

## بررسی اثر سرباره فولاد و مصالح خرده آسفالتی بر خصوصیات مکانیکی و آلاینده‌گی روسازی بتن غلتکی

محسن عموزاده عمرانی\*، گروه عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران  
مهرابه حصیرچیان، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: omrani@iausk.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

### چکیده

در سال‌های اخیر، به دلیل هزینه‌های زیاد ساخت روسازی و ملاحظات زیست‌محیطی، از مصالح ضایعاتی و بازیافتی مختلفی در مخلوط‌های بتنی و بتن غلتکی استفاده شده است. این پژوهش، به بررسی خصوصیات مکانیکی و زیست‌محیطی بتن غلتکی حاوی سرباره فولاد به عنوان محصول جانبی و پسماند صنعت فولاد و مصالح خرده آسفالتی به عنوان پسماند صنعت ساخت راه جهت جایگزینی بخشی یا تمام مصالح سنگی در روسازی راه‌ها می‌پردازد. بدین منظور، آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. آزمایش خمش سه نقطه‌ای جهت به دست آوردن مقاومت خمشی، چقرمگی و قابلیت جذب انرژی استفاده شد. همچنین، آزمایش سایش کانتابرو و آزمایش تراوش مواد آلاینده روی نمونه های ۲۸ روزه انجام شد. نتایج نشان داد که جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با سرباره فولاد و مصالح خرده آسفالتی باعث کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی روسازی بتن غلتکی می‌شود. در این میان، تأثیر مصالح خرده آسفالتی در کاهش خصوصیات مکانیکی بارزتر است. با افزایش مقدار سرباره فولاد و مصالح خرده آسفالتی، علی‌رغم کاهش در میزان بار حداکثر، میزان چقرمگی و قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش سرباره فولاد، مقاومت سایشی مخلوط بتن غلتکی افزایش می‌یابد. همچنین، بر اساس نتایج این تحقیق، با جایگزینی تا ۵۰٪ مصالح سنگی طبیعی با سرباره فولاد یا ترکیب سرباره فولاد و مصالح خرده آسفالتی، حداقل معیارهای قابل قبول مطابق استانداردهای مربوطه حاصل شد. نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد و ۲۵٪ مصالح خرده آسفالتی جایگزین مصالح سنگی طبیعی، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب تا ۲۴٪، ۳۴٪ و ۲۱٪ کاهش و چقرمگی را تا ۱۳٪ افزایش داد. بدین ترتیب، مصالح ضایعاتی استفاده شده در این پژوهش، به دلیل نتایج رضایت‌بخش، اثرات زیست‌محیطی مثبت و صرفه اقتصادی، قابلیت استفاده در بتن غلتکی را دارا هستند.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتن غلتکی، سرباره فولاد، مصالح خرده آسفالتی، خصوصیات مکانیکی، تراوش مواد آلاینده

## ۱. مقدمه

بهره‌برداری سریع از جاده را داراست و می‌تواند با تجهیزات آسفالت پخش و متراکم شود (بری، ۲۰۰۱؛ لویز یوسدا و همکاران، ۲۰۱۶؛ ابات و همکاران، ۲۰۱۷). در مقایسه با روسازی بتنی معمولی، روسازی بتن غلتکی دارای مزیت سرعت بیشتر اجراست. روش ساخت سازگار با محیط‌زیست آن، علاوه بر اقتصادی بودن، باعث کاهش تولید دی‌اکسید کربن می‌شود (کورتر و ایتون، ۱۹۹۱؛ بیلی و همکاران، ۲۰۱۵). سطح روسازی حاصل به اندازه یک رویه بتن سیمانی متداول صاف نیست. بنابراین، استفاده متداول از بتن غلتکی برای ساخت روسازی در مناطق صنعتی است، که سرعت ترافیک کندتر است و نیاز به آسفالت سفت و بادوام است (هلستد، ۲۰۰۹). تحقیقات روی روسازی بتن غلتکی در دهه ۸۰ میلادی آغاز شد و اولین قطعه راه آزمایشی در سال ۱۹۸۲ ساخته شد. در ابتدا، روسازی‌ها با این محدودیت روبرو می‌شدند که بتن غلتکی، روسازی باکیفیت بالا ایجاد نمی‌کرد. اما امروزه، با توسعه فناوری و پیشرفت فنی دستگاه‌ها و غلتک‌های متراکم کننده، فرصت مناسبی برای توسعه روسازی‌های بتن غلتکی ایجاد شده است (ACI 207.5R-99، ۲۰۰۴).

## ۲. مطالعات پیشین

امروزه، به دلایل زیست‌محیطی و با توجه به کاهش منابع طبیعی، بازیافت مواد زاید و استفاده مجدد از آنها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. آلودگی محیط‌زیست ناشی از توسعه صنعتی در آینده، استفاده از مواد بازیافتی و ضایعات را اجتناب ناپذیر می‌کند. در سال‌های اخیر، مواد بازیافتی و ضایعاتی زیادی در مخلوط‌های بتنی معمولی و بتن غلتکی به‌کار رفته است. کمک به حفظ و نگهداری منابع غیرقابل جایگزین، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و بازیابی انرژی‌های صرف شده طی تولید این ضایعات، از جمله اهداف مورد نظر در کاربرد این مواد به شمار می‌رود. مصالح بازیافتی

موضوع زیرساخت‌های حمل و نقل برای توسعه اقتصادی و اجتماعی در سطح منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی بسیار مهم است. عنصر اصلی زیرساخت حمل و نقل، روسازی است، که می‌تواند با هدف‌های مختلف، صلب یا انعطاف‌پذیر باشد (بنواده و همکاران، ۲۰۱۷). هر دو نوع روسازی، مزایا و معایبی از نقطه نظر انتقال بارهای ترافیکی دارند. روسازی بتنی برای ساخت راه‌های با حجم ترافیک زیاد، فرودگاه‌ها، تونل‌ها، پل‌ها، توقفگاه‌های روباز، محوطه‌های روباز و انواع دیگر کف‌سازی‌ها به‌کار می‌رود (بنواده و همکاران، ۲۰۱۷). امروزه با پیشرفت علم روسازی، حصول معیارهای مهمی، از جمله افزایش عمر رویه‌ها، افزایش مشخصات فنی، داشتن صرفه اقتصادی، در نظر گرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی و رقابت با سایر انواع رویه‌ها مد نظر می‌باشد.

بتن غلتکی (RCC)<sup>۱</sup> عبارت است از مخلوط سفت و نسبتاً خشکی از سنگدانه‌ها، ماسه با دانه‌بندی توپر، مواد سیمانی و آب که در مخلوط‌کن بتن مخلوط شده و همگن می‌گردد. مخلوط تولید شده دارای کارایی و ظاهر مشابه با مخلوط شن نمدار است. این مخلوط توسط کامیون‌ها یا نقاله‌ها حمل می‌شود و توسط فینیشر یا پخش‌کننده‌های اصلاح شده مخصوص، در لایه زیرین پخش و توسط غلتک‌های ارتعاشی متراکم می‌شود (تیابجی و همکاران، ۱۹۹۵؛ ACI 207.5R-99، ۲۰۰۴). از آنجا که این نوع بتن از آب و سیمان کمتری نسبت به بتن معمولی برخوردار است، دارای خواص بتن با اسلامپ صفر است. این بتن یک گزینه جایگزین مهم برای ساخت و ساز در راستای سیاست‌های حمل و نقل بسیاری از کشورهای پیشرفته شده است، زیرا حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد صرفه اقتصادی در مقایسه با بتن معمولی به دلایلی از جمله میزان سیمان کمتر، عدم استفاده از میلگرد، فاصله بیشتر درزها، پخش بدون قالب‌بندی و

<sup>۱</sup> - Rolled Compacted Concrete

قالب سه مخلوط به صورت جایگزینی در بخش درشت‌دانه، جایگزینی در بخش ریزدانه و جایگزینی در هر دو بخش، استفاده شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم نشان‌دهنده کاهش مقاومت در مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بود. پژوهش مشابهی در دانشگاه فلوریدا در رابطه با افزودن خرده آسفالت به بتن معمولی انجام شد. خرده آسفالت با درصدهای مختلف صفر، ۲۰، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ به مخلوط بتن معمولی اضافه گردید. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کاهش در مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصد خرده آسفالت بود. میزان کاهش مقاومت خمشی کمتر از مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم بود (حسینی و همکاران، ۲۰۰۸). فخری و عموسلطانی (۲۰۱۷) نشان دادند که استفاده از خرده آسفالت باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتن غلتکی شد؛ به ویژه هنگامی که میزان مصالح خرده آسفالتی بیش از ۵۰٪ باشد. این رفتار، با چسبندگی کمتر بین ملات سیمان و دانه‌های مصالح خرده آسفالت توجیه شده است. چسبندگی بین مصالح سنگی و ماتریس سیمان تحت تأثیر منفی حضور سنگدانه‌های مصالح خرده آسفالتی در مخلوط‌های بتن غلتکی است و این می‌تواند کاهش مشاهده شده در مقاومت آنها را توضیح دهد (بوستا و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، باید در استفاده از مصالح خرده آسفالتی برای روسازی‌های بتن غلتکی توجه زیادی شود، تا حداقل مشخصات لازم برای روسازی‌های بتنی حفظ گردد. استفاده از هر بخشی از مصالح خرده آسفالتی (ریزدانه، درشت‌دانه یا ترکیب هر دو) می‌تواند مقاومت فشاری، کششی و خمشی مخلوط بتن غلتکی را در تمام زمان‌های عمل‌آوری تا حد زیادی کاهش دهد. با این حال، مخلوط حاوی مصالح خرده آسفالتی ریزدانه، خصوصیات مقاومتی بهتری را نسبت به مخلوط حاوی

به عنوان جایگزین سنگدانه‌های ریز و درشت و نیز به عنوان افزودنی‌های سیمانی استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، بتن خرد شده، خرده آسفالت بازیافتی (RAP)<sup>۱</sup> و شیشه‌های خرد شده دورریز، از جمله مهمترین مواد پسماند بازیافت شده مورد استفاده به عنوان سنگدانه‌های ریز و درشت در روسازی‌های بتنی هستند.

استفاده از مصالح با کیفیت کمتر یا مصالح بازیافتی نه تنها یک راه‌حل مقرون به‌صرفه‌تر می‌باشد، بلکه می‌تواند اثرات منفی زیست‌محیطی بتن غلتکی را نیز کاهش دهد. پژوهشی که در زمینه بررسی نقش خرده بتن بازیافتی راه به عنوان سنگدانه در بتن غلتکی انجام شده، نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب سنگدانه‌های بازیافتی و قابل استفاده بودن این مصالح در بتن غلتکی است (کورارد و همکاران، ۲۰۱۰). مداح و همکاران (۲۰۱۴) امکان استفاده از لاستیک خرد شده را در روسازی بتن غلتکی بررسی کردند. آنها دریافتند که مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی ساخته شده با سنگدانه‌های لاستیکی، در صورت اصلاح زبری سطوح لاستیکی، می‌تواند ۱۱ تا ۲۸ درصد بهبود یابد؛ در حالی که مقاومت کششی می‌تواند ۱۵ تا ۲۰ درصد بهبود یابد. همچنین، ایشان در پژوهشی دریافتند که با وجود لاستیک، روسازی بتن غلتکی از خاصیت انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار می‌شود. عیب اصلی استفاده از لاستیک، کاهش خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی بود (مداح و همکاران، ۲۰۱۷).

استفاده از خرده آسفالت در تهیه مخلوط‌های بتنی می‌تواند مقدار مصرف مصالح جدید را کاهش دهد و منجر به صرفه‌جویی در مصرف سرمایه و منابع طبیعی گردد. هوانگ و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی تأثیر استفاده از خرده آسفالت در مخلوط‌های بتنی معمولی پرداخته اند. در این پژوهش، به جای خرده آسفالت بازیافتی، از خرده آسفالت مصنوعی و پیر شده در آزمایشگاه و در

<sup>۱</sup> - Reclaimed asphalt pavement

با توجه به سیلیس آمورف از خاصیت پوزولانی برخوردار است. سرباره از آهک، سیلیس، آلومین و مقادیری اکسیدهای آهن، اکسید منیزیم و اکسیدهای قلیایی تشکیل شده است. هر ساله ۲۵۰ میلیون کیلوگرم سرباره در اصفهان تولید می‌شود، که حاوی مواد و ترکیبات با ارزشی مانند اکسید کلسیم، اکسید منیزیم، آهن، فسفر، منگنز و سیلیسیم می‌باشد. این مواد در حال حاضر بدون استفاده می‌ماند، که علاوه بر محدودیت‌های فیزیکی، احتمالاً خطرات بالقوه زیست‌محیطی را نیز در بر دارد. بنابراین، در صورت استفاده از این مواد می‌توان تا اندازه‌ای از هزینه‌های تحمیلی جهت نگهداری و انتقال آنها کاست.

تحقیقی که در مورد مصالح بازیافتی حاصل از سرباره کنورتر کارخانه ذوب آهن به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های مخلوط بتن غلتکی انجام شد، نشان داد که جایگزینی ۲۵ درصد این مواد باعث بهبود خواص مقاومتی بتن غلتکی شده و افزایش بیشتر در درصد جایگزینی سرباره باعث کاهش مقاومت گردید. بر مبنای نتایج حاصل شده در تحقیق فوق، و با توجه به قیمت ارزانتر سرباره نسبت به سنگدانه طبیعی، استفاده از سرباره موجب کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود. در ضمن، استفاده از ترکیب ۱۰٪ سرباره و ۱۵٪ پودر سنگ آهک جایگزین سیمان، ضمن اقتصادی کردن طرح مخلوط، سبب افزایش دوام بتن می‌شود. در این تحقیق، به-کارگیری چنین ترکیبی از مواد سیمانی، برای ساخت بتن-های در مجاورت یون سولفات و از جمله ابنیه مسیر راه و پایه‌های پل توصیه شده است (مستوفی نژاد و نظری منفرد، ۱۳۸۵). در پژوهشی دیگر، با افزایش نسبت مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی به عنوان درشت‌دانه، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیک روسازی بتن غلتکی در تمامی زمان‌های عمل‌آوری، در مقایسه با نمونه‌های شاهد، کمی کاهش یافت؛ در حالی که مقاومت در برابر سایش افزایش یافت. بتن غلتکی حاوی ۱۰٪ سرباره فولاد به عنوان جایگزین درشت‌دانه،

مصالح خرده آسفالتی درشت‌دانه و مخلوط حاوی مصالح خرده آسفالتی ترکیبی نشان می‌دهد. این موضوع برخلاف تصور عمومی است (دبارما و سینگ، ۲۰۱۹). همچنین، وجود مصالح خرده آسفالتی می‌تواند مقاومت چقرمگی مخلوط بتن غلتکی را افزایش دهد. بدین ترتیب، ظرفیت تحمل بار پیش از گسیختگی و شکست در روسازی افزایش می‌یابد (دبارما و همکاران، ۲۰۱۹). در ضمن، تا ۵۰٪ از مصالح سنگی طبیعی را می‌توان با بخشی از مصالح خرده آسفالتی (درشت‌دانه یا ریزدانه) جایگزین کرد، تا مخلوط بتن غلتکی به عنوان لایه سطحی روسازی مورد استفاده قرار گیرد. زیرا این مخلوط‌ها مقاومت کافی در برابر سایش ناشی از حرکت وسایل نقلیه را دارند (دبارما و سینگ، ۲۰۱۹).

بتن غلتکی ترکیبی با لاستیک، کاهش مقاومت بیشتری را نسبت به خرده آسفالت از خود نشان می‌دهد، که این می‌تواند از مزیت‌های خرده آسفالت نسبت به خرده لاستیک باشد. مزیتی که اضافه کردن خرده لاستیک به بتن معمولی دارد، افزایش بیشتر خاصیت جذب انرژی در بتن است. بدین ترتیب، در قیاس با لاستیک، خرده آسفالت شانس بیشتری برای جایگزینی سنگدانه در مخلوط بتنی، به‌ویژه در مقادیر بیش از ۱۰٪ نسبت به وزن کل مخلوط دارد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۴). فخری و همکاران (۲۰۱۷)، رفتار ترک خوردگی مخلوط بتن حاوی مصالح خرده آسفالتی و خرده لاستیک را بررسی کردند. به طور کلی، مشخص شد که با افزایش مقدار سیمان از ۱۲ درصد به ۲۰ درصد، چقرمگی شکست همه مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. مخلوط‌های حاوی خرده لاستیک، مقادیر چقرمگی شکست بیشتری را در مقایسه با مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی نشان می‌دهند.

ضعف در مشخصات مکانیکی بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالتی در صورت جایگزینی بخشی از آن با مصالح دیگر می‌تواند قابل حل باشد. سرباره کوره فولاد، محصول جانبی صنعت آهن و فولاد می‌باشد، که

طبیعت و همچنین استفاده از سرباره کارخانه‌های فولادسازی، که حجم انبوهی را در کارخانه‌ها به خود اختصاص می‌دهد، به عنوان جایگزینی مناسب برای سنگدانه در بتن، علاوه بر حفظ محیط‌زیست، باعث کاهش استفاده از منابع طبیعی شن و ماسه می‌شود. همچنین، بررسی خواص مکانیکی و زیست‌محیطی بتن غلتکی با افزودن توأمان خرده آسفالت و سرباره فولاد و بررسی درصدهای بهینه مصالح و تحلیل خصوصیات بهینه آنها یک رویکرد جدید خواهد بود.

### ۳. مشخصات مصالح و طرح اختلاط

مصالح اصلی مورد استفاده در این پژوهش شامل مصالح سنگی، سیمان، خرده آسفالت بازیافتی، سرباره فولاد و آب است. مصالح سنگی مصرفی در این مطالعه از نوع شکسته بوده است. مشخصات سنگدانه‌های ریز و درشت طبق روش‌های آزمایش C3، C127 و C128 از استاندارد ASTM تعیین شده است. سرباره فولاد ترکیبی غیرفلزی است که دارای سیلیکات‌های کلسیم، فریت‌های کلسیم، اکسیدهای آهن، آلومینیوم، منگنز، کلسیم و منیزیم است و به طور همزمان با فولاد تولید می‌شود. سرباره مورد استفاده در این پژوهش، که از نوع سرباره فولاد کوره اکسیژنی (BOF)<sup>۱</sup> یا فرایند کنورتر اکسیژنی<sup>۲</sup> است، از کارخانه فولاد مبارکه اصفهان تهیه شد. مشخصات مصالح سنگی و سرباره به شرح جدول ۱ می‌باشد.

به مقاومت مطلوبی برای استفاده در روسازی رسید (لم و همکاران، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸a). در پژوهشی دیگر، بافت زبر مصالح سرباره قوس الکتریکی باعث بهبود مقاومت کششی مخلوط بتن غلتکی شد (لم و همکاران، ۲۰۱۸b). سرباره فولاد ریزدانه و درشت‌دانه حاصل از کوره قوس الکتریکی اثرات متفاوتی بر خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی دارند. نتایج نشان داده که با جایگزینی مصالح ریزدانه با سرباره، مشخصات مکانیکی به دست آمده کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر، استفاده از سرباره فولاد در بخش درشت‌دانه، به دلیل زاویه‌دار بودن و زبری زیاد آن، باعث افزایش قفل و بست مصالح سنگی و به تبع آن باعث افزایش خصوصیات مکانیکی و شکستگی می‌شود (روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۹).

در پژوهش‌های پیشین، بررسی تأثیر استفاده جداگانه و ترکیبی سرباره کوره فولاد و خرده آسفالت بازیافتی بر خواص مکانیکی روسازی بتن غلتکی مورد مطالعه و مقایسه قرار نگرفته است. بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه بتن غلتکی بر پایه بررسی نقش مصالح محلی و ضایعاتی به عنوان جایگزین مصالح درشت‌دانه روی رفتار بتن غلتکی استوار بوده است. همچنین، روش‌هایی که محققین مختلف برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی به کار برده‌اند با یکدیگر متفاوت است. این تحقیق، ضمن استفاده از خرده آسفالت ناشی از تخریب روسازی‌های قدیمی و رفع مشکلات ناشی از دفع این نوع مصالح در

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی و سرباره فولاد

مشخصات	مصالح سنگی	سرباره فولاد	استاندارد
حداکثر سایش به روش لس آنجلس (%)	۱۸	۲۰	ASTM C131-06
چگالی واقعی درشت‌دانه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۷۱	۳/۲۱	ASTM C127
چگالی واقعی ریزدانه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۵۴	۲/۷۹	ASTM C128
جذب مصالح درشت‌دانه (%)	۱/۲	۱/۸	ASTM C127
جذب مصالح ریز دانه (%)	۲/۵	۳/۳	ASTM C127
ارزش ماسه‌ای (%)	۸۰	-	-
مدول نرمی	۲/۷۸	۳/۶۲	ASTM C125

<sup>۲</sup>- Oxygen converter process

<sup>۱</sup>- Basic xygen urnace steel slag

سنگی، خرده آسفالت بازیافتی و سرباره فولاد استفاده شد تا شرایط یکسانی برای همه حالت‌ها در نظر گرفته شود. دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس دستورالعمل PCA (۲۰۰۳) در جدول ۳ آورده شده است.

خرده آسفالت بازیافتی از دپوی مصالح در غرب تهران تهیه شد. سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان تهران برای تهیه نمونه‌ها انتخاب شد. ترکیبات سیمان مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. در این پژوهش، از دانه‌بندی یکسانی برای تمام ترکیبات شامل مصالح

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیبات شیمیایی	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI	سایر
درصد	۶۱/۷۱	۲۱/۰۴	۴/۷۵	۳/۶۱	۱/۱۹	۲/۳۵	۰/۶۱	۰/۵۴	۱/۷۳	۲/۴۷

جدول ۳. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

اندازه الک (mm)	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۱/۱۸	۰/۱۵	۰/۰۷۵
حدود دانه‌بندی PCA	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۷۰-۹۰	۷۰-۸۵	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۶-۱۶	۲-۸
دانه‌بندی استفاده شده	۱۰۰	۹۵	۸۳	۷۵	۴۵	۲۵	۶	۲

نمونه N100 که هر دو بخش درشت‌دانه و ریزدانه آن از سنگدانه طبیعی ساخته شده، به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده است. تأثیر میزان خرده آسفالت و سرباره فولاد بر مخلوط‌های بتن غلتکی در قالب سایر نمونه‌ها بررسی شد. در واقع، نمونه‌ها متشکل از هر یک از مصالح سنگی، خرده آسفالتی و سرباره فولاد به تنهایی و ترکیب درصدهای مختلف از آنهاست. میزان رطوبت بهینه و چگالی حداکثر برای مخلوط بتن غلتکی شاهد به دست آمد و برای سایر مخلوط‌های مورد مطالعه نیز به همان مقدار در نظر گرفته شد تا شرایط یکنواختی برای همه مخلوط‌ها حاصل شود. نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴ در نظر گرفته شد.

نکته مهم در روش ساخت این است که بتن ساخته‌شده در آزمایشگاه مشابه نمونه عملی خود که توسط فینیش و غلتک اجرا شده است، باشد. فاکتور مناسبی که می‌تواند منعکس‌کننده این تشابه باشد، وزن مخصوص نمونه‌هاست که باید حتی‌الامکان مشابه نمونه واقعی اجرا شده باشد و این فاکتور نیز کاملاً از میزان تراکم تأثیرپذیر است.

برای ساخت نمونه‌ها از آب شهری (آشامیدنی) استفاده گردید. در بتن غلتکی، آب مورد نیاز هیدراتاسیون شیمیایی از دو منبع تأمین می‌شود. قسمتی از آن از طریق آب اضافی (آب آزاد) در ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها تأمین می‌شود و قسمت دیگر آن با اضافه کردن آب به همزن تأمین می‌شود. کیفیت آب مصرفی باید الزامات استاندارد ASTM C1602 را داشته باشد.

نسبت‌های مختلف مصالح استفاده شده برای تهیه مخلوط‌های RCC در جدول ۴ ارائه شده است. برای دستیابی به اهداف تحقیق، ۱۵ نسبت مخلوط تهیه شده است. مخلوط‌های RCC در مطالعه حاضر بر اساس استاندارد ASTM: C1176 طراحی و تهیه شده است. در مطالعات گذشته و دستورالعمل‌های طرح اختلاط، مقدار کل مواد سیمانی در RCC، ۱۲ تا ۱۶ درصد وزن خشک مصالح سنگی توصیه شده است (بری، ۲۰۰۱؛ PCA، ۲۰۰۳؛ مدرس و حسینی، ۲۰۱۴؛ فخری و عموسلطانی، ۲۰۱۷). بنابراین، در این تحقیق، میزان سیمان، با انجام چند پیش‌آزمایش و همانند بسیاری از پژوهش‌های مشابه، برای همه نسبت‌های اختلاط، ثابت (مقدار میانگین ۱۴٪ در این پژوهش) در نظر گرفته شد (مدرس و حسینی، ۲۰۱۴؛ فخری و عموسلطانی، ۲۰۱۷؛ حسامی و همکاران، ۲۰۱۶؛ روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۹).

جدول ۴. مشخصات و نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های مختلف RCC ( $\text{kg/m}^3$ )

آب	سرباره فولاد	RAP	مصالح سنگی	سیمان	علامت اختصاری	ترکیب مصالح مخلوط
۱۱۴	-	-	۲۰۳۶	۲۸۵	N100	۱۰۰٪ مصالح سنگی
۱۱۴	-	۵۰۹	۱۵۲۷	۲۸۵	N75R25	۷۵٪ مصالح سنگی، ۲۵٪ مصالح خرد آسفالتی
۱۱۴	-	۱۰۱۸	۱۰۱۸	۲۸۵	N50R50	۵۰٪ مصالح سنگی، ۵۰٪ مصالح خرد آسفالتی
۱۱۴	-	۱۵۲۷	۵۰۹	۲۸۵	N25R75	۲۵٪ مصالح سنگی، ۷۵٪ مصالح خرد آسفالتی
۱۱۴	-	۲۰۳۶	-	۲۸۵	R100	۱۰۰٪ مصالح خرد آسفالتی
۱۱۴	۵۰۹	-	۱۵۲۷	۲۸۵	N75S25	۷۵٪ مصالح سنگی، ۲۵٪ سرباره فولاد
۱۱۴	۱۰۱۸	-	۱۰۱۸	۲۸۵	N50S50	۵۰٪ مصالح سنگی، ۵۰٪ سرباره فولاد
۱۱۴	۱۵۲۷	-	۵۰۹	۲۸۵	N25S75	۲۵٪ مصالح سنگی، ۷۵٪ سرباره فولاد
۱۱۴	۲۰۳۶	-	-	۲۸۵	S100	۱۰۰٪ سرباره فولاد
۱۱۴	۵۰۹	۱۵۲۷	-	۲۸۵	R75S25	۷۵٪ مصالح خرد آسفالتی، ۲۵٪ سرباره فولاد
۱۱۴	۱۰۱۸	۱۰۱۸	-	۲۸۵	R50S50	۵۰٪ مصالح خرد آسفالتی، ۵۰٪ سرباره فولاد
۱۱۴	۱۵۲۷	۵۰۹	-	۲۸۵	R25S75	۲۵٪ مصالح خرد آسفالتی، ۷۵٪ سرباره فولاد
۱۱۴	۵۰۹	۵۰۹	۱۰۱۸	۲۸۵	N50R25S25	۵۰٪ مصالح سنگی، ۲۵٪ مصالح خرد آسفالتی، ۲۵٪ سرباره فولاد
۱۱۴	۵۰۹	۱۰۱۸	۵۰۹	۲۸۵	N25R50S25	۲۵٪ مصالح سنگی، ۵۰٪ مصالح خرد آسفالتی، ۲۵٪ سرباره فولاد
۱۱۴	۱۰۱۸	۵۰۹	۵۰۹	۲۸۵	N25R25S50	۲۵٪ مصالح سنگی، ۲۵٪ مصالح خرد آسفالتی، ۵۰٪ سرباره فولاد

کیلوگرمی متراکم شدند. سپس میز مرتعش شد تا زمانی که نشانه‌هایی از شیره بتن در اطراف لبه ظاهر شد. همچنین، نمونه‌های تیر در قالب‌های منشوری شکل به ابعاد  $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۵۰۰$  میلی‌متر با استفاده از میز ارتعاش و سربار  $۲۲/۷$  کیلوگرمی متراکم شدند. پس از اتمام ساخت و قبل از برداشتن از قالب‌ها، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه عمل‌آوری و توسط پوشش‌های پلاستیکی پوشانده شدند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و قبل از انجام آزمایش‌های مربوط به خصوصیات مکانیکی، در حمام آب نگهداری شدند.

برای تراکم نمونه‌های بتن غلتکی دو روش کلی "میز ارتعاشی همراه با سربار (روش ارتعاشی همراه با سربار)" و "چکش ارتعاشی (روش ضربه‌ای)" مورد استفاده قرار می‌گیرد (روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۸). در این پژوهش، از روش میز ارتعاشی همراه با سربار استفاده شد. ساخت نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C1176 صورت پذیرفت. در این روش، برای تراکم نمونه‌ها از میز مرتعش وب<sup>۱</sup> استفاده می‌گردد (شکل ۱). بدین ترتیب که قالب محکم به میز بسته شده، مخلوط بتنی در سه لایه داخل قالب ریخته می‌شود. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر با سربار ۹/۱

<sup>۱</sup>- Vebe



شکل ۱. نمونه استوانه‌ای تحت سربار روی میز ارتعاش

#### ۴. برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی در این پژوهش شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم، خمش سه‌نقطه‌ای جهت به دست آوردن مقاومت خمشی، چقرمگی و جذب انرژی، آزمایش سایش کانتابرو و آزمایش تراوش مواد آلاینده (TCLP)<sup>۱</sup> می‌باشد. نمونه‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی درون حوضچه آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۷ و ۲۸ روز و نمونه‌های مقاومت سایشی و تراوش مواد آلاینده به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. با توجه به آزمایش‌های مورد استفاده در این پژوهش، بررسی‌ها روی نمونه‌های با سن حداکثر ۲۸ روز انجام شد. مطابق با توصیه دستورالعمل‌ها در این زمینه، بجز آزمایش مقاومت خمشی جهت طراحی روسازی فرودگاه‌ها و نواحی صنعتی، که بهتر است روی نمونه‌های ۹۰ روزه انجام شود، سایر آزمایش‌ها می‌توانند روی نمونه‌های ۲۸ روزه انجام شوند (ACI 325.10R, ۱۹۹۹). بسیاری از پژوهشگران نیز نمونه‌های با سن حداکثر ۲۸ روز را مورد بررسی قرار داده‌اند (ابات و همکاران، ۲۰۱۷؛ دبارما و سینگ، ۲۰۱۹؛ لم و همکاران، ۲۰۱۸b؛ روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۹).

#### ۴-۱. آزمایش مقاومت فشاری

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، از نمونه‌های استوانه‌ای طبق استاندارد ASTM C39 استفاده شده است. بر اساس این استاندارد، نرخ مجاز بارگذاری ۰/۱۵ تا ۰/۳۵ مگاپاسکال بر ثانیه است. نحوه انجام این آزمایش بدین گونه بود که پس از رسیدن نمونه به سن مورد نظر، نمونه‌های بتنی را در زیر جک فشاری مخصوص قرار داده، سپس نیروی قائمی از سوی جک با نرخ بارگذاری ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه به نمونه‌ها اعمال شد تا نمونه در اثر بار فشاری وارد بر آن گسیخته شود. نیروی لازم جهت گسیخته شدن توسط دستگاه نشان داده شده در شکل ۲ مشخص و ثبت شده است.

#### ۴-۲. آزمایش کشش غیرمستقیم

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. مقاومت کششی معمولاً به صورت درصدی از مقاومت فشاری بیان می‌شود.

<sup>۱</sup>- Toxicity characteristic leaching procedure





شکل ۲. نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری

برای بتن غلتکی، مقاومت کششی معمولاً کمتر از بتن‌های معمولی است، که این امر عموماً برای بتن‌های با کارایی کم صادق است (مدرس، ۱۳۹۳). جهت انجام این آزمایش، از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. 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. نرخ بارگذاری باید بین ۰/۷ تا ۱/۴ مگاپاسکال بر دقیقه باشد. در این پژوهش، نرخ بارگذاری برابر ۱ مگاپاسکال بر دقیقه بر نمونه‌ها وارد شد. بار اعمالی از سوی جک به تدریج افزایش یافت تا آنجا که منجر به دو نیم شدن نمونه گردید. سپس بار نهایی گسیختگی توسط دستگاه قرائت و ثبت شد.

$$F_s = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

که در آن  $F_s$  مقاومت خمشی (MPa)،  $P$  حداکثر بار وارده (N)،  $L$  طول دهانه (mm)،  $b$  عرض نمونه (mm) و  $d$  عمق نمونه است.

چقرمگی به عنوان قابلیت تغییرشکل مصالح قبل از شکست تعریف می‌شود. هرچه مصالح چقرمه‌تر باشد، در اثر اعمال تنش، با افزایش طول بیشتر، دیرتر دچار شکست می‌شود. جهت به دست آوردن مقدار چقرمگی، بارگذاری با نرخ کرنش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه و فرکانس ۱ هرتز انجام شد. مقدار چقرمگی از رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$Toughness = \int_0^{\Delta_f} F(\Delta) d\Delta \quad (2)$$

در این رابطه،  $F(\Delta)$  مقدار بار در وسط دهانه با تغییرشکل برابر  $\Delta$  (N)،  $\Delta$  تغییرشکل وسط دهانه (mm) و  $\Delta_f$  حداکثر تغییرشکل وسط دهانه (mm) است. هر چه سطح زیر نمودار بار- تغییرشکل بیشتر باشد، قابلیت جذب

مقاومت کششی معمولاً کمتر از بتن‌های معمولی است، که این امر عموماً برای بتن‌های با کارایی کم صادق است (مدرس، ۱۳۹۳). جهت انجام این آزمایش، از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. 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. نرخ بارگذاری باید بین ۰/۷ تا ۱/۴ مگاپاسکال بر دقیقه باشد. در این پژوهش، نرخ بارگذاری برابر ۱ مگاپاسکال بر دقیقه بر نمونه‌ها وارد شد. بار اعمالی از سوی جک به تدریج افزایش یافت تا آنجا که منجر به دو نیم شدن نمونه گردید. سپس بار نهایی گسیختگی توسط دستگاه قرائت و ثبت شد.

### ۳-۴. آزمایش خمش سه نقطه‌ای

این آزمایش به منظور به دست آوردن پارامترهای مقاومت خمشی، چقرمگی و جذب انرژی انجام شد. مهمترین پارامتر مورد استفاده در ارزیابی مقاومت روسازی‌ها، مقاومت خمشی است. در این پژوهش، مقاومت خمشی روی نمونه‌های تیر منشوری شکل بتن غلتکی مطابق با استاندارد ASTM C78 تعیین شد. نرخ بارگذاری باید بین

یک از مصالح بر مخلوط‌های بتن غلتکی انجام شد. آزمایش TCLP مطابق دستور العمل EPA-1311 سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا انجام می‌گیرد (EPA, 2005).

در این آزمایش، ابتدا باید از مخلوط‌ها و مصالح مورد نظر نمونه‌گیری انجام شود. سپس، باید محلول مورد نظر برای ترکیب با نمونه را آماده کرد. باید توجه داشت که نسبت محلول به بخش جامد ۲۰ به ۱ می‌باشد، که در این آزمایش ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول و ۱۰ گرم بخش جامد استفاده شد. محلول استفاده شده شامل آب یون‌زدایی شده و استیک اسید دارای pH برابر ۲/۸۸ می‌باشد. سپس، نمونه‌ها در دستگاه نوسان‌دهنده قرار می‌گیرند. این دستگاه دارای ویژگی کنترل دما و نوسان می‌باشد. نمونه‌ها باید به مدت ۱۲ ساعت با سرعت ۳۰ دور در دقیقه و در دمای ۲۰ درجه در حالت نوسان باشند. بعد از اتمام ۱۸ ساعت نوسان و اختلاط، مایع درون ظرف از فیلتر مخصوص عبور داده می‌شود. پس از فیلتراسیون برای غلیظ شدن محلول، استیک اسید به محلول اضافه می‌شود تا pH محلول به کمتر از ۲ برسد. در نهایت، غلظت فلزات سنگین به روش جذب اتمی، اندازه‌گیری شده و با حدود استاندارد مقایسه می‌شود (EPA, 2005).

## ۵. نتایج و بحث

### ۵-۱. مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف با مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۳ نشان داده شده است. از هر طرح اختلاط و زمان عمل‌آوری، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین این مقادیر در نظر گرفته شده است. خط ترسیم شده روی شکل بیانگر حداقل مقاومت مجاز (۲۷/۶ مگاپاسکال) مطابق استاندارد ACI می‌باشد (بری، ۲۰۰۱). مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها از آهنگ تغییرات مشابهی برخوردار است.

انرژی بیشتر و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها پیش از وقوع شکست بیشتر است.

### ۴-۴. آزمایش سایش کانتابرو<sup>۱</sup>

فرسایش ناشی از نیروهای ساینده باعث کاهش عملکرد روسازی‌های بتنی می‌شود. از این رو، در صورت استفاده از بتن RCC به عنوان لایه رویه، ارزیابی آن لازم است (دبارما و همکاران، ۲۰۱۹). در این پژوهش، نمونه‌های RCC برای تعیین مقاومت در برابر سایش مخلوط‌های مورد نظر مطابق با ASTM C1747 ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. در این روش، نمونه‌های استوانه‌ای نام برده شده، درون دستگاه لُس آنجلس (بدون گلوله‌های فلزی) با تعداد ۳۰۰ دور و با سرعت ۳۳ دور در دقیقه قرار گرفتند. افت وزنی کانتابرو از رابطه (۳) به دست آمد:

$$C_L = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

که در آن،  $C_L$  افت وزنی کانتابرو (%)،  $W_1$  وزن اولیه نمونه (گرم) و  $W_2$  وزن نهایی نمونه (گرم) است.

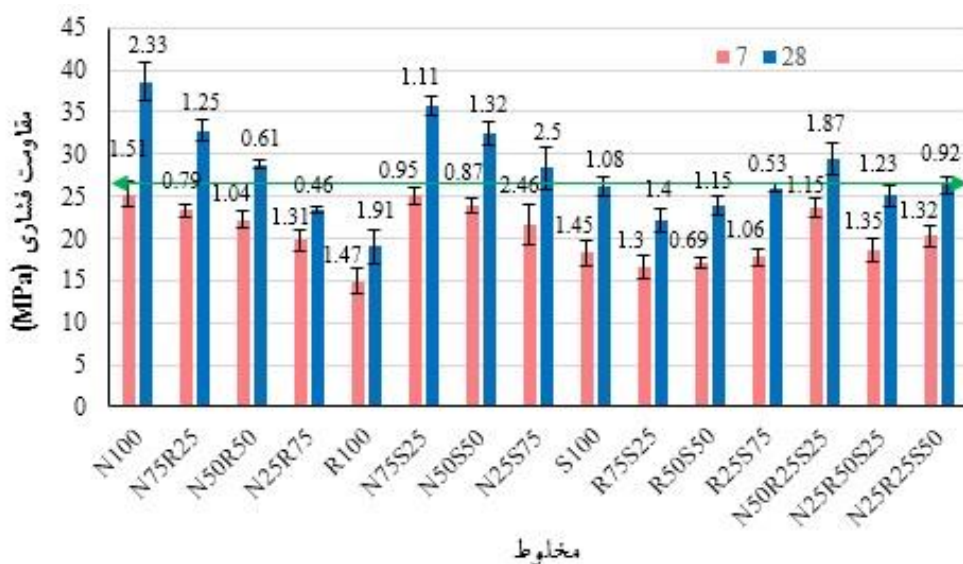
### ۴-۵. آزمایش تراوش مواد آلاینده (TCLP)

آزمایش TCLP یکی از متداول‌ترین تست‌های تراوش آلودگی مواد زائد خطرناک است. در این آزمایش، می‌توان میزان جدا شدن فلزات سنگین از ماده جامد را تحت شرایط طبیعی اندازه گرفت و از خطرناک نبودن ماده مورد استفاده اطمینان حاصل کرد. با توجه به ترکیب شیمیایی سرباره فولاد، فلزات سنگینی که در این آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرند، می‌توانند شامل کروم، نیکل، سرب، روی، جیوه، کادمیوم و ... باشند. این آزمایش به منظور بررسی تبعات احتمالی زیست‌محیطی و تعیین میزان آلودگی آب‌های عبوری از روسازی‌های بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالتی و مخصوصاً سرباره فولاد، روی سرباره فولاد و مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی هر

<sup>۱</sup>- Cantabro

به یکدیگر می‌شود. عدم پیوند مناسب، در فصل مشترک قیر و فاز دوگانه سنگدانه و سیمان اتفاق می‌افتد، زیرا وجود پوشش نازک قیر دور سنگدانه، چسبندگی ماتریس ملات سیمان به سطح سنگدانه را کاهش داده و باعث انتقال ترک به ماتریس ملات سیمان در اطراف سنگدانه می‌شود. بدین ترتیب، بتن حاوی مصالح خرده آسفالتی، به جای اینکه از قسمت سنگدانه گسیخته شود، به دلیل کاهش چسبندگی، از قسمت ملات سیمان شکسته می‌شود.

همانطوری که در این شکل مشاهده می‌شود، با جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با مصالح خرده آسفالتی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. به طوری که در نمونه‌های ۲۸ روزه، با جایگزین کردن کل مصالح سنگی طبیعی با مصالح خرده آسفالتی، مقاومت فشاری ۵۰/۸ درصد کاهش یافت و نتوانست حداقل مقاومت فشاری لازم مطابق با استانداردهای مربوطه را کسب نماید. به این علت که هم مصالح خرده آسفالتی کیفیت ضعیف‌تری نسبت به مصالح طبیعی دارند و علت اصلی این که وجود قیر در اطراف سنگدانه‌ها باعث کاهش چسبندگی مصالح



شکل ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف (میل‌های خطا و اعداد روی آنها بیانگر انحراف معیار استاندارد هستند)

همچنین، با جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با مصالح سرباره فولادی، مقاومت فشاری کاهش یافت. نمونه حاوی ۱۰۰٪ سرباره فولاد نسبت به نمونه کنترلی، ۳۲/۴ درصد کاهش در مقاومت فشاری ۲۸ روزه را نشان می‌دهد و مقدار آن نیز کمتر از حداقل قابل قبول است. یکی از علت‌ها، نسبت آب به سیمان بیشتر مخلوط دارای مصالح سرباره‌ای نسبت به مصالح سنگی طبیعی است. علاوه بر آن، مطالعات گذشته نشان داده که اتصال کمتری بین مصالح ریزدانه سرباره فولاد و خمیر سیمان برقرار است، که باعث کاهش تحمل بار می‌شود (روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۹). این مشکل می‌تواند به دلیل تشکیل

شکل ۴، نحوه گسترش ترک مویی در نمونه‌های مقاومت فشاری نمونه حاوی خرده آسفالت را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها، افزایش انعطاف‌پذیری حاصل از وجود قیر در مصالح خرده آسفالتی باعث ایجاد تمرکز تنش در نمونه شده، سبب از بین رفتن چسبندگی بین بتن و قیر می‌شود. همچنین، می‌تواند زیر بارهای فشاری، باعث ایجاد ترک مویی در مخلوط و کاهش مقاومت فشاری شود. با جایگزینی ۵۰٪ از مصالح سنگی طبیعی با مصالح خرده آسفالتی، حداقل مقاومت فشاری برابر با ۲۸/۸ به دست آمد که بیشتر از حداقل مقدار لازم است.

عمل‌آوری، مقاومت فشاری ارتقا می‌یابد. نمونه‌های حاوی سرباره، در مجموع مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به نمونه‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی نشان دادند.

پوشش کربنات کلسیم طی فرایند هوازدگی مصالح سرباره باشد (لم و همکاران، ۲۰۱۷). می‌توان اینطور بیان کرد که مصالح سرباره فولاد آب را در خود نگه می‌دارند و همین امر باعث کاهش مقاومت، مخصوصاً در دوره‌های عمل‌آوری کمتر، می‌شود. با افزایش مدت



شکل ۴. نحوه گسترش ترک در نمونه‌های مقاومت فشاری

نظر گرفته شده است. خط ترسیم شده روی شکل بیانگر حداقل مقاومت کششی مجاز (۲ مگاپاسکال) مطابق استاندارد ACI است (بری، ۲۰۰۱). همانند آزمایش مقاومت فشاری، با جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با مصالح خرده آسفالتی و نیز سرباره فولاد، مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش یافت. به طوری که در نمونه‌های ۲۸ روزه، با جایگزین کردن کل مصالح سنگی طبیعی با مصالح خرده آسفالتی، مقاومت کششی ۵۷/۵ درصد کاهش یافت و نتوانست حداقل مقاومت کششی لازم مطابق با استانداردهای مربوطه را کسب نماید. البته براساس این آزمایش، نمونه‌های بیشتری حداقل مقاومت کششی را برآورده کردند. بجز نمونه مذکور و نمونه‌های حاوی حداقل ۷۵٪ مصالح خرده آسفالتی، حاوی ترکیب ۵۰٪ مصالح خرده آسفالتی و ۵۰٪ سرباره فولاد، حاوی ترکیب ۲۵٪ مصالح خرده آسفالتی و ۷۵٪ سرباره فولاد و نمونه حاوی ترکیب ۲۵٪ از مصالح سنگی یا سرباره فولاد و ۵۰٪ مصالح خرده آسفالتی، سایر نمونه‌ها حداقل

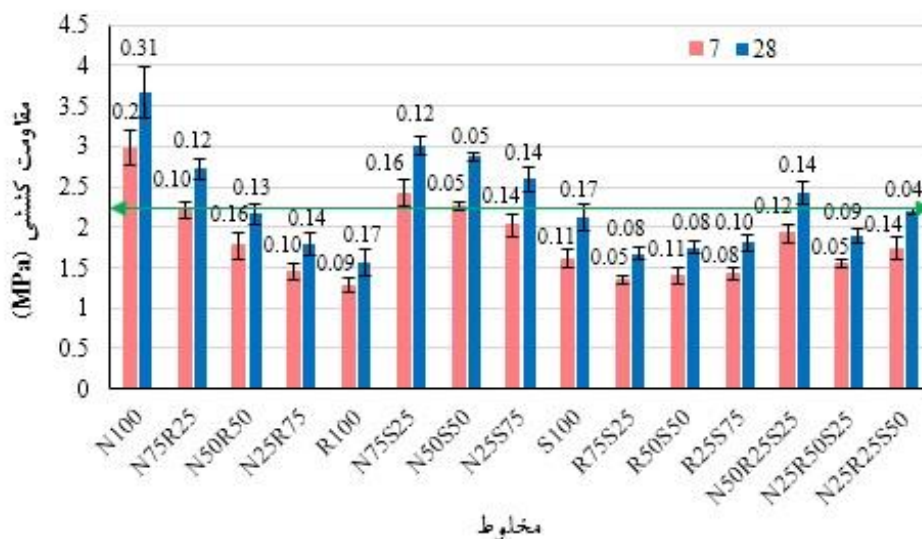
هرچه مقدار مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد افزایش می‌یابد، مقاومت فشاری نمونه‌ها کمتر می‌شود. تأثیر افزایش مصالح خرده آسفالتی بر کاهش مقاومت فشاری بتن غلتکی بیشتر از سرباره فولاد است. بدین ترتیب، نمونه‌های حاوی ۱۰٪ مصالح خرده آسفالتی و سرباره یا مجموع این دو و همچنین نمونه‌های حاوی ۲۵٪ مصالح طبیعی و مابقی مصالح خرده آسفالتی و سرباره در مدت عمل‌آوری ۲۸ روز نتوانستند حداقل مقاومت فشاری مجاز مطابق استاندارد را برآورده نمایند. نمونه‌های حاوی دست کم ۵۰٪ مصالح طبیعی، حداقل مقاومت فشاری مجاز مطابق استاندارد را برآورده کردند.

## ۲-۵. مقاومت کششی غیرمستقیم

در شکل ۵، نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های با مدت عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه نشان داده شده است. از هر طرح اختلاط و زمان عمل‌آوری، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین این مقادیر در

مطابق استاندارد را کسب کرد (۲/۱۲ مگاپاسکال). ولی نمونه N25R75 علی‌رغم دارا بودن ۲۵٪ مصالح سنگی طبیعی دارای مقاومت کمتر از مقاومت مجاز بود (۱/۷۸ مگاپاسکال). بیشتر بودن مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حاوی سرباره فولاد نسبت به نمونه‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی عمدتاً مربوط به تفاوت سطح تماس مصالح سنگی و ماتریس سیمان است، که این سطح برای بتن غلتکی دارای سرباره فولاد، زبرتر است.

معیارهای استاندارد را در مدت عمل‌آوری ۲۸ روز کسب کردند. نمونه حاوی ۱۰۰٪ سرباره فولاد نسبت به نمونه کنترلی، ۴۲/۲ درصد کاهش در مقاومت کششی ۲۸ روزه را نشان می‌دهد؛ ولی مقدار آن بیشتر از حداقل مقدار قابل قبول است. در این آزمایش نیز افزایش مصالح خرده آسفالتی، کاهش مقاومت کششی بیشتری را نسبت به سرباره فولاد نتیجه داد. به عنوان مثال، نمونه حاوی ۱۰۰٪ مصالح سرباره فولاد (S100) حداقل مقاومت کششی لازم



شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های مختلف (میل‌های خطا و اعداد روی آنها بیانگر انحراف معیار استاندارد هستند)

و همکاران، ۲۰۱۹). مخلوط‌های با مقاومت فشاری بیشتر، مقاومت خمشی بیشتری را نشان دادند. بر اساس این شکل، با افزایش مصالح خرده آسفالتی جایگزین مصالح سنگی، مقاومت خمشی کاهش یافت. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، چسبندگی ضعیف بین مصالح خرده آسفالتی و ملات سیمان دلیل اصلی کاهش مقاومت است. اگرچه روش تراکم تأثیر زیادی بر مقاومت دارد، اما با این حال، چسبندگی بین ذرات و ملات سیمان بسیار مهم است.

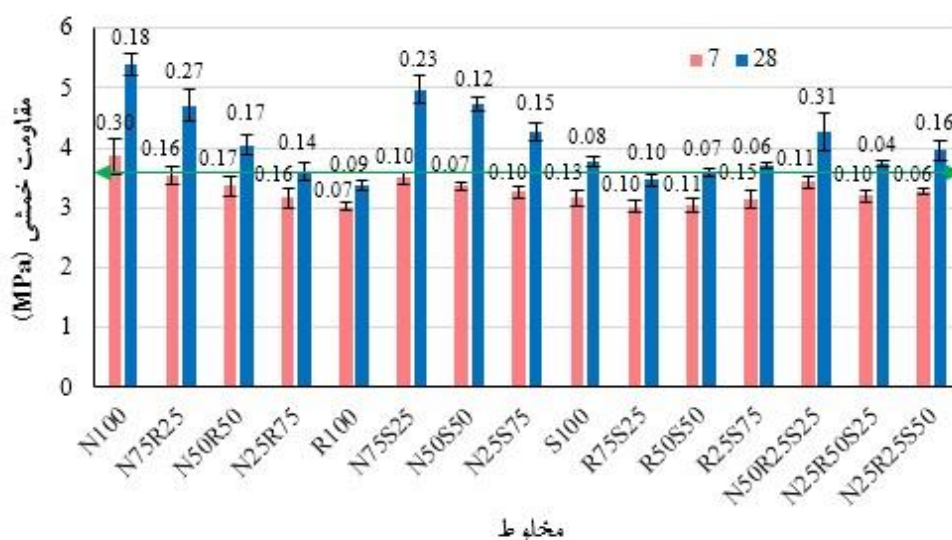
البته استفاده از مصالح خرده آسفالتی تأثیر منفی کمتری بر مقاومت خمشی داشته تا مقاومت فشاری. بدین معنی که با جایگزینی تمام مصالح سنگی با مصالح خرده آسفالتی، مقاومت فشاری ۵۰/۸ درصد کاهش

### ۳-۵. مقاومت خمشی

مقاومت خمشی مخلوط بتن غلتکی یکی از موارد بحث برانگیز در این مخلوط‌هاست که نه تنها بر نتایج طراحی تأثیر می‌گذارد، بلکه مستقیماً بر مقاومت مخلوط در برابر خستگی و ترک خوردگی حرارتی نیز تأثیرگذار است (فخری و عموسلطانی، ۲۰۱۷). مقاومت خمشی نمونه‌های مختلف مورد بررسی در این پژوهش با مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز در شکل ۶ مشاهده می‌شود. از هر طرح اختلاط و زمان عمل‌آوری، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین این مقادیر در نظر گرفته شده است. خط ترسیم شده روی شکل بیانگر حداقل مقاومت خمشی مجاز (۳/۶ مگاپاسکال) مطابق اکثر دستورالعمل‌هاست (لوپز یوسدا و همکاران، ۲۰۱۸؛ دبارما

دارای خواص شکستگی بهتری نسبت به مخلوط درای مصالح سنگی طبیعی هستند. همچنین، نحوه بارگذاری در تست‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی یکسان نیست (دبارما و همکاران، ۲۰۱۹). اینها برخی از دلایلی است که می‌تواند جهت توجیه کاهش کمتر مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری در نظر گرفته شود. از آنجا که روسازی‌های بتن غلتکی معمولاً براساس مقاومت خمشی طراحی می‌شوند، این نتایج می‌تواند باعث افزایش استفاده از مصالح خرده آسفالتی جایگزین مصالح سنگی برای این روسازی‌ها شود.

یافت؛ در حالی که مقاومت خمشی ۳۷/۶ درصد کاهش یافت. در تأیید مورد مذکور، شایان ذکر است که بجز نمونه حاوی ۱۰۰٪ مصالح خرده آسفالتی، سایر نمونه‌ها حداقل معیار مقاومت خمشی را برآورده کردند. ممکن است وجود پوشش قیر عاملی برای مقاومت خمشی بهتر مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت نسبت به مقاومت فشاری باشد. پوشش قیری از لحاظ ماهیت ویسکوالاستیک است و تمایل دارد مانع انتشار ترک از طریق خمیر ملات به جای مصالح شود. در نتیجه، چقرمگی مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی افزایش می‌یابد. این مخلوط‌ها به دلیل چقرمگی بهتر



شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های مختلف (میل‌های خطا و اعداد روی آنها بیانگر انحراف معیار استاندارد هستند)

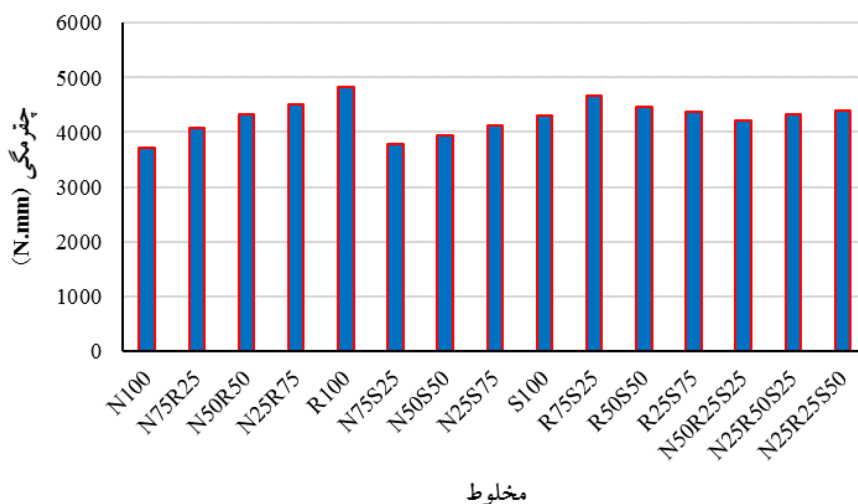
مخلوط بتن غلتکی می‌شود، که عمدتاً به دلیل مقدار زیاد CaO آزاد در سرباره فولاد است. این عامل می‌تواند منجر به انبساط و تشکیل میکروتکرک‌های بیشتر بین سرباره و خمیر سیمان و در نهایت تضعیف اتصال بین آنها شود. همانند مقاومت فشاری و کششی، مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی سرباره فولاد نیز بیشتر از نمونه‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی با مقدار معادل است.

همانطور که در شکل ۶ پیداست، با افزایش سرباره فولاد جایگزین مصالح سنگی، مقاومت خمشی کاهش یافت. نمونه حاوی ۱۰۰٪ سرباره فولاد نسبت به نمونه کنترلی، ۳۰٪ کاهش در مقاومت خمشی ۲۸ روزه را نشان می‌دهد؛ ولی مقدار آن بیشتر از حداقل مقدار قابل قبول است. از آنجا که در این پژوهش جایگزینی مصالح هم در بخش درشت‌دانه و هم در بخش ریزدانه انجام شد، علت کاهش مقاومت خمشی را می‌توان این گونه تحلیل کرد که وجود سرباره فولاد ریزدانه (با سطح مخصوص زیاد) باعث ایجاد خصوصیات مکانیکی نامطلوب در

#### ۴-۵. چقرمگی

سنگی طبیعی است، که ۳۰٪ افزایش چقرمگی را نسبت به نمونه کنترلی نشان می‌دهد. این عامل به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری و جذب انرژی مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی می‌باشد. در واقع، با کاهش مقاومت خمشی، چقرمگی زیاد می‌شود. در مخلوط‌های حاوی مصالح سنگی طبیعی، علاوه بر این که مقاومت خمشی بیشتر بود، شکست به صورت ناگهانی و سریع اتفاق افتاد. زیرا هر چه تحمل بار بیشتر باشد، شکست سریعتر اتفاق می‌افتد و جذب انرژی کمتر می‌شود.

چقرمگی، جذب انرژی پیش از شکست را نشان می‌دهد. این پارامتر بستگی به ظرفیت تحمل بار و تغییر شکل مربوطه پیش از شکست دارد. شکل ۷، مقایسه چقرمگی مخلوط‌های بتن غلتکی با مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش مصالح خرده آسفالتی به عنوان جایگزین مصالح سنگی طبیعی، چقرمگی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار مربوط به نمونه حاوی ۱۰٪ مصالح خرده آسفالتی جایگزین مصالح



شکل ۷. نتایج آزمایش چقرمگی روی نمونه‌های ۲۸ روزه

مخلوط R50S50، میزان چقرمگی ۴۴۶۸ نیوتن میلی‌متر می‌باشد و بالاخره چقرمگی مخلوط حاوی ۱۰٪ سرباره فولاد ۴۲۹۴ نیوتن میلی‌متر است. در واقع، تأثیر مصالح خرده آسفالتی در افزایش چقرمگی بیش از سرباره فولاد است.

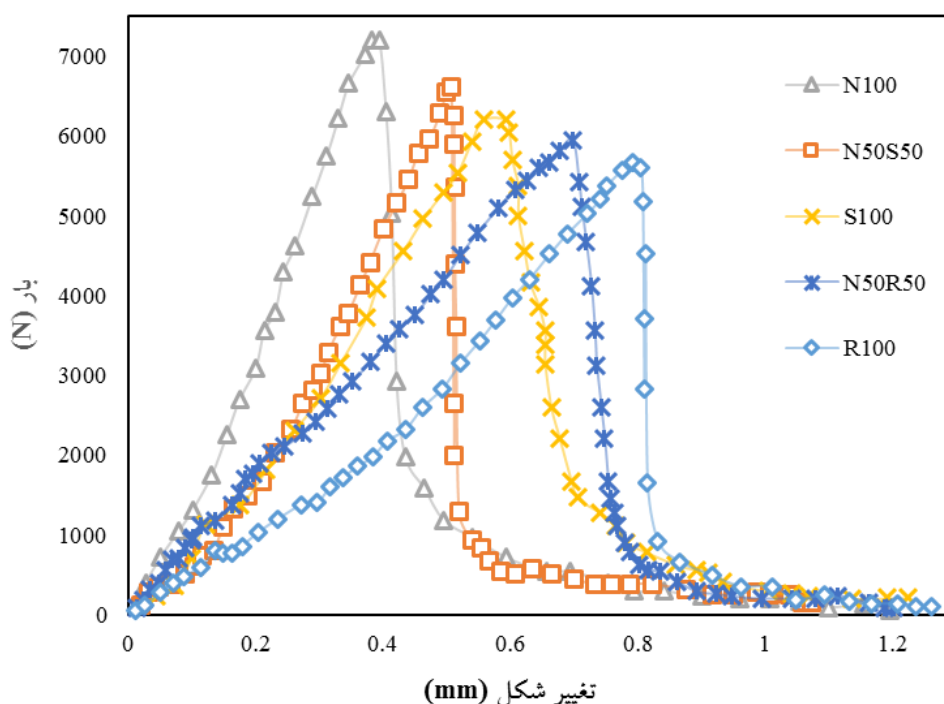
همچنین، با افزایش سرباره فولاد جایگزین مصالح سنگی طبیعی، میزان چقرمگی افزایش یافت. به طوری که با جایگزینی کل مصالح سنگی طبیعی با سرباره فولاد، چقرمگی ۱۵/۷ درصد افزایش یافت. مطالعات گذشته نیز نشان داده که با جایگزینی بخش درشت‌دانه مصالح سنگی با سرباره فولاد، چقرمگی شکست در عملکرد برشی افزایش می‌یابد (روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۹). بدین ترتیب مشاهده می‌شود که افزایش چقرمگی بتن غلتکی حاوی سرباره فولاد در مقایسه با مصالح خرده آسفالتی کمتر است. به عنوان مثال، چقرمگی مخلوط حاوی ۱۰٪ مصالح خرده آسفالتی، ۴۸۲۰ نیوتن میلی‌متر است. با جایگزین کردن مصالح خرده آسفالتی با سرباره فولاد، میزان چقرمگی به تدریج کاهش یافت. به عنوان مثال، در

#### ۵-۵. قابلیت جذب انرژی

انرژی جذب شده را می‌توان با محاسبه مساحت زیر منحنی بار- تغییر شکل حاصل از آزمایش خمش سه‌نقطه- ای به دست آورد. در شکل ۸، مقدار انرژی جذب شده در نمونه‌های ۲۸ روزه دارای ۱۰٪ از هر یک از مصالح مورد استفاده و همچنین نمونه‌های حاوی ترکیب ۵۰٪ مصالح سنگی طبیعی و ۵۰٪ مصالح خرده آسفالتی و

چسبندگی زیاد بین سنگدانه و ملات سیمان، ترک از میان ذرات سنگدانه انتشار می‌یابد. در مقابل، برای مخلوط بتن غلتکی حاوی مصالح خرد آسفالتی، قیر یک فیلم نازک در سطح مشترک ملات سیمان و مصالح تشکیل می‌دهد، که ممکن است مانع انتشار ترک شود. از این رو، ترک در دور ذرات مصالح سنگی ایجاد می‌شود و این پدیده منجر به افزایش تغییرشکل نهایی نمونه قبل از شکست کامل و نهایتاً جذب انرژی بیشتر می‌گردد، که به طور مستقیم به طول مسیر ترک بستگی دارد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۸). مخلوط حاوی ۱۰۰٪ سرباره رفتار بینابین دو مخلوط مذکور را دارا می‌باشد. نکته قابل توجه این که مخلوط حاوی ترکیب ۵۰٪ مصالح سنگی طبیعی و ۵۰٪ مصالح خرد آسفالتی جذب انرژی بیشتری نسبت به مخلوط حاوی ۱۰۰٪ سرباره فولاد دارد. واضح است، که مخلوط حاوی ترکیب ۵۰٪ مصالح خرد آسفالتی و ۵۰٪ سرباره فولاد دارای میزان جذب انرژی کمتری از مخلوط تماماً خرد آسفالتی و بیشتر از مخلوط تماماً سرباره‌ای می‌باشد.

ترکیب ۵۰٪ مصالح سنگی طبیعی و ۵۰٪ سرباره فولاد نشان داده شده است. هرچه انرژی جذب شده بیشتر باشد، انعطاف‌پذیری نمونه تا وقوع شکست بیشتر خواهد بود. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه حاوی ۱۰۰٪ مصالح خرد آسفالتی (R100) بیشترین تغییرشکل را پیش از شکست تحمل کرده است؛ علی‌رغم این که مقدار بار حداکثر کمتری را نسبت به سایر مخلوط‌های مورد بررسی دارد. بدین ترتیب، افزودن مصالح خرد آسفالتی، نمونه‌ها را انعطاف‌پذیرتر و تغییرشکل‌پذیرتر می‌کند و انتظار می‌رود که در معرض بارهای مکرر، رفتار بهتری داشته باشند. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی نیز در هنگام انجام آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ مصالح سنگی طبیعی بر خلاف نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ مصالح خرد آسفالتی، به سرعت و به طور ناگهانی به مرحله شکست می‌رسیدند. در حالی که در نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ مصالح خرد آسفالتی، گسیختگی به صورت تدریجی و سطح ترک در زمان گسیختگی اندک بوده است. در مخلوط بتن غلتکی معمولی، به دلیل



شکل ۸. منحنی بار- تغییرشکل پنج مخلوط بررسی شده از نمونه‌های ۲۸ روزه

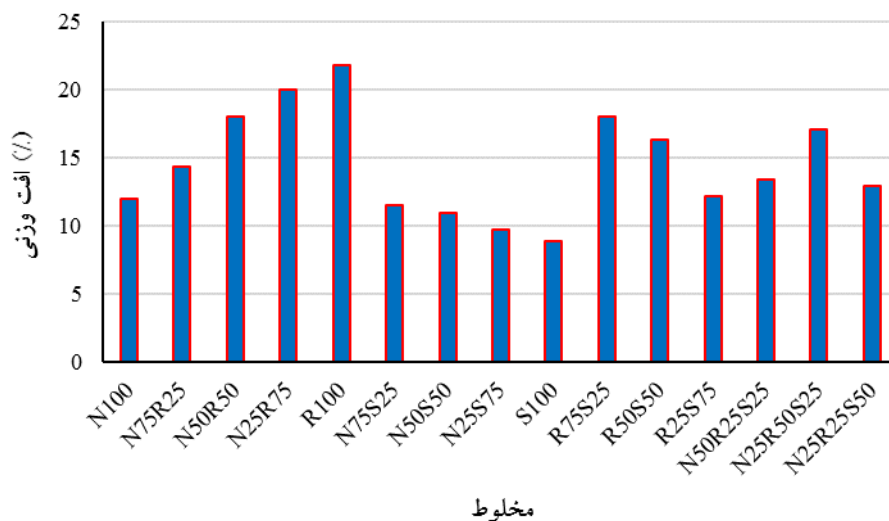


## ۵-۶. مقاومت سایشی

یافت، که می‌تواند به دلیل چسبندگی ضعیف بین ملات سیمان و مصالح حاوی قیر حتی در سطح باشد. این نتایج، پتانسیل استفاده از RAP در مخلوط‌های بتن غلتکی را به عنوان یک سطح رویه روسازی محدود می‌نماید. با این وجود، مخلوط N75R25 می‌تواند برای روسازی راه پیشنهاد شود، زیرا این مخلوط آنطور که از نتایج بر می‌آید، مقاومت قابل مقایسه‌ای با مخلوط کنترلی دارد.

نکته شایان ذکر این که با افزایش سرباره فولاد به عنوان جایگزین مصالح سنگی طبیعی، مقاومت سایشی افزایش یافت. بیشترین مقاومت سایشی مربوط به مخلوط دارای ۱۰٪ سرباره کوره فولاد (S100) می‌باشد. این امر به دلیل بافت ناهموار سرباره فولاد است. علاوه بر آن، از آنجایی که جایگزینی مصالح با سرباره فولاد شامل مصالح سنگی ریزدانه نیز می‌شود، توانایی سرباره فولاد ریزدانه در افزایش واکنش پوزولانی باعث پر کردن منافذ و متراکم‌تر شدن سطح مشترک بین ماتریس سیمان و مصالح می‌شود.

مقاومت سایشی یکی از پارامترهای مهم در روسازی بتن غلتکی است، زیرا سطح آن همیشه در معرض سایش ناشی از لاستیک‌های وسایل نقلیه خواهد بود. در این پژوهش، مقاومت سایشی مخلوط‌های مختلف با استفاده از تعیین افت وزنی در آزمایش کانتابرو مشخص شد. هرچه درصد افت وزنی کمتر باشد، مقاومت سایشی بیشتر است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با توجه به مطالعات، مخلوط کنترلی (N100) با افت وزنی ۱۲٪، مقاومت سایشی مناسبی را داراست. با افزایش مصالح خرده آسفالتی به عنوان جایگزین مصالح سنگی طبیعی، افت وزنی افزایش و در نتیجه مقاومت سایشی کاهش یافت. در مورد مقاومت سایشی مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی، در مخلوط‌های N50R50 و N25R75 در مقایسه با مخلوط کنترلی (N100)، مقاومت سایشی به ترتیب حدود ۴۷٪ و ۶۶٪ کاهش



شکل ۹. افت وزنی کانتابرو در مخلوط‌های مختلف ۲۸ روزه

فلزات سنگین شامل سرب، جیوه، نیکل، کروم، کادمیوم، مس و روی بررسی شد. غلظت فلزات سنگین در شیرابه سرباره فولاد ریزدانه و مخلوط‌های بتن غلتکی شامل ۱۰٪ از هر یک از مصالح، در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، غلظت سرب و کادمیوم در

## ۵-۷. تراوش مواد آلاینده (TCLP)

آزمون TCLP برای بررسی تأثیرات زیست‌محیطی مصالح خرده آسفالتی و مخصوصاً سرباره فولاد، قبل و بعد از کاربرد در بتن غلتکی استفاده شد. در این تحقیق، غلظت

سیمان پرتلند در جذب مقدار زیادی کادمیوم، کروم و روی نسبت داد (مدرس و همکاران، ۲۰۱۸). در سایر مخلوط‌ها نیز مقدار غلظت فلزات سنگین کمتر از حد مجاز است. این امر نشان می‌دهد که مخلوط بتن غلتکی می‌تواند فلزات سنگین موجود را تثبیت و جامدسازی کند و شیرابه لایه‌های بتنی اثرات مخربی بر آب‌های سطحی و زیرزمینی نخواهد داشت.

سرباره فولاد بیشتر از حد مجاز تعیین شده به وسیله دستورالعمل EPA-1311 سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا می‌باشد. در حالی که غلظت این فلزات سنگین در مخلوط حاوی سرباره (S100) بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری کمتر از حد مجاز است. در واقع می‌توان گفت که ماتریس سیمان می‌تواند این فلزات سنگین را در خود حل نماید. مقاومت فشاری را نیز می‌توان به توانایی

جدول ۵. نتایج آزمایش تراوش مواد آلاینده

غلظت فلزات سنگین در شیرابه (mg/l)							نمونه
Zn	Cu	Cd	Cr	Ni	Hg	Pb	
۰/۰۸	۰/۱۳	۱/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۶/۸۹	سرباره فولاد
۰/۰۹	Nd	۰/۰۶	۰/۶۳	۰/۳۶	Nd	Nd <sup>۱</sup>	N100
Nd	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۳	Nd	۰/۰۹	R100
۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۴۸	۰/۰۲	Nd	Nd	۳/۸۷	S100
۲۵	۲۵	۱	۵	۲۵	۰/۲	۵	معیار مقررات TCLP

۵-۸. بحث در مورد نمونه‌های ترکیبی

همانطور که پیش از این نیز ذکر شد، یکی از اهداف مهم این پژوهش به حداقل رساندن استفاده از مصالح سنگی طبیعی جهت صرفه‌جویی در هزینه و جایگزینی با مصالح ضایعاتی به منظور برآورده کردن اهداف زیست‌محیطی است. در مورد نمونه‌های ترکیبی، نمونه‌های ۲۸ روزه‌ای که با کمترین میزان مصالح سنگی طبیعی، حداقل معیارهای لازم برای استفاده از بتن غلتکی در روسازی راه را مطابق استانداردها کسب نمودند، به شرح زیر می‌باشند:

در خصوص مقاومت فشاری، نمونه‌های N50R50، N50S50 و N50S25R25 حداقل مقاومت فشاری مجاز مطابق استاندارد را برآورده نمودند. بیشترین مقاومت فشاری میان این نمونه‌ها، مربوط به نمونه N50S50 است، که نسبت به نمونه‌های N50R50 و N50S25R25، به ترتیب ۱۲/۸ درصد و ۱۰/۲ درصد افزایش و نسبت به

نمونه کنترلی ۱۵/۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد. مقاومت کششی نمونه‌های N50R50، N50S50، N25S75، N50R25S25 و N25R25S50 بیش از حداقل مقادیر مجاز مطابق استاندارد مربوطه است. بیشترین مقاومت کششی میان این نمونه‌ها مربوط به نمونه N50S50 است، که نسبت به نمونه N50S25R25، ۱۸/۵ درصد افزایش و نسبت به نمونه کنترلی ۲۱/۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. بجز نمونه R75S25، سایر نمونه‌های ترکیبی، حداقل مقاومت خمشی لازم بر اساس استاندارد را کسب کردند، که بیانگر این است که مخلوط‌های بتن غلتکی در مجموع، ضعف کمتری در مقابل تنش‌های خمشی دارند. در این میان، نمونه N50S50 نسبت به نمونه N50S25R25، ۱۰/۵ درصد افزایش و نسبت به نمونه کنترلی ۱۲/۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup>- Not detected

پژوهش، با کاهش ۵۰٪ در استفاده از مصالح سنگی طبیعی می‌تواند علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، به حفظ این منابع غیرقابل جایگزین کمک کند. مصالح خرده آسفالتی، یک محصول ضایعاتی است و به صورت محلی در دسترس است. هزینه آن بسیار ناچیز در نظر گرفته می‌شود. با این حال، مشمول هزینه شکستن و خرد کردن مصالح است. این هزینه حدود ۱٪ کل هزینه تولید یک متر مکعب بتن غلتکی می‌باشد (دبارما و همکاران، ۲۰۱۹). از آن‌جا که سرباره فولاد محصول جانبی و پسماند صنعت فولاد است، تولید آن هیچگونه مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن را در پی ندارد. از یک طرف، هزینه‌های حمل و نقل مصالح از معادن سنگ تا محل ساخت و اجرای بتن هم برای مصالح سنگی طبیعی و هم مصالح ضایعاتی وجود دارد و از طرفی دیگر کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از برداشته شدن مصالح خرده آسفالتی از محل دپو و سرباره فولاد از زمین‌های اطراف کارخانه را نیز باید در نظر داشت. در نتیجه، کاهش استفاده از مصالح سنگی طبیعی، علاوه بر صرفه اقتصادی، بازیابی انرژی‌های صرف شده در تولید ضایعات و کمک به حل مشکلات مربوط به محل دفع ضایعات را نیز در پی دارد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان استفاده از مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد و ترکیبی از آنها به عنوان جایگزین مصالح سنگی طبیعی در روسازی بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های مورد استفاده شامل آزمایش‌های مکانیکی و آزمایش TCLP به عنوان یک آزمایش زیست‌محیطی می‌باشد. اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- استفاده از مصالح خرده آسفالتی و سرباره کوره فولاد به عنوان جایگزین مصالح سنگی طبیعی باعث کاهش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی

نمونه‌های ترکیبی، نسبت به نمونه حاوی ۱۰۰٪ مصالح سنگی طبیعی، چقرمگی و جذب انرژی بیشتری داشتند. بالطبع، با افزایش مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد، نه تنها حداقل معیارها برآورده می‌گردد، بلکه چقرمگی و جذب انرژی افزایش می‌یابد. چقرمگی نمونه N50S25R25 به دلیل دارا بودن ۲۵٪ مصالح خرده آسفالتی به جای سرباره فولاد، نسبت به نمونه N50S50، ۶۷ درصد افزایش و همچنین نسبت به نمونه کنترلی ۱۳/۴ درصد افزایش را نشان می‌دهد. اگرچه نمونه‌های حاوی مقدار زیاد مصالح خرده آسفالتی مقاومت سایشی مناسبی نداشتند، ولی با توجه به بیشتر بودن مقاومت سایشی نمونه حاوی سرباره فولاد حتی نسبت به نمونه حاوی مصالح سنگی طبیعی، با جایگزینی بخشی از مصالح خرده آسفالتی با سرباره فولاد، مقاومت سایشی نمونه‌های ترکیبی ارتقا می‌یابد. به عنوان مثال، نمونه‌های N50S50، N50R25S25، N25R25S50 و R25S75 دارای مقاومت سایشی قابل مقایسه‌ای با مخلوط کنترلی هستند و حتی نمونه N50S50 درصد افت وزنی کمتری را نسبت به نمونه کنترلی نشان می‌دهد (۱۶/۴ درصد در برابر ۱۸٪). بدین ترتیب، با ترکیب مناسبی از مصالح سنگی طبیعی، مصالح خرده آسفالتی و سرباره می‌توان به مقاومت سایشی کافی دست یافت.

در خصوص جنبه زیست‌محیطی نمونه‌های ترکیبی، با توجه به این که غلظت برخی فلزات نظیر سرب و کادمیوم در سرباره فولاد بیش از حد مجاز دستورالعمل‌های مربوطه می‌باشد و در صورت استفاده در بتن غلتکی، غلظت آنها به کمتر از حد مجاز کاهش می‌یابد، مسلماً از اثرات تخریبی ناشی از شیرابه‌های این ضایعات در طبیعت کاسته خواهد شد.

با توجه به موارد مذکور، نمونه‌های ترکیبی N50S50 و N50S25R25 حداقل معیارهای مربوط به آزمایش‌های به کار رفته در این پژوهش را برآورده کردند. نمونه N50S25R25 به عنوان یکی از نمونه‌های مناسب حاوی هردو مصالح ضایعاتی مورد استفاده در این

- روسازی بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد اثرات مخربی بر آب‌های سطحی و زیرزمینی نخواهد داشت. علی‌رغم بالا بودن غلظت فلزات سنگین در شیرابه سرباره فولاد ریزدانه، در صورت استفاده از سرباره فولاد در بتن غلتکی، غلظت فلزات سنگین در شیرابه لایه بتنی به کمتر از حد مجاز کاهش می‌یابد.

- براساس یافته‌های این پژوهش، ترکیب مناسبی از مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی طبیعی، با برآورده کردن حداقل معیارهای قابل قبول روسازی بتن غلتکی مطابق استانداردهای مربوطه، می‌تواند علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، هزینه‌های مربوط به مصرف مصالح طبیعی را کاهش دهد.

- با توجه به یافته‌های این پژوهش و با دیدگاه استفاده از حداقل مصالح سنگی طبیعی، از میان مخلوط‌های بتن غلتکی ترکیبی مورد استفاده، مخلوط حاوی ۵۰٪ مصالح سنگی طبیعی و ۵۰٪ سرباره فولاد و همچنین مخلوط حاوی ۵۰٪ مصالح سنگی طبیعی، ۲۵٪ سرباره فولاد و ۲۵٪ مصالح خرده آسفالتی می‌توانند برای ساخت روسازی پیشنهاد شوند. این پیشنهاد محدود به مشخصات مصالح و آزمایش‌های مربوط به این پژوهش بوده و برای اجرایی شدن باید توسط آزمایش‌های بیشتر و پژوهش‌های میدانی، اعتبارسنجی شود.

مخلوط‌های بتن غلتکی می‌شود. با افزایش این مصالح ضایعاتی، عمدتاً به دلیل کاهش چسبندگی بین این مصالح و ملات سیمان، مقاومت‌های مکانیکی مذکور کاهش می‌یابد. تأثیر افزایش مصالح خرده آسفالتی بر کاهش مقاومت مکانیکی بتن غلتکی بیشتر از سرباره فولاد است. استفاده از مصالح خرده آسفالتی احتمالاً به علت وجود پوشش قیر، تأثیر منفی کمتری بر مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری داشته است.

- با افزودن مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد، به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری، چقرمگی افزایش می‌یابد. تأثیر مصالح خرده آسفالتی در افزایش چقرمگی بیش از سرباره فولاد است.

- مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد بیشتر، علی‌رغم کاهش در میزان بار حداکثر، جذب انرژی بیشتری را دارند. بدین ترتیب، انعطاف‌پذیری این نمونه‌ها تا وقوع شکست بیشتر خواهد بود و انتظار می‌رود که در معرض بارهای مکرر، رفتار بهتری داشته باشند.

- با افزایش مصالح خرده آسفالتی مقاومت سایشی مخلوط بتن غلتکی به دلیل چسبندگی ضعیف بین مصالح حاوی قیر و ملات سیمان حتی در سطح، کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش سرباره فولاد، مقاومت سایشی روسازی به دلیل بافت ناهموار سرباره و متراکم‌تر شدن سطح مشترک بین این مصالح و ماتریس سیمان افزایش می‌یابد. بدین ترتیب در صورت استفاده ترکیبی از مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد، ضعف مربوط به سایش مصالح خرده آسفالتی جبران خواهد شد.

## ۷. مراجع

- مدرس، ا. ۱۳۹۳. "بررسی مواد باطله زغال سنگ موجود در کارخانه زغال سنگ البرز مازندران برای بکارگیری در لایه‌های زیرسازی و روسازی راه". گزارش طرح پژوهشی برون دانشگاهی، اداره کل راه و شهرسازی استان مازندران.
- مستوفی نژاد، د. و نظری منفرد، ح. ۱۳۸۵. "افزودن سرباره و پودر سنگ آهک به بتن جهت افزایش دوام آن در محیط سولفاتی". پژوهشنامه حمل و نقل، ۳(۲): ۱۴۵-۱۳۹.

- Abut, Y. and Yildirim, S. T. 2017. "Structural design and economic evaluation of roller compacted concrete pavement with recycled aggregates". *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(2): 022064, IOP Publishing.
- ACI 207.5R-99. 2004. "Roller compacted mass concrete". ACI Manual of Concrete Practice.
- ACI 325.10R. 1999. "Roller compacted concrete pavements". American Concrete Institute.
- ASTM C1747/C1747M-13. 2013. "Standard test method for determining potential resistance to degradation of pervious concrete by impact and abrasion".
- Benouadah, A., Beddar, M. and Meddah, A. 2017. "Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber". *J. Fund. Appl. Sci.*, 9(2): 623-635.
- Berry, J. R. 2001. "Report on roller-compacted concrete pavements". ACI Committee Report, Farmington Hills, MI.
- Bilý, P., Fládr, J. and Haase, M. 2015. "Experimental verification of properties of roller-compacted concrete for pavements". *In: Advanced Materials Research*, 1124: 307-312, Trans Tech Publications Ltd.
- Boussetta, I., El Euch Khay, S. and Neji, J. 2018. "Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates". *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1482792>
- Cortez, E. R. and Eaton, R. A. 1991. "Environmental monitoring and performance evaluation of roller-compacted concrete pavement: Conley Terminal, Boston, Massachusetts". CRREL-SR-91-25, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Lab.
- Courard, L., Michel, F. and Delhez, P. 2010. "Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete". *Constr. Build. Mater.*, 24(3): 390-395.
- Debbarma, S., Singh, S. and Ransinchung RN, G. D. 2019. "Laboratory investigation on the fresh, mechanical, and durability properties of roller compacted concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates". *Transport. Res. Record J. Transport. Res. Board*, 2673(10): 652-662.
- Debbarma, S., Ransinchung RN, G. D. and Singh, S. 2019. "Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement". *Constr. Build. Mater.*, 199: 508-525.
- Environmental Protection Agency. 2005. "Using coal ash in highway construction: A guide to benefits and impacts. Report Number EPA-530-K-002: ID: 151, USA.
- 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.
- Fakhri, M., Amoosoltani, E. and Aliha, M. R. M. 2017. "Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber". *Eng. Fract. Mech.*, 180: 43-59.
- Halsted, G. E. 2009. "Roller-compacted concrete pavements for highways and streets". *In: 2009 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada-transportation in a Climate of Change*.
- Hesami, S., Modarres, A., Soltaninejad, M. and Madani, H. 2016. "Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement". *Constr. Build. Mater.*, 111: 625-636.
- Hossiney, N., Wang, G., Tia, M. and Bergin, M. J. 2008. "Evaluation of concrete containing RAP for use in concrete pavement". *In: Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting (Cdrom)*, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Huang, B., Li, G., Pang, S. S. and Eggers, J. 2004. "Investigation into waste tire rubber-filled concrete". *J. Mater. Civ. Eng.*, 16(3): 187-194.
- Huang, B., Shu, X. and Li, G. 2005. "Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements". *Cement Concrete Res.*, 35(10): 2008-2013.
- Huang, B., Shu, X. and Burdette, E. G. 2006. "Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements". *Mag. Concrete Res.*, 58(5): 313-320.
- Lam, M. N. T., Le, D. H. and Jaritngam, S. 2018a. "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.
- Lam, M. N. T., Jaritngam, S. and Le, D. H. 2018b. "EAF slag aggregate in roller-compacted concrete pavement: Effects of delay in compaction". *Sustain.*, 10(4): 1122.
- Lam, M. N. T., Jaritngam, S. and Le, D. H. 2017. "Roller-compacted concrete pavement made of electric arc furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties". *Constr. Build. Mater.*, 154: 482-495.
- Li, Q., Zhang, F., Zhang, W. and Yang, L. 2002. "Fracture and tension properties of roller compacted concrete cores in uniaxial tension". *J. Mater. Civ. Eng.*, 14(5): 366-373.
- Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Ayuso, J. and López, M. 2018. "Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates". *Road Mater. Pavement Design*, 19(1): 36-55.

- Meddah, A., Beddar, M. and Bali, A. 2014. "Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement". *J. Clean. Prod.*, 72: 187-192.
- Meddah, A., Bensaci, H., Beddar, M. and Bali, A. 2017. "Study of the effects of mechanical and chemical treatment of rubber on the performance of rubberized roller-compacted concrete pavement". *Innov. Infrastruct. Solut.*, 2(1): 17.
- Modarres, A., Hesami, S., Soltaninejad, M. and Madani, H. 2018. "Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment". *Int. J. Pavement Eng.*, 19(8): 748-761.
- Modarres, A. and Hosseini, Z. 2014. "Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Mater. Design*, 64: 227-236.
- Portland Cement Association. 2003. "Structural design of roller-compacted concrete for industrial pavements". Portland Cement Association.
- Rooholamini, H., Hassani, A. and Aliha, M. R. M. 2018. "Fracture properties of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete in mode I with consideration of possible kinked crack". *Constr. Build. Mater.*, 187: 248-256.
- Rooholamini, H., Sedghi, R., Ghobadipour, B. and Adresi, M. 2019. "Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete". *Constr. Build. Mater.*, 211: 88-98.
- Tayabji, S. D., Sherman, T. W., Keifer, O., Nanni, A., Piggott, R. W., Pittman, D., ... and Scott, J. A. 1995. "State-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements". ACI325. 10R-95.