداکثر تراکم مخلوط است (Harrington et al., 2010; Lopez-Uceda et al., 2020; Ashteyat et al., 2022).

مشابه سنگدانه‌های بتنی بازیافتی، استفاده از سنگدانه‌های سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی در نسبت‌های ۵۰ الی ۱۰۰ درصد

می‌تواند باعث افزایش درصد رطوبت بهینه در حدود ۱۵ تا ۲۱ درصد شود. این موضوع بدان معناست که سنگدانه‌های سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی ممکن است نیاز به آب بیشتری برای دستیابی به حداکثر تراکم ایجاد کنند. با افزودن خاکستر بادی، این نیاز به آب می‌تواند کاهش پیدا کند، این توانایی کاهش آب به دلیل اثر باربری ذرات کروی آن رخ می‌دهد (Lam, Jaritngam & Le, 2017). برخلاف سنگدانه‌های بتنی بازیافتی و سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی، استفاده از سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی در مخلوط روسازی بتن غلتکی، اغلب موجب کاهش مقدار درصد رطوبت بهینه در حدود ۸ تا ۱۲ درصد می‌شود. این موضوع عمدتاً به دلیل توانایی دفع آب لایه قیری آن است. با این حال برخی از محققان گزارش کردند که استفاده از آسفالت بازیافتی ممکن است موجب افزایش درصد رطوبت بهینه تا ۱۲ درصد شود (Settari et al., 2015; Debbarma & Ransinchung, 2021; Boussetta, El Euch Khay & Neji, 2020; Ferreeb et al., 2014). این اثر منفی روی درصد رطوبت بهینه به تجمع ذرات آسفالت بازیافتی نسبت داده می‌شود که موجب محبوس شدن آب در درون حفرات می‌شود (Debbarma, Singh & RN, 2019). محققان در مورد مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی حاوی خرده‌لاستیک گزارش کردند که استفاده از ذرات خرده‌لاستیک باعث کاهش درصد رطوبت بهینه مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی می‌شود (Fakhri & Amoosoltani, 2017). علاوه بر این، به دلیل جذب آب کمتر ذرات خرده‌لاستیک، ملات آزاد بیشتری در دسترس است که موجب افزایش کارایی و بهبود تراکم شده و در نتیجه منجر به تراکم و روانی بهتر مخلوط‌های تازه می‌شود. در تحقیقات مختلف نشان داده شده که ادغام سنگدانه بتنی بازیافتی و سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی به دلیل ظرفیت جذب آب بالاتر، می‌تواند باعث افزایش مقادیر درصد رطوبت بهینه شود. در حالی که استفاده از آسفالت بازیافتی و خرده‌لاستیک به دلیل مقادیر کمتر جذب آب آن‌ها، می‌تواند باعث کاهش درصد رطوبت بهینه شود. در برخی موارد، استفاده از آسفالت بازیافتی به دلیل وجود ذرات کلوخه‌ای و گرد و غبار، منجر به درصد رطوبت بهینه بالاتری می‌شود (Selvam et al., 2022; Harrington et al., 2010). حفظ رطوبت مناسب در مخلوط بتن، به ویژه در مواد مکمل سیمانی، موجب بهبود حرکت بین ذرات مخلوط و پر شدن بهتر فضای خالی بین مصالح سنگی می‌شود. سطح ذرات تأثیر زیادی بر میزان آب و سیمان لازم جهت بهبود وضعیت ملات دارد. مواد مکمل سیمانی، معمولاً دارای سطح ویژه بالاتری نسبت به سیمان معمولی هستند و به دلیل ذرات ریزتر، تعامل بیشتری با

در مخلوط بتن غلتکی موجب کاهش تخلخل و جذب آب در مقایسه با سنگدانه‌های بکر می‌شود و میزان آب در دسترس را افزایش می‌دهد. خاکستر بادی در مقایسه با دوده سیلیس، به دلیل صیقلی بودن سطح کروی خود، سطح ویژه کمتر و در نتیجه نیاز به رطوبت کمتری دارد. از سوی دیگر در مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی ۲۰ تا ۶۰ درصد ذرات سرباره کوره، سطح رطوبت بهینه به ترتیب حدود ۱ تا ۱۱ درصد افزایش پیدا می‌کند. افزایش چشمگیر در سطح رطوبت بهینه می‌تواند به دلیل عدم واکنش ذرات سرباره در سنین ابتدای خود و سطح ویژه بالاتر این ذرات نسبت به سیمان پرتلند نسبت داده شود (Debbarma et al., 2020; Zheng et al., 2023; RamKumar & Ramakrishna, 2022).

محیط دارند. به همین دلیل، در صورت جایگزینی این مواد با سیمان، تقاضای آب در مخلوط بتن غلتکی افزایش می‌یابد. این افزایش سطح رطوبت بهینه، بر اساس میزان و نوع استفاده از مکمل سیمانی متفاوت است. با توجه به نتایج محققان که در جدول ۲ نمایش داده شده است، دوده سیلیس بیشترین افزایش درصد رطوبت بهینه را به خود اختصاص داده است. این افزایش قابل توجه در میزان تقاضای رطوبت، به دلیل سطح ویژه بالاتر ذرات دوده سیلیس است. از این رو افزودن دوده سیلیس به طور قطع مستلزم استفاده از یک کاهنده آب است که هزینه کلی مخلوط را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی و خرده لاستیک این مشکل را حل کرد. وجود قیر پیرشده بر روی آسفالت بازیافتی

جدول ۲. خلاصه تاثیر مکمل‌های سیمانی در سطوح مختلف جایگزینی بر خواص تازه مخلوط بتن غلتکی

مرجع	میزان تغییرات زمان vebe نسبت به مخلوط کنترلی (%)	میزان تغییرات حداکثر چگالی خشک نسبت به مخلوط کنترلی (%)	میزان تغییرات رطوبت بهینه نسبت به مخلوط کنترلی (%)	سطوح جایگزینی (%)	نوع مکمل سیمانی
Debbarma et al., 2021	-	-۵/۱۹	+۱۹/۷۵	۵	دوده سیلیس (SF)
	-	-۲/۸۳	+۲۲/۸۶	۱۰	
Vahedifard & Nili, 2010	+۱۰	-	*	۱۰	
Tavakoli, Fakharian & de Brito, 2022	+۷/۱۴	-	-	۵	
	+۲۳/۸۱	-	-	۱۰	
	+۵۰	-	-	۱۵	
Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013	-	-۱/۲	+۴/۴	۲۰	خاکستر بادی (FA)
	-	-۴/۶	+۲۲/۲	۴۰	
	-	-۶/۹	+۳۲/۲	۶۰	
adamu, Mohammed & Liew, 2018	-۱۸/۱۸	-۱/۱۳	-	۵۳	
adamu, Mohammed & Liew, 2018	-	-۴/۳۱	+۱۸/۲۰	۱۵	سرباره کوره آسیاب شده (GGBF)
	-	-۴/۹۲	+۱۳/۵۳	۳۰	
Aghaeipour & Madhkan, 2017	-	-۰/۵۱	+۰/۹۶	۲۰	
	-	-۰/۷۲	+۴/۲۸	۴۰	
	-	-۰/۰۸	+۱۱/۴۰	۶۰	

توجه: نماد + بیانگر افزایش مقادیر و - به معنای کاهش است.
* با توجه به آنکه میزان رطوبت بهینه برای تمامی مخلوط‌ها در محدوده ۶٫۲ الی ۶٫۸ است، درصد رطوبت بهینه برای تمامی نمونه‌ها برابر با ۷ درصد در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۱- حداکثر چگالی خشک

ادغام سنگدانه بتنی بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی، می‌تواند منجر به کاهش حداکثر چگالی خشک شود که عمدتاً به دلیل وزن مخصوص پایین‌تر آن است (Fardin & Santos, 2020). با این حال، نرخ تغییر در شیب نمودار درصد رطوبت بهینه-حداکثر چگالی خشک آن، می‌تواند افقی‌تر از شیب نمودار روسازی بتن غلتکی کنترل‌ی باشد. این روند تغییرات نشان می‌دهد که مخلوط روسازی بتن غلتکی حاوی سنگدانه بتنی بازیافتی، می‌تواند تغییرات مشابه یا بیشتری در درصد رطوبت نسبت به مخلوط شاهد، بدون کاهش چگالی خشک در طول تراکم داشته باشد (Lopez-Uceda et al., 2018). مشابه سنگدانه بتنی بازیافتی، ادغام آسفالت بازیافتی با چگالی کم و همچنین خرده لاستیک، می‌تواند موجب کاهش حداکثر چگالی خشک مخلوط روسازی بتن غلتکی به ترتیب در حدود ۵ و ۷ درصد شود (Debbarma, Ransinchung & Singh, 2019; Debbarma, Singh & RN, 2019; Mohammed & Adamu, 2018). با این وجود، استفاده از آسفالت بازیافتی به دلیل ترکیب شدن اثر چسبندگی لایه قیر و کمتر بودن زاویه سطوح مصالح آن، موجب بهبود کارایی و تراکم‌پذیری مخلوط می‌شود (Modarres & Hosseini, 2014). از سوی دیگر، استفاده از سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی عمدتاً به دلیل چگالی بالاتر، باعث بهبود حداکثر چگالی خشک مخلوط روسازی بتن غلتکی تقریباً به مقدار ۰/۷ تا ۳/۹ درصد می‌شود (Lam, Jaritngam & Le, 2017). صرف نظر از نوع سنگدانه‌های جایگزین مورد استفاده در مخلوط روسازی بتن غلتکی، تفاوت در حداکثر چگالی خشک آن‌ها بسیار کم است. این موضوع نشان دهنده پتانسیل بالای سنگدانه‌های جایگزین است؛ زیرا مقاومت سخت شده روسازی بتن غلتکی، مستقیماً به حداکثر تراکم مخلوط تازه آن مرتبط است (Selvam et al., 2022). استفاده از مواد مکمل به‌عنوان جایگزین سیمان موجب کاهش حداکثر چگالی خشک مخلوط بتن غلتکی می‌شود. به‌عنوان مثال محققان در استفاده از خاکستر بادی در نسبت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد مشاهده کردند که حداکثر چگالی خشک به ترتیب حدود ۱/۲، ۴/۶ و ۶/۸ درصد کاهش پیدا می‌کند (Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013). همچنین در مخلوط که حاوی ۱۵ تا ۳۰ درصد خاکستر بادی و ۵۰ درصد تراشه آسفالت

بازیافتی، حداکثر چگالی خشک آن حدود ۴/۲ تا ۴/۹ درصد کمتر از مخلوط کنترل‌ی حاصل شد (Debbarma et al., 2021). علت اصلی این کاهش، وزن مخصوص کمتر خاکستر بادی در مقایسه با سیمان پرتلند است (Adamu, Mohammed & Liew, 2018). همچنین نتایج نشان داد که در استفاده ۵ و ۱۰ درصدی از دوده سیلیس در مخلوط بتن غلتکی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی، حداکثر چگالی خشک حدود ۲/۸ و ۵/۲ درصد کاهش پیدا می‌کند (Debbarma et al., 2021). همانگونه که نتایج محققان نشان می‌دهد، با افزایش سطح جایگزینی دوده سیلیس در مخلوط بتن غلتکی، نرخ کاهش چگالی خشک مخلوط کاهش پیدا می‌کند. در واقع با توجه به نتایج تست سرعت پالس اولتراسونیک می‌توان گفت، با افزایش میزان دوده سیلیس در مخلوط بتن غلتکی، سرعت پالس اولتراسونیک افزایش پیدا می‌کند، این موضوع به منزله بهبود ریزساختار خمیر سیمان و ویژگی‌های ناحیه انتقال بین سطحی است که منجر به افزایش چگالی و سرعت پالس اولتراسونیک در مخلوط می‌شود (adamu, Mohammed & Liew, 2018 ; Tavakoli, Fakharian & de Brito, 2022). همچنین با توجه به مشخصات فیزیکی مصالح جایگزین که در جدول ۳ نشان داده شده است، سرباره کوره آسیاب شده به دلیل نزدیکی وزن مخصوص آن به سیمان، کمترین نرخ کاهش در حداکثر چگالی خشک (حدود ۱ درصد) را نسبت به سایر مکمل‌های سیمانی مانند دوده سیلیس و خاکستر بادی را دارد (Aghaeipour & Madhkan, 2017). به هر حال صرف نظر از نوع و سطح جایگزینی، نرخ کاهش چگالی کمتر از ۱۰ درصد است. از این رو، انتظار می‌رود جایگزین کردن مواد مکمل با سیمان، باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در خواص تازه مخلوط بتن غلتکی نگردد.

۳-۲-۲- خواص مکانیکی روسازی بتن غلتکی حاوی

سنگدانه‌های جایگزین

در این بخش تأثیر سنگدانه‌های جایگزین بر برخی از خواص مکانیکی مهم روسازی بتن غلتکی، مانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت سایشی مورد بحث قرار می‌گیرند. مقاومت فشاری و مقاومت خمشی، پارامترهای

دلیل مقدار کمتر لاستیک مورد استفاده است، در این حالت اصطکاک کافی بین ذرات و قرارگیری بهتر ذرات لاستیک در داخل مخلوط ایجاد می‌شود (Fakhri & Amoosoltani, 2017).

نتایج محققان نشان می‌دهد استفاده از آسفالت بازیافتی در مخلوط روسازی بتن غلتکی منجر به کاهش مقاومت فشاری در محدوده

۹ تا ۶۷ درصد می‌شود (Debbarma, Ransinchung & Singh, 2019; Debbarma, Singh & RN, 2019; Fakhri & Amoosoltani, 2017; Modarres & Hosseini, 2014).

کاهش، به وجود یک لایه قیری نسبت داده می‌شود که در برگیرنده آسفالت بازیافتی است و مانع اتصال سطحی مناسب بین ملات

سیمان و سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی می‌شود. استفاده از سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی درشت‌تر، موجب کاهش مقاومت

کمتری (حدود ۲۵ درصد کاهش مقاومت) می‌شود. همچنین استفاده از قطعات ریزتر و یا ترکیبی از سنگدانه‌های آسفالت

بازیافتی درشت‌دانه و ریزدانه، کاهش مقاومت فشاری بیشتری (حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد کاهش مقاومت) را به همراه خواهد داشت

(Debbarma, Singh & RN, 2019; Modarres & Hosseini, 2014). نتایج محققان رفتار متفاوتی در مورد مخلوط‌های روسازی

بتن غلتکی شامل سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی نشان می‌دهد که عمدتاً به میزان تخلخل، شکل ساختاری، میزان جذب

آب و ناحیه انتقال بین‌سطحی آن نسبت داده می‌شود (Lam, Jaritngam & Le, 2017; Rooholamini et al., 2019; Dong et al., 2021; Toffolo et al., 2021).

برخی از محققان گزارش کردند که استفاده از سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی در مخلوط بتن غلتکی موجب کاهش مقاومت فشاری مخلوط‌های

روسازی بتن غلتکی می‌شود، این در حالی است که برخی دیگر گزارش کردند که با افزایش مقاومت همراه است. به عنوان مثال در

یک تحقیق نشان داده شد که صرف نظر از میزان جایگزینی سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی یا درصد درشت‌دانه یا ریزدانه بودن آن در مخلوط بتن غلتکی، کاهش مقاومت فشاری در محدوده ۵ تا

۳۹ درصد خواهد بود. شایان ذکر است که وجود آهک آزاد و اکسید منیزیم در سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی منجر به انبساط در آن می‌شود و این اتفاق در محیط مرطوب می‌تواند

اساسی هستند که بر طراحی ضخامت روسازی بتن غلتکی تاثیرگذارند (Selvam et al., 2022; Chhorn, Hong & Lee, 2018).

۳-۲-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری یکی از پارامترهای مهم در کنترل کیفیت بتن است و انتخاب مواد اولیه باید با دقت انجام شود. استفاده از

سنگدانه‌های جایگزین می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری مخلوط روسازی بتن غلتکی داشته باشد. به طور مثال،

استفاده از سنگدانه بتنی بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری مخلوط تا ۳۵ درصد می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهند که مقاومت

فشاری به نسبت سنگدانه بتنی بازیافتی بستگی دارد و استفاده از ۳۰ درصد سنگدانه بتنی بازیافتی موجب کاهش ۲۹ درصدی مقاومت فشاری می‌شود (Fardin & Santos, 2020). در حالی

که استفاده ۱۰۰ درصدی از سنگدانه بتنی بازیافتی ممکن است باعث کاهش مقاومت تا حدود ۳۵ درصد شود (Lopez-Uceda et al., 2018).

کاهش مقاومت فشاری به دلیل وجود ملات چسبیده قدیمی در حاشیه سنگدانه بتنی بازیافتی است که معمولاً

موجب ضعیف شدن ناحیه انتقال بین‌سطحی سنگدانه‌ها با خمیر ملات سیمان جدید می‌شود. در استفاده از سنگدانه بتنی بازیافتی

بصورت مخلوطی از چند منبع مختلف، کاهش بیشتر (۲۴ تا ۳۱ درصدی) در مقایسه با کاهش ۱۲ تا ۱۸ درصدی زمانی که سنگدانه

بتنی بازیافتی از یک منبع غیر مخلوط استفاده شد گزارش شده است (Lopez-Uceda et al., 2020; Hosseinezhad, 2020; Hatungimana & Ramyar, 2021; Tavakoli et al., 2020).

مشابه سنگدانه بتنی بازیافتی، استفاده از خرده‌لاستیک و آسفالت بازیافتی نیز می‌تواند موجب کاهش مقاومت فشاری مخلوط‌های

روسازی بتن غلتکی شود. به عنوان مثال، زمانی خرده لاستیک در نسبت‌های ۵ تا ۳۰ درصد استفاده شود، باعث کاهش ۱۰ تا ۳۲

درصدی مقاومت فشاری می‌شود (Meddah, Beddar & Bali, 2014). کاهش مقاومت در مخلوط روسازی بتن غلتکی حاوی

خرده‌لاستیک، عمدتاً به چسبندگی ضعیف بین ملات سیمان و ذرات لاستیک، نسبت داده می‌شود. با این حال، افزودن ۵ درصد خرده‌لاستیک، می‌تواند اثر مثبتی به همراه داشته باشد که این به

پوزولانی و هیدرولیکی سرباره کوره است. مدت زمان عمل آوری و غلظت کلسیم هیدروکسید تولید شده در فرآیند هیدراتاسیون سیمان دو پارامتر مهم در افزایش مقاومت این مخلوط هستند. به این علت که غلظت کلسیم هیدروکسید موجود در نمونه‌ها در طی واکنش هیدراتاسیون سیمان و سرباره کوره آهنگدازی پس از ۹۰ روز، افزایش می‌یابد که این افزایش غلظت منجر به تداوم واکنش‌های پوزولانی و تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده در منافذ بتن می‌شود. در نهایت این روند موجب افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی می‌شود. همچنین نتایج برخی محققان نشان می‌دهد، زمانی که سطح جایگزینی سرباره کوره آهنگدازی از حد مشخصی (۴۰ درصد) بیشتر شود، مخلوط از کلسیم هیدروکسید کافی برای فعال کردن سرباره کوره برخوردار نیست و سرباره صرفاً نقش پرکننده را ایفا می‌کند (Aghaeipour & Madhkhan, 2017; Feng, 2004). در همین حال، استفاده از ذرات خاکستر بادی تا سطح جایگزینی معینی، اثر مثبتی را بر روی مقاومت فشاری مخلوط بتن غلتکی نشان می‌دهد و افزایش درصد استفاده از آن ممکن است منجر به کاهش مقاومت بتن شود. همچنین نتایج محققان در استفاده از خاکستر بادی نشان می‌دهد مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه با استفاده از ۱۵ درصد خاکستر بادی از ۲۲/۵۷ به ۲۵/۸۹ مگاپاسکال افزایش پیدا کرد. اما در سطوح جایگزینی بالاتر (یعنی ۳۰ و ۴۵ درصد)، مقاومت فشاری حدود ۱۹ الی ۴۷ درصد کاهش پیدا کرد (Atiş et al, 2004). این کاهش عمدتاً به افزایش نسبت آب به سیمان به دلیل افزایش مقدار خاکستر بادی نسبت داده می‌شود، چرا که نسبت آب به سیمان عامل مهمی در فاصله بین ذرات است و با افزایش این نسبت، فاصله بین ذرات افزایش پیدا می‌کند که در نتیجه موجب افزایش مدت زمان لازم برای تشکیل شبکه کریستال می‌شود (Aitcin, P. C., & Neville, 2003). از این رو، با گذشت زمان، خاکستر بادی به دلیل واکنش آهسته خود می‌تواند موجب ساخت بتنی با مقاومتی قابل مقایسه یا حتی بهتر از مخلوط کنترلی شود (Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013; Atiş et al, 2004). محققان دیگر در استفاده از دوده سیلیس نشان دادند، واکنش پذیری بسیار بالای آن موجب

موجب افزایش حجم تا ۱۰ درصد شود. این ویژگی سبب می‌شود سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی برای کاربرد در سیمان پرتلند نامناسب باشد. به منظور استفاده از سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی به عنوان یک مصالح ساختمانی بالقوه، باید به مدت ۳ تا ۱۲ ماه در معرض رطوبت در فضای باز قرار گیرد (Lam, Jaritngam & Le, 2017; Lam, Le & Jaritngam, 2018). با وجود پیش‌فراوری سنگدانه‌های سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی، دلیل احتمالی کاهش مقاومت فشاری مخلوط، ویژگی‌های شکل ظاهری و اتصال سطحی ضعیف بین ملات سیمان و سنگدانه‌های سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی است. در مقابل، محققان نشان داده‌اند که استفاده از سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی درشت‌دانه در سطوح جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصدی، می‌تواند به ترتیب منجر به بهبود ۶ و ۱۴ درصدی مقاومت فشاری شود. این رفتار، عمدتاً به بافت خشن و زاویه‌دار بودن سنگدانه‌های سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی درشت‌دانه نسبت داده می‌شود. این ویژگی تسهیل‌کننده به هم پیوستگی بهتر مصالح است و بهبود ناحیه انتقال بین‌سطحی را به همراه دارد و در نتیجه منجر به افزایش ظرفیت باربری مخلوط بتن غلتکی می‌شود. می‌توان مشاهده کرد که استفاده از سنگدانه بتن بازیافتی یا آسفالت بازیافتی موجب کاهش مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی می‌شود. این در حالی است که در استفاده از سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی و خرده‌لاستیک، رفتار متفاوتی دیده می‌شود. از این رو، مطالعه رفتار این سنگدانه‌ها در سطح خرد ممکن است درک بهتری از تأثیر آن بر خواص روسازی بتن غلتکی ارائه دهد (Rooholamini et al., 2019). مرور ادبیات در مورد ادغام مواد مکمل جایگزین با سیمان، نشان می‌دهد، این ادغام تأثیر مثبتی بر روی مقاومت فشاری مخلوط بتن غلتکی دارد. به عنوان مثال نتایج دو تحقیق نشان دادند، زمانی که مقدار سرباره کوره در مخلوط بتن غلتکی تا ۴۰ درصد افزایش پیدا می‌کند، مقاومت فشاری مخلوط در سن ۲۸ روز، حدود ۲/۶۷ تا ۴/۵ درصد افزایش پیدا خواهد کرد (Aghaeipour & Madhkhan, 2017; Rao et al, 2016). این بهبود عمدتاً به دلیل هیدراتاسیون سیمان، واکنش

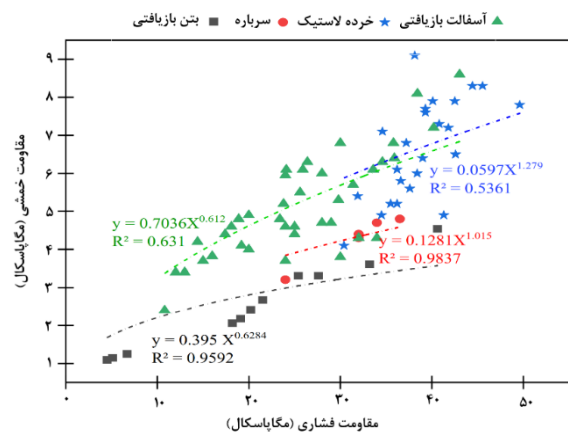
مخلوط می‌شود. علاوه بر این، استفاده از خرده‌لاستیک درشت‌تر به نسبت ۵ تا ۳۰ درصد، باعث کاهش مقاومت خمشی در حدود ۲۴ تا ۳۱ درصد می‌شود (Meddah, Beddar & Bali, 2014). برخی دیگر از محققان نشان داده‌اند که استفاده ۵ درصدی از خرده‌لاستیک جایگزین سنگدانه، باعث افزایش ۳ الی ۴ درصدی مقاومت خمشی می‌شود. این رفتار تحت تأثیر کاهش نسبت سیمان، به دلیل جذب آب کمتر خرده‌لاستیک است که باعث پایداری و همگنی بیشتر مخلوط می‌شود و در درجه بعدی به پراکندگی خرده‌لاستیک بین سنگدانه‌ها و ایجاد چفت و بست بهتر در مخلوط مرتبط است (Fakhri & Amoosoltani, 2017). همچنین استفاده از آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین جزئی برای سنگدانه‌های طبیعی، بدون توجه به درشت یا ریزدانه بودن یا سطح جایگزینی آن، می‌تواند باعث کاهش مقاومت خمشی مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی در حدود ۵ تا ۳۱ درصد شود (Debbarma, Singh & RN, 2019; Fakhri & Amoosoltani, 2017). اما، وجود لایه قیری که آسفالت بازیافتی را فرا گرفته، به دلیل تشکیل پیوند سطحی ضعیف بین ملات سیمان و آسفالت بازیافتی منجر به کاهش مقاومت خمشی مخلوط بتن غلتکی می‌شود و بالعکس، وجود این لایه قیر پیرامون سنگدانه آسفالت بازیافتی به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک قیر، می‌تواند به بهبود چقرمگی مخلوط روسازی بتن غلتکی کمک کند (Fakhri & Amoosoltani, 2017). در نتیجه، اگر با طراحی یک دال روسازی ضخیم‌تر کاهش مقاومت خمشی جبران شود، استفاده از آسفالت بازیافتی می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت باربری روسازی بتن غلتکی شود (Debbarma & Ransinchung, 2021). در مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی شامل سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی، استفاده از سرباره ریزتر می‌تواند موجب کاهش مقاومت خمشی تا حدود ۲۷ درصد شود که دلیل آن، پیوند ضعیف بین خمیر سیمان و بخش ریزتر سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی است. برخلاف این موضوع، جایگزینی کامل سنگدانه‌های طبیعی با سرباره درشت‌تر، می‌تواند باعث افزایش مقاومت خمشی تا حدود ۹ درصد شود (Rooholamini et al., 2019). این موضوع به ویژگی‌های ساختاری بهبود یافته سنگدانه‌های سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی، مانند بافت ناهموار و زاویه‌دار که منطقه انتقال سطحی را بهبود می‌بخشد، نسبت داده می‌شود و این موجب افزایش

بهبود مقاومت فشاری مخلوط بتن غلتکی، به ویژه تا سن ۲۸ روزگی خواهد شد (Tavakoli, Fakharian & de Brito, 2022; adamu, Mohammed & Liew, 2018; Vahedifard & Nili, 2010). محققان از طریق اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه بتن غلتکی دریافتند که بیشترین نرخ افزایش مقاومت در سن ۷ تا ۲۸ روزگی نمونه‌ها رخ می‌دهد. همچنین آن‌ها دریافتند با افزایش سطح جایگزینی از ۱۰ به ۱۵ درصد، نرخ بهبود مقاومت کاهش پیدا می‌کند. این کاهش نرخ بهبود مقاومت ممکن است به دلیل اتمام کلسیم هیدروکسید و یا کمبود آب در دسترس مورد نیاز برای تداوم واکنش‌های پوزولانی رخ داده باشد. از این رو دوده سیلیس اضافی به عنوان یک ماده بی اثر در خمیر بتن باقی می‌ماند. علاوه بر این ممکن است این ذرات بی اثر در مخلوط به خوبی پراکنده نشوند و در برخی نقاط تجمع پیدا کنند (adamu, Mohammed & Liew, 2018; Tavakoli, Fakharian & de Brito, 2022). همچنین محققان دیگر نشان دادند ترکیب دوده سیلیس با مصالح سنگی بازیافتی نظیر خرده لاستیک و تراشه آسفالت بازیافتی، می‌تواند مقاومت از دست رفته مخلوط بتن غلتکی را تا حد قابل قبولی از طریق بهبود ناحیه انتقال بین سطحی، جبران کند (Tavakoli, Fakharian & de Brito, 2022; Debbarma et al., 2021; Fakhri., 2016).

۳-۲-۳- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی، یک پارامتر مهم در طرح اختلاط و طراحی روسازی‌های بتنی است. پارامترهای مختلفی بر رفتار خمشی روسازی‌های بتنی تأثیرگذار هستند که مهم‌ترین آن‌ها نسبت آب به سیمان و ترکیب دانه‌بندی سنگدانه‌ها است. مشابه با مقاومت فشاری، افزودن سنگدانه بتنی بازیافتی بدون توجه به درشت‌دانه و ریزدانه بودن و یا سطوح جایگزینی آن، موجب کاهش مقاومت خمشی مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی در حدود ۱۲ تا ۲۷ درصد می‌شود (Fardin & Santos, 2020; Lopez-Uceda et al., 2018). همانطور که قبلاً ذکر شد، ناحیه انتقال بین سطحی ضعیف بین ملات سیمان و سنگدانه بتنی بازیافتی، منجر به تخلخل بالاتر در ناحیه انتقال بین سطحی و در نتیجه کاهش مقاومت خمشی

گسیختگی مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی مورد نیاز است (Selvam et al., 2022).



شکل ۲. رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی مطابق با ادبیات فنی (Selvam et al., 2022)

این مواد، به صورت محسوسی کمتر از مقاومت مخلوط کنترلی است، اما در دراز مدت با انجام فعالیت‌های پوزولانی، استحکام خمشی مخلوط در سطوح جایگزینی کمتر از ۲۰ درصد نزدیک به مخلوط کنترلی است (Atiş et al, 2004; Mardani- Aghabaglou & Ramyar, 2013). از سوی دیگر با جایگزینی سرباره کوره آسیاب شده به جای سیمان، می‌توان کمبود کلسیم اکسید (CaO) را از طریق منیزیم اکسید (Mgo) جبران کرد. زمانی که مقدار منیزیم اکسید مخلوط حدود ۸ الی ۱۰ درصد باشد، می‌تواند تاثیر جزئی بر روی افزایش مقاومت داشته باشد. اگرچه افزایش میزان کلسیم، اکسید آلومینیم و منیزیم فعالیت هیدرولیکی را افزایش می‌دهد، اما با افزایش سطح اکسید سیلیس این فعالیت‌ها کاهش می‌یابد (Özbay et al., 2016). در تمامی حالت‌های جدول ۵، فقط نمونه‌های حاوی ۴۰ درصد سرباره کوره، مقاومت خمشی مشابه و یا بهتر از مخلوط کنترلی را از خود نشان می‌دهند. کاهش خواص قلیایی مخلوط و افزایش نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های حاوی ۶۰ درصد سرباره کوره آهنگدازی از مهم‌ترین دلایل کاهش مقاومت خمشی بتن بشمار می‌روند (Rao et al, 2017; Aghaeipour & Madhkan, 2016).

ظرفیت باربری مخلوط بتنی می‌شود. از این تجزیه و تحلیل، می‌توان مشاهده کرد که روند کلی در مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی حاوی سنگدانه‌های جایگزین، به جز سنگدانه‌های سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی، با کاهش مقاومت خمشی همراه است. از این رو، برای درک رفتار واقعی روسازی بتن غلتکی حاوی سنگدانه‌های جایگزین، باید مطالعات بیشتری در رابطه با خصوصیات ساختاری سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی به کمک بررسی پارامترهای مقاومت انجام شود (Selvam et al., 2022). در یک تحقیق، روابط بین مقاومت فشاری و خمشی مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی حاوی سنگدانه‌های جایگزین مطابق با شکل ۲ ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تغییر در خواص مصالح، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت سنگدانه جایگزین روسازی بتن غلتکی دارد. از این رو، مطالعات جامع بیشتری برای تعیین اثر مواد جایگزین بر مدول مواد پوزولانی از طریق تقویت ساختار داخلی بتن و پاک‌سازی منافذ موجود در سطح مشترک بین مصالح سنگی و خمیر سیمان، مقاومت خمشی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند مقاومت خمشی ۲۸ روزه مخلوط روسازی بتن غلتکی، با جایگزینی ۱۰ درصد دوده سیلیس به جای سیمان و یا افزودن ۱ درصد نانو سیلیس به ترتیب ۲۰ و ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. افزایش سطح جایگزینی دوده سیلیس بیش از این مقدار، می‌تواند منجر به کاهش نرخ بهبود مقاومت خمشی شود. این کاهش ممکن است به دلیل سطح ویژه بالای این مواد و ماهیت کم آب مخلوط بتن غلتکی نسبت داده شود (Fakhri, 2016; adamu, Mohammed & Liew, 2018). همچنین برخی افزایش اندکی در میزان مقاومت خمشی مخلوط بتن غلتکی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی، به کمک دوده سیلیس را گزارش شده است. به گونه‌ای که با استفاده از ۵ تا ۱۰ درصد دوده سیلیس، افزایش مقاومت خمشی ۱ تا ۵ به همراه داشت. مشاهدات نشان می‌دهد که با افزایش سطح جایگزینی، غلظت سیلیس آمورف افزایش یافته و این امر موجب بهبود مقاومت خمشی می‌شود. از طرفی فعالیت‌های پوزولانی خاکستر بادی مانند سیلیس فعال نبوده و در سنین پایین مقاومت مخلوط‌های حاوی ۲۰ الی ۶۰ درصد از

۳-۲-۴- مقاومت کششی غیرمستقیم

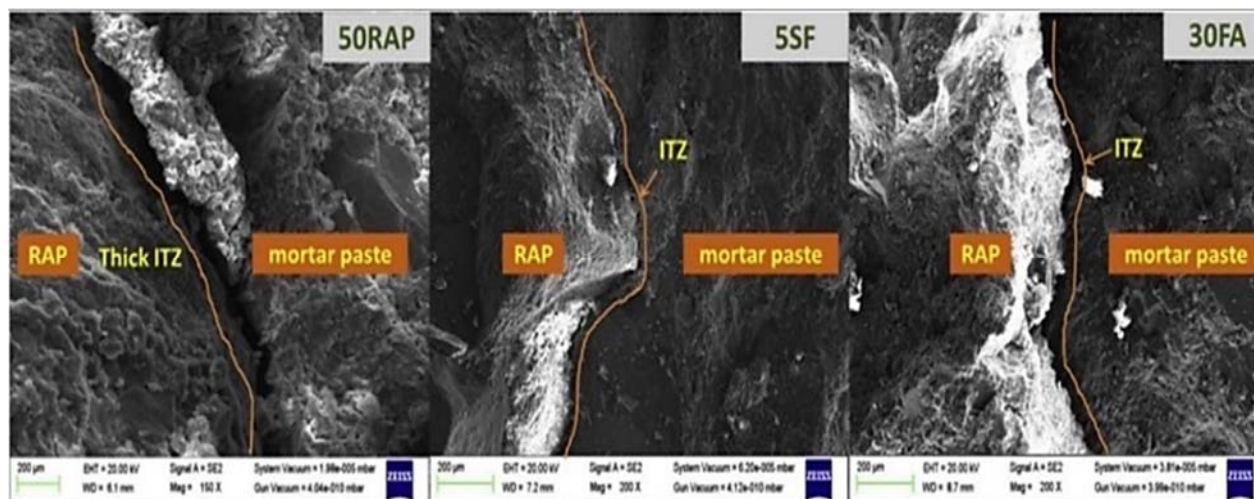
نتایج محققان نشان می‌دهد، زمانی که بخش درشت‌تری از سنگدانه بتنی بازیافتی به نسبت ۱۰۰ درصد استفاده می‌شود مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی، با کاهش تا حدود ۱۸ درصد همراه است. این کاهش، عمدتاً به پیوند سطحی ضعیف بین ملات سیمان و ذرات سنگدانه بتن بازیافتی نسبت داده می‌شود که مقاومت کمتری در برابر تغییر شکل، قبل از رسیدن به حد مقاومت کششی گسیختگی از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، وجود ضایعات سرامیکی در مخلوط روسازی بتن غلتکی حاوی سنگدانه بتنی بازیافتی، موجب کاهش مقاومت کششی گسیختگی تا حدود ۲۳ درصد می‌شود (Lopez-Uceda et al., 2018). همچنین طبق تحقیقات قبلی نشان داده شد، استفاده از خرده‌لاستیک با میزان جایگزینی ۳۰ درصد، موجب کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط روسازی بتن غلتکی تا حدود ۲۳ درصد می‌شود (Meddah, Beddar & Bali, 2014).

به همین ترتیب، استفاده از آسفالت بازیافتی باعث کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط روسازی بتن غلتکی بدون توجه به سنین عمل‌آوری آن می‌شود (Debbarma, Ransinchung & Singh, 2019; Debbarma, Singh & RN, 2019). به عنوان مثال، محققان مشاهده کردند که استفاده از ۱۶ درصد آسفالت بازیافتی درشت‌دانه، می‌تواند موجب کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم تا حدود ۱۶ درصد شود. به طور مشابه، محققان دیگر نشان دادند در استفاده ۱۰۰ درصدی از آسفالت بازیافتی درشت‌دانه، کاهش حدود ۲۶ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم را به همراه دارد. ضمن اینکه وجود لایه قیری که آسفالت بازیافتی را فرا گرفته است، مانع از تشکیل یک پیوند سطحی خوب بین ملات سیمان و سنگ‌دانه‌های آسفالت بازیافتی می‌شود و در نتیجه منجر به کاهش مقاومت بتن می‌شود. همچنین نتایج محققان نشان می‌دهد، استفاده از سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی درشت، کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم بین ۱۳ تا ۳۲ درصد در سطوح مختلف جایگزینی (۳۰ تا ۱۰۰ درصد) را به همراه دارد (Lam, Jaritngam & Le, 2017). برخلاف این موضوع، برخی از محققان دیگر دریافتند که مقاومت کششی غیرمستقیم، زمانی که

سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی درشت به ترتیب به نسبت ۵۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگدانه شود، افزایشی تا حدود ۲۵ و ۳۲ درصد دارد. همچنین، استفاده از ۵۰ درصد سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی ریزدانه می‌تواند باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم تا حدود ۲۵ درصد شود (Rooholamini et al., 2019). دلیل احتمالی این کاهش مقاومت، عمدتاً به افزایش سطح سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی ریز نسبت داده می‌شود که باعث انسجام کمتری می‌شود. بدیهی است که ترکیب سنگدانه بتنی بازیافتی و آسفالت بازیافتی ممکن است منجر به کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم شود. از این رو، مطالعات آزمایشگاهی بیشتر در این باره می‌تواند به درک تأثیر این مواد بازیافتی بر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی کمک شایانی کند (Selvam et al., 2022). نتایج استفاده از مواد پوزولانی نشان‌دهنده افزایش مقاومت کششی مشابه با مقاومت فشاری است. نتایج نشان می‌دهد به ترتیب با جایگزینی ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره کوره آسیاب شده با سیمان، مقاومت کششی نمونه‌های ۹۰ روزه به ترتیب، ۸/۷۵ و ۱۵/۸۲ درصد افزایش پیدا کرد و در طرح‌های حاوی ۶۰ درصد سرباره، میزان افزایش مقاومت به ۱/۶۸ درصد محدود شد (Aghaeipour & Madhkhan, 2017). مدت زمان عمل‌آوری در مخلوط حاوی سرباره کوره نقش مهمی در افزایش مقاومت دارد، در سنین پایین (۳ تا ۷ روز)، مقاومت کششی به دلیل واکنش آهسته ذرات سرباره، کاهش پیدا می‌کند، اما در نمونه‌هایی که شامل ۵۰ درصد سرباره کوره بودند و بیش از ۲۸ روز از تهیه آن‌ها گذشته بود، مقاومت کششی حدود ۵۰ درصد بهبود پیدا کرد (Rao et al, 2016). تحقیقات در مورد مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی خاکستر بادی، نشان می‌دهد، در سطح جایگزینی ۱۵ درصد، مقاومت کششی در نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب حدود ۲۲ و ۱۲ درصد نسبت به مخلوط کنترل بهبود پیدا می‌کند. در حالی که با افزایش سطح جایگزینی، مقاومت کششی به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند (Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013; Atiş et al, 2004). با ادامه این روند واکنش‌های پوزولانی در خاکستر بادی، اختلاف به وجود آمده بین مقاومت مخلوط‌های

درصد دوده سیلیس در مخلوط، مقاومت کششی ۶/۷ تا ۱۳/۳ درصد بهبود پیدا می‌کند (Debbarma et al., 2020). ترکیب ضایعات ساختمانی با دوده سیلیس در مخلوط بتن غلتکی می‌تواند به‌طور مؤثری ضعف‌های مکانیکی و فیزیکی این مصالح سنگی بازیافتی را جبران کند. محققان عنوان کردند که در افزودن ۵ تا ۱۰ درصد دوده سیلیس، در مخلوط‌هایی که به ترتیب ۵۰ و ۷۵ درصد از مصالح سنگی آن‌ها با ضایعات ساختمانی جایگزین شده، کاهش ۱۰/۵ و ۱۷/۲ درصدی مقاومت کششی به میزان ۲/۹ و ۱۰/۸ درصد بهبود یافته است (Tavakoli, Fakharian & de Brito, 2022).

کنترل و مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی را کاهش می‌دهند (Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013). نرخ واکنش پذیری کمتر خاکستر بادی، می‌تواند به دلیل اندازه ذرات بزرگتر و مقدار سیلیس کمتر آن باشد (Khankhaje et al., 2024). دوده سیلیس نسبت به خاکستر بادی به دلیل سطح ویژه بالاتر و برخورداری از ذرات آمورف، ملات سیمانی بهتر و به طبع ناحیه انتقال بین سطحی مستحکم‌تری دارد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مخلوطی که ۵۰ درصد از مصالح سنگی آن را تراشه آسفالتی تشکیل می‌دهد، نشان می‌دهد که ناحیه انتقال بین سطحی در مخلوط حاوی دوده سیلیس نسبت به مخلوط کنترل و مخلوط حاوی خاکستر بادی متراکم‌تر و مستحکم‌تر است (شکل ۳). از این رو برخلاف خاکستر بادی، با استفاده از تنها ۵ تا ۱۰



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه انتقال بین تراشه آسفالت و خمیر سیمان در مخلوط روسازی بتن غلتکی (al., 2020 Debbarma et)

جدول ۳. تاثیر مکمل‌های سیمانی در سطوح مختلف جایگزینی بر خواص مکانیکی مخلوط بتن غلتکی

مرجع	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)			مقاومت کششی (مگاپاسکال)			مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			مقدار سیمان (کیلوگرم بر مترمکعب)	ترکیبات مواد سیمانی (%)	سطوح جایگزین (%)	نوع مکمل سیمانی
	مدت زمان عمل آوری			مدت زمان عمل آوری			مدت زمان عمل آوری						
	۹۰	۲۸	۷	۹۰	۲۸	۷	۹۰	۲۸	۷				
Debbarma et al., 2020	-	-	-	-	۴/۱	-	-	۴۲/۱	۳۴/۴	۳۵۰-۲۹۷	SiO ₂ = ۹۳%	۰	
	-	-	-	-	۴/۶۵	-	-	۴۷/۵	۳۵/۷		CaO = ۲/۵%	۵	
	-	-	-	-	۵/۳۸	-	-	۵۴/۳	۳۷/۱		Al ₂ O ₃ = ۱/۵%	۱۰	
	-	-	-	-	۵/۴۸	-	-	۵۶	۳۸/۴			۱۵	
Debbarma et al., 2020	۴/۲	۳/۸۳	۳/۴	۳	۲/۷۸	۲	۳۲/۶	۲۹/۵	۲۳/۵	۳۵۰-۳۱۵	SiO ₂ = ۹۰/۷۶%	۰	دوده سیلیس (SF)
	۴/۲۴	۳/۹	۳	۳/۲	۲/۸۲	۱/۸	۳۴	۳۱	۲۴/۵		CaO = ۰/۶۳%	۵	
	۴/۴	۳/۹۶	۳/۲	۳/۴	۲/۹۵	۱/۸۷	۳۵/۵	۳۲/۲	۲۵/۷		Al ₂ O ₃ = ۰/۹۶%	۱۰	
Fakhri, 2016	-	۵/۵	۴/۴۵	-	-	-	-	۴۰	۲۹	۲۹۴-۲۶۴	SiO ₂ = ۷/۸۵	۰	
	-	۶/۵	۵/۴۵	-	-	-	-	۵۲	۳۳		CaO = ۱/۳۰%	۱۰	
Atiş et al, 2004	۳/۶۹	۳/۳۱	-	۲/۳۲	۲/۰۴	-	۲۳/۶۴	۲۲/۵۷	-	۲۰۰-۱۱۰	SiO ₂ = ۱۸/۹۵%	۰	خاکستر بادی (FA)
	۳/۶۷	۳/۲	-	۲/۵۸	۲/۴۹	-	۲۸/۹۱	۲۲/۸۹	-		CaO = ۵۱/۲۹%	۱۵	
	۳/۳۵	۳/۰۲	-	۲/۰۱	۱/۹۲	-	۲۳/۲۸	۱۸/۲۰	-		Al ₂ O ₃ = ۷/۵۳%	۳۰	
	۲/۴۳	۲/۱۴	-	۱/۹۲	۱/۱۸	-	۱۹/۵۸	۱۱/۸۸	-			۴۵	
Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013	۵/۱۵	۴/۸۸	۴/۰۲	۴/۳۶	۴/۰۳	۳/۲۷	۵۴	۴۱	۳۳/۸	۲۵۰-۱۰۰	SiO ₂ = ۴۹/۷۰%	۰	
	۵/۵۰	۴/۶۵	۳/۶۰	۴/۲۷	۴/۰۲	۳	۴۸/۱	۳۸/۹	۲۹/۱		CaO = ۱۰/۸۸%	۲۰	
	۵/۳۰	۴/۶۰	۲/۷۱	۳/۹۹	۳/۸۱	۲/۳۳	۴۲/۲	۳۵/۶	۲۱/۸		Al ₂ O ₃ = ۱۷/۰۱%	۴۰	
	۴/۶۶	۴/۲۲	۲/۳۴	۳/۷۰	۳/۵۴	۱/۹۶	۳۹/۵	۳۱/۸	۱۷/۷			۶۰	
Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013	۵/۹۸	۵/۱	-	۲/۹۷	۲/۶۹	-	۴۴/۷۸	۳۴/۴۱	-	۲۸۸-۲۴۰	SiO ₂ = ۳۵/۸۵%	۰	سرباره کوره
	۵/۵۶	۴/۶۱	-	۳/۲۳	۲/۸۲	-	۴۰	۳۴/۰۷	-		CaO = ۳۷/۷۱%	۲۰	
	۶/۱۳	۵/۷۲	-	۳/۴۴	۳/۳۰	-	۴۶/۵۶	۳۵/۳۳	-		Al ₂ O ₃ = ۱۳/۳۹%	۴۰	
	۵/۱۹	۴/۵۶	-	۲/۹۲	۲/۶۰	-	۳۳/۰۴	۲۸/۱۰	-			۶۰	
Rao et al, 2016	۷/۲۰	۶/۸۰	۴/۸۰	۳/۶۰	۳/۱۸	۲/۷۸	۴۹/۵۰	۴۳/۲۰	۲۶/۵۰	۲۶۵-۱۱۲	SiO ₂ = ۳۴/۴۰%	۰	آسیاب شده GGB) (F)
	۷/۵۸	۷/۰۴	۴/۶۸	۴/۵۵	۳/۵۴	۲/۹۱	۵۰/۲۷	۴۳/۷۲	۲۷/۸۴		۱۰		
	۷/۸۱	۷/۴۲	۴/۷۲	۵/۰۵	۳/۹۰	۳/۲۴	۵۲/۱۱	۴۴/۲۸	۲۸/۱۲		۲۰		
	۸/۰۵	۷/۷۰	۴/۹۵	۵/۹۰	۴/۶۱	۳/۴۸	۵۵/۷۰	۴۴/۸۵	۳۰/۴۴		۳۰		
	۸/۲۰	۷/۹۰	۵/۱۰	۶/۲۰	۴/۸۰	۳/۶۰	۵۸/۲۸	۴۵/۱۵	۳۲/۵۰		۴۰		
	۸/۱۱	۷/۶۷	۵/۰۵	۶/۱۰	۴/۵۲	۳/۳۷	۵۶/۰۰	۴۴/۶۱	۳۱/۹۰		۵۰		
۷/۸۲	۷/۱۵	۴/۸۰	۵/۷۱	۳/۷۷	۳/۲۱	۵۴/۱۰	۴۳/۲۷	۳۱/۰۵	۶۰				

۳-۲-۵- مقاومت در برابر سایش

ارزیابی مقاومت سایشی روسازی بتن غلتکی برای ارائه کیفیت سواری مناسب ضروری است. این مقاومت عمدتاً به کیفیت سنگدانه‌ها و مقاومت فشاری بستگی دارد. استفاده از سنگدانه‌های جایگزین با ویژگی‌های مختلف مانند تراکم‌پذیری، جذب آب و بافت، می‌تواند تأثیر زیادی بر مقاومت سایشی داشته باشد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از آسفالت بازیافتی ممکن است باعث افزایش اتلاف جرم در آزمایش سایش شود، با این حال، بافت سطحی آسفالت بازیافتی نقش مهمی در مقاومت سایشی آن ایفا می‌کند (Debbarma, Ransinchung & Singh, 2019; Debbarma, Singh & RN, 2019). به عنوان مثال، استفاده از آسفالت بازیافتی با بافت خشن با مقدار قیر کمتر ممکن است تخریب کمتری در برابر نیروهای ساینده نشان دهد. ضمن اینکه آسفالت بازیافتی با بافت صاف و درصد قیر بالاتر، تخریب بالاتری در برابر نیروهای ساینده به همراه دارد (Debbarma, Ransinchung & Singh, 2019; Debbarma, Singh & RN, 2019). مصالح سنگی بازیافتی مانند تراشه آسفالت و ضایعات ساختمان، به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی ضعیف‌تر نسبت به مصالح سنگی بکر، موجب کاهش مقاومت سایشی بتن می‌شوند. همچنین این مصالح می‌توانند بر ناحیه انتقال بین سطحی خمیر سیمان و مصالح سنگی تأثیر منفی بگذارند. تحقیقات نشان داده‌اند که مقاومت سایشی در مخلوط‌هایی که کاملاً با ضایعات ساختمانی جایگزین شده‌اند، حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. افزودن دوده سیلیس، با بهبود ساختار خمیر سیمان و کیفیت بتن، می‌تواند مقاومت در برابر سایش را افزایش دهد. به طور خاص، با جایگزینی ۱۰ درصد دوده سیلیس به جای مواد سیمانی، مقاومت سایشی ۴۳/۳۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در مخلوط‌هایی که ۳/۴ درصد مصالح سنگی آن با ضایعات ساختمانی جایگزین شده است، استفاده از ۱۰ درصد دوده سیلیس می‌تواند عمق شیار را از ۱۳/۸۵ میلی‌متر به ۷/۲۶ میلی‌متر کاهش دهد. در تحقیق دیگری نشان داده شد که دوده سیلیس در کنار تراشه آسفالت، میزان اتلاف جرم بتن را کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، در مخلوط‌هایی با ۵ و ۱۰ درصد دوده سیلیس و ۵۰ درصد تراشه آسفالت، اتلاف جرم به ترتیب ۱۵ و ۱۸ درصد بهبود یافته است. برخلاف دوده سیلیس،

جایگزینی سیمان پرتلند با ۱۵ و ۳۰ درصد خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت سایشی ۱۴ و ۲۲ درصدی در مقایسه با مخلوط حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت می‌شود. در بتن‌های غلتکی، افزایش سطح جایگزینی سرباره کوره آسیاب شده در سنن پایین (۳ تا ۷ روزگی) باعث افزایش اتلاف جرم می‌شود، اما در سن ۲۸ روزه با افزایش جایگزینی تا ۵۰ درصد، میزان اتلاف جرم کاهش می‌یابد (Tavakoli et al., 2020; Debbarma, 2020; Rao, Sravana & Rao, 2016).

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از مصالح سنگی جایگزین در روسازی بتن غلتکی مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک کند. نتایج تحقیق شامل موارد زیر است. - سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی، به دلیل پوشش قیری، ممکن است موجب کاهش چسبندگی با ملات سیمان و خواص مقاومتی کمتری شوند، ولی استفاده از آن‌ها تا ۵۰ درصد تأثیر زیادی بر مقاومت و تخلخل ندارد. - خواص سنگدانه بتنی بازیافتی به کیفیت منبع بستگی دارد. جایگزینی ۵۰ درصد سنگدانه بتنی بازیافتی در روسازی بتن غلتکی می‌تواند مقاومت کافی فراهم کند. - سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی می‌تواند حداکثر چگالی خشک مخلوط را افزایش دهد، اما به آب اختلاط بیشتری نیاز دارد و باید درصد کلسیم اکسید آزاد آن کمتر از ۱ درصد باشد. - خرده‌لاستیک‌ها به دلیل وزن مخصوص پایین‌تر ممکن است تراکم را کاهش دهند، اما با درصد کم (تا ۵ درصد) موجب بهبود کارایی بتن می‌شوند. - استفاده از مواد پوزولانی به بهبود خواص شیمیایی و فیزیکی بتن غلتکی کمک می‌کند. با بهینه‌سازی میزان پوزولان‌ها، می‌توان مقاومت و دوام بتن را افزایش داد. در نهایت، اگر مصالح جایگزین در نسبت‌های بهینه استفاده شوند، می‌توان روسازی بتن غلتکی با خواص مکانیکی قابل قبول تولید کرد.

۵- پی نوشت ها

- 1- Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP)
- 2- Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)
- 3- Recycled Concrete Aggregates (RCA)
- 4- Mixed Recycled Concrete Aggregates (MRCA)
- 5- Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
- 6- Electric Arc Furnace Steel Slag (EAFSS)
- 7- Superpave gyratory compactor (SGC)

۶- مراجع

- Greene, J., Nazef, A., & Choubane, B. (2011). Thirty-year performance evaluation of two-layer concrete pavement system. *Transportation Research Record*, 2226(1), 21-29.
- Kasu, S. R., Manupati, K., & Muppireddy, A. R. (2020). Investigations on design and durability characteristics of cement treated reclaimed asphalt for base and subbase layers. *Construction and Building Materials*, 252, 119102.
- Singh, S., Ransinchung, G. D., Monu, K., & Kumar, P. (2018). Laboratory investigation of RAP aggregates for dry lean concrete mixes. *Construction and Building Materials*, 166, 808-816.
- Singh, S., Ransinchung, G. D., & Monu, K. (2019). Sustainable lean concrete mixes containing wastes originating from roads and industries. *Construction and Building Materials*, 209, 619-630.
- Hesami, S., Modarres, A., Soltaninejad, M., & Madani, H. (2016). Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Construction and Building Materials*, 111, 625-636.
- Chan, S., Lane, B., Kazmierowski, T., & Lee, W. (2011). Pavement preservation: A solution for sustainability. *Transportation Research Record*, 2235(1), 36-42.
- Mohammed, M. S., ElKady, H., & Abdel-Gawwad, H. A. (2021). Utilization of
- Aghaeipour, A., & Madhkhan, M. (2020). Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP)—a review. *Road Materials and Pavement Design*, 21(7), 1775-1798.
- Shamran, A. S., & Abbas, Z. K. (2024). Fabricating a Sustainable Roller Compacted Concrete Containing Recycled Waste Demolished Materials: A Literature Review. *Journal of Engineering*, 30(03), 15-29.
- Harrington, D., Abdo, F., Ceylan, H., Adaska, W., Hazaree, C., & Bektas, F. (2010). Guide for roller-compacted concrete pavements.
- Khayat, K. H., & Libre, N. A. (2014). Roller compacted concrete: field evaluation and mixture optimization.
- ACI, Guide to Roller Compacted Concrete Pavements, Am. Concr. Inst. ACI-327R (2014) Farmington Hills, USA.
- Lee, S. W., Cho, Y. H., & Park, C. (2014). Mechanical performance and field application of low cement based concrete under compaction energy. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18, 1053-1062.
- Chhabra, R. S., Ransinchung, G. D., & Islam, S. S. (2021). Performance analysis of cement treated base layer by incorporating reclaimed asphalt pavement material and chemical stabilizer. *Construction and Building Materials*, 298, 123866.

- Construction and Building Materials*, 130, 171-181.
- Brand, A. S., & Roesler, J. R. (2017b). Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part II—Cement-asphalt chemical interactions. *Construction and Building Materials*, 130, 182-192.
- Singh, S., Monu, K., & Ransinchung Rn, G. D. (2020). Laboratory investigation of RAP for various layers of flexible and concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(14), 1780-1793.
- Shi, X., Mirsayar, M., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2019). Characterization of two-parameter fracture properties of portland cement concrete containing reclaimed asphalt pavement aggregates by semicircular bending specimens. *Cement and Concrete Composites*, 95, 56-69.
- Fakhri, M., & Amoosoltani, E. (2017). The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 137, 470-484.
- Fakhri, M., Amoosoltani, E., Farhani, M., & Ahmadi, A. (2017). Determining optimal combination of roller compacted concrete pavement mixture containing recycled asphalt pavement and crumb rubber using hybrid artificial neural network—genetic algorithm method considering energy absorbency approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(11), 945-955.
- Fakhri, M., Amoosoltani, E., & Aliha, M. R. M. (2017). Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Engineering Fracture Mechanics*, 180, 43-59.
- Rooholamini, H., Sedghi, R., Ghobadipour, B., & Adresi, M. (2019). Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 211, 88-98.
- construction and demolition waste and synthetic aggregates. *Journal of Building Engineering*, 43, 103207.
- Nodehi, M., & Mohamad Taghvaei, V. (2022). Sustainable concrete for circular economy: a review on use of waste glass. *Glass Structures & Engineering*, 7(1), 3-22.
- Nodehi, M., & Aguayo, F. (2021). Ultra high performance and high strength geopolymer concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1), 34.
- Nodehi, M. (2021). A comparative review on foam-based versus lightweight aggregate-based alkali-activated materials and geopolymer. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(4), 231.
- Nodehi, M., & Taghvaei, V. M. (2022). Alkali-activated materials and geopolymer: a review of common precursors and activators addressing circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, 2(1), 165-196.-
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2018). Sustainability assessment for portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 192, 569-581.
- Selvam, M., Debbarma, S., Singh, S., & Shi, X. (2022). Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements—A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 317, 125838.
- Piao, Z., Mikhailenko, P., Kakar, M. R., Bueno, M., Hellweg, S., & Poulidakos, L. D. (2021). Urban mining for asphalt pavements: A review. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124916.
- Safiuddin, M., Alengaram, U. J., Rahman, M. M., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z. (2013). Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(6), 796-810.
- Brand, A. S., & Roesler, J. R. (2017a). Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part I—The interfacial transition zone.

- Williams, S. G. (2013). Comparison of the superpave gyratory and proctor compaction methods for the design of roller-compacted concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2342(1), 106-112.
- Sengun, E. M. İ. N., Alam, B., Yaman, I. O., & Ceylan, H. (2021). A new evaluation of the fatigue design criteria of roller compacted concrete (RCC) pavements. *Construction and Building Materials*, 289, 123195.
- Şengün, E., Alam, B., Shabani, R., & Yaman, I. O. (2019). The effects of compaction methods and mix parameters on the properties of roller compacted concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 228, 116807.
- LaHucik, J., & Roesler, J. (2017). Field and laboratory properties of roller-compacted concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2630(1), 33-40.
- Fardin, H. E., & Santos, A. G. D. (2020). Roller compacted concrete with recycled concrete aggregate for paving bases. *Sustainability*, 12(8), 3154.
- Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Ayuso, J., & López, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates. *Road Materials and Pavement Design*, 19(1), 36-55.
- Fakhri, M. (2016). The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 129, 521-530.
- Ashteyat, A., Obaidat, A., Kirgiz, M., & AlTawallbeh, B. (2022). Production of roller compacted concrete made of recycled asphalt pavement aggregate and recycled concrete aggregate and silica fume. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-16.
- Lam, M. N. T., Jaritngam, S., & Le, D. H. (2017). Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix
- Tu, T. Y., Chen, Y. Y., & Hwang, C. L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 943-950.
- Lopez-Uceda, A., Ayuso, J., Jiménez, J. R., Galvín, A. P., & Del Rey, I. (2020). Feasibility study of roller compacted concrete with recycled aggregates as base layer for light-traffic roads. *Road Materials and Pavement Design*, 21(1), 276-288.
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Liu, K. W. (2017). Mix design formulation and evaluation of portland cement concrete paving mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 152, 756-768.
- Dubey, P., Paswan, S., Sukhija, M., & Saboo, N. (2020). Assessing the effect of reclaimed asphalt pavement on mechanical properties of dry-lean concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(11), 04020348.
- Singh, S., Ransinchung RN, G. D., & Kumar, P. (2018). Laboratory investigation of concrete pavements containing fine RAP aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(2), 04017279.
- Singh, M., Adhikari, A., Maurya, M. K., Srivastava, A., & Chhabra, R. S. (2020). Feasibility study on use of washed-reclaimed asphalt as a partial replacement of natural aggregate in dry-lean concrete as base course for rigid pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(9), 04020266.
- Abu-Eishah, S. I., El-Dieb, A. S., & Bedir, M. S. (2012). Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Construction and Building Materials*, 34, 249-256.
- Palankar, N., Shankar, A. R., & Mithun, B. M. (2016). Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 129, 437-448.

portland cement concrete containing reclaimed asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 22(1), 59-81.

-Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2019). Long-term performance evaluation of concrete pavements containing recycled concrete aggregate in Oklahoma. *Transportation Research Record*, 2673(5), 429-442.

-Modarres, A., & Hosseini, Z. (2014). Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design*, 64, 227-236.

-Settari, C., Debieb, F., Kadri, E. H., & Boukendakdji, O. (2015). Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 617-621.

-Debbarma, S., & Ransinchung, G. D. (2021). Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates—state of the art review. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125078.

-Boussetta, I., El Euch Khay, S., & Neji, J. (2020). Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(11), 1729-1743.

-Ferrebee, E. C., Brand, A. S., Kachwalla, A. S., Roesler, J. R., Gancarz, D. J., & Pforr, J. E. (2014). Fracture properties of roller-compacted concrete with virgin and recycled aggregates. *Transportation Research Record*, 2441(1), 128-134.

-Mohammed, B. S., & Adamu, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 159, 234-251.

-Shafigh, P., Hashemi, M., Nam, B. H., & Koting, S. (2020). Optimum moisture content in

design and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 154, 482-495.

-Debbarma, S., Ransinchung, G. D., & Singh, S. (2019). Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 199, 508-525.

-Debbarma, S., Singh, S., & RN, G. R. (2019). Laboratory investigation on the fresh, mechanical, and durability properties of roller compacted concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Transportation Research Record*, 2673(10), 652-662.

-Hosseinnezhad, H., Hatungimana, D., & Ramyar, K. (2021). Mechanical properties of roller compacted concrete containing recycled concrete aggregate. *Revista de la construcción*, 20(2), 277-290.

-Meddah, A., Beddar, M., & Bali, A. (2014). Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 72, 187-192.

-Dong, Q., Wang, G., Chen, X., Tan, J., & Gu, X. (2021). Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124447.

-Toffolo, R. V. M., Moro, T. K., Santos, D. H., Costa, L. C. B., Mendes, J. C., & Peixoto, R. A. F. (2021). Roller-compacted concrete pavements produced entirely with steelmaking slag aggregates. *ACI Materials Journal*, 118(4), 51-64.

-Lam, M. N. T., Le, D. H., & Jaritngam, S. (2018). Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash. *Construction and Building Materials*, 191, 912-922.

-Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., & Huang, K. (2021). Performance evaluation of jointed plain concrete pavement made with

- Mohammed, B. S., Awang, A. B., San Wong, S., & Nhavene, C. P. (2016). Properties of nano silica modified rubbercrete. *Journal of Cleaner Production*, 119, 66-75.
- Lyu, K., Garboczi, E. J., She, W., & Miao, C. (2019). The effect of rough vs. smooth aggregate surfaces on the characteristics of the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Composites*, 99, 49-61.
- Wu, C. R., Hong, Z. Q., Zhang, J. L., & Kou, S. C. (2020). Pore size distribution and ITZ performance of mortars prepared with different bio-deposition approaches for the treatment of recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 111, 103631.
- Jalilifar, H., & Sajedi, F. (2021). Microstructural analysis of recycled concretes made with recycled coarse concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 267, 121041.
- Khakbaz, M., Kamboozia, N., Mohammad Aliha, M. R., & Taheriyani, A. R. (2024). A review of the application of fracture mechanics in investigating the behavior of flexible and rigid pavements. *Road*, 32(121), 115-136.
- Kong, D., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J., & Jiang, J. (2010). Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 701-708.
- Khankhaje, E., Kim, T., Jang, H., Kim, C. S., Kim, J., & Rafieizonooz, M. (2024). A review of utilization of industrial waste materials as cement replacement in pervious concrete: An alternative approach to sustainable pervious concrete production. *Heliyon*.
- Ameri, M., Kamboozia, N., & Khakbaz, M. (2023). A review of Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP). *Road*, 32(119), 169-169.
- roller-compacted concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(14), 1769-1779.
- Debbarma, S., & Ransinchung, G. D. (2021). Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates—state of the art review. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125078.
- Abut, Y., & Yildirim, S. T. (2022). An investigation on the durability properties of RAP-containing roller compacted concrete pavement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(2), 802-818.
- Salimi, A., Kamboozia, N., & Aliha, M. R. M. (2024). Experimental Investigation of the self-healing capability of Roller-Compacted Concrete (RCC) containing epoxy-filled glass tubes through fracture properties. *Case Studies in Construction Materials*, e03369.
- Zhang, W., Gong, S., & Zhang, J. (2018). Effect of rubber particles and steel fibers on frost resistance of roller compacted concrete in potassium acetate solution. *Construction and Building Materials*, 187, 752-759.
- Mukhopadhyay, A., & Shi, X. (2019, March). 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*. 187-206.
- Shi, X., Grasley, Z., Hogancamp, J., Brescia-Norambuena, L., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2020). Microstructural, mechanical, and shrinkage characteristics of cement mortar containing fine reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(4), 04020050.
- Ossola, G., & Wojcik, A. (2014). UV modification of tire rubber for use in cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 52, 34-41.

- Tavakoli, D., Dehkordi, R. S., Divandari, H., & de Brito, J. (2020). Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂. *Construction and Building Materials*, 249, 118747.
- Debbarma, S., Ransinchung, G. D., Singh, S., & Sahdeo, S. K. (2020). Utilization of industrial and agricultural wastes for productions of sustainable roller compacted concrete pavement mixes containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104504.
- Rao, S. K., Sravana, P., & Rao, T. C. (2016). Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS. *Construction and building materials*, 114, 925-933.
- Zheng, W., Shui, Z., Gao, X., Lian, J., Xu, Z., & Wang, Y. (2023). Optimization of concrete mix design based on three-level separation distance of particles. *Journal of Building Engineering*, 70, 106479.
- Singh, S., Shintre, D., Ransinchung RN, G. D., & Kumar, P. (2018). Performance of fine RAP concrete containing flyash, silica fume, and bagasse ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018233.
- BAV. RamKumar, krishna. (2022). Performance evaluation of sustainable materials in roller compacted concrete pavements: A state of art review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1), 78.
- Debbarma, S., Ransinchung RN, G. D., & Singh, S. (2021). Suitability of various supplementary cementitious admixtures for RAP inclusive RCCP mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(12), 1568-1581.
- Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K. (2013). Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Construction and Building Materials*, 38, 356-364.
- Chhorn, C., Hong, S. J., & Lee, S. W. (2018). Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(3), 215-223.
- Tavakoli, D., Fakharian, P., & de Brito, J. (2022). Mechanical properties of roller-compacted concrete pavement containing recycled brick aggregates and silica fume. *Road Materials and Pavement Design*, 23(8), 1793-1814.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244-1256.
- Aghaeipour, A., & Madhkhan, M. (2017). Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability. *Construction and Building Materials*, 141, 533-541.
- Vahedifard, F., Nili, M., & Meehan, C. L. (2010). Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2528-2535.
- Firdous, R., Stephan, D., & Djobo, J. N. Y. (2018). Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 190, 1251-1263.
- Tailby, J., & MacKenzie, K. J. (2010). Structure and mechanical properties of aluminosilicate geopolymer composites with Portland cement and its constituent minerals. *Cement and Concrete Research*, 40(5), 787-794.
- Ayub, M., Othman, M. H. D., Khan, I. U., Hubadillah, S. K., Kurniawan, T. A., Ismail, A. F., ... & Jaafar, J. (2021). Promoting sustainable cleaner production paradigms in palm oil fuel ash as an eco-friendly cementitious material: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126296.

- Khankhaje, E., Kim, T., Jang, H., Kim, C. S., Kim, J., & Rafieizonooz, M. (2024). A review of utilization of industrial waste materials as cement replacement in pervious concrete: An alternative approach to sustainable pervious concrete production. *Heliyon*.
- Mohsen, M. O., Aburumman, M. O., Al Diseet, M. M., Taha, R., Abdel-Jaber, M. T., Senouci, A., & Abu Taqa, A. (2023). Fly ash and natural pozzolana impacts on sustainable concrete permeability and mechanical properties. *Buildings*, 13(8), 1927.
- Singh, S., & Ransinchung, G. D. (2018). Durability properties of pavement quality concrete containing fine RAP. *Advances in Civil Engineering Materials*, 7(1), 271-290.
- Lam, M. N. T., Le, D. H., & Jaritngam, S. (2018). Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash. *Construction and Building Materials*, 191, 912-922.
- Luo, S., Bai, T., Guo, M., Wei, Y., & Ma, W. (2022). Impact of freeze-thaw cycles on the long-term performance of concrete pavement and related improvement measures, A review. *Materials*, 15(13), 4568.
- Adamu, M., Mohammed, B. S., & Liew, M. S. (2018). Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 171, 521-538.
- Feng, X., Garboczi, E. J., Bentz, D. P., Stutzman, P. E., & Mason, T. O. (2004). Estimation of the degree of hydration of blended cement pastes by a scanning electron microscope point-counting procedure. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1787-1793.
- Atiş, C. D., Sevim, U. K., Özcan, F., Bilim, C., Karahan, O. K. A. N., Tanrikulu, A. H., & Ekşi, A. (2004). Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash. *Materials Letters*, 58(9), 1446-1450.
- Aitcin, P. C., & Neville, A. (2003). How the water-cement ratio affects concrete strength. *Concrete International*, 25(8), 51-58.
- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties, A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434.

Comprehensive Review of the Application of Alternative Materials in Roller Compacted Concrete Pavements (RCCP) with a Sustainable Development Approach

*Mohammad Reza Khakbaz, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering,
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Fahim Faryabi, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science
and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Sourosh Ghaderi, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Iran University
of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Mahmmoud Ameri, Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science
and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

E-mail: Sheikh@iust.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Given the increasing demand for durable and sustainable pavements, Roller Compacted Concrete (RCC) has emerged as a preferred option for heavy traffic applications. Due to its high strength, long durability, and low maintenance costs, RCC is recognized as one of the best choices for roads and port areas with heavy traffic. Moreover, in light of growing concerns about the environmental impacts of industrial activities and construction, the use of alternative materials in RCC pavements has gained attention as an effective strategy to reduce environmental harm and enhance the sustainability of projects. This paper provides a comprehensive review of the application of alternative materials in RCC pavements, with a focus on environmental issues and sustainable development. The findings of this study indicate that the use of recycled aggregates can improve performance and reduce costs, and when these alternative materials are used in optimal proportions, RCC pavements with acceptable mechanical properties can be produced.

Keywords: Roller Compacted Concrete, Alternative Materials, Recycled Asphalt, Sustainable Development, Environment