ارزیابی رفتار مکانیکی و خصوصیات مهندسی روسازی‌های بتن غلتکی حاوی الیاف مصنوعی

مقاله علمی – پژوهشی

مجید صافحیان*، استادیار، گروه مدیریت ساخت و آب، دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
علی نجف پور طالش، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
مهدی روانشادنیا، دانشیار، گروه مدیریت ساخت و آب، دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: safehian@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۳/۰٤/۰۱– پذیرش: ۱٤۰۳/۱۱/۰۱
صفحه ٤۵۲-٤۳۷

چکیده

هدف از این تحقیق ارزیابی عملکرد مکانیکی و دوام بتن غلتکی همراه با الیاف به عنوان جایگزینی برای روسازی‌های آسفالتی در مناطق صنعتی با بارگذاری ترافیکی سنگین است. روسازی بتن غلتکی عبارت است از مخلوط سفت و نسبتا خشکی از سنگدانه (حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر)، سیمان و آب که توسط فینیشرهای متداول روسازی آسفالتی پخش و توسط غلتک ویبره‌ای کوبیده و متراکم می‌شود. روسازی بتن غلتکی بعد از تکمیل واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان، دارای ظاهری مشابه با بتن با اسلامپ صفر می‌باشد در این پژوهش از آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، دوام در برابر آتش و سیکل‌های متوالی یخ زدن و ذوب شدن استفاده شد. هدف اصلی این پژوهش بررسی خصوصیات مهندسی و مکانیکی بتن غلتکی به عنوان جایگزینی برای روسازی آسفالتی در مناطق صنعتی با ترافیک سنگین است. همچنین با انجام آزمایش دوام در برابر آتش، مقاومت در برابر آتش سوزی دو روسازی بتن غلتکی و روسازی آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد بتن غلتکی حاوی الیاف بهتر از بتن‌های غلتکی بدون الیاف است. همچنین مقاومت روسازی بتن غلتکی در مقابل آتش سوزی بسیار بیشتر از مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته است. درنهایت روسازی بتن غلتکی به دلیل خصوصیات مهندسی و مکانیکی که دارد مناسب برای راه‌ها با ترافیک وسائل نقلیه سنگین و سرعت پایین است

واژه‌های کلیدی: عملکرد مکانیکی، دوام، بتن غلتکی، الیاف مصنوعی، روسازی آسفالتی، مناطق صنعتی

۱–مقدمه

مخلوط‌های آسفالتی رایج‌ترین رویه برای ساخت روسازی در آزادراه‌ها، بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها می‌باشند. در طول چند دهه‌اخیر، افزایش چشمگیری در حجم ترافیک، وزن وسایل نقلیه و فشار چرخ اتومبیل‌ها رخ داده است که منجر به افزایش پدیده شیارشدگی و موج افتادگی در روسازی‌های آسفالتی شده است (چوبدار، ۱٤۰۰ و فضلی، ۱۳۹۹). این افزایش در حجم ترافیک که در طراحی روسازی‌ها پیش‌بینی نشده است، عمر خدمت‌دهی روسازی‌های انعطاف‌پذیر را به شدت کاهش، هزینه تعمیر و نگهداری را برای سازمان‌های راه و ترابری افزایش داده است. با توجه به خرابی‌های روسازی آسفالتی در دمای بالا (شیارشدگی و موج افتادگی) و همچنین خرابی‌هایی نظیر کاهش عملکرد روسازی (دوام) بر اثر پیرشدگی قیر و حساسیت رطوبتی، ضروری است تحقیقات جامعی بر روی رویه جدید برای روسازی‌ها، که از پایداری و دوام مناسبی در برابر خرابی‌های ذکر شده برخوردار باشند، انجام گیرد (نوابی، ۱۳۹۹). از طرف دیگر، عملکرد و عمر خدمت‌دهی روسازی‌های آسفالتی در کشور، با توجه به ورود سیستم‌های جدید حمل و نقل همگانی نظیر سامانه اتوبوس‌رانی تندرو و افزایش استفاده از وسایل نقلیه، با انتظارات و خواسته‌های جوامع امروزی سازگار نیست و سالانه مقدار زیادی از بودجه کشور صرف بهسازی و نگهداری روسازی راه‌ها می‌گردد. همواره به‌منظور دستیابی به روسازی با عملکرد مطلوب، تحقیقات در زمینه‌ی عیب‌یابی و

ارائه راه‌حل می‌تواند راهگشا بوده، از صرف بودجه‌های سالیانه کلان ناشی از ضعف‌های فوق که عمده دلایل وقوع آنها استفاده از شیوه‌های سنتی ساخت و تولید روسازی آسفالتی است، جلوگیری نماید (روح الامینی، ۱۴۰۱). با افزایش هزینه مصالح اولیه ساخت روسازی آسفالتی، قوانین سختگیرانه زیست محیطی و خرابی‌های این روسازی، رویکرد فعالان و مدیران صنعت روسازی به سمت تولید و استفاده از روسازی‌های بتنی و بتن غلتکی هم راستا با توسعه پایدار اقتصاد و محیط زیست متمایل گردیده است. یکی از روسازی‌های سازگارتر با محیط زیست و همچنین مقاوم در برابر بارگذاری‌های سنگین، روسازی‌های بتن غلتکی است (غفاری، ۱۳۹۸). روسازی بتن غلتکی عبارت است از مخلوط سفت و نسبتا خشکی از سنگدانه (حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر)، سیمان و آب که توسط فینیشرهای متداول روسازی آسفالتی پخش و توسط غلتکهای ویبره‌ای کوبیده، متراکم می‌شود. روسازی بتن غلتکی بعد از خشک شدن در اثر واکنش هیدراتاسیون سیمان به بتن تبدیل می‌گردد و دارای ظاهری مشابه با بتن با اسلامپ صفر می‌باشد. برای دستیابی به سطح با کیفیت بالاتر، از غلتک چرخ لاستیکی برای تراکم لایه نهایی استفاده می‌گردد. بتن غلتکی به اندازه کافی خشک می‌باشد که بتواند وزن غلتک متراکم کننده را تحمل کند. همچنین به اندازه کافی مرطوب و دارای آب است که مقدار مطلوبی از خمیر سیمان در داخل بتن سیمانی تشکیل شود تا در زمان پخش از سطحی یکنواخت برخوردار باشد (Afonso et al., 2016). یکی از ضعف های رویه های بتن غلتکی، ناهمواری سطح آن است که برای برطرف کردن آن یک قشر نازک روکش آسفالتی روی آن اجرا می گردد. بتن غلتکی جهت کاربرد به عنوان روسازی راه، در حالت تازه با بتن معمولی متفاوت بوده و بسیار سفت‌تر و کارایی آن به مراتب کمتر می‌باشد. در حالت سخت شده، روسازی بتن غلتکی از بسیاری جهات مشابه بتن معمولی است و پارامترهای اصلی تاثیر گذار روی خواص بتن‌های معمول نظیر نسبت آب به سیمان (w/c) و میزان تراکم، تأثیر مشابه روی خصوصیات بتن غلتکی دارند. در عین حال باید توجه داشت که به علت کارایی بسیار پایین این نوع بتن‌ها، روش‌های تهیه و تعیین خصوصیات بتن غلتکی متفاوت با بتن‌های معمولی است. روسازی بتن غلتکی باید به حدی خشک بوده و استحکام داشته باشد که بتواند وزن غلتک را تحمل کند و به اندازه‌ای مرطوب باشد که به خوبی مخلوط شود و خمیر آن بین سنگدانه‌ها، به طور یکنواخت و بدون جداشدگی سنگدانه‌ها پراکنده شود. بتن غلتکی روسازی معمولاً با استفاده از فینیشر های بتن آسفالتی پخش و پس از آن توسط غلتک ویبره‌ای کوبیده و متراکم می‌گردد. از مزیت‌های اقتصادی که روسازی بتن غلتکی در مقایسه با روسازی بتنی معمولی ایجاد می‌نماید، عمدتاً می‌توان به کاهش درصد سیمان، کاهش هزینه‌های قالب بندی و بتن ریزی، کاهش زمان ساخت و کاهش ترک خوردگی‌های ناشی از تنش‌های جمع شدگی اشاره کرد.(An et al., 2018). بعلاوه روسازی بتن غلتکی را می‌توان طوری طراحی کرد که دارای مقاومت‌های خمشی، فشاری و کششی بیشتری باشد که به آن امکان تحمل بارهای سنگین تکرار شونده را می‌دهد، بدون آنکه دچار گسیختگی گردد. همچنین به دلیل نفوذپذیری پایین آن، روسازی بتن غلتکی دوام بسیار خوبی داشته و در برابر حملات شیمیایی و محیطی مانند شرایط ذوب و انجماد مقاومت می‌کند. قابلیت رنگ سطح روسازی بتن غلتکی، به تأمین الزامات روشنایی سطح پارکینگ‌ها و انبارها کمک می‌کند. بعلاوه به علت حساسیت کمتر روسازی بتن غلتکی به مواد نفتی مانند بنزین، گازوئیل و نیز مواد خورنده، عمر مفید این رویه بیشتر از روسازی آسفالتی می‌باشد (۴۰ تا ۵۰ سال در مقایسه با ۱۵ تا ۲۰ سال). همچنین مزیت اصلی روسازی بتن غلتکی نسبت به روسازی بتن معمولی سرعت ساخت بیشتر و هزینه ساخت کمتر آن است که معمولاً حدود ۳۰ درصد صرفه جویی اقتصادی در بردارد.

از دیگر مزایای روسازی بتن غلتکی می‌توان به موارد زیر اشاره داشت.

-عدم نیاز به مسلح کننده‌های فولادی

-عدم تغییر شکل تحت اثر بارهای سنگین و تکراری در مقایسه با روسازی آسفالتی

-امکان استفاده روی بسترهای دارای مقاومت کم

-تحمل بارهای سنگین ترافیکی به ویژه در شیب‌ها، ایستگاه‌های اتوبوسرانی تندور و مناطق صنعتی

-کاهش تخریب منابع طبیعی و محیط زیست

باید توجه داشت که روسازی بتن غلتکی معایبی نظیر ظرفیت باربری کمتر نسبت به روسازی بتنی و کیفیت رانندکی کمتر نسبت به روسازی آسفالتی دارد.

۲- پیشینه تحقیق

روسازی‌های بتنی در برابر شیارشدگی و موج افتادگی بسیار مقاوم می‌باشند و از دوام و عمرخستگی بالاتری نسبت به روسازی‌های آسفالتی برخوردار هستند (Cai et al., 2017). سابقه کاربرد روسازی بتن غلتکی عمدتاً در جاده‌ها و روسازی‌ها با سرعت و ترافیک پایین بوده است هرچند که امروزه با پیشرفت تکنولوژی و ساخت فینیشرهای با کارآیی بالاتر و قدرت تراکم بیشتر امکان اجرای سطح نهایی کاملاً هموار امکان‌پذیر شده، استفاده از آن برای سرعت‌های بالاتر فراهم شده است. تاکنون عمده کاربرد روسازی بتن غلتکی در محوطه‌های روباز، کارخانه‌ها، جاده‌های دسترسی معادن، سطوح محوطه بارانداز بندرها، پایانه‌های وسایل نقلیه سنگین و نظامی، محوطه پارکینگ اتومبیل‌ها و کامیون‌ها، سطح انبارها، محل پارکینگ هواپیماها در فرودگاه‌ها، جاده‌های فرعی و یا خیابان‌های با سرعت پایین و متوسط بوده است. روسازی بتن غلتکی به علت سرعت بالا در اجرا، هزینه‌های اولیه‌ی کم، دوام و ماندگاری بالا تحت بارهای دینامیکی، مقاومت فشاری مناسب در مقابل بارهای وارده از ترافیک عبوری، تطبیق بیشتر با محیط زیست و قابلیت بازیافت، نسبت به روسازی آسفالتی دارای مزیت‌هایی می‌باشد.

در پژوهشی دیگر رفتار شکست بتن غلتکی مسلح شده با الیاف مصنوعی و فلزی بررسی شد (Gong et al., 2019). نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که حضور الیاف‌ها (هم الیاف مصنوعی و هم الیاف فلزی) در بتن غلتکی سبب کاهش سرعت رشد ترک در حالت ۱ و ۲ شکست شده است. همچنین الیاف مصنوعی نسبت به الیاف فلزی امکان پخش بهتری در بتن غلتکی دارد. در مطالعه‌ای دیگر تأثیرات تراکم و پارامترهای اختلاط بر عملکرد بتن غلتکی مورد ارزیابی قرار گرفت (Cihackova et al., 2015). در این مطالعه آزمایشگاهی از دو درصد مختلف سیمان و چند دانه‌بندی مختلف برای بتن غلتکی استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های خمشی و فشاری بتن غلتکی نشان داد که مقدار سیمان و مقدار تراکم تأثیر بسیار زیادی در نتایج این دو آزمایش دارند در حالیکه مقدار آب تأثیر ناچیزی خواهد داشت. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش مقدار سیمان مقاومت فشاری بتن غلتکی افزایش خواهد یافت. در پژوهشی که در سال ۲۰۲۱ انجام شد خصوصیات مکانیکی و دوام روکش‌های بتنی مسلح شده با الیاف مصنوعی پروپیلن اصلاح شده و فلزی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش برای ارزیابی خصوصیات بتن‌های ساخته شده با الیاف فلزی و پروپیلن، آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخ انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که بتن‌های حاوی الیاف مصنوعی پروپیلن اصلاح شده دارای عملکرد بهتری در مقاومت فشاری و کارایی بتن دارند، اما مقاومت خمشی آن‌ها از بتن‌های حاوی الیاف فلزی کمتر است (Hasani et al., 2021). بتن مسلح شده با الیاف به مصالح جدیدی تبدیل شده‌است که در سازه‌های مختلف مانند سازه‌های ساختمانی، کف مناطق صنعتی بزرگ و راه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهشی، الیاف خرد شده بازالت به شکل رشته برای اصلاح بتن با نام بتن مسلح شده با فیبر بازالت برای افزایش مقاومت فشاری و مدول گسیختگی ۲۸ روزه مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های الیاف بازالت با سه طول مختلف و سه مقدار مختلف در بتن استفاده شدند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد الیاف عمل اختلاط با مشکل روبرو می‌گردد و الیاف‌ها به پره مخلوط کن گیر می‌کنند. این مشکلات زمانی شدیدتر می‌شوند که الیاف با طول‌های بلندتر در بتن استفاده شوند. نتایج نشان داد که الیاف رشته بازالت خرد شده ۳٦ میلی‌متری و مقدار الیاف ۸ کیلوگرم بر متر مکعب برای دستیابی به عملکرد بالا هم در مقاومت فشاری و هم در مدول گسیختگی بهینه هستند (Corradini et al., 2017).

نتایج حاصل از پژوهشی نشان داد که اضافه کردن ماکرو الیاف‌ها در بتن غلتکی سبب افزایش مقاومت خمشی، مقاومت در برابر خستگی و مقاومت در برابر رشد و گسترش ترک خواهد شد (روح الامینی، ۱٤۰۱). نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اندازه و مقدار الیاف‌ها تأثیر بسزایی در افزایش یا کاهش مقاومت در برابر ترک خوردگی بتن غلتکی دارد. همچنین خصوصیات شکست بتن غلتکی حاوی الیاف بهتر از بتن غلتکی معمولی (بدون الیاف) می‌باشد. افزایش محبوبیت استفاده از بتن غلتکی مسلح شده با الیاف ماکرو مصنوعی به عنوان یک مصالح روسازی، نیاز به شناسایی کامل نحوه تأثیر این الیاف بر نفوذ پذیری و مقاومت بتن غلتکی در سیکل‌های ذوب و یخ دارد. در پژوهشی مقاومت بتن غلتکی مسلح شده با الیاف مصنوعی در برابر سیکل‌های ذوب و یخ و نفوذپذیری آب به داخل این بتن بررسی شد. برای ارزیابی عملکرد الیاف مذکور در بتن غلتکی مقادیر، ۰، ۰/۲، ۰/٤ و ۰/٦ درصد مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌های فشاری، خمشی، مقاومت در برابر لغزندگی و سیکل

ذوب و یخ انجام شد. نتایج نشان داد که ۰/٤ درصد الیاف در بتن غلتکی، بهترین عملکرد را در برابر سیکل‌های ذوب و یخ و مقاومت خمشی دارد. همچنین مقدار الیاف تاثیری در مقاومت در برابر لغزندگی ندارد (Rooholamini et al., 2019). افزودن الیاف ماکرو به دال‌های بتنی سبب افزایش ظرفیت خمشی، مقاومت خستگی، کاهش نرخ سرعت رشد ترک‌ها و کمک به انتقال برش در اتصالات و ترک‌ها می‌گردد. در یک مطالعه آزمایشگاهی مزایای الیاف ماکرو در بتن غلتکی با اندازه‌گیری تغییر در خواص مکانیکی آن و مقایسه آن با بتن الیافی معمولی برای روسازی‌ها بررسی شد. شش نوع الیاف، چهار نوع مصنوعی و دو نوع فولادی، با شکل‌های فیبر مختلف در مخلوط‌های بتن غلتکی و در دو مقدار (۰/۲٪ و ۰/٤٪ حجمی) ترکیب شدند. افزودن ماکروفیبرهای مصنوعی، حداکثر تراکم خشک را بر روی مخلوط کنترل RCC با کاهش اصطکاک داخلی بین سنگ دانه‌ها افزایش داد. در حالی که الیاف فولادی تأثیر محدودی بر حداکثر تراکم خشک بتن غلتکی داشت. برای انواع مختلف الیاف، مقاومت فشاری بتن غلتکی مسلح شده با الیاف نسبت به مخلوط کنترل بتن غلتکی افزایش چشمگیری داشت. افزودن الیاف‌ها، مقاومت خمشی بتن غلتکی را افزایش نداد. اما به طور قابل توجهی ظرفیت مقاومت پس از پیک و مقاومت باقیمانده بتن غلتکی را بهبود بخشید (Rucka et al., 2021). هدف از تحقیقی، بررسی اثر الیاف ماکروسنتتیک بر خواص مکانیکی و برخی پارامترهای دوام بتن غلتکی می‌باشد. بدین منظور آزمایش های بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، طاقت خمشی، نفوذ پذیری، سایش و میزان پوسته شدگی در چرخه‌های ذوب و یخ بر روی نمونه‌های بتن غلتکی مسلح به الیاف ماکروسنتتیک انجام شد. از الیاف ماکروسنتتیک سوپر امباس با درصدهای جایگزینی حجمی برابر با ۰/۹ و ۱/۸ استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده و افزایش مقدار الیاف ماکروسنتتیک تأثیر محسوسی بر مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم بتن غلتکی نداشته است.(Tennis et al., 2004).

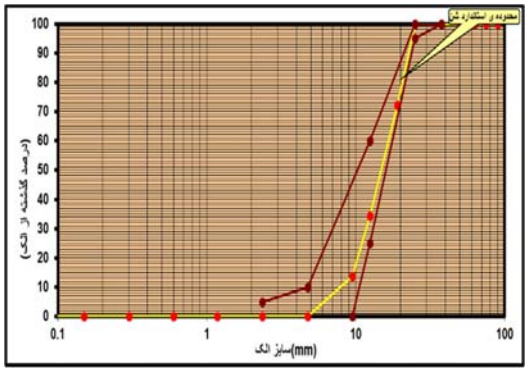
پژوهشی دیگر به بررسی تأثیر انواع الیاف شیشه (با دو طول ۱۲ و ۲٤ میلی‌متر) بر خصوصیات روسازی بتن غلتکی بعنوان هدف اصلی پرداخته بود. جهت مقایسه پارامترهای مقاومتی، درصد افزودن الیاف ثابت نگهداشته شد و با تغییر طول الیاف، تأثیر آن بر خصوصیات بتن غلتکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که با توزیع یکنواخت الیاف، بتن غلتکی مسلح شده به الیاف شیشه ۱۲ میلی‌متری نسبت به بتن شاهد مقاومت فشاری بیشتری دارد اما مقاومت کششی آن چندان تفاوتی ندارد. ولی نمونه های حاوی الیاف ۲٤ میلی‌متری در مقابل نمونه شاهد و نمونه الیافی ۱۲ میلی‌متر در تست کششی، فشاری و خمشی عملکرد بهتری دارد. در تست خمش مشاهده گردید که نمونه شاهد دچار گسیختگی آنی می‌گردد (Yang and Weng, 2015).

در پژوهشی الیاف ماکروسنتتیک جهت مسلح نمودن بتن غلتکی استفاده گردید. آزمایش‌های مکانیکی شامل آزمایش مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و آزمایش تیر خمشی بر روی دو درصد مصرفی از این الیاف صورت پذیرفت. همچنین رفتار ترک خوردگی و خستگی با استفاده از تیر خمشی سه نقطه ای با شیار مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین اثر الیاف را می‌توان به ترتیب بر روی انرژی شکست (رفتار پس از ترک خوردگی)، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم بیان نمود. این در حالی است که الیاف، اثرگذاری چشمگیری بر روی مقاومت فشاری ندارد. نتایج حاصل شده از آزمایش خستگی و تحلیل آماری صورت پذیرفته، بیانگر تأثیر بسزای درصد الیاف و انرژی شکست بر عمر خستگی تیر بتن غلتکی است (Iyer et al., 2015). در پژوهشی خواص مکانیکی بتن غلتکی و بتن معمولی همراه با ماکروالیاف برای روسازی‌ها بررسی‌شد. نتایج نشان داد که براساس تست‌های کشش فشرده دیسک شکل، خواص شکست بتن غلتکی با الیاف، مشابه یا بیشتر از بتن معمولی با الیاف است. بنابراین هر دو روسازی یادشده، وقتی به درستی ساخته شوند، مقاومت به شکست و خستگی مشابه‌ای خواهند داشت (Pei et al., 2016).

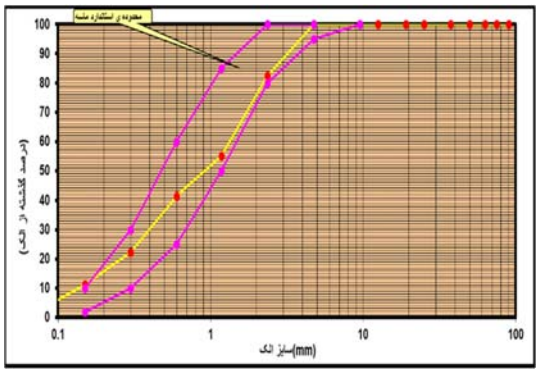
در پژوهشی با تغییر در مقدار ریزدانه و سیمان، سعی بر رسیدن به طرح اختلاطی بهینه شده است که به ترتیب مقدار ریزدانه از کل مصالح سنگی در دو محدوده ۰ تا ۵۰ و ۵۰ تا ۱۰۰ درصد و مقدار نسبت سیمان به مصالح خشک در محدوده‌ی ۱۰ تا ۲۲ درصد تغییر کرده است. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که طرح اختلاطی با ٪۳٤ ریزدانه و ٪٦٦ درشت‌دانه دارای دانه‌بندی و سیمان بهینه است و به ترتیب باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ٪۱۲/۵ و ٪۱۵/۰٤ نسبت به حالت مبنا شده است (Rooholamini et al., 2018).

۳- مصالح و ساخت نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌های بتن غلتکی مورد استفاده در این تحقیق از سنگدانه‌ها (شامل هر دو گروه درشت‌دانه و ریزدانه)، آب، سیمان و الیاف استفاده شده است که در ادامه به بیان مشخصات و ویژگی‌های هرکدام پرداخته می‌شود. مصالح سنگی نه تنها در مقاومت بتن بسیار مؤثرند بلکه دوام و پایداری بتن نیز تا حد زیادی تحت تأثیر ویژگی‌های این مواد قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده بیشتر از سنگدانه‌های سالم (شکسته شده و عاری از گرد و غبار) در بتن که منجر به کم کردن مصرف سیمان می‌گردد از نظر اقتصادی، سودمند است. لازم به ذکر است که جنبه اقتصادی نسبت‌های اختلاط باید با ویژگی‌های بتن تازه و سخت‌شده سازگار باشد. سنگدانه‌های طبیعی معمولاً در اثر هوازدگی و فرسایش یا به طور مصنوعی از طریق خرد کردن سنگ‌های مادر حاصل می‌شوند. در این تحقیق مصالح سنگی از منابع غرب تهران تأمین شده و پس از دانه‌بندی در طرح اختلاط بتن غلتکی مورد استفاده قرارگرفته است. در اشکال ۱ و ۲ نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های به ترتیب درشت‌دانه و ریزدانه نشان داده شده است. همچنین مشخصات سنگدانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. سیمان استفاده شده در این تحقیق سیمان تیپ ۱ تولید شده توسط کارخانه آبیک می‌باشد. مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی این سیمان با استاندارد سیمان پرتلند ASTM C150 و استاندارد شماره ۳۸۹ ایران نیز مطابقت دارد. در این پژوهش برای افزایش مقاومت خمشی بتن غلتکی از الیاف مکس-۲۰۰ استفاده شده است. الیاف مکس-۲۰۰ محصولی تک رشته با مقاومت کششی بالا برای جلوگیری از انواع ترک‌های ریز و درشت با اثر بخشی فوق‌العاده بالا برای انواع بتن‌های سبک و سنگین می‌باشد. این محصول به‌طور خاص برای استفاده در بتن و جلوگیری از انواع ترک‌های آن طراحی‌شده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی شن مصرفی



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی

٤- آزمون‌های آزمایشگاهی

با توجه به طرح اختلاط بتن غلتکی، محدوده ۳۸۰ کیلوگرم سیمان به‌عنوان چسباننده در این طرح در نظر گرفته شده است. لذا در این پژوهش چهار مقدار الیاف مکس-۲۰۰ با نسبت حجمی ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ و ۲ درصد انتخاب شد که به‌وسیله آزمایش روی آنها درصد بهینه محاسبه گردید.

همچنین به‌عنوان نمونه شاهد، بتن با وزن سیمان ۳۸۰ انتخاب شد. در جداول ۲ و ۳ طرح اختلاط نمونه‌های مورد آزمایش در کنار هم و همچنین به تفکیک با درصد وزنی هرکدام از تشکیل‌دهنده‌ها آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش

مشخصات سنگ‌دانه‌ها	استاندارد مربوطه	درشت‌دانه طبیعی		ریزدانه طبیعی	
		مصالح-۱	مصالح -۲	مصالح-۱	مصالح-۲
حداکثر اندازه (میلی‌متر)	ASTM C136	۱۹	۱۹		
وزن حجمی (کیلوگرم بر متر مربع)	ASTM C127	۱٦٤۸	۱۵۸۲	۱۸٦٦	۱۸۸۰
جذب آب SSD (٪)	ASTM C136	۱/۲	۱/۳	۲/٤	۲/٦
مدول نرمی	ASTM D2419	–	–	۲/۸۸	۲/۹۳
وزن مخصوص	ASTM C127,128	۲/٦۷	۲/٦۵	۲/٦۵	۲/٦٦
رس و ذرات سست (٪)	ASTM C142	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۱	–
درصد سایش	ASTM C131	۱۱/۳	۱٤/٤		
سلامت سنگ‌دانه‌ها (٪)	ASTM C88	۵/۲	٦/۷		
ضریب تورق (٪)	ASTM D4791	۱٦/٦	۱۹/۷۷		
ضریب تطویل (٪)	ASTM D4791	۱۷/۸	۱۹/۰۹		

جدول ۲. طرح اختلاط بتن غلتکی

طرح اختلاط	سیمان (کیلوگرم بر مترمکعب)	آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	الیاف– درصد حجمی (کیلوگرم بر مترمکعب)	درشت‌دانه (کیلوگرم بر مترمکعب)	ریزدانه (کیلوگرم بر مترمکعب)	w/c
Control	۳۸۰	۱۳۰	٪ ۰ – ۰	۷۵۰	۱۱۵۰	۰/۳٤۲
CSF05	۳۸۰	۱۳۰	٪ ۰/۵ –۲	۷۵۰	۱۱۵۰	۰/۳٤۲
CSF10	۳۸۰	۱۳۰	٪ ۱ –٤	۷۵۰	۱۱۵۰	۰/۳٤۲
CSF15	۳۸۰	۱۳۰	٪ ۱/۵ – ٦	۷۵۰	۱۱۵۰	۰/۳٤۲
CSF20	۳۸۰	۱۳۰	٪ ۲ – ۸	۷۵۰	۱۱۵۰	۰/۳٤۲

جدول ۳. طرح اختلاط نمونه شاهد

مصالح	مقدار وزنی (کیلوگرم بر مترمکعب)	درصد وزنی
سیمان	۳۸۰	۱٦
درشت‌دانه	۷۵۰	۳۲
ریزدانه	۱۰۵۰	٤٦
آب	۱۳۰	٦
وزن کل	۲۳۱۰	۱۰۰

٤-۱-مقاومت فشاری

نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری پس از کپینگ (کلاهک گذاری قبل از انجام آزمایش) سطح نمونه مطابق با استاندارد ASTM C39 و با استفاده از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰ تن مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۳).

شکل ۳. آزمایش مقاومت فشاری

٤-۲- مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای بر روی تیرهای منشوری مطابق با استاندارد ASTM C1018 صورت پذیرفت. معمولاً از این استاندارد زمانی استفاده می‌گردد که الیاف توانایی بهبود بخشیدن کشش‌پذیری بتن پس از ترک‌خوردگی را داشته باشد. با توجه به طول الیاف و حداکثر اندازه سنگدانه‌ها، ابعاد ۳۵×۱۰×۱۰ سانتی‌متر برای ساخت تیرهای منشوری انتخاب گردید. پیش فرض این استاندارد، بارگذاری سه نقطه‌ای می‌باشد منتهی با توجه به اینکه یکی از ویژگی‌های الیاف تبدیل ترک‌های منفرد به ترک‌های چندگانه ریز است و نیز به منظور درگیر کردن ناحیه بیشتر از طول مقطع و برآورد بهتری از مقاومت خمشی، از بارگذاری چهار نقطه‌ای مطابق با توصیه ACI-544-2R استفاده گردید.

٤-۳- آزمایش آتش‌سوزی

به منظور ارزیابی مقاومت در برابر آتش‌سوزی دو روسازی، بتن غلتکی و مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته در یک کوره حرارتی المنتی قرار داده، تا ٦۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. هنگامی‌که مخلوط آسفالتی داغ یا روسازی آسفالتی دچار آتش‌سوزی می‌گردد، می‌تواند شرایط خطرناک و جبران ناپذیری را برای کاربران راه، به ویژه در تونل‌ها ایجاد کند. مطالعات نشان می‌دهد که در هنگام آتش‌سوزی در تونل، روسازی آسفالتی به شدت دچار حریق می‌گردد و دمای تونل به سرعت افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی، دمای روسازی می‌تواند در مدت زمان کوتاهی تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. در نتیجه لازم است روسازی بتن غلتکی در آزمایش آتش‌سوزی با روسازی آسفالتی مقایسه گردد. در شکل ٤ روش انجام آزمایش نشان داده‌شده است.

شکل ٤. روش انجام آزمایش آتش‌سوزی

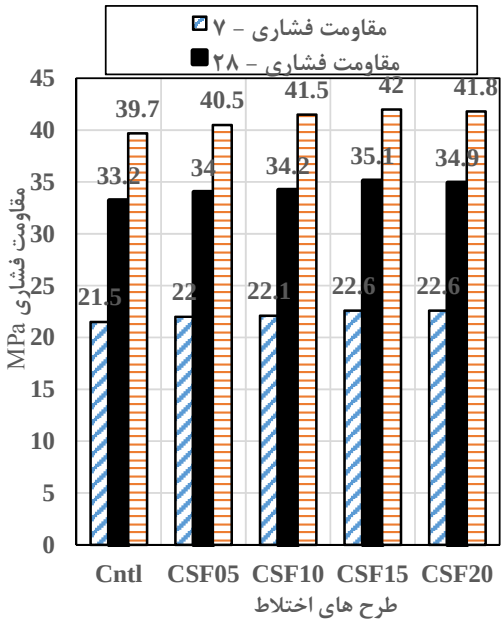
٤-٤- آزمایش دوام

مطابق استاندارد ASTM C 666، آزمایش ذوب و یخ سریع برای ارزیابی دوام روسازی نیمه انعطاف‌پذیر تحت چرخه‌های ذوب و یخ انجام شد. در طول آزمایش، دمای نمونه‌های روسازی نیمه انعطاف‌پذیر از مقدار۲ ± ۵ درجه سلسیوس به ۲ ± ۱۸- درجه سلسیوس کاهش می‌یابد و مجدداً دما به ۲ ± ۵ درجه سلسیوس می‌رسد (یک چرخه ذوب و یخ). زمان انجام یک چرخه ذوب و یخ ٤ ساعت است. در پایان هر چرخه ذوب و یخ، نمونه‌های تیر شکل از دستگاه دوام خارج‌شده و سپس خشک و وزن می‌گردند. در نهایت، مقدار کاهش وزن نمونه‌ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد.

تحلیل نتایج

مقاومت فشاری

شکل ۵ مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) می‌باشد. در شکل ۵ قابل مشاهده است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه شاهد ۳۳/۲ مگا پاسکال بوده درحالیکه مقاومت فشاری برای سطوح جایگزینی مختلف الیاف مکس-۲۰۰ افزایش‌یافته و برای جایگزینی تا سقف ٪۲ به ۳٤/۹ مگا پاسکال و برای جایگزینی تا سقف ٪۱ به ۳٤/۲ مگا پاسکال افزایش‌یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه و حتی ۹۰ روزه بتن حاوی درصدهای بالاتر الیاف، مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که الیاف مکس-۲۰۰ می‌تواند باعث بهبود خصوصیات مقاومت فشاری شود. نتایج حاکی از این است که هرچه سطح افزودن الیاف مکس-۲۰۰ افزایش یابد، میزان افزایش مقاومت فشاری بیشتر خواهد بود. عموماً برای توجیه این افزایش می‌توان به ایجاد ارتباط قوی‌تر بین ریزساختار بتن و جلوگیری از گسترش ترک در این ساختار اشاره نمود. همچنین می‌توان بر این نکته نیز اذعان نمود که با افزایش درصد الیاف مکس-۲۰۰ از ۱/۵ به ۲ درصد نه تنها شاهد افزایش در مقاومت نمی‌شویم، بلکه کاهش نیز مشاهده می‌شود. این امر به این علت است که با افزایش الیاف مکس-۲۰۰ از مقداری بیشتر، این الیاف عامل ضعف بتن بوده، پیوستگی بتن را کاهش می‌دهد. همچنین باید توجه داشت که با توزیع یکنواخت الیاف در مخلوط، عملکرد الیاف در جهت ترک‌ها بیشتر می‌گردد و منجر به کاهش گسترش ترک در بتن غلتکی می‌شود. با این حال اطمینان از توزیع مناسب الیاف‌ها در مخلوط باید در زمان اختلاط حاصل گردد. همچنین الیاف‌ها منجر به چسبندگی بیشتر (با ایجاد پلی بین ملات و سنگدانه‌ها) درشت‌دانه‌ها با ملات سیمان در مخلوط می‌گردند.



شکل ۵. مقاومت فشاری در سنین مختلف

مقاومت خمشی

از آزمایش خمشی سه نقطه‌ای جهت بررسی تغییرات مقاومت خمشی در اثر افزودن سرباره بجای سنگدانه به نمونه‌های بتنی، قبل و بعد از چرخه ذوب و یخ استفاده‌شده است. جهت انجام آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C78، مقاومت تیرهای بتنی واقع بر هر تکیه‌گاه ساده، تحت بار ناشی از خمش سه‌نقطه‌ای (مانند شکل ٦) تعیین‌شده و نتایج به صورت مدول گسیختگی بیان می‌شود. شکل ۷ نمونه‌ها پس از شکست را نشان می‌دهد. آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه بر روی نمونه تیرچه‌های خمشی انجام گرفته، نتایج آن به صورت مدول گسیختگی در شکل ۸ مقایسه شده‌است.

بر اساس نتایج، بتن با ۱/۵ درصد الیاف مکس-۲۰۰ بیشترین میزان مدول گسیختگی را دارد. البته میزان کم شدن مقاومت خمشی بتن با جایگزینی بیشتر الیاف مکس-۲۰۰ از ۱/۵ درصد تا ۲ درصد، مقدار اندک ۰/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است که قابل صرف نظر کردن است. لازم به توضیح است که مقاومت خمشی بتن در واقع ترکیبی از مقاومت کششی و فشاری مقطع بتنی در برابر تنش‌های ناشی از خمش اعمال شده به نمونه است. طبق آزمایش‌های انجام شده که نتایج آن در بالا ذکر گردید، از یک سو مقاومت فشاری بتن الیافی نسبت به بتن شاهد افزایش یافته و از سوی دیگر به دلیل کاهش ترد شدگی بتن (شکنندگی) که در نتیجه استفاده از الیاف مکس-۲۰۰ می‌باشد، مقاومت کششی مقطع نیز به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. این افزایش به دلیل قابلیت استهلاک تنش‌های کششی مقطع بتن الیافی که دارای تخلخل و در نتیجه خاصیت اسفنجی است اتفاق می‌افتد. بنابراین، مقاومت خمشی مقطع به دلایل ذکر شده افزایش پیدا می‌کند تا به مقدار بهینه رسیده و از آن به بعد به دلیل کاهش سطح مقاوم در برابر تنش‌های ناشی از اعمال خمش، مقدار مقاومت خمشی کاهش پیدا می‌کند. در این آزمایش نیز نقش الیاف‌ها در کنترل ترک‌خوردگی و گسترش ترک در مخلوط چشمگیر است. اگر الیاف‌ها در جهت عمود بر ترک قرار گیرد سبب کنترل ترک خوردگی و افزایش مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی می‌گردد. توزیع یکنواخت الیاف در مخلوط منجر به افزایش انرژی شکست بتن غلتکی و افزایش منحنی نیرو به جا به جایی می‌شود.

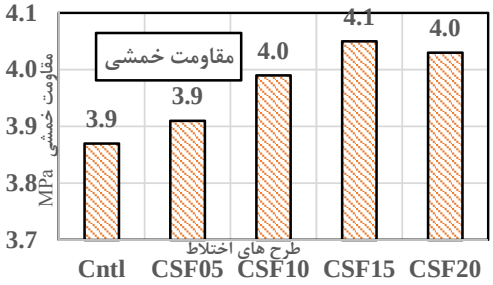
مقاومت در برابر آتش سوزی

به منظور ارزیابی مقاومت در برابر آتش‌سوزی، یک نمونه‌ی بتن غلتکی و یک مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته در یک کوره حرارتی المنتی قرار داده شده، تا ٦۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. همان طور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود سنگدانه‌های پوشش داده شده با قیر در مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته در دمای ۳۹۲ درجه سلسیوس کاملاً از یکدیگر جداشده و مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته کاملاً سوخته است. علاوه بر این، هنگامی که مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته یا روسازی آسفالتی دچار آتش‌سوزی می-گردد، می‌تواند شرایط خطرناک و جبران ناپذیری را برای کاربران راه، به ویژه در تونل‌ها ایجاد کند.

مطالعات نشان می‌دهد که در هنگام آتش‌سوزی در تونل، روسازی آسفالتی به شدت دچار حریق می‌گردد و دمای تونل به سرعت افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی، دمای روسازی می‌تواند در مدت زمان کوتاهی تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، دمای بتن غلتکی کمتر از مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته در ۳۹۲ درجه سلسیوس است. این موضوع مرتبط با ساختار بتن غلتکی است، که شامل پوششی از ملات سیمان سخت شده بر روی سنگدانه است. در مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته قیر مستقیم تحت حرارت قرار می‌گیرد و در مدت بسیار کوتاهی دچار آتش‌سوزی می‌گردد. با اجرای روسازی بتن غلتکی در مناطق صنعتی و مناطق پتروشیمی که سوخت و مواد شیمیایی به علت عبور وسائل نقلیه سنگین در سطح روسازی زیاد است و پتانسیل آتش سوزی بالا است، مقاومت در برابر آتش سوزی روسازی نسبت به روسازی آسفالتی بسیار افزایش می‌یابد.

شکل ٦. دستگاه UTM جهت بارگذاری خمشی

شکل ۷. نمونه بتن غلتکی پس از بارگذاری خمشی

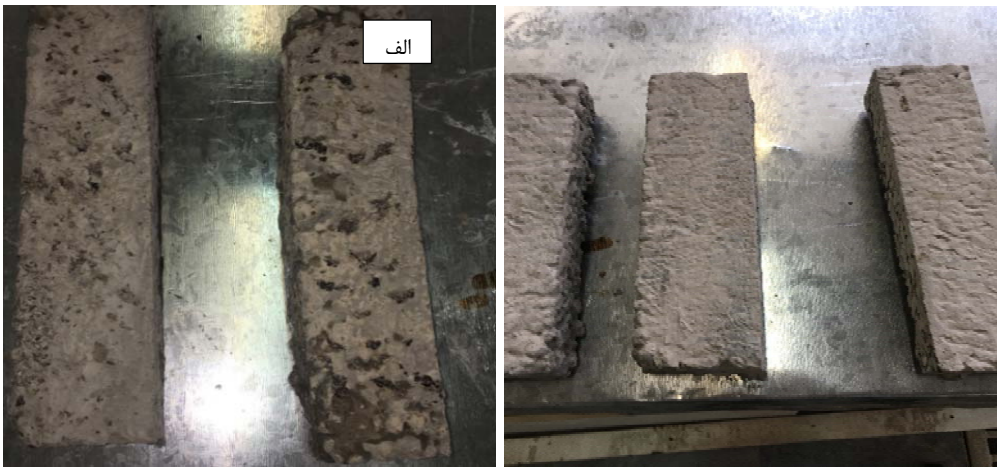


شکل ۸. نتایج آزمون مقاومت خمشی

شکل ۹. نتایج آزمایش آتش‌سوزی رویه بتن غلتکی و آسفالتی

نتایج آزمایش دوام

در طول آزمایش دوام، روسازی بتن غلتکی در معرض چرخه‌های ذوب و یخ قرار می‌گیرد. در پایان چرخه ذوب و یخ، نمونه‌های تیر شکل از دستگاه دوام خارج شده و سپس خشک و وزن می‌گردند. در نهایت، مقدار کاهش وزن نمونه‌ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌گردد. با افزایش سیکل‌های ذوب و یخ، مقدار فضای خالی و ارتباط آنها با یکدیگر افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه فضای‌های خالی ایجاد شده می‌توانند رطوبت و آب بیشتری را جذب کنند، ترک خوردگی و آسیب در بتن سخت شده در طول چرخه ذوب و یخ رخ می‌دهد. همانطور که در جدول (٤) نشان داده شده‌است، کاهش وزن بتن غلتکی ساخته شده با الیاف در مقایسه با بتن غلتکی بدون الیاف کمتر است. شکل (۱۰) سطح نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش (سیکل ذوب و یخ) را نشان می‌دهد. همانطور که از تصویر مشخص است، مقداری ملات پس از ۱۸ سیکل از سطح نمونه جدا شده است. باید توجه داشت که دوام بتن غلتکی در برابر مواد شیمیایی و سوخت وسایل نقلیه بسیار بیشتر از روسازی‌های آسفالتی (حاوی مواد نفتی و قیری) می‌باشد که منجر به افزایش ایمنی کاربران مناطق صنعتی و افزایش عمر خدمت‌دهی روسازی می‌گردد.



شکل ۱۰. نمونه‌های بتن غلتکی برای آزمایش دوام

(الف: قبل و ب: بعد از آزمایش)

جدول ٤. مقدار افت وزنی روسازی نیمه انعطاف پذیر پس از سیکل ذوب و یخ

نوع نمونه	وزن اولیه (g)	وزن نهایی (g)	مقدار کاهش وزن (%)
نمونه بتن غلتکی بدون الیاف	۲٤۷۸	۲۳۹۱	۳/۵۱
نمونه بتن غلتکی با الیاف	۲۳۲۵	۲۲٦۷	۲/٤۹

ملاحظات محیط زیستی

در طول دهه‌های اخیر، تعداد وسایل نقلیه به ازای هر شهروند و انتقال افراد جامعه به شهرهای بزرگ به طور چشمگیری افزایش یافته‌است. به دلیل افزایش وسایل نقلیه در شهرهای بزرگ، دودهای ناشی از اگزوز آنها افزایش یافته است. دودهای خارج‌شده از اگزوز وسایل نقلیه شامل دی‌اکسید کربن، اکسید نیتروژن، اکسید کربن و ترکیبات خطرناکی هستند که آسیب‌های شدیدی به سلامت انسان و محیط زیست وارد می‌کنند. یکی از مواردی که برای جذب و تخریب دودهای ناشی از اگزوز مورد

استفاده قرار می‌گیرد دی‌اکسید تیتانیوم است. در دهه‌های گذشته، دی‌اکسید تیتانیوم برای تصفیه دودهای ناشی از اگزوز و سایر آلاینده‌های هوا، قدرت اکسید کنندگی مناسب، غیر سمی بودن، پایداری خوب و هزینه پایین، استفاده شده است. در پژوهشی با اسپری کردن دی‌اکسید تیتانیوم بر سطح روسازی بتن غلتکی و در ترکیب با سیمان، پتانسیل تخریب و تجزیه ترکیبات سمی موجود در دودهای اگزوز وسایل نقلیه مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج نشان داد که در هر دو روش، دی‌اکسید تیتانیوم توانایی تخریب و تجزیه ترکیبات سمی را دارد و مقدار مواد سمی را به شدت کاهش می‌دهد. در مقایسه دو روش، حالت اسپری کردن دی‌اکسید تیتانیوم بر سطح روسازی پذیر عملکرد بهتری دارد. همچنین نتایج تخریب مواد سمی نشان داد که ترکیب دی‌اکسید تیتانیوم با گروت در مرحله اولیه آزمایش، عملکرد تخریب بالاتری دارد در حالیکه اسپری کردن، توانایی تخریب پایدارتری داشت. در پژوهشی، برای ساخت روسازی بتن غلتکی دوستدار محیط زیست و به منظور جذب و تصفیه آلودگی دودهای اگزوز وسایل نقلیه، از دی‌اکسید تیتانیوم در ترکیب با سیمان استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش مشخص کرد که دی‌اکسید نیتروژن توسط خمیر سیمان قلیایی حاوی دی‌اکسید تیتانیوم جذب، تجزیه و به نیترات و آب تبدیل می‌شود. مقدار بهینه دی‌اکسید تیتانیوم در خمیر سیمان ۸ درصد است و حضور دی‌اکسید تیتانیوم در خمیر سیمان، عملکرد روسازی بتن غلتکی در آزمایش‌های دینامیکی را کاهش نمی‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که خاصیت فتوکالیستی دی‌اکسید تیتانیوم منجر به جذب آلودگی می‌گردد و ترکیبات سمی را تجزیه می‌کند.

ملاحظات اقتصادی

با بررسی هزینه‌های ساخت روسازی آسفالتی و بتن غلتکی، محاسبات حاکی از آن است که روسازی بتن غلتکی بر خلاف روسازی‌های بتنی دیگر، هزینه ساخت اولیه‌ی کمتری نسبت به روسازی آسفالتی دارد. همچنین، در کل دوره طراحی (دوره‌ای که پروژه برای آن طراحی می‌شود) هزینه‌ی آن ٪۲۱ ارزان‌تر از رویه آسفالتی از دیدگاه کارفرما خواهد بود (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه هزینه روسازی بتن غلتکی الیافی و روسازی آسفالتی.

شماره	آیتم	بتن غلتکی (ریال)	آسفالتی (ریال)
۱	ساخت اولیه	۲،۲۳۷،۳۲۰	۲،٥٥٦،۳۹۰
۲	نگهداری	٥۳،٦۸۰	۱۲،٥٦۰
۳	هزینه تعمیر	۱۷،٥۹۰	۳٦٥،٤۲۰
٤	مابه‌التفاوت هزینه اضافه مصرف سوخت و انرژی	–	۳۹۸،۱۸۰
٥	مابه‌التفاوت هزینه آلودگی	–	۸۲،٤۲۰
٦	جمع هزینه کارفرما	۲،۳۰۸،٥۹۰	۲،۹۳٤،۳۷۰
۷	جمع هزینه جامعه	۲،۳۰۸،٥۹۰	۳،٤۱٤،۹۷۰

با توجه به سیاست آزاد سازی قیمت‌ها و حذف یارانه‌ها توسط دولت، می‌توان پیش‌بینی نمود که استفاده از سیستم‌های فعلی در زمینه جاده‌سازی (کاربرد قیر و آسفالت) بسیار پرهزینه خواهند بود و بنگاه‌های دولتی و پیمانکاران فعال در زمینه جاده‌سازی به سمت یافتن روش‌های جایگزین که هزینه‌های کمتری دارند، گرایش بیشتری خواهند یافت. به‌صورت نمونه می‌توان به سخنان وزیر وقت راه و ترابری (بهبهانی) در همایش ترویج روش‌های کم‌هزینه و جدید در احداث و بهسازی راه‌ها اشاره نمود. "با افزایش قیمت قیر از یک سو و افزایش تولید سیمان در کشور از سوی دیگر، کاربرد بتن غلتکی در راه‌سازی رفته‌رفته توجیه اقتصادی بیشتری پیدا می‌کند. به ویژه در راه‌هایی که دارای ترافیک سنگین هستند این روش موجب صرفه‌جویی قابل توجهی خواهد شد". بنابراین به نظر می‌رسد با توجه به تغییرات این عوامل، بررسی‌هایی در خصوص آنالیز قیمت تمام‌شده این دو روسازی نه فقط بر اساس هزینه ساخت ابتدایی بلکه با توجه به تمامی هزینه‌ها اعم از هزینه تعمیرات و نگهداری، هزینه کاربران و ... صورت‌گیرد.

تحلیل آماری

تحلیل آماری به عنوان یک ابزار توانمند برای ارزیابی داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در این پژوهش به منظور سنجش معناداری اختلاف مشاهده شده بین نتایج، از تحلیل ANOVA استفاده شد. در این آزمون از سطح اطمینان ۹۵ درصد برای سنجش معناداری نتایج استفاده شد. آزمون Tukey برای ارزیابی تفاوت آماری مشاهده شده بین مقادیر میانگین استفاده می‌شود. نتایج این آزمون که توسط نرم افزار SPSS صورت پذیرفت به صورت دسته‌بندی نتایج بر اساس فاکتور مورد نظر نمود پیدا می‌کند. به این صورت که داده‌های آزمایشگاهی متناسب با ارتباط موجود بین‌شان به دسته‌های مختلف تقسیم می‌شوند. تعداد دسته‌های مشاهده شده و مقادیر آماری به دست آمده نشان دهنده قابلیت تحلیل صورت گرفته در دسته‌بندی عملکرد مخلوط‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه برای تحلیل آماری و معناداری اختلاف بین مخلوط‌های بتن غلتکی به تکرار ۳ تا ۵ نمونه لازم است، در این پژوهش تنها برای آزمایش مقاومت فشاری تحلیل آماری صورت گرفت.

برای تعیین معناداری تفاوت بین نتایج نمونه‌های مختلف، تحلیل آماری با استفاده از تحلیل واریانس و تحلیل آماری Tukey Pairwise با نرم افزار SPSS انجام شد. سطح معنی داری در تحلیل آماری ۰/۰۵ انتخاب شد. بر اساس نتایج تحلیل آماری Pairwise Tukey که در جدول ٤ ارائه شده است، برای همه نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری عدد اهمیت برابر با صفر است، بنابراین این فرضیه که نشان می‌دهد میانگین اختلاف نتایج نمونه‌های مختلف یکسان است، قابل پذیرش نمی‌باشد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که حداقل یک نمونه در آزمایش مقاومت فشاری وجود دارد که به طور متوسط تفاوت قابل توجهی با نمونه‌های دیگر دارد. از مقایسه Pairwise Tukey می‌توان نتیجه گرفت که تاثیرات درصد الیاف بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری قابل توجه است که با افزایش درصد الیاف مقدار حساسیت و تفاوت نتایج کاهش می‌یابد.

جدول ٤. نتایج تحلیل آماری برای آزمایش مقاومت فشاری

Pincrease

		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean
						Lower Bound
Model	CSF05	3	2.4090	.14007	.08087	2.0610
	CSF10	3	3.0167	.63951	.36922	1.4280
	CSF15	3	5.7037	.34382	.19850	4.8496
	CSF20	3	5.1453	.20343	.11745	4.6400
	Total	12	4.0687	1.48499	.42868	3.1251
	Fixed Effects			.38347	.11070	3.8134
	Random Effects				.80071	1.5205

۵- نتیجه‌گیری

همان‌طور که از نتایج مشخص است، تأثیر الیاف در بهبود مقاومت خمشی بیشتر از مقاومت فشاری است که این امر به بحث افزایش مقاومت پس از ترک‌خوردگی مربوط می‌باشد. از آنجا که عامل تعیین‌کننده در روسازی‌های بتنی نظیر بتن غلتکی، مقاومت خمشی است و همچنین مقاومت خمشی بتن، ترکیبی از مقاومت کششی و فشاری آن در برابر تنش‌های ناشی از خمش اعمال شده به نمونه است، باید مصالحی به بتن غلتکی اضافه گردد تا از شکنندگی و ترد شدگی آن بکاهد. همچنین نتایج نشان داد که مقاومت فشاری بتن الیافی نسبت به بتن شاهد افزایش یافته و از سوی دیگر به دلیل کاهش ترد شدگی بتن که

در نتیجه استفاده از الیاف مکس-۲۰۰ می‌باشد، مقاومت کششی مقطع نیز به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. این افزایش به دلیل قابلیت استهلاک تنش‌های کششی مقطع بتن الیافی که دارای تخلخل و در نتیجه خاصیت اسفنجی است اتفاق می‌افتد. بنابراین مقاومت خمشی مقطع به دلایل ذکر شده افزایش پیدا می‌کند تا به مقدار بهینه رسیده و از آن به بعد به دلیل کاهش سطح مقاوم در برابر تنش‌های ناشی از اعمال خمش، مقدار مقاومت خمشی کاهش پیدا می‌کند. در این راستا قابل ذکر است که نقش پر رنگ الیاف مکس-۲۰۰ به عنوان افزودنی افزاینده خواص بتن می‌تواند توجیه کننده استفاده از آن علیرغم افزایش هزینه‌های آن در بتن باشد. در توجیه این مطلب می‌توان اذعان نمود که بتن‌های الیافی به دلیل دارا بودن مقاومت‌های بالاتر نسبت به بتن معمولی، کمتر دچار ترک ناشی از تنش داخلی می‌شوند و در نهایت به کاهش نفوذپذیری آن‌ها منجر می‌گردد. در حوزه اقتصادی نتایج نشان می‌دهد که در مواردی که ترافیک طرح و نیز بارهای وارده زیاد باشد، ارزش اقتصادی روسازی‌های بتنی نمایان می‌گردد.

٦-مراجع

-چوبدار، امین، فرج اللهی، امین و عاملی، علیرضا (۱٤۰۰). بررسی استفاده از ماکروالیاف بر خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی، *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۱۸(۱)، ۱٤٤-۱۳۵.

-روح‌الامینی، حامد (۱٤۰۱). ارزیابی اثر الیاف بر شرایط رشد ترک در بتن غلتکی با استفاده از مدل اصلاح شده دو پارامتری شکست، *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۱۹(۲)، ۲۳۳-۲٤۸.

-فضلی، منیر، دوست محمدی، علیرضا و مصطفوی، سیدمحمدامیر (۱۳۹۹). بررسی خواص مکانیکی و پارامترهای دوام بتن غلتکی مسلح به الیاف ماکروسنتتیک، *دوازدهمین کنفرانس ملی بتن*، تهران.

-غفاری، نجمه، جلیلی قاضی‌زاده، مرتضی، شفیعی، مصطفی و خیرخواه، حسین (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر الیاف شیشه بر خصوصیات روسازی بتن غلتکی، *سومین کنفرانس ملی رویه‌های بتنی*، تهران.

-نوابی، مهدی، شربتدار، محمدکاظم و شفابخش، غلامعلی (۱۳۹۹). بررسی آزمایشگاهی اثر مشترک مقدار ریزدانه، سیمان، و مقاومت فشاری طرح اختلاط بهینه بتن غلتکی روسازی، *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۱۷(۳)، ۷٤-۵۹.

- Afonso, M. L., Dinis-Almeida, M., Pereira-de-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J., and Zoorob, S. E. (2016). Development of a semi-flexible heavy-duty pavement surfacing incorporating recycled and waste aggregates–Preliminary study. *Construction and Building Materials,* 102, 155-161.

- An, S., Ai, C., Ren, D., Rahman, A., and Qiu, Y. (2018). Laboratory and Field Evaluation of a Novel Cement Grout Asphalt Composite. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 30(8), 415-433.

- Cai, J., Pei, J., Luo, Q., Zhang, J., Li, R., and Chen, X. (2017). Comprehensive service properties evaluation of composite grouting materials with high-performance cement paste for semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials,* 153, 544-556.

- Cihackova, P., Hyzl, P., Stehlik, D., Dasek, O., Šernas, O., and Vaitkus, A. (2015). Performance characteristics of the open-graded asphalt concrete filled with a special cement grout. *Baltic Journal of Road & Bridge Engineering,* 10(4), 1121-1152.

- Corradini, A., Cerni, G., D'Alessandro, A., and Ubertini, F. (2017). Improved understanding of grouted mixture fatigue behavior under indirect tensile test configuration. *Construction and Building Materials,* 155, 910-918.

- Gong, M., Xiong, Z., Chen, H., Deng, C., Chen, X., Yang, J., and Hong, J. (2019). Evaluation on the cracking resistance of semi-flexible pavement mixture by laboratory research and field validation. *Construction and Building Materials,* 207, 387-395.

- Hasani, M., Nejad, F. M., Sobhani, J., & Chini, M. (2021). Mechanical and durability properties of fiber reinforced concrete overlay: experimental results and numerical simulation. *Construction and Building Materials,* 268, 992-1012.

- Iyer, P., Kenno, S. Y., & Das, S. (2015). Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament

Reinforced Roller-Compacted Concrete. *Journal of Transportation Research,* 16(1), 185-195.

-Rucka, M., Wojtczak, E., Knak, M., & Kurpińska, M. (2021). Characterization of fracture process in polyolefin fibre-reinforced concrete using ultrasonic waves and digital image correlation. *Construction and Building Materials,* 280, 122-135.

- Tennis, Paul D, Michael L Leming, and David J Akers. (2004). *Pervious Concrete Pavements* (Portland cement association Skokie, IL).

- Yang, B., Weng, X. (2015). The influence on the durability of semi-flexible airport pavement materials to cyclic wheel load test. *Construction and Building Materials,* 98, 171-175.

fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *27*(11), 04015015.

- Pei, J., Cai, J., Zou, D., Zhang, J., Li, R., Chen, X., and Jin, L. (2016). Design and performance validation of high-performance cement paste as a grouting material for semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 126, 206-217.

- Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. R. M. (2018). Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, *159*, 517-529.

- Rooholamini, H., Hassani, A., Karimi, A., & Ghobadipour, B. (2019). Presenting Fatigue Prediction Model of Macro-Synthetic Fiber

Evaluation of Mechanical Behavior and Engineering Characteristics of Roller-Compacted Concrete (RCC) Containing Synthetic Fibers

Majid Safehian, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Ali Najafpour, M.Sc., Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mehdi Ravanshadnia, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: safehian@srbiau.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

The purpose of this research is to evaluate the mechanical performance and durability of Roller Compacted Concrete (RCC) with fibers as an alternative to asphaltic pavements in industrial areas with heavy traffic loading. RCC is a hard and relatively dry mixture of aggregate (maximum nominal size 19 mm), cement and water which is spread by conventional asphalt pavement finishers and compacted by a vibrating roller. After completing the hydration reactions, the RCC has the same appearance as the concrete with zero slump. In this research the compressive and bending strength, durability and cycles of freezing and thawing were tested. The results showed that the performance of RCC containing fibers is better than RCC without fibers. Also, the resistance of RCC against fire is much higher than asphaltic mixture. The results showed that RCC pavement is suitable for roads with heavy vehicle traffic and low speed due to its engineering and mechanical characteristics. The main purpose of this research is to investigate the engineering and mechanical properties of RCC as an alternative to asphaltic pavement in industrial areas with heavy traffic loading. Also, by conducting a test, the fire resistance of RCC and asphaltic pavements was evaluated.

Keywords: Mechanical Performance, Roller Compacted Concrete, Fibers, Asphalt Concrete, Industrial Area