

## تأثیر کاربرد فریت بر رفتار قیر، عملکرد خستگی و خزش مخلوط آسفالتی

رضا جعفری سامانی، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

محمد مهدی خبیری\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

Email: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹

### چکیده

در دهه‌های اخیر، به دلیل هزینه زیاد ساخت روسازی و ملاحظات زیست‌محیطی، از مصالح ضایعاتی مختلف در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. از این‌رو، به‌کارگیری مواد ضایعاتی به عنوان یک ماده افزودنی برای بهبود عملکرد قیر و آسفالت حائز اهمیت است. استفاده از فریت در بخش فیلر یا افزودنی قیر، به دلیل زاویه‌دار بودن، تخلخل و زبری زیاد سطحی آن، پیش‌بینی می‌شود که باعث افزایش اصطکاک مصالح سنگی و نفوذ و چسبندگی بیشتر قیر و به تبع آن بهبود خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مخلوط آسفالتی شود. در این مطالعه، عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی طی طرح اختلاط خشک و تر فریت و تأثیر آن به عنوان افزودنی بر عملکرد قیر مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور تعیین پارامترهای قیر، در ابتدا فریت به‌صورت افزودنی به قیر اضافه شد و پس از آن آزمون DSR، FTIR و همچنین عکس‌برداری SEM انجام پذیرفت. در مرحله بعد، یک‌بار با قیر اصلاح‌شده (اختلاط تر) و بار دیگر با فیلر اصلاحی (اختلاط خشک) نمونه آسفالتی ساخته شد و آزمون‌های مارشال، خستگی، خزش، کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، کانتابرو و مدول برجهندگی در دو حالت بارگذاری نیمه‌سینوسی و مربعی انجام شد. اضافه کردن فریت به اندازه ۱۰۰٪، تنها عامل خستگی در مخلوط آسفالتی را به بیشترین مقدار رساند. در حالی که نمونه آسفالتی حاوی ۷۰٪ فریت و ۳۰٪ سیمان، سایر عملکردهای مخلوط آسفالتی را به ترتیب ۴۸، ۹۰، ۳۸، ۱۷/۷، ۳۹، ۶۷ و ۸۰ درصد نسبت به نمونه شاهد اصلاح کرد. همچنین، در انجام آزمایش DSR، هرچه درصد افزودنی فریت به قیر افزایش یافت، پارامترهای خستگی و شیارشدگی بهبود یافتند، به شکلی که در نمونه ۷٪، بهترین عملکرد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: پسماند صنعتی، اختلاط تر و خشک، پودر فریت، مخلوط آسفالتی.

## ۱. مقدمه

را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با جایگزینی آهک هیدراته با پودر معدنی، می‌توان عملکرد آسفالت را بهبود بخشید. توصیه می‌شود که مقدار آهک هیدراته مورد استفاده نباید بیش از ۳۰ درصد باشد زیرا آهک زیاد باعث کاهش عملکرد مخلوط آسفالت می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که با ثابت نگه‌داشتن مقدار فیلر جایگزین با سیمان، ضریب شیارشدگی آسفالت با افزایش نسبت فیلر به قیر افزایش می‌یابد. دامنه ضریب خوردگی آسفالت قبل یا بعد از نسبت فیلر به قیر ۲/۱ است. همچنین، در مقدار جایگزین نمونه مشابه سیمان، جریان زیاد افزایش نمی‌یابد؛ اما عملکرد مکانیکی مخلوط بسیار بهبود می‌یابد. بنابراین، با جایگزینی جزئی پرکننده با سیمان و آسفالت قبل یا بعد از نسبت پرکننده به قیر ۲/۱، دامنه افزایش متفاوتی وجود دارد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که در مقدار جایگزین نمونه مشابه سیمان، روانی زیاد افزایش نمی‌یابد؛ اما عملکرد مکانیکی مخلوط بسیار بهبود می‌یابد. بنابراین، با جایگزینی بخشی از پرکننده با سیمان، می‌توان کارایی مخلوط را بهبود بخشید. چن و همکاران (۲۰۱۱ a) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی که در آن از پودر آجر بازیافتی به عنوان پرکننده استفاده شده بود، عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالت را تعیین کردند. در حقیقت، آن‌ها یک مطالعه مقایسه‌ای بین دو مخلوط آسفالت مختلف، به ترتیب با استفاده از پودر آجر بازیافتی و پرکننده آهک انجام دادند. بر اساس نتایج به‌دست آمده و تجزیه و تحلیل‌های انجام شده توسط آن‌ها، نشان داده شد که مخلوط حاوی فیلر آجر بازیافتی دارای استحکام کششی غیرمستقیم بیشتری در دمای ۴۰ درجه سلسیوس است که نشان می‌دهد مخلوط حاوی پرکننده آجر بازیافتی نسبت به مخلوط شاهد مقاومت بهتری در برابر شیارخوردگی دارد. همچنین، در مقایسه با پرکننده آهک، افزودن فیلر آجر بازیافتی می‌تواند حساسیت به آب و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالت را بهبود بخشد. به‌علاوه، نتایج نشانگر آن است که افزودن

در سال‌های اخیر، روند صعودی هزینه تعمیر و نگهداری جاده‌ها، فرودگاه‌ها و بنادر که ناشی از افزایش شدت و تکرار بارهای ترافیکی است (آلماسی و همکاران، ۲۰۱۹) منجر به تحقیقات زیادی در زمینه ساخت مخلوط آسفالت با کیفیت بهتر شده است. یکی از روش‌های افزایش کیفیت آسفالت، استفاده از مواد افزودنی است (موسی و همکاران، ۲۰۲۱؛ لی و همکاران، ۲۰۲۲؛ الدوما و ژیانومینگ، ۲۰۲۱). از طرف دیگر، نگرانی در خصوص افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و تولید زباله و همچنین محدودیت منابع غیرقابل تجدید، مهندسان را برای استفاده از مواد زائد در صنعت روسازی تشویق می‌کند (گیل، ۲۰۲۲؛ ال وی و همکاران، ۲۰۲۱). از این‌رو، تا کنون محققان زیادی به مطالعه استفاده از انواع مواد ضایعاتی به‌صورت اختلاط تر (ساخت آسفالت با قیر اصلاح‌شده) و اختلاط خشک (افزودن مواد اصلاح‌کننده به‌صورت فیلر) به‌منظور بهبود عملکرد آسفالت پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، احمد و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر دو فیلر اصلی، سیمان و سنگ‌آهک آسیاب شده، را در مخلوط آسفالت بررسی کردند. هدف از این مطالعه، مقایسه اثر استفاده از دو پرکننده معدنی بر قدرت مخلوط آسفالت بود که با قدرت مارشال اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که هر دو نوع پرکننده تأثیر قابل توجهی بر مقاومت مارشال ندارند. با این‌حال، افزایش سیمان بیش از ۵ درصد، مقاومت مارشال را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، افزایش مقدار سنگ‌آهک ساییده شده به بیش از ۵ درصد منجر به افزایش مقادیر مقاومت مارشال شد. برای نوع ترکیب در نظر گرفته شده در این مطالعه، ۵ درصد پرکننده‌های سنگ‌آهک و ۶ درصد پرکننده‌های سیمان، مقادیر بهینه را برای مقدار پرکننده مخلوط به دست آوردند. چن و همکاران (۲۰۱۱ b) در مطالعه‌ای، اثر آهک و سیمان بر عملکرد آسفالت از طریق جایگزینی مساوی بین آهک و سیمان

پرکننده آجر بازیافتی، تغییر شکل دائمی را در دمای ۶۰ درجه سلسیوس در آزمایش‌های خزش دینامیک و استاتیک به طرز چشم‌گیری کاهش داد. این امر منجر به مقاومت بهتر در برابر خوردگی مخلوط‌های آسفالت در دمای زیاد می‌شود. در نهایت، بر اساس یافته‌های آن‌ها، به نظر می‌رسد که می‌توان از پودر آجر بازیافتی به عنوان پرکننده در مخلوط‌های آسفالت استفاده کرد.

در سال‌های اخیر، استفاده از مواد ضایعاتی و بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی زیاد شده است (نیون و خیبری، ۲۰۱۶). دلیل اصلی انتخاب فریت در مخلوط آسفالتی، کمک به حفظ منابع قابل جایگزین، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و بازیابی انرژی صرف شده طی تولید این نوع فیلر و ریزدانه‌ها است. استفاده از انواع پودر با منشأ فلزی، ویژگی‌های قیر خالص را بهبود بخشیده و باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارگذاری و کاهش وقوع پدیده شیارشدگی می‌شود. لذا، از فریت که منشأ فلزی دارد، انتظار چنین عملکردی می‌رود. نیون و خیبری (۲۰۱۶) تأثیر فریت بر خواص مکانیکی و همچنین حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت را بررسی کردند. آن‌ها فریت را در مقادیر مختلف صفر، ۳۵، ۷۰ و ۱۰۰ درصد از مقدار پرکننده مورد نیاز مخلوط و بقیه مخلوط را یک‌بار با سیمان و یک‌بار با سنگ‌آهک پر کردند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، افزودن فریت باعث افزایش استحکام مارشال در نمونه‌های ۱۰۰٪ فریت نسبت به ۱۰۰٪ نمونه‌های سیمان و آهک، به ترتیب ۱۱٪ و ۳۵٪، شد. کشش غیرمستقیم در نمونه ۱۰۰٪ فریت نسبت به آهک دارای افزایش ۳۹٪ در حالت خشک و ۶۲٪ در حالت اشباع بود. به‌علاوه، بیشترین میزان مدول برجهندگی مرتبط با نمونه حاوی ۷۰٪ فریت بود که حدود ۳۱٪ و ۱۰٪ برتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ سیمان و ۱۰۰٪ آهک داشت. بنابراین، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فریت می‌تواند جایگزین پرکننده‌های سنتی سیمان و آهک شود.

زیاری و همکاران (۲۰۱۹) مطالعه‌ای را برای تجزیه و تحلیل حساسیت رطوبتی، عملکرد خستگی و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر لاستیک چرخ (GTR) و پودر کربن غیرکریستالی (ACP) به عنوان ضایعات صنعتی انجام دادند. لاستیک چرخ (۸، ۱۲ و ۱۶ درصد وزن قیر) به عنوان اصلاح‌کننده قیر و پودر کربن غیرکریستالی (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد وزن فیلر) به عنوان پرکننده استفاده شد. یافته‌ها نشان‌دهنده افزایش مدول برجهندگی به وسیله پودر کربن غیرمتبلور و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های بتن آسفالتی لاستیکی (RAC) است. پودر کربن غیرکریستالی انرژی شکست را کاهش می‌دهد. اما از پودر لاستیک برای بهبود مقاومت خستگی مخلوط آسفالت استفاده می‌شود. علاوه بر این، نتایج آزمایش خزش پویا و ویل تراک (شیارشدگی چرخ) نشان می‌دهد که 16GTR + 50ACP کمترین تغییر شکل دائمی و بیشترین مقاومت در مقابل شیارشدگی را دارد. بنابراین، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از لاستیک چرخ و پودر کربن غیرکریستالی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های عملکردی مخلوط آسفالت دارد. شمسایی و همکاران (۲۰۲۰) پژوهشی به‌منظور بررسی استفاده از ضایعات سرامیکی به عنوان مواد ریزدانه و تأثیر آن بر خواص مکانیکی آسفالت انجام دادند. برای این منظور، پودر ضایعات سرامیکی با پودر سنگ‌آهک معمولی به نسبت‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزین شد. آزمون‌های مقاومت مارشال، حساسیت رطوبتی، خستگی و شیارشدگی برای بررسی اثر ضایعات سرامیکی بر عملکرد آسفالت انجام شد. نتایج نشان داد که مقاومت مارشال در تمام نسبت‌های جایگزینی سرامیک افزایش یافته است (افزایش ۲۳ درصد برای حداکثر نرخ جایگزینی). همچنین، مقاومت آسفالت در برابر رطوبت پس از استفاده از پودر ضایعات سرامیکی ۱۰۰ درصد، تقریباً ۵ درصد بهبود یافت. علاوه بر این، نتایج نشان داد که این میزان جایگزینی به عنوان مواد

ریزدانه HMA باعث افزایش عمر خستگی (تقریباً ۶۰۰ چرخه بیشتر از نمونه‌های شاهد) و مقاومت شیارشدگی (کاهش تقریباً ۳۱ درصدی عمق شیار) شد. زارعی و همکاران (۲۰۲۰) طی پژوهشی، با اضافه کردن درصد‌های مختلف فیبر کربن و انجام آزمایش مارشال، مشاهده کردند که مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی بهبود یافته است. اما با توجه به نتایج، افزایش میزان الیاف در درصد‌های بیشتر باعث کاهش مقاومت می‌شود، به شکلی که مقاومت نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف کربن تقریباً ۳۲ درصد بیشتر از مقاومت نمونه بدون الیاف است. با توجه به نتایج، افزایش مقاومت نسبت به تحقیقات قبلی و سایر انواع الیاف به‌کار رفته در آن بود. پس از افزایش میزان فیبر به ۳ درصد، کاهش ۱۲ درصدی در مقاومت مشاهده شد. اما از نظر اقتصادی، با توجه به قیمت زیاد این الیاف، استفاده از آن‌ها فقط در مناطق محدود و بهینه مقرون به صرفه است.

در خصوص افزودن مواد اصلاح‌کننده به روش اختلاط تر نیز پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است که از جمله می‌توان به پژوهش کاستا و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. آن‌ها از زباله‌های پلاستیکی به عنوان جایگزینی برای پلیمرهای بکر استفاده کردند. بنابراین، طی این مطالعه، به اصلاح قیر معمولی با درجه نفوذ ۵۰-۳۵، با پلیمرهای اتیلن وینیل استات و پلی اتیلن، که به‌دقت از کارخانه‌های بازیافت پلاستیک انتخاب شده بودند، پرداختند. یک پلیمر اولیه (استایرن- بوتادین استایرن) نیز به عنوان ماده مرجع به‌کار رفت زیرا پلیمری است که بیشتر برای اصلاح قیر استفاده می‌شود. عملکرد (فیزیکی، پایداری ذخیره‌سازی و خواص رئولوژیک) و ویژگی‌های مورفولوژیک نمونه‌های مختلف اصلاح‌شده با پلیمر ضایعاتی به‌طور کامل مورد ارزیابی قرار گرفت و با نمونه‌های قیر ۵۰-۳۵ و اصلاح‌شده با پلیمر اولیه مقایسه شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که نمونه‌های اصلاح‌شده با EVA بازیافتی و SBS اولیه با توجه به ویسکوزیته و خواص

رئولوژیک خود می‌توانند عملکرد مشابهی داشته باشند. علاوه بر این، نمونه‌های اصلاح‌شده EVA پایداری بهتری را از خود نشان دادند که احتمالاً به دلیل پراکندگی همگن این مواد بوده است. قیر اصلاح‌شده HDPE بازیافتی، برخی خواص فیزیکی امیدوارکننده (مرتبط با مقاومت شیارشدگی) را از خود نشان داد؛ اما بدترین قابلیت ارتجاعی و بازیابی خزش را نیز داشت. نتیجه این کار، توسعه نمونه‌های آسفالتی جدید اصلاح‌شده با پلیمرهای ضایعاتی به عنوان جایگزین‌های قابل اعتماد برای ساخت روسازی جاده‌ها به دلیل عملکرد عالی آن‌ها، در مقایسه با رایج‌ترین پلیمرهای اولیه، بود. عامری و همکاران (۲۰۱۹) با مطالعه رابطه عمر خستگی مخلوط آسفالتی، تحت تأثیر افزودن پلیمرهای الاستومری ضایعاتی حاصل از فرآیند تولید پلیمر پرداختند. مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی گرم (HMA) اصلاح شده توسط پلیمرهای الاستومری مانند SBR و PBR و ضایعات فرآیند تولید آن‌ها با انجام آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای و آزمون خستگی کششی غیرمستقیم بررسی شد. روش سنتی مبتنی بر کاهش ۵۰ درصدی سختی اولیه به‌اندازه کافی برای محاسبه عمر خستگی مناسب نبوده، زیرا این روش عمر خستگی مخلوط‌های اصلاح‌شده پلیمری را دست‌کم می‌گیرد و منجر به تغییرات زیادی می‌شود. بنابراین، دو تحلیل خستگی جایگزین انجام شد: روش تغییر نسبت انرژی تلف‌شده و روش نسبت انرژی. هر دوی این روش‌ها مقایسه دقیق‌تری بین عمر خستگی این مخلوط‌ها ارائه دادند. عمر خستگی مخلوط‌های اصلاح شده توسط ضایعات پلیمری، به‌طور معنی‌داری بیشتر از مخلوط‌های اصلاح نشده بود و به‌طور قابل توجهی به مخلوط‌هایی از جمله پلیمرهای اصلی نزدیک بود (عامری و همکاران، ۲۰۱۹).

جان‌محمدی و همکاران (۲۰۲۰) در یک مطالعه آزمایشگاهی، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده با قیر اصلاح شده توسط اتیل وینیل استات (EVA) و

نظر گرفتن تمامی جوانب، مخلوط آسفالت CIG25 به دلیل خصوصیات فنی - اقتصادی پیشنهاد شد. اگرچه مطالعات متعددی در خصوص انواع مواد افزودنی به آسفالت انجام شده است، اما هیچ کدام آن‌ها به بررسی تأثیر فریت بر عملکرد آسفالت و قیر نپرداخته‌اند. از این رو، هدف این پژوهش، بررسی تأثیر پسماند صنعتی فریت بر عملکرد خستگی قیر و آسفالت است. فریت، پودری است که از فرآیندهای قوس الکتریکی در صنعت فولاد استخراج می‌شود و در نهایت با کامیون به شکل ضایعات به خارج از کارخانه منتقل می‌گردد که منجر به مشکلات زیست محیطی می‌شود، که اگر بتوان از آن در آسفالت استفاده کرد، مشکلات زیست محیطی ناشی از انبار آن را می‌توان تا حد زیادی کاهش داد.

## ۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، ماده فریت یکبار به صورت ماده اصلاح‌کننده قیر (اختلاط تر) و یکبار به صورت فیلر (اختلاط خشک) با درصد‌های مختلف به آسفالت اضافه گردید و سپس قیر اصلاح‌شده و آسفالت حاوی قیر اصلاح‌شده و همچنین آسفالت حاوی فیلر فریتی تحت آزمایش‌های مختلف قرار گرفتند. شکل ۱، نشان‌دهنده روند کلی تحقیق است.

### ۲-۱. مواد مورد استفاده

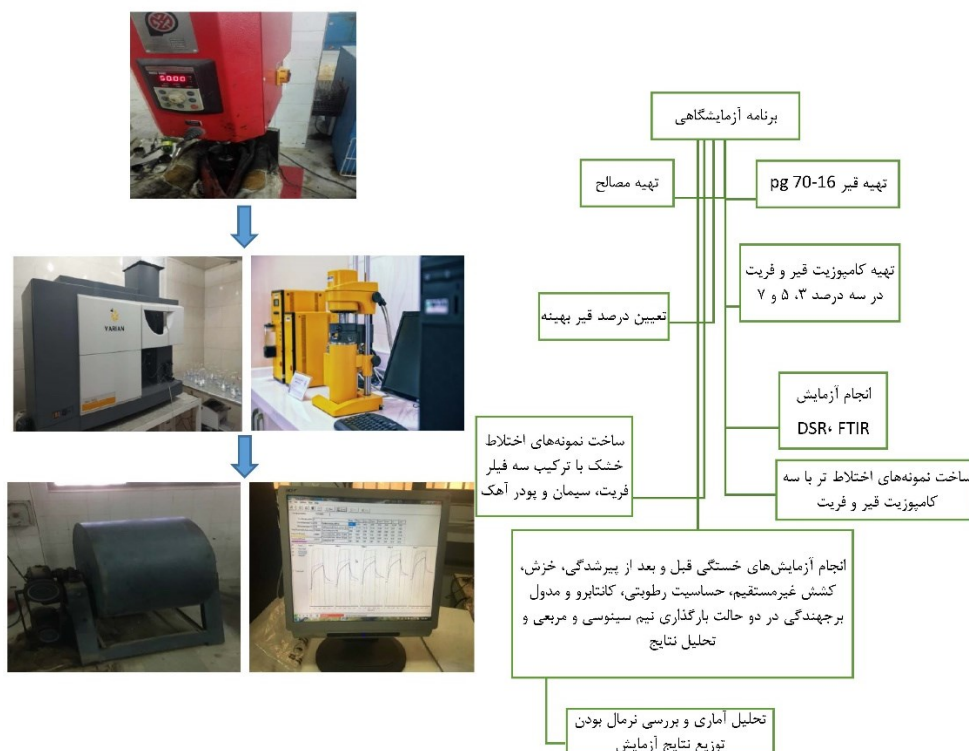
در این پژوهش، از سنگ‌دانه، پودر آهک، پودر سیمان، پودر فریت (شکل ۲) و قیر PG 70-16 استفاده گردید. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل ۲-A بیانگر پیوستگی ذرات فریت می‌باشند که این تا حد زیادی ناشی از استحکام پیوند مولکولی و میان‌کنش مغناطیسی بین آنها می‌باشد. همچنین، شکل ۲-C بیانگر تشکیل نانوذراتی با ابعاد کوچکتر از نانومتر می‌باشد. همانطوری که در این شکل مشاهده می‌شود، کریستال‌ها به شکل کروی بوده که در بعضی نقاط به صورت تجمعی درآمده‌اند، همچنین، ذرات به ابعاد مختلف در پودر نهایی

حاوی مقادیر مختلف الیاف شیشه را ارزیابی کردند. برای این منظور، در مجموع ۱۱ نوع مخلوط ساخته شد و آزمایش‌های مارشال و مدول برجهندگی برای بررسی تأثیر مواد افزودنی بر نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزودن ۵ درصد EVA و ۰/۳ درصد الیاف شیشه، پایداری مارشال را به ترتیب حدود ۲۵ و ۲۰ درصد افزایش داد. همچنین، نتیجه گرفته شد که استفاده هم‌زمان از هر دو افزودنی، پایداری مارشال را بیشتر از افزودن هر یک از آن‌ها به‌طور جداگانه افزایش می‌دهد. بیشترین پایداری مارشال متعلق به نمونه حاوی ۳ درصد EVA و ۰/۳ درصد الیاف شیشه بود که برابر با ۱۲۱۰ کیلوگرم بود. از سوی دیگر، نتایج مدول برجهندگی نشان داد که با افزایش مقدار EVA و الیاف شیشه به‌طور جداگانه و هم‌زمان در دو دمای مختلف ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس، مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد. با این‌حال، افزایش دما، مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی را کاهش داد. بر اساس تمامی نتایج، نمونه 3EF به عنوان بهینه‌ترین مخلوط آسفالتی انتخاب شد. همچنین، براتی و همکاران (۲۰۲۲) طی پژوهشی، با اصلاح خواص مکانیکی قیر و مخلوط‌های آسفالتی با افزودنی‌های بازیافتی مانند پودر شیشه بازیافتی (RGP) و همچنین افزودنی‌های جدید مانند نانولوله‌های کربنی (CNT)، خواص قیر و آسفالت را بهبود بخشیدند. برای این منظور، در مجموع، ۱۷ نوع مخلوط آسفالتی ساخته شد. CNT و RGP با درصد‌های مختلف به قیر و سنگ‌دانه اضافه شدند. نتایج حاصل از خواص رئولوژیک قیر نشان داد که افزودن این مواد باعث کاهش حساسیت حرارتی قیر می‌شود. همچنین، نتایج آزمون مارشال نشان داد که پایداری نمونه‌های حاوی RGP و CNT به دلیل حضور مؤثرتر CNT نسبت به حضور RGP افزایش یافته است. علاوه بر این، مشخص شد که مقاومت مارشال نمونه‌های اصلاح‌شده نیز افزایش یافته است. از نظر اقتصادی، افزودن RGP و CNT اقتصادی نبوده و در نهایت با در

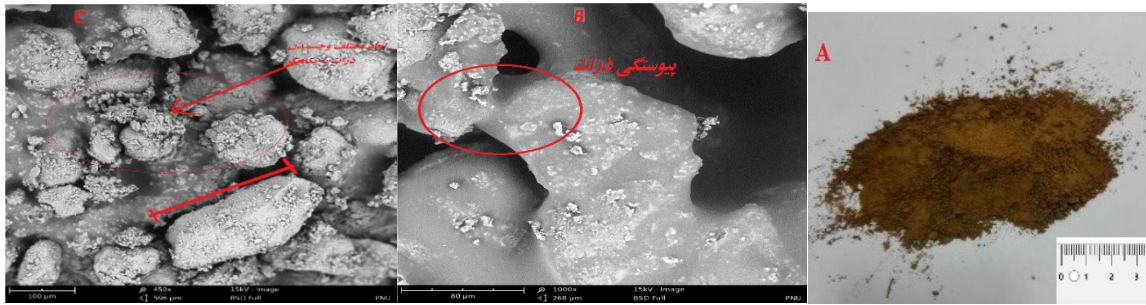
## تأثیر کاربرد فریت بر رفتار قیر، عملکرد خستگی و خزش مخلوط آسفالتی

است. مهمترین خواص عبارتند از: ثبات حجم، چگالی ظاهری، شکل، مقاومت در برابر خردشدگی (مقاومت در برابر ضربه و خرد شدن)، جذب آب، مقاومت در برابر یخزدگی و ذوب شدن و همچنین مقاومت در برابر سایش. از نظر ترکیب شیمیایی فریت سرباره‌ای فولاد و به ویژه اگر به عنوان ماده‌ای در نظر گرفته شود که می‌تواند در صنعت ساختمان‌سازی، یعنی راه‌سازی نیز کاربرد داشته باشد، یک پارامتر حیاتی، میزان اکسیدهای آزاد آهن، کلسیم و منیزیم است، که ویژگی‌های مناسبی در روسازی آسفالتی دارند. فریت یا سرباره‌های پودری کارخانه ذوب آهن، عمدتاً حاوی آهک، سیلیس و آلومین هستند و شباهت زیادی به اجزای سیمان پرتلند دارند. معمولاً بخشی از این سرباره اکسیدهای منگنز، منیزیم و آهن نیز است، وزن مخصوص آن ۲/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و سطح ویژه آن به ۳۲۰۰ سانتی‌متر بر متر مربع می‌رسد.

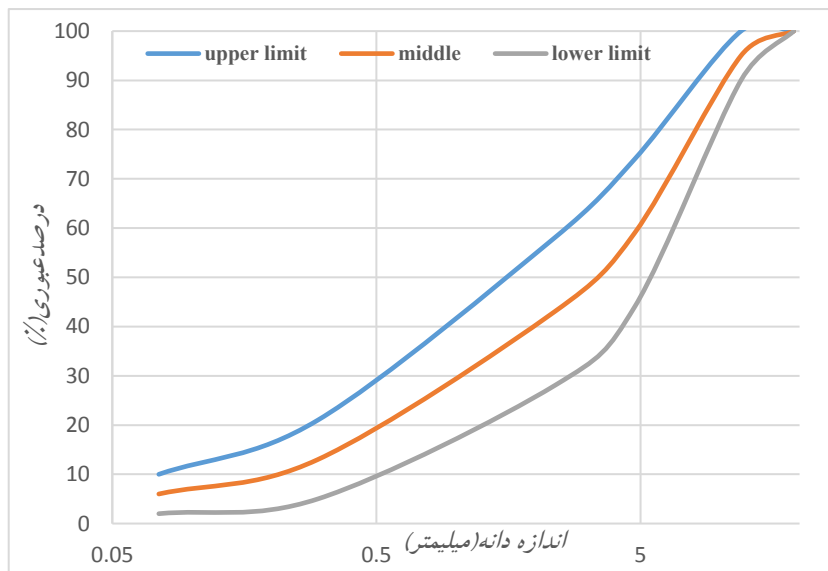
قابل مشاهده است. دانه‌بندی بهینه در یک محدوده مشخصات لزوماً دانه‌بندی حد وسط آن می‌باشد و برای این منظور دانه‌بندی در محدوده بیندر و توپکا به عنوان پرکاربردترین دانه‌بندی مورد استفاده در کارهای تحقیقاتی و اجرایی، با استفاده از مصالح یکی از معادن قرضه فعال منطقه تعیین شد. دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس نشریه MS-2 و نمودار دانه‌بندی در شکل ۳ و همچنین مشخصات پودر آهک، پودر سیمان و پودر فریت در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجایی که معمول ترین حوزه استفاده از فریت سرباره‌ای، صنعت ساخت-وساز است، عملکرد و سیستم مورد نیاز آن نیز باید در نظر گرفته شود. نیروهای ایستا و دینامیک و کرنش‌های محیطی مانند نفوذ باران، گرما، یخزدگی و ذوب شدن نیاز به رفتار طولانی مدت کافی در این شرایط برای تمام سازه‌هایی که ساخته می‌شوند دارند. بنابراین، خواص فنی پودر فریت فرآوری شده که به عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد از اهمیت اساسی برخوردار



شکل ۱. گردش کار روند تحقیق و تجهیزات به کار رفته در فرایند تحقیق



شکل ۲. (A) پودر فریت، (B) تصاویر SEM فریت آسیاب نشده (میانی) و (C) فریت در مقیاس میکرون



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

جدول ۱. مشخصات انواع فیله‌های مورد استفاده

ترکیبات شیمیایی	پودر آهک (%)	سیمان (%)	فریت (%)
SiO <sub>2</sub>	۱۶/۴۶	۲۱/۲۵	۷/۰۲
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۴۷	۵/۱۱	۰/۷۷
Fe total	-	-	۲۷/۷۴
FeO	-	-	۱/۴۲
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۹۲	۳/۰۲	۳۸/۰۷
MnO	۰/۰۱۹	۰/۱۴	۰/۲۳
TiO <sub>2</sub>	۰/۲	۰/۲۶	۰/۱۲
CaO	۴۲/۲۶	۵۴/۹۵	۸/۱۳
MgO	۱/۳۲	۱/۴۸	۵/۴۸
Na <sub>2</sub> O	۰/۰۳۶	۰/۲۵	۱۳/۴۹
K <sub>2</sub> O	۰/۴۴	۱/۰۸	۱۱/۲۸

۰/۶۳	۰/۱۱	۰/۳۳	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
۰/۶۱	۴/۴۱	۰/۷۸	SO <sub>3</sub>
۱۲/۵۷	۳/۸۳	۳۵/۶۱	L.O.I

## ۲-۲. آزمایش‌های قیر اصلاح شده

محدوده مادون قرمز استفاده می‌شود. در این روش، قسمتی از انرژی پرتو جذب نمونه می‌شود و بخشی دیگر از آن عبور می‌کند. طیف حاصله نشان‌دهنده جذب و عبور مولکولی است و اثر مولکولی نمونه را ایجاد می‌نماید. این ویژگی، طیف‌سنجی مادون قرمز را برای تجزیه و تحلیل انواع مختلف مواد مفید می‌کند.

در اختلاط فریت نانو شده با قیر، از همزن با سرعت برش زیاد استفاده شد. برای مخلوط کردن، ابتدا قیر تا ۱۵۰ درجه سلسیوس گرم شده و سپس فریت به قیر اضافه شد. اختلاط با استفاده از یک همزن برش زیاد با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ثابت انجام شد. پس از ساخت نمونه‌های قیر اصلاح شده، آزمایش‌های متداول قیر (وزن مخصوص، خاصیت انگمی، نقطه نرمی، لعاب نازک، درجه اشتعال و...) و همچنین آزمایش روش رنومتر دینامیک (DSR) قیر به شرح زیر انجام شد.

### ۲-۲-۱. آزمایش رنومتر دینامیک (DSR)

## ۲-۳. آزمایش‌های مخلوط آسفالتی

برای تکمیل این تحقیق، درصد بهینه قیر در مخلوط آسفالت با استفاده از روش مارشال تعیین شد. با استفاده از این درصد قیر بهینه، نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش‌های خستگی قبل و بعد از پیرشدگی، خزش، مارشال، کانتابرو، حساسیت رطوبتی و مدول برجهندگی مطابق استانداردهای مربوطه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این آزمایش‌ها از درصد‌های مختلف فیلرها در اختلاط خشک استفاده شد که در جدول ۲ به آن‌ها اشاره می‌شود. درصد فیلر از کل مصالح سنگی ثابت و برابر ۶ درصد است، و برای انتخاب درصد‌های جایگزینی فیلر از پودر فریت از گام یک سوم استفاده شد. مقادیر جایگزینی صفر، ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد انتخاب گردید. همچنین، برای اختلاط تر نیز از سه مقدار مختلف ۳، ۵ و ۷ درصد، بر اساس مطالعات قبل، استفاده شد، که در متن به نام‌های F3%، F5% و F7% به آن‌ها اشاره می‌شود.

بر اساس استاندارد AASHTO T315، برای اندازه‌گیری رفتار کندروان و الاستیک چسب‌های قیری در دمای عملیاتی زیاد و میانه، از روش رنومتر دینامیک (DSR) استفاده می‌شود. دو پارامتر مدول مرکب  $G^*$  و زاویه فاز  $\delta$  از این آزمایش حاصل می‌شود که بیانگر مقاومت شیارشدگی است. به طوری که برای مقاومت به شیارشدگی، مدول مرکب  $G^*$  زیاد و زاویه فاز  $\delta$  کوچک، هر دو مطلوب است.

### ۲-۲-۲. آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR)

از آزمون FTIR برای بررسی گروه‌های عاملی در ساختار کامپوزیت تولید شده استفاده شد. در روش طیف‌سنجی مادون قرمز، از یک پرتوی الکترومغناطیسی فرکانسی در

جدول ۲. درصد‌های مختلف فیلرها در اختلاط خشک

نمونه	F100	L100	C100	L30	C30	L65	C65
فیلر	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۳۰٪ پودر آهک +	۳۰٪ سیمان +	۶۵٪ پودر آهک +	۶۵٪ سیمان +
فریت	فریت	پودر آهک	سیمان	۷۰٪ فریت	۷۰٪ فریت	۳۵٪ فریت	۳۵٪ فریت



### ۲-۳-۱. حساسیت رطوبتی

روش استاندارد AASHTO T283 (مقاومت مخلوط‌های قیری متراکم در برابر آسیب رطوبتی) یکی از معمول‌ترین فرآیندهای آزمایشی برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت با TSR و برحسب درصد نشان داده می‌شود، که بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. مقدار ITS در رابطه (۱) مقدار میانگین برای نمونه‌های تحت شرایط اشباع و خشک است. حداقل مقدار TSR، ۸۰ درصد است و هر چه مقدار TSR بیشتر باشد نشان‌دهنده مقاومت بهتر در برابر رطوبت است.

$$TSR = \frac{ITS_{\text{اشباع}}}{ITS_{\text{خشک}}} \quad (1)$$

### ۲-۳-۲. کانتابرو

این آزمایش به صورت غیرمستقیم نشانگر چسبندگی، پیوستگی و تأثیرات سایش و کنده شدن سنگ‌دانه‌ها و قیر در مخلوط‌های آسفالتی است (آدیتیا و همکاران، ۲۰۲۰). نتیجه این آزمایش با استفاده از رابطه (۲) تعیین می‌گردد.

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه، P افت وزنی سایش کانتابرو،  $P_1$  وزن اولیه نمونه (gr) و  $P_2$  وزن ثانویه نمونه (gr) است.

### ۲-۳-۳. مدول برجهنگی

مدول برجهنگی (Mr) مدول ارتجاعی در بارگذاری دوره‌ای با کرنش‌های بسیار کوچک و یکی از مشخصه‌های مکانیکی مهم مخلوط‌های آسفالتی است. اگر بار در مقایسه با مقاومت مصالح، کوچک باشد و در دوره زمانی طولانی تکرار شود، تغییرشکل، تحت هر تکرار بار، تقریباً به طور کامل برگشت‌پذیر خواهد بود. در این تحقیق، مدوله‌کننده (Mr) مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از فریم آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و دستگاه

(UTM) با قابلیت بارگذاری دوره‌ای و اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها، طبق استاندارد ASTM4123 در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد.

### ۲-۳-۴. خستگی

در این تحقیق، از روش کشش غیرمستقیم جهت انجام آزمایش خستگی استفاده شده است. شکل بارگذاری پیشنهادی در این آزمایش نیم‌سینوسی است. همچنین، مقدار بار وارده به صورت ۵۰ نیوتن بار ثابت و ۳۰۰ نیوتن بار متغیر منظور گردید. زمان بارگذاری به صورت ۱۰۰ میلی‌ثانیه بارگذاری و ۵۰۰ میلی‌ثانیه کل دوره بارگذاری انتخاب گردید. بعد از انجام آزمایش خستگی، نمونه‌ها به مدت ۱۲۰ ساعت درون گرمخانه در دمای ۸۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا بتوان پیرشدگی نمونه‌ها را مدل‌سازی کرد. بعد از آن، نمونه‌ها مورد آزمایش خستگی قرار گرفتند. برای بررسی نسبت تغییرات، فرمول (۳) تعریف شد.

$$(3) \quad \text{نسبت تغییرات} = \frac{\text{تغییر شکل ماندگار بعد از پیرشدگی}}{\text{تغییر شکل ماندگار قبل از پیرشدگی}} \times 100$$

### ۲-۳-۵. خزش

برای مصالح رویه، اساس و زیراساس، آزمایش بارگذاری تکراری تک‌محوری (خزش دینامیک) مخلوط آسفالتی بر اساس روش BS-DD 226 انجام می‌شود. در این آزمایش، از نمونه‌های استوانه‌ای مارشال با قطر ۱۰ میلی-متر و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش استفاده شد. دمای انجام آزمایش ۳۰ درجه سلسیوس اعمال گردید که قبل از انجام آزمایش، کنترل دمای نمونه‌ها انجام شد. پیش‌بارگذاری ۲۰ کیلوپاسکال به مدت ۳۰ ثانیه اعمال شد. بارگذاری طی ۱۸۰ سیکل به شکل نیمه‌سینوسی با تنش ثابت ۵ کیلوپاسکال و تنش دینامیک ۲۰۰ کیلوپاسکال در سیکل‌های یک ثانیه‌ای با زمان استراحت ۹۰۰ میلی‌ثانیه انجام گرفت.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. نتایج آزمایش‌های متداول قیر

درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی به درجه نفوذ اولیه، درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی برحسب ۰/۱ میلی‌متر و درجه نفوذ در  $25^{\circ}\text{C}$  (۱۰۰ گرم-۵ ثانیه) برحسب ۰/۱ میلی‌متر کاهش و مقدار کشش در  $25^{\circ}\text{C}$  برحسب سانتی‌متر، لعاب نازک قیر و درجه اشتعال افزایش می‌یابد.

نتایج آزمایش‌های متداول قیر اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف نانوفریت مطابق جدول ۳ ارائه شده است. با افزایش میزان فریت، وزن مخصوص، نقطه نرمی، نسبت

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های متداول قیر مورد استفاده و قیر اصلاح‌شده

نتایج	روش آزمایش		آزمایش‌های قیرهای خالص			
	ASTM	AASHTO				
بدون فریت	۳٪	۵٪	۷٪			
	۳٪	۵٪	۷٪			
۱/۰۸	۱/۱۵	۱/۱۷	۱/۱۸	D70	T228	وزن مخصوص در $25^{\circ}\text{C}$
۱۳۷	۱۳۴	۱۳۱	۱۳۰	D113	T51	مقدار کشش در $25^{\circ}\text{C}$ (سانتی‌متر)
۵۲	۴۸	۵۱	۵۵	D36	T53	نقطه نرمی (ساجمه- حلقه) ( $^{\circ}\text{C}$ )
۰/۴۵	۰/۳۱	۰/۲۵	۰/۱۸	D1754	T179	لعاب نازک قیر ( $163^{\circ}\text{C}$ - پنج ساعت) تغییر در جرم اولیه (%)
۲۹۷	۳۰۹	۳۰۳	۳۰۵	D92	T48	درجه اشتعال (روباژ-کلیولند) ( $^{\circ}\text{C}$ )
۸۸/۰۶	۹۳/۷۵	۹۵/۴۵	۹۵/۵۹	D5	T49	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی به درجه نفوذ اولیه
۵۹	۶۰	۶۳	۶۵	-	-	درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی برحسب ۰/۱ میلی‌متر
۶۱	۶۴	۶۶	۶۸	D5	T49	درجه نفوذ در $25^{\circ}\text{C}$ (۱۰۰ گرم-۵ ثانیه) برحسب ۰/۱ میلی‌متر

#### ۳-۲. نتایج آزمایش روش رئومتر دینامیک (DSR)

دارای کمترین مقدار کرنش در تمامی سطوح تنش است. همان‌طور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، در نمونه‌های اصلاح شده با ۳ و ۵ درصد فریت، مدول پیچیده برشی اختلاف چندانی نداشته، اما باعث افزایش این پارامتر در نمونه اصلاح شده با فریت ۷ درصد شده است. زاویه فازی نشان‌دهنده درجه الاستیسیته قیر است. هرچه مقدار زاویه فازی افزایش یابد ویسکوزیته قیر نیز افزایش می‌یابد که این ویسکوزیته می‌تواند باعث بهبود عملکرد قیر در برابر ترک‌های خستگی و کاهش عملکرد

در این قسمت، نتایج خصوصیات رئولوژیک قیرهای اصلاح شده با پسماند صنعتی فریت آورده شده است. رفتار رئولوژیک قیرها در خرابی خستگی و حساسیت در برابر شیار شدگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زیر بر اساس خروجی‌های آزمایش، DSR در دماهای متغیر به‌دست آمده است. بر اساس نتایج آزمایش DSR، اضافه نمودن پسماند صنعتی فریت به قیر سبب افزایش مدول پیچیده برش می‌شود. قیر اصلاح‌شده با ۷ درصد فریت

• ۳-۳. نتایج آزمایش طیف‌سنجی

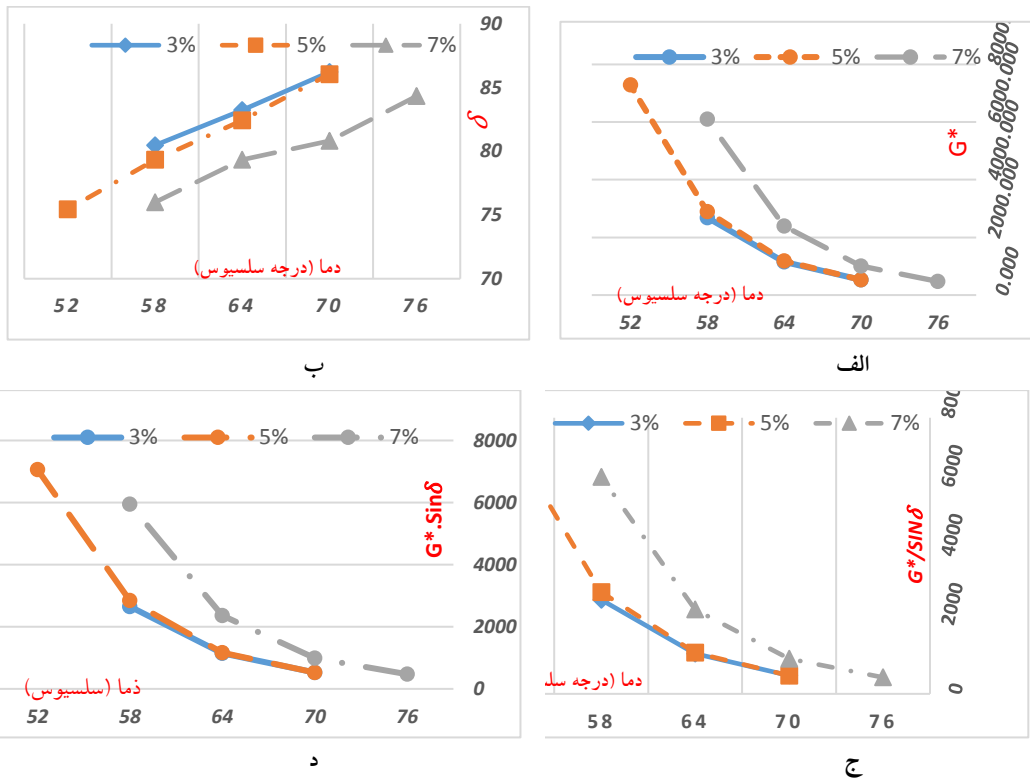
مادون‌قرمز (FTIR)

در شکل ۵، طیف FTIR مربوط به کامپوزیت مورد بررسی نشان داده شده است. در این شکل، وجود چند پیک (اوج) مختلف در طیف FTIR مربوط به کامپوزیت تولیدی مشهود است که هر پیک مربوط به پیوندی خاص است. پیک‌های واقع شده در اعداد موج  $1408\text{ cm}^{-1}$  و  $1365\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به ارتعاش خمشی درون صفحه و خارج از صفحه گروه‌های متیل و متیلن موجود در قیر است. همچنین، پیک‌های جذبی قابل مشاهده در اعداد موج  $1007\text{ cm}^{-1}$ ،  $812\text{ cm}^{-1}$  و  $779\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به ارتعاش گروه‌های سولفکساید ( $\text{C}_2\text{S}=\text{O}$ )، ارتعاش گهواره‌ای خارج از صفحه پیوندهای C-H و ارتعاش زنجیره‌های آلکیلی حاوی بیش از ۴ واحد متیلن است (اورا و همکاران، ۲۰۱۵)، که همه این گروه‌ها مربوط به ساختار قیر در کامپوزیت مورد بررسی است. این در حالی است که پیک جذبی کوچک واقع شده در عدد موج  $580\text{ cm}^{-1}$  ناشی از ارتعاش کششی پیوندهای Fe-O در ساختار فریت است و بنابراین از نتایج آزمون FTIR می‌توان به وجود هر دو ساختار قیر و فریت در کامپوزیت مورد بررسی پی برد (پکسوز و همکاران، ۲۰۱۱).

قیر در برابر شیارشدگی گردد. همان‌طور که در شکل ۴-ب مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار افزودنی فریت، زاویه فازی کاهش یافته، که این مسئله در ترک خستگی به نفع نیست؛ اما در خرابی شیارشدگی این کاهش زاویه فازی باعث بهبود عملکرد قیر شده است.

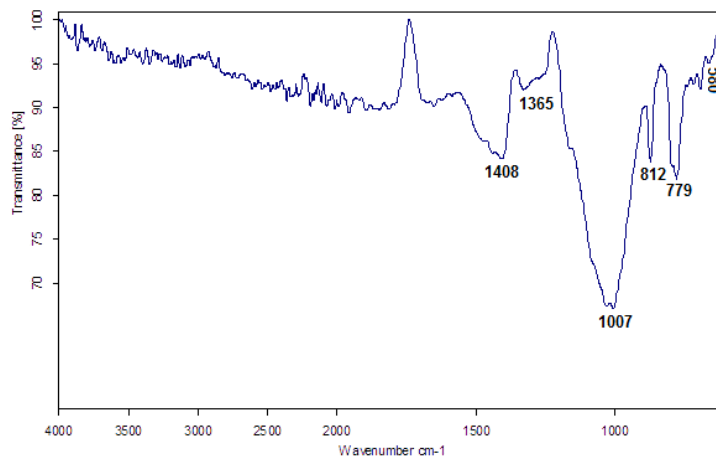
مهم‌ترین عامل برای مقایسه ترک‌های خستگی از منظر آزمایش DSR پارامتر  $G^*\text{Sin}\delta$  است. این پارامتر رابطه مستقیم با مقاومت قیر در مخلوط آسفالتی در برابر خرابی مد نظر دارد، به شکلی که با افزایش این پارامتر، مقاومت مخلوط آسفالتی نیز نسبت به ترک خستگی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴-ج مشاهده می‌شود، در نمونه‌های ۳ و ۵ درصد، پارامتر  $G^*\text{Sin}\delta$  تفاوت چندانی نداشته، اما در نمونه ۷ درصد، نمودار جهش قابل توجهی، علی‌الخصوص در دماهای کم، داشته به شکلی که در دمای ۵۸ درجه سلسیوس این پارامتر بیش از دو برابر نسبت به نمونه ۳ درصد افزایش یافته است. در خصوص خرابی شیارشدگی، مهم‌ترین پارامتر را می‌توان  $G^*\text{Sin}\delta$  در نظر گرفت. این پارامتر نیز رابطه مستقیمی با مقاومت قیر در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالتی دارد، به شکلی که با افزایش این پارامتر، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی شیارشدگی نیز بهبود می‌یابد. حال، با توجه به شکل ۴-د، در این پارامتر نیز بیشترین تغییر در نمودار مربوط به نمونه ۷ درصد است که در اینجا نیز در دمای ۵۸ درجه این پارامتر بیش از دو برابر نسبت به نمونه ۳ درصد افزایش یافته است.

تأثیر کاربرد فریت بر رفتار قیر، عملکرد خستگی و خزش مخلوط آسفالتی



شکل ۴. الف) نمودار نتایج مدول پیچیده برشی، ب) نمودار نتایج زاویه فازی، ج) نمودار نتایج پارامتر

$G^* \cdot \sin\delta$  و د) نمودار نتایج پارامتر  $G^*/\sin\delta$



شکل ۵. طیف FT-IR مربوط به کامپوزیت قیر- فریت

۳-۴. نتایج آزمایش مخلوط آسفالتی

۳-۴-۱. تعیین درصد قیر بهینه

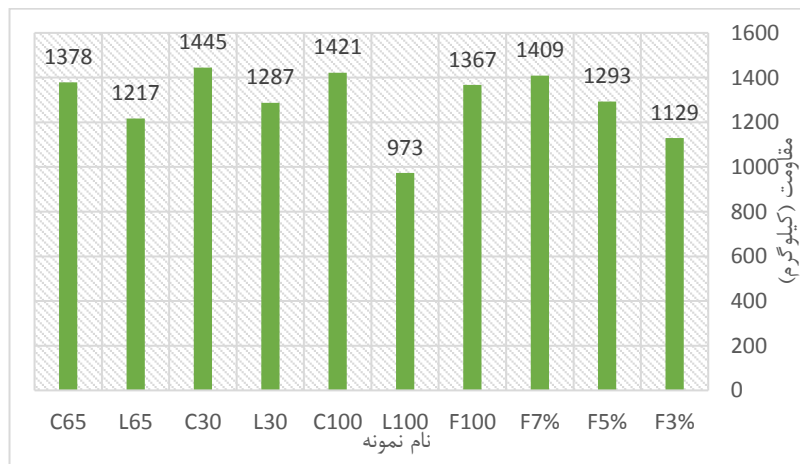
با توجه به نتایج آزمایش‌های مارشال، مقادیر قیر بهینه برای نمونه‌های آسفالتی با ترکیب مساوی سه فیلر پودر آهک، سیمان و فریت محاسبه شد. با توجه به تعریف ارائه شده در فصل قبل برای تعیین درصد قیر بهینه، ابتدا

نمودارهای استقامت مارشال، وزن مخصوص واقعی و مقدار فضای خالی مخلوط آسفالتی رسم شده و سپس طبق تعریف درصد قیر بهینه از میانگین سه نمودار به دست می‌آید. با توجه به نتایج، مقدار قیر بهینه ۵/۱ درصد در نظر گرفته شد.

### ۳-۴-۲. آزمایش مارشال

با توجه به مطالب ذکر شده در بخش قبل، درصد قیر بهینه نمونه‌های آسفالتی توسط آزمایش مارشال تعیین گردید و پس از آن نمونه‌های آسفالتی با توجه به مقدار قیر بهینه ساخته شدند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افزودن فریت منجر به افزایش استحکام نمونه‌ها شده است. در اختلاط خشک، مقاومت فشاری نمونه ۱۰۰ درصد فریت نسبت به نمونه ۱۰۰ درصد آهک، ۴۰ درصد بیشتر بوده، ولی نسبت به نمونه ۱۰۰ درصد سیمان، ۴ درصد کمتر بوده است. اما بیشترین مقاومت مارشال برای نمونه C30 بود که حاوی ۷۰ درصد فریت

و ۳۰ درصد سیمان است. در این نمونه، مقاومت مارشال نسبت به نمونه با فیلر پودر آهک ۴۸ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین، در اختلاط تر فریت با مخلوط آسفالتی، با افزایش درصد فریت، مقاومت مارشال افزایش پیدا کرده، به طوری که در نمونه ۷ درصد فریت، استحکام نمونه نسبت به نمونه ۱۰۰ درصد پودر آهک، ۴۵ درصد افزایش پیدا کرده است. در مقایسه مقاومت مارشال اختلاط تر و خشک فریت با مخلوط آسفالتی می‌توان بیان کرد که با توجه به درصد استفاده کمتر از فریت در اختلاط تر و اختلاف کم در مقدار مقاومت مارشال نمونه‌های ۳ و ۵ و ۷ درصد، استفاده از نمونه ۷ درصد اختلاط تر مقرون به صرفه تر است.



شکل ۶. تأثیر تغییرات نوع فیلر بر نتایج مقاومت مارشال

### ۳-۴-۳. حساسیت رطوبتی

برای سنجش حساسیت در برابر رطوبت مخلوط‌های آسفالتی از شاخص نسبت مقاومت کششی (TSR) استفاده می‌شود که در شکل ۷ به نمایش گذاشته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اختلاط تر، با افزایش فریت، حساسیت رطوبتی کاهش یافته، به شکلی که در نمونه F7%، ۹/۹ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. در اختلاط خشک، نمونه C30 بهترین

عملکرد را از خود نشان داده است؛ به شکلی که نسبت به نمونه شاهد ۱۷/۷ درصد بهبود یافته است. در مقایسه اختلاط خشک و تر نیز نمونه C30 مطلوب‌ترین نتیجه را داشته است. در رابطه با چگونگی بهبود این عملکرد می‌توان به نقش قیر و چسبندگی بین مصالح اشاره کرد که فریت در اختلاط تر، با بهبود چسبندگی قیر، و در اختلاط خشک، با بهبود چسبندگی بین مصالح ریزدانه، باعث این بهبود عملکرد شده است.

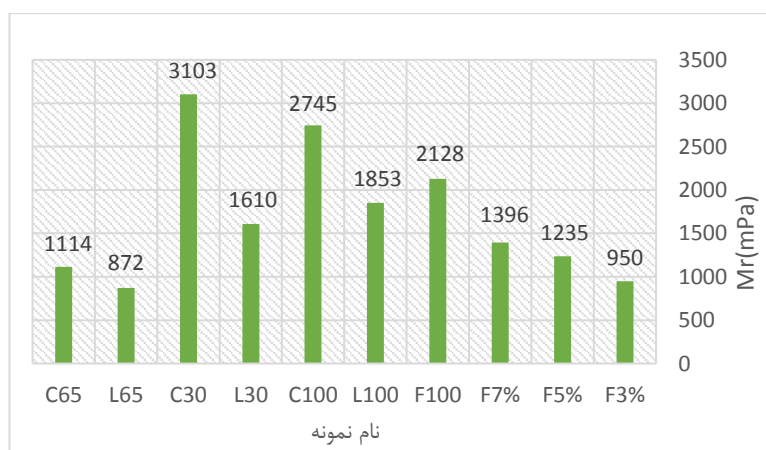


شکل ۷. تأثیر تغییرات نوع فیلر بر نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

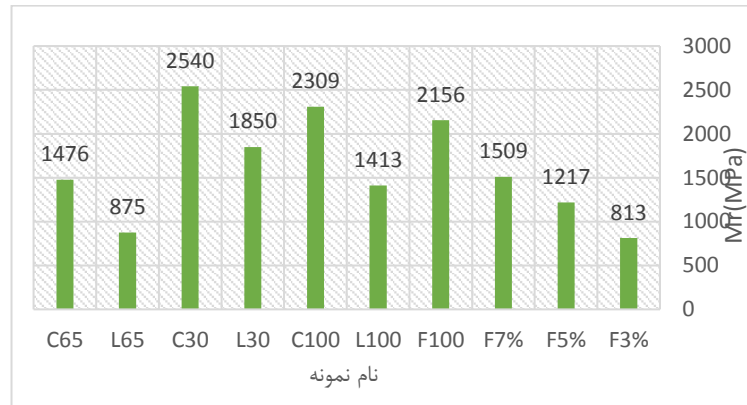
### ۳-۴-۴. مدول برجهندگی

نتایج اختلاط خشک، این مقدار افزایش کمتر از نمونه L100 است. در بارگذاری به شکل مربعی، که در شکل ۸- ب آمده است نیز بیشترین مقدار مدول برجهندگی مربوط به نمونه C30 است که با افزایش ۸۰ درصدی نسبت به نمونه L100 به مقدار ۲۵۴۰ رسیده است. در اختلاط تر نیز با افزایش مقدار فریت مدول برجهندگی افزایش یافته که در این بارگذاری، برخلاف بارگذاری نیم‌سینوسی در نمونه F7%، مقدار مدول نسبت به نمونه L100 افزایش یافته است.

شکل ۸- الف، نتایج آزمایش مدول برجهندگی با بارگذاری نیم‌سینوسی را نشان می‌دهد. بیشترین مدول برجهندگی مربوط به نمونه C30 است که با افزایش ۶۷ درصدی نسبت به نمونه L100، ۳۱۰۳ مگاپاسکال است. این افزایش می‌تواند ناشی از چسبندگی بیشتر بین سیمان و فریت باشد. در اختلاط تر نیز با افزایش مقدار فریت، افزایش مدول برجهندگی مشاهده می‌شود. اما با توجه به



الف



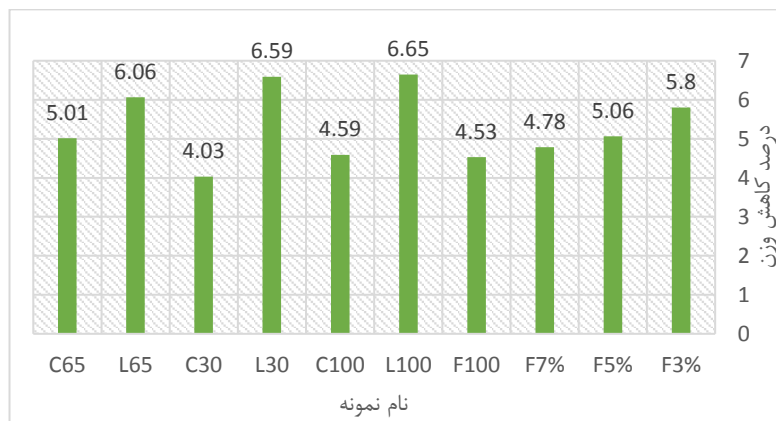
ب

شکل ۸. الف) نتایج آزمایش مدول برجهندگی با بارگذاری نیم‌سینوسی و ب) نتایج آزمایش مدول برجهندگی با بارگذاری مربعی

بهبود ۲۸ درصدی در کاهش درصد وزنی نمونه را نسبت به نمونه شاهد داشته است. در اختلاط خشک نیز افزودن فریت باعث بهبود مقاومت چسبندگی شده و نمونه C30، که بهترین عملکرد را در برابر سایش از خود نشان داده، با بهبود ۳۹ درصدی نسبت به نمونه L100، کمترین کاهش وزنی را دارا بوده که این می‌تواند ناشی از چسبندگی خوب حاصل شده بین فریت و سیمان باشد.

### ۳-۴-۵. کانتابرو

نتایج آزمایش سایش کانتابرو در شکل ۹ نشان داده شده است. محور افقی این شکل، درصد افزودنی‌های استفاده شده در مخلوط آسفالتی و محور قائم، میزان سایش هر یک از مخلوط‌های ساخته شده را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در اختلاط تر فریت، بهترین عملکرد مربوط به نمونه F7% بوده که



شکل ۹. تأثیر تغییرات نوع فیلر بر نتایج آزمایش کانتابرو

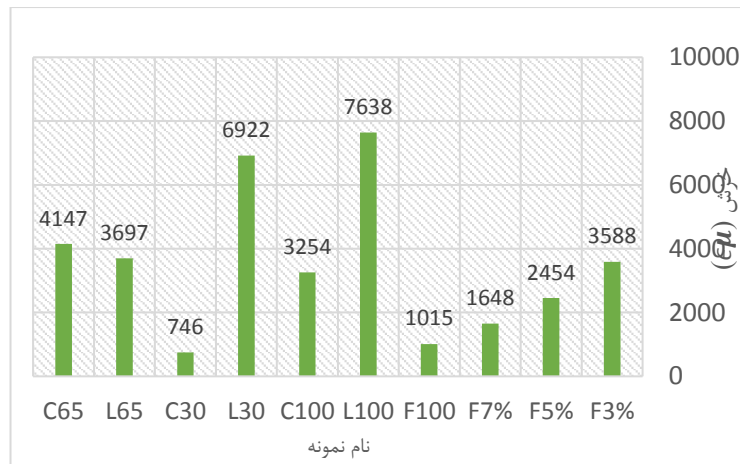
ماندگار مخلوط آسفالتی شده است. به شکلی که در نمونه F100 کاهش ۸۶ درصدی خزش نسبت به نمونه شاهد به دست آمده است. اما در این روش، اختلاط بهترین عملکرد مربوط به نمونه C30 بوده که کاهش قابل ملاحظه ۹۰ درصدی را داشته است. همچنین، در اختلاط

### ۳-۴-۶. خزش

شکل ۱۰، تغییرات در میزان کرنش نمونه‌های آسفالتی را نشان می‌دهد. در یک سیکل ثابت، تغییرات کرنش ناشی از اعمال تنش در نمونه‌ها نشان می‌دهد که افزودن فریت به صورت اختلاط خشک باعث کاهش تغییر شکل

عملکرد مربوط به نمونه C30 است که این بهبود عملکرد می‌تواند ناشی از واکنش خوب فریت با سیمان باشد.

تر نیز با افزایش درصد فریت، عملکرد مخلوط در برابر این خرابی کاهش یافته و نمونه F7% کمترین میزان خزش را داشته است. در مقایسه کلی نمونه‌ها نیز بهترین



شکل ۱۰. نتایج آزمایش خزش

روانی قیر می‌شود و همین افزایش ضخامت قیر پوشش-دهنده روی سنگ‌دانه‌ها باعث می‌شود سنگ‌دانه‌ها در کنار یکدیگر باقی بمانند و در نهایت، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر وقوع و گسترش ترک خوردگی افزایش یابد. به علاوه، افزایش عمر خستگی تابع کاهش کرنش کششی ایجاد شده در مخلوط آسفالتی است، که در این پدیده باز وجود فریت کمک‌کننده است.

همان‌طور که در شکل ۱۲-الف پیداست، در اختلاط تر، قبل از فرایند پیرشدگی نمونه‌ها، با افزایش درصد فریت، عملکرد مخلوط در برابر خستگی بهبود یافته است، به شکلی که در نمونه F7% با کاهش ۷۱ درصدی تغییرشکل نسبت به نمونه شاهد، کمترین تغییرشکل ماندگار مشاهده گردید؛ که این می‌تواند ناشی از چسبندگی خوب بین قیر خالص و افزودنی فریت باشد. در اختلاط تر نیز بهترین عملکرد مربوط به نمونه F100 بود که باعث بهبود ۸۰ درصدی این خرابی شده است. در حالت کلی نیز بعد از مقایسه اختلاط خشک و تر، کمترین تغییرشکل مربوط به نمونه F100 بود که این نیز می‌تواند ناشی از ذرات ریز فریت باشد که به خوبی اتصال

### ۳-۴-۷. خستگی

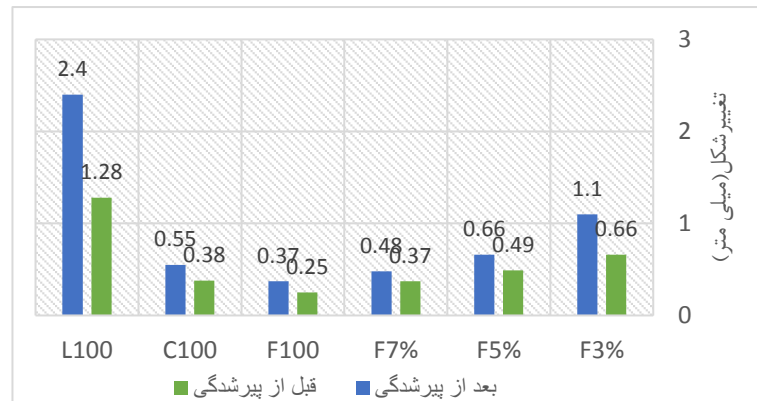
آزمایش کشش غیرمستقیم از جمله آزمایش‌هایی است که در تعیین مقاومت کششی مصالح آسفالتی‌ها به کار می‌رود. تجمع تغییرشکل‌های کشش مهمترین روش در تعیین عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی با آزمایش کشش غیرمستقیم یاد شده است. بدین منظور، در این پژوهش، مقاومت خستگی با روش کشش غیرمستقیم دینامیک (ITFT) مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمایش با کاربرد دستگاه UTM و طبق استاندارد EN 12697-24 انجام شد. این بارگذاری به صورت شبه‌سینوسی و فرکانس یک مرکز در دمای محیط یا ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد. همانگونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نمونه‌های دارای افزودنی بیشتر، عمر خستگی بیشتری نسبت به نوع شاهد دارند، این پدیده نشان می‌دهد که ماهیت ارتجاعی و الاستیک قیر در مخلوط آسفالتی با اضافه کردن فریت بهبود یافته است. علت این امر، پیوند قوی‌تر ذرات پودر فریت با قیر است، به طوری که فریت باعث چسبندگی بیشتر قیر حاوی آن با مصالح سنگی به علت افزایش



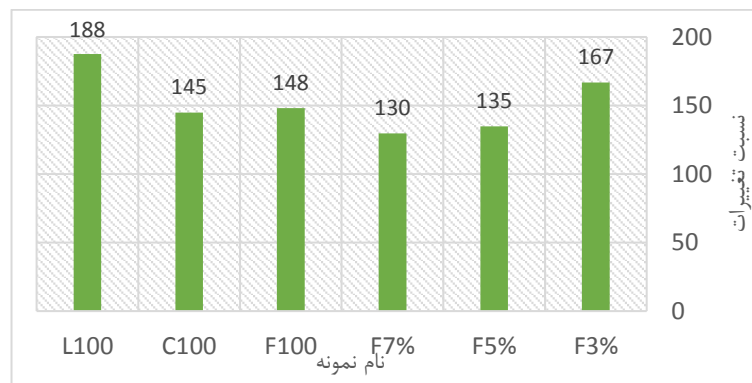
خرابی پیرشدگی است. اما در اختلاط خشک، نمونه‌های C100 و F100 عملکرد تقریباً یکسان و بهتری نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند. در حالت کلی، با مقایسه اختلاط تر و خشک می‌توان بیان کرد که نمونه F7% بهترین عملکرد را داشته که این نتیجه می‌تواند به دو دلیل اتفاق افتاده باشد. اولاً، در خرابی خستگی، مهم‌ترین عملکرد مربوط به قیر و چسبندگی آن است. ثانیاً، ظرفیت حرارتی نسبتاً خوب فریت باعث شده تا گرما را به خود جذب کند و مانع از تبخیر روغن قیر شده و از پیرشدگی نمونه تا حدی جلوگیری کند (فرهمندجو و سفلائی، ۲۰۱۴).

بین سنگ‌دانه‌ها با یکدیگر و همچنین قیر و سنگ‌دانه‌ها را برقرار کرده است.

نتایج آزمون خستگی نمونه‌ها، بعد از فرایند پیرشدگی در شکل ۱۲ آمده است که نشان از بهبود عملکرد نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد بعد از افزودن فریت دارد. اما برای درک بهتر این مسئله، نمودار نسبت تغییرات تغییرشکل ماندگار بعد از پیرشدگی به تغییرشکل ماندگار قبل از پیرشدگی در شکل ۱۲-ب رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در اختلاط تر، این نسبت تغییرات با افزایش درصد فریت کاهش یافته که این نشانگر بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر



الف



ب

شکل ۱۱. الف) نتایج آزمایش خستگی و ب) نسبت تغییرات خستگی

خواص و عملکرد قیر دارای افزودنی با مخلوط آسفالتی ساخته شده با آن را بهبود بخشد. در این پژوهش، اثر توأم فریت بر عملکرد خزش و خستگی مخلوط آسفالتی

### ۵-۳. تحلیل نتایج آزمایش‌ها

اصلاح کننده‌های قیر موادی هستند که در حین تهیه مخلوط‌های آسفالتی یا پیش از اختلاط افزوده شده، تا

می‌دهد. دنباله تصاویر به وضوح نشان می‌دهد که چگونه ریزساختار قیر تحت تأثیر وجود فریت قرار می‌گیرد. قیرهای حاوی فریت، به دلیل وجود این ماده اضافی، دارای سطح ناصاف می‌باشند. از میکروگراف‌های SEM مشخص می‌شود که نمونه‌های تهیه شده دارای مورفولوژی ناهموار با توزیع اندازه باریک هستند. با توجه به اندازه ذرات نمونه که در محدوده تقریباً یک میکرون بود، مشاهده گردید که با افزایش محتوای فریت، سطوح با روشنایی بیشتر، افزایش می‌یابد. از آنجا که قیر وظیفه پیوند بین سنگ‌دانه‌ها را بر عهده دارد، قیر با قابلیت چسبندگی و استحکام زیاد سبب تولید مخلوط‌های آسفالتی سفت‌تر و سخت‌تر می‌شود. از این‌رو، پارامترهای مقاومتی مخلوط آسفالتی در حالت اختلاط تر بهبود می‌یابد (کردی و شفابخش، ۲۰۱۶؛ رضوان و ایزدی، ۲۰۱۶). همانگونه که نتایج نشان می‌دهد، افزودن درصد‌های گوناگون فریت توانسته مقدار مدول برشی قیر را بهبود بخشد (به دلیل کاهش ویسکوزیته قیر و ایجاد پیوستگی بین ذرات و مولکول‌های قیر) و در مجموع نیروی برشی را در قیر اضافه می‌کند. همچنین، در خصوص اختلاط تر می‌توان بیان کرد که خواص شیمیایی و فیزیکی فیلر فریت باعث ایجاد ماستیکی با چسبندگی و مقاومت بیشتر شده و در نتیجه آسفالتی با قابلیت چسبندگی و استحکام زیاد حاصل شده که باعث بهبود عملکرد قیر و آسفالت می‌شود (روسو و همکاران، ۲۰۲۱).

بررسی شده است. افزودن مواد پایه فلزی به قیر باعث تسلیح ذرات تشکیل‌دهنده قیر می‌شود و در نتیجه پیوند قوی‌تری بین ذرات قیر ایجاد شده و باعث چسبندگی و استحکام بیشتر قیر می‌شود. در شرایط یکسان از نظر دانه‌بندی، ویژگی سنگ‌دانه و نوع قیر، پایداری شیارشدگی مخلوط آسفالتی عمدتاً به استحکام داخلی مخلوط وابسته است و هر چه استحکام داخلی، ماستیک با افزودنی‌ها بهبود یابد، پایداری در برابر تغییرشکل ماندگار بیشتر می‌شود. طبق رفتار مشاهده شده از آزمایش‌های DSR برای این نوع ماستیک، مشاهده می‌شود که پارامتر  $G^*/\sin\delta$  افزایش یافته و مقاومت بیشتر در برابر شیارشدگی دور از انتظار نیست. در فرآیند بارگذاری محوری خزشی، اضافه نمودن فریت، همانگونه که در تصویر بزرگ‌مقیاس (شکل ۱۲) ملاحظه می‌شود، ناهمواری سطحی قیر افزایش می‌یابد و امکان درگیری با مصالح سنگی ماستیک قیری (قیر حاوی این نوع فیلر) افزایش می‌یابد. همچنین، به علت وجود ترکیبات Fe-O، میزان ظرفیت حرارتی قیر حاوی فریت افزایش می‌یابد و به علت روان‌تر شدن ماستیک قیری در یک دمای معین، امکان چسبندگی به سنگ‌دانه‌ها و پر کردن ناحیه تحت کرنش کششی افزایش می‌یابد؛ به عبارتی، پیوستگی داخلی قیر افزایش یافته و امکان تحمل کرنش کششی و تحمل بار تکراری عامل خستگی بیشتر می‌شود. در شکل ۱۲، همانگونه که مورفولوژی سطحی قیر حاوی ذرات فریت نمایش می‌دهد، برای قیر پایه، سطح شبکه‌ای قیر از مناطق همگن و صاف را نشان



شکل ۱۲. نحوه پراکندگی فریت در قیر پایه و نمایش تغییرات سطحی

### ۳-۶. تحلیل آماری نتایج

در این قسمت، به بررسی وجود، جهت و میزان رابطه خطی بین متغیرهای موجود در پژوهش که از نوع پیوسته می‌باشند، پرداخته می‌شود. برای این منظور، می‌توان از آزمون‌های ضریب همبستگی خطی استفاده نمود که رابطه خطی را بین متغیرها به صورت دوجه دو بررسی می‌کند. اگر هر دو یا یکی از متغیرهای مورد بررسی نرمال باشند، از همبستگی پیرسون و در غیر این صورت از همبستگی اسپیرمن استفاده می‌شود. برای بررسی نرمال بودن هر متغیر از آزمون شاپیرو-ویلک استفاده می‌شود که در آن اگر مقدار معناداری بیشتر از سطح خطای ۰/۰۵

باشد، نرمال بودن متغیر را نمی‌توان رد کرد. مطابق جدول ۴، به جز متغیر خستگی بعد از پیرشدگی، تمامی متغیرها دارای توزیع نرمال هستند. پس در هنگام محاسبه ضرایب همبستگی دوجه دو، شرط این که حداقل یکی نرمال باشد برقرار می‌شود. بنابراین، در ادامه، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده می‌شود. همچنین، به منظور بررسی نرمال بودن متغیرها، ابتدا از آزمون شاپیرو-ویلک استفاده شده است. با توجه به نرمال بودن توزیع  $\delta$ ، در هنگام محاسبه ضرایب همبستگی دوجه دو بین  $\delta$  و سه متغیر دیگر، شرط این که حداقل یکی نرمال باشد برقرار می‌شود. پس در ادامه، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است.

جدول ۴. بررسی نرمال بودن نتایج مخلوط آسفالتی و قیر حاوی افزودنی

نتیجه	معناداری	درجه آزادی	آماره آزمون	آزمون بررسی نرمال بودن شاپیرو-ویلک
دارای توزیع نرمال است	۰/۱۶۰	۱۰	۰/۸۸۸	مارشال
دارای توزیع نرمال است	۰/۴۲۵	۱۰	۰/۹۲۸	کشش غیرمستقیم
دارای توزیع نرمال است	۰/۳۶۶	۱۰	۰/۹۲۱	کشش غیرمستقیم اشباع
دارای توزیع نرمال است	۰/۶۳۱	۱۰	۰/۹۴۷	TSR
دارای توزیع نرمال است	۰/۲۹۴	۱۰	۰/۹۱۲	مدول برجهدگی نیم‌سینوسی
دارای توزیع نرمال است	۰/۶۸۳	۱۰	۰/۹۵۱	مدول برجهدگی مربعی
دارای توزیع نرمال است	۰/۴۰۵	۱۰	۰/۹۲۵	کانتابرو
دارای توزیع نرمال است	۰/۳۱۰	۱۰	۰/۹۱۴	خزش
دارای توزیع نرمال است	۰/۰۷۹	۶	۰/۸۱۴	خستگی قبل از پیرشدگی
دارای توزیع نرمال نیست	۰/۰۲۴	۶	۰/۷۵۸	خستگی بعد از پیرشدگی
دارای توزیع نرمال است	۰/۴۹۳	۶	۰/۹۱۸	نسبت تغییرات (/.)
دارای توزیع نرمال است	۰/۶۲۹	۱۱	۰/۹۴۹	$\delta$
دارای توزیع نرمال نیست	۰/۰۰۸	۱۱	۰/۷۹۴	G*
دارای توزیع نرمال نیست	۰/۰۰۹	۱۱	۰/۷۹۷	G*.Sin $\delta$
دارای توزیع نرمال نیست	۰/۰۰۷	۱۱	۰/۷۹۱	G*/Sin $\delta$

### ۳-۶-۱. آزمون همبستگی بین متغیرهای مخلوط

#### آسفالتی

همان‌طور که بیان شد، پس از اطلاع از وضعیت نرمال بودن متغیرها، نوع آزمون همبستگی انتخاب و سپس

تحلیل می‌گردد. مقدار ضریب همبستگی بین -۱ و +۱ تغییر می‌کند که در آن مقدار صفر نشان‌دهنده عدم وجود رابطه خطی است و هر چه ضریب به مقدار -۱ و +۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده قوی‌تر بودن رابطه خطی

گردیده است. بنا به نتایج این جدول، ضریب همبستگی برای هر متغیر با خودش برابر با یک است که بدیهی است. در سطرهای مربوط به نتیجه، در صورت معناداری ضریب همبستگی عبارت "وجود" و در صورت عدم معناداری، عبارت "عدم" به شکل اختصاری درج گردیده است. در حدود نیمی از ضرایب همبستگی محاسبه شده معنادار نمی باشند که نشان دهنده عدم وجود رابطه خطی معنادار بین آن متغیرهاست. در ادامه، به بررسی وجود یا عدم وجود رابطه خطی بین متغیر  $\delta$  با سه متغیر  $G^*$ ،  $G^* \cdot \sin \delta$  و  $G^* / \sin \delta$  پرداخته می شود.

است. علامت مثبت نشان دهنده جهت رابطه مستقیم (با افزایش یکی، دیگری هم افزایش می یابد) و علامت منفی بیانگر رابطه معکوس (با افزایش یکی، دیگری کاهش می یابد) بین دو متغیر است. اگر مقدار معناداری کمتر از سطح خطای ۰/۰۵ باشد، می توان بیان کرد که معناداری ضریب همبستگی را نمی توان رد کرد و رابطه خطی بین دو متغیر وجود دارد. در جدول ۵، مقدار ضریب همبستگی پیرسون، مقدار معناداری و تعداد نمونه های استفاده شده در محاسبات درج گردیده است. به دلیل متقارن بودن جدول، مقادیر اضافی (تکراری) حذف

جدول ۵. نتایج آزمون همبستگی بین آزمایش های مخلوط آسفالتی

خزش	کانتابرو	مدول برجهنگی مربعی	بندول برجهنگی نیم سینوسی	TSR	کشش غیر مستقیم اشباع	کشش غیر مستقیم	مارشال		
							۱	ضریب همبستگی	مارشال
							-	معناداری	
							۱۰	تعداد	
							-	نتیجه	
							۰/۷۸۸	ضریب همبستگی	کشش غیر مستقیم
							-	معناداری	
							۱۰	تعداد	
							-	نتیجه	
					۱	۰/۹۸۹	۰/۸۰۷	ضریب همبستگی	کشش غیر مستقیم اشباع
					-	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	معناداری	
					۱۰	۱۰	۱۰	تعداد	
					-	وجود	وجود	نتیجه	
				۱	۰/۹۴۳	۰/۸۸۴	۰/۸۲۶	ضریب همبستگی	TSR
				-	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	معناداری	
				۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	تعداد	
				-	وجود	وجود	وجود	نتیجه	

				۱	۰/۶۹۹	۰/۶۶۷	۰/۶۱۱	۰/۴۲۳	ضریب همبستگی	مدول برجهدنگی نیم سینوسی		
				-	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵	۰/۰۶۰	۰/۲۲۳	معناداری			
				۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	تعداد			
				-	وجود	وجود	عدم	عدم	نتیجه			
		۱	-۰/۵۸۸	-۰/۵۳۶	-۰/۷۹۳	-۰/۷۹۷	-۰/۷۷۲	-۰/۸۲۳	ضریب همبستگی	کانتابرو		
		-	۰/۰۷۴	۰/۱۱۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	معناداری			
		۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	تعداد			
		-	عدم	عدم	وجود	وجود	وجود	وجود	نتیجه			
	۱	۰/۸۹۳	-۰/۳۱۱	-۰/۲۸۱	-۰/۶۲۵	-۰/۵۴۹	-۰/۴۹۸	-۰/۷۰۱	ضریب همبستگی	خزش		
	-	۰/۰۰۱	۰/۳۸۲	۰/۴۳۱	۰/۰۵۳	۰/۱۰۱	۰/۱۴۳	۰/۰۲۴	معناداری			
	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	تعداد			
	-	وجود	عدم	عدم	عدم	عدم	عدم	وجود	نتیجه			
۱	۰/۹۶۸	۰/۹۷۰	-۰/۴۴۰	-۰/۱۶۰	-۰/۷۶۴	-۰/۷۸۳	-۰/۷۹۶	-۰/۹۳۷	ضریب همبستگی	خستگی قبل از پیرشدگی		
-	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۳۸۲	۰/۰۷۶۲	۰/۰۷۷	۰/۰۶۵	۰/۰۵۸	۰/۰۰۶	معناداری			
۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	تعداد			
-	وجود	وجود	عدم	عدم	عدم	عدم	عدم	وجود	نتیجه			
	۱	۰/۹۹۶	۰/۹۶۹	۰/۹۶۳	-۰/۳۸۹	-۰/۱۱۰	-۰/۷۱۲	-۰/۷۴۰	-۰/۷۶۳	-۰/۹۳۷	ضریب همبستگی	خستگی بعد از پیرشدگی
	-	<۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۴۴۶	۰/۸۳۶	۰/۱۱۳	۰/۰۹۳	۰/۰۷۸	۰/۰۰۶	معناداری	
	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	تعداد	
	-	وجود	وجود	وجود	عدم	عدم	عدم	عدم	عدم	وجود	نتیجه	
۱	۰/۹۰۲	۰/۸۷۰	۰/۸۶۶	۰/۸۸۱	۰/۲۷۸	۰/۰۰۳	۰/۵۱۰	-۰/۵۳۹	۰/۵۷۵	-۰/۹۱۱	ضریب همبستگی	نسبت تغییرات (%)
-	۰/۰۱۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۶	۰/۰۲۰	۰/۵۹۳	۰/۹۹۶	۰/۳۰۱	۰/۲۶۹	۰/۲۳۳	۰/۰۱۲	معناداری	
۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	تعداد	
-	وجود	وجود	وجود	وجود	عدم	عدم	عدم	عدم	عدم	وجود	نتیجه	

همبستگی بین متغیر  $\delta$  با سه متغیر دیگر معنادار و منفی است که نشان‌دهنده وجود رابطه خطی قوی (نزدیک به -۱) و معکوس بین  $\delta$  با هر کدام از آنهاست.

۳-۶-۲. آزمون همبستگی بین متغیرهای رئولوژیک قیر در جدول ۶، مقدار ضریب همبستگی پیرسون، مقدار معناداری و تعداد نمونه‌های استفاده شده در محاسبات درج گردیده است. بر اساس نتایج این جدول، ضریب

جدول ۶. نتایج آزمون همبستگی مشخصات عملکردی قیر

$G^*.Sin\delta$	$G^*.Sin\delta$	$G^*$	$\delta$		
-۰/۹۰۸	-۰/۹۱۰	-۰/۹۰۹	۱	ضریب همبستگی	$\delta$
<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	-	معناداری	
۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	تعداد	

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، خواص قیر و مخلوط آسفالتی حاوی پسماند صنعتی فریت به عنوان فیلر و اصلاح کننده قیر به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

- پس از ترکیب فریت با قیر و با توجه به نتایج آزمایش FTIR و عکس های SEM می توان دریافت که از اختلاط این دو ماده کامپوزیت خوب و یکدستی حاصل می شود. همچنین، با توجه به نتایج آزمایش DSR می توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد فریت، زاویه فازی که نشان دهنده الاستیسیته قیر است افزایش می یابد. الاستیسیته بیشتر باعث بهبود عملکرد قیر در برابر خستگی شده و همچنین پارامتر  $G^*.Sin\delta$  با افزایش درصد فریت بالاتر رفته که نشان از بهبود عملکرد قیر در نمونه ۷ درصد فریت در برابر خستگی دارد. همچنین، با توجه به پارامتر  $G^*.Sin\delta$  با افزایش فریت تا ۷ درصد، مقاومت نمونه در برابر شیارشدگی افزایش یافت.

- در آزمایش مقاومت مارشال، بهترین عملکرد هم در اختلاط خشک و هم در اختلاط تر مربوط به نمونه C30 است و همچنین، با افزایش درصد فریت در اختلاط تر، مقاومت مارشال بهبود یافته است. علاوه بر این، با توجه به نتایج آزمایش های کشش غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی، می توان بیان کرد که بهترین عملکرد مربوط به نمونه C30 است. همچنین، با افزایش فریت در اختلاط تر، مقاومت نمونه در برابر کشش و حساسیت رطوبتی بهبود یافته است.

- همان طور که اشاره شد، هم در بارگذاری نیم سینوسی و هم در بارگذاری مربعی، بهترین عملکرد مربوط به نمونه C30 است و با بالا رفتن درصد فریت در اختلاط تر، این عملکرد بهبود یافته است. در آزمایش کانتابرو نیز بهترین عملکرد مربوط به نمونه C30 بود که کمترین مقدار کاهش وزنی را داشته است و در اختلاط تر نیز بهترین عملکرد مربوط به نمونه با فریت ۷ درصد است. همچنین، در آزمایش خزش، بهترین نتیجه از نمونه C30 حاصل شده و در اختلاط تر نیز با افزایش درصد فریت مقدار خزش کاهش یافته است.

- در آزمایش خستگی در اختلاط خشک، بهترین عملکرد مربوط به نمونه F100 بود که بعد از تعداد محدودی سیکل بارگذاری، تغییر شکل کمتری از خود نشان داد، که می توان بیان کرد که طول عمر خستگی در این نمونه نسبت به نمونه شاهد تا حد قابل توجهی افزایش یافت. در ارتباط با اختلاط تر نیز می توان بیان کرد که با افزایش درصد فریت، تغییر شکل ماندگار نمونه ها کاهش یافت. پس می توان بیان کرد که نمونه F7% بهترین عملکرد را در اختلاط خشک در برابر خستگی از خود نشان داد و افزایش طول عمر خستگی قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد داشت.

- در مقایسه اختلاط خشک و تر فریت با یکدیگر می توان بیان کرد که هر دو اختلاط بهبود عملکرد خوب و قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد داشتند. اما نمونه F100 در اختلاط خشک عملکرد بهتری نسبت به نمونه F7% داشت و بالاترین طول عمر خستگی را به خود اختصاص داد. در ارتباط با بحث خستگی بعد از

پیرشدگی نمونه‌ها، با توجه به نتایج نسبت تغییرات در طول عمر خستگی داشت. همچنین، در اختلاط خشک، نمونه F7%، پیرشدگی تأثیر کمتری نسبت به تمامی نمونه‌ها (چه در اختلاط خشک و چه در اختلاط تر) بر کمترین تغییر طول عمر خستگی در برابر پیرشدگی را نمونه F100 داشت.

## ۵. مراجع

- Adhitya, B. B., Pataras, M., Kadarsa, E. and Nurainiyah, F. 2020. "The utilization of plastics waste in flexible pavement hot rolled sheet and asphalt concrete wearing course with Marshall immersion and Cantabro test". *J. Phys.: Conference Series*, 1500(1): 012067.
- Ahmed, H. Y., Othman, A. M. and Mahmoud, A. A. 2006. "Effect of using waste cement dust as a mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt". *Ass. Univ. Bull. Environ. Res.*, 9(1): 51-60.
- Almassy, K., Pusztai, G., Gáspár, L. and Lógó, J. 2019. "Optimization methods of the pavement management system of Budapest". *J. Civ. Eng. Manag.*, 25(8): 798-804.
- Ameri, M., Yeganeh, S. and Valipour, P. E. 2019. "Experimental evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures containing waste elastomeric polymers". *Constr. Build. Mater.*, 198: 638-649.
- Barati, M., Zarei, M., Zahedi, M. and Akbarinia, F. 2022. "Evaluating the effect of carbon nanotubes (CNTs) and recycled glass powder (RGP) on the rheological and mechanical properties of bitumen and hot mix asphalt (HMA)". *Adv. Mater. Process. Tech.*, 8(1): 755-773.
- Chen, M. Z., Lin, J. T., Wu, S. P. and Liu, C. H. 2011a. "Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.*, 25: 1532-1536.
- Chen, J., Zhou, L. and Hao, P. W. 2011b. "Analysis of different fillers on performance of asphalt mastic". *Proceedings of International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*, pp. 2379-2382, IEEE.
- Costa, L. M., Silva, H. M., Peralta, J. and Oliveira, J. R. 2019. "Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification- performance and morphological assessment". *Constr. Build. Mater.*, 198: 237-244.
- Eldouma, I. B. and Xiaoming, H. 2021. "Evaluation of the additives' behaviour to determine the best modifier for improving asphalt performance at high temperature". *Adv. Civ. Eng.*, 2021: 1-10.
- Farahmandjou, M. and Soflaee, F. 2014. "Low temperature synthesis of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-rods using simple chemical route". *J. NanoStruct.*, 4(4): 413-418.
- Gil, A. 2022. "Challenges on waste-to-energy for the valorization of industrial wastes: Electricity, heat and cold, bioliquids and biofuels". *Environ. Nanotech., Monit. Manag.*, 17: 100615.
- Janmohammadi, O., Safa, E., Zarei, M. and Zarei, A. 2020. "Simultaneous effects of ethyl vinyl acetate (EVA) and glass fiber on the properties of the hot mix asphalt (HMA)". *SN Appl. Sci.*, 2: 1-14.
- Kordi, S. and Shafabakhsh, G. 2016. "The feasibility of the effect of nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on behavior of stone mastic asphalt mixtures against dynamic loads". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 2(1): 69-84. (In Persian)
- Li, J., Zhang, Z., Wang, X. and Yan, W. 2022. "Intelligent decision-making model in preventive maintenance of asphalt pavement based on PSO-GRU neural network". *Adv. Eng. Inform.*, 51: 101525.
- Lv, S., Hu, L., Xia, C., Cabrera, M. B., Guo, Y., Liu, C. and You, L. 2021. "Recycling fish scale powder in improving the performance of asphalt: A sustainable utilization of fish scale waste in asphalt". *J. Clean. Prod.*, 288: 125682.
- Moussa, G., Sallam, I. and Younis, H. 2021. "Performance investigation of hot-and warm-asphalt mixtures modified with superplast". *J. Eng. Sci.*, 49(5): 679-703.
- Nabiun, N. and Khabiri, M. M. 2016. "Mechanical and moisture susceptibility properties of HMA containing ferrite for their use in magnetic asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 113: 691-697.
- Orea, M., ChemiConsult, C. A., Bruzual, J., Diaz, A., Lattanzio, M. and ChemiConsult, L. D. L. 2015. "Fouling phenomena in phenolic sour water stripping units during heavy oil upgrading operations: A spectroscopic characterization approach". *America*, 128: 1-12.
- Peksoz, A., Akay, S. K., Kaya, Y., Ovalioglu, H., Kaynak, G. and Yalciner, A. 2011. "Analytical information on the asphaltenes from a few standard characterization techniques". *Energy Sour., Part A: Recov., Util. Environ. Effects*, 33(15): 1474-1481.
- Rezvan, M., and Izadi, A. 2016. "Investigation of the effect of iron and aluminum nano-oxides on reduction of moisture sensitivity in hot-mix asphalt". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 1(4): 93-102. (In Persian)
- Russo, F., Veropalumbo, R., Oretto, C., Biancardo, S. A., Abbondati, F. and Viscione, N. 2021. "Verifying the mechanical performance of cold and hot asphalt mastics containing jet grouting waste as a

- filler". *Coatings*, 11(7): 751.
- Shamsaei, M., Khafajeh, R., Ghasemzadeh Tehrani, H. and Aghayan, I. 2020. "Experimental evaluation of ceramic waste as filler in hot mix asphalt". *Clean Tech. Environ. Policy*, 22: 535-543.
- Zarei, M., Akbarinia, F., Rahmani, Z., Zahedi, M. and Zarei, A. 2020. "Economical and technical study on the effect of carbon fiber with high strength on hot mix asphalt (HMA)". *Electr. J. Struct. Eng.*, 20: 6-12.
- Ziari, H., Divandari, H., Hajiloo, M. and Amini, A. 2019. "Investigating the effect of amorphous carbon powder on the moisture sensitivity, fatigue performance and rutting resistance of rubberized asphalt concrete mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 217: 62-72.