

ارزیابی عملکرد روسازی آسفالتی مجهز به سامانه انتقال توان بی‌سیم برای خودروهای برقی

امیر کاووسی^۱، بیتا خلفانی^۲، امید حاجی نژاد^۳، علی یزدیان ورجانی^۴، آرمین قیصری^۵

۱- استاد گروه راه و ترابری، kavussia@modares.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی راه و ترابری، Bita.khalfani@modares.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ایمنی راه و ترابری، omid.hajinezhad@modares.ac.ir

۴- دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس، yazdian@modares.ac.ir

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی الکترونیک قدرت، دانشگاه تربیت مدرس a.gheysari@modares.ac.ir

چکیده

افزایش استفاده از خودروهای برقی، توسعه روش‌های ایمن و کارآمد برای تأمین انرژی این وسایل نقلیه را ضروری ساخته است. انتقال توان القایی با حذف اتصال مستقیم کابل، امکان شارژ بی‌سیم خودروهای برقی را فراهم می‌کند و ادغام آن با روسازی می‌تواند زمینه توسعه زیرساخت‌های شارژ ایستا و پویا را فراهم سازد. در این کاربرد، مخلوط آسفالتی باید ضمن حفظ بازده مناسب انتقال انرژی، از عملکرد مکانیکی مطلوبی در شرایط دمایی مختلف برخوردار باشد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی هم‌زمان عملکرد الکترومغناطیسی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با فریت، گرافیت و بیوپار انجام شد. بدین منظور، بازده انتقال توان با استفاده از سامانه انتقال توان القایی اندازه‌گیری و رفتار مکانیکی نمونه‌ها با آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دماهای ۱۰-، صفر و ۲۵+ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. حداکثر بار، جابه‌جایی متناظر با بار اوج و انرژی جذب‌شده تا رسیدن به بار اوج استخراج و مقایسه گردید. نتایج نشان داد بازده انتقال توان در تمامی نمونه‌ها بیش از ۹۴ درصد بوده و افزودنی‌ها عملکرد پایدار سامانه القایی را حفظ کردند. نمونه فریت بیشترین بازده انتقال توان را به خود اختصاص داد، درحالی‌که گرافیت و بیوپار نیز بازدهی نزدیک به نمونه شاهد داشتند. از نظر عملکرد مکانیکی، گرافیت بیشترین ظرفیت باربری و بالاترین بار اوج را ایجاد کرد. بیوپار با حفظ ظرفیت باربری در دامنه وسیع‌تری از جابه‌جایی، عملکرد مطلوبی از نظر انرژی جذب‌شده نشان داد. فریت نیز ضمن ارائه بالاترین بازده انتقال توان، موجب بهبود ظرفیت باربری و پایداری مکانیکی مخلوط شد. همچنین، افزایش دما با کاهش بار اوج و افزایش قابلیت تغییر شکل نمونه‌ها همراه بود. در مجموع، نتایج نشان داد فریت، گرافیت و بیوپار ظرفیت مناسبی برای تولید مخلوط‌های آسفالتی چندعملکردی با قابلیت انتقال بی‌سیم انرژی و عملکرد مکانیکی مطلوب دارند و می‌توانند در توسعه روسازی‌های هوشمند ویژه شارژ بی‌سیم خودروهای برقی مورد استفاده قرار گیرند.

کلمات کلیدی: روسازی هوشمند، شارژ بی‌سیم، انتقال توان القایی، آزمون خمش نیم‌دایره (SCB)، خودروهای برقی

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، جهان با چالش‌های جدی ناشی از تغییرات اقلیمی مواجه بوده است که عمدتاً به فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در بخش حمل‌ونقل، نسبت داده می‌شود. و یکی از مهم‌ترین منابع انتشار کربن در سطح جهان محسوب می‌شود و حدود ۲۵٪ از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای را شامل می‌شود؛ این میزان در برخی مناطق مانند آسیا تا حدود ۳۹٪ نیز گزارش شده است. برای مقابله با این چالش، بسیاری از کشورها توجه خود را به خودروهای برقی^۱ به عنوان یک راهکار پایدار معطوف کرده‌اند. خودروهای برقی به‌عنوان جایگزینی پاک‌تر برای وسایل نقلیه با سوخت فسیلی شناخته می‌شوند، و تأمین انرژی از منابع تجدیدپذیر، می‌توانند به‌طور قابل توجهی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ردپای کربن نقش داشته باشند [۱].

افزایش استفاده از خودروهای برقی، توسعه زیرساخت‌های سریع، ایمن و کارآمد برای تأمین انرژی آن‌ها را ضروری ساخته است. روش‌های متداول شارژ تماسی مانند پانتوگراف^۲ و ریل هادی، به دلیل مشکلاتی همچون محدودیت ایمنی، ایجاد جرقه و اختلال در جریان ترافیک، با چالش‌هایی مواجه‌اند. در مقابل، انتقال توان بی‌سیم^۳ با حذف اتصال فیزیکی، ظرفیت مناسبی برای افزایش ایمنی و توسعه زیرساخت‌های نوین شارژ خودروهای برقی فراهم می‌کند فناوری‌های مختلفی برای انتقال توان بی‌سیم وجود دارد که از میان آن‌ها، انتقال توان القایی^۴ به دلیل قابلیت انتقال انرژی از طریق میدان مغناطیسی متناوب، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای حمل‌ونقل برقی محسوب می‌شود. این سامانه با استفاده از سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه و بدون نیاز به اتصال فیزیکی، انرژی را منتقل می‌کند. انتقال توان بالا، بازده شارژ مناسب و فاصله هوایی کم از مهم‌ترین مزایای آن برای استفاده در روسازی‌های مجهز به شارژ بی‌سیم خودروهای برقی است [۲]. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در سامانه شارژ بی‌سیم مبتنی بر انتقال توان القایی، سیم‌پیچ اولیه در ساختار روسازی و سیم‌پیچ ثانویه در زیر خودرو تعبیه می‌شود. انرژی الکتریکی از طریق میدان مغناطیسی متناوب و بدون نیاز به اتصال فیزیکی، از سیم‌پیچ اولیه به ثانویه منتقل می‌گردد [۵،۳]. واحدهای شارژ^۵ در عمق مشخصی از لایه آسفالتی روسازی تعبیه می‌شوند تا ضمن محافظت در برابر بارهای ترافیکی و عوامل محیطی، شرایط مناسبی برای انتقال توان بی‌سیم فراهم شود. عمق استقرار این واحدها بر اساس فاصله انتقال موردنیاز سامانه انتقال توان القایی تعیین می‌گردد. سیم‌پیچ‌های اولیه نیز به‌صورت متوالی در طول مسیر قرار گرفته و هم‌زمان با عبور خودرو، به‌صورت متناوب فعال می‌شوند؛ در نتیجه، توان الکتریکی به سیم‌پیچ ثانویه نصب‌شده در خودرو منتقل شده و فرآیند شارژ به‌صورت پیوسته انجام می‌شود [۴].

به‌طور کلی، جاده برقی زیرساختی هوشمند است که با ادغام سامانه‌های شارژ هادی یا القایی در ساختار روسازی، امکان تأمین پیوسته انرژی موردنیاز خودروهای برقی را در حین حرکت فراهم می‌کند. این فناوری با کاهش وابستگی به ظرفیت بالای باتری، می‌تواند به کاهش وزن و هزینه خودروهای برقی و افزایش برد حرکتی آن‌ها کمک کند [۶]. فناوری شارژ القایی با حذف اتصال فیزیکی، امکان انتقال بی‌سیم انرژی بین فرستنده تعبیه‌شده در روسازی و گیرنده نصب‌شده روی خودرو را فراهم می‌کند. این فناوری در دو حالت ایستا و پویا به‌کار می‌رود؛ در شارژ ایستا، خودرو در محل مشخصی متوقف شده و انرژی از پد شارژ دریافت می‌شود، درحالی‌که در شارژ پویا، ماژول‌های انتقال توان در روسازی تعبیه شده و امکان تأمین پیوسته انرژی خودرو در حین حرکت را فراهم می‌کنند. انتقال توان القایی از فناوری‌های نوین و کارآمد در توسعه زیرساخت‌های شارژ بی‌سیم خودروهای برقی محسوب می‌شود [۴].

¹ Electric Vehicles² Pantograph Charging System³ Wireless Power Transfer⁴ Inductive Power Transfer⁵ Charging Units

بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر افزودنی‌های فریت، گرافیت و بیوچار بر عملکرد الکترومغناطیسی و رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی و شناسایی مناسب‌ترین افزودنی برای کاربرد در روسازی‌های مجهز به سامانه انتقال توان القایی خودروهای برقی است. در این راستا، عملکرد انتقال توان در نمونه‌های اصلاح‌شده ارزیابی و رفتار مکانیکی آن‌ها با استفاده از آزمون خمش نیم‌دایره‌ای در دماهای مختلف بررسی شد تا ضمن مقایسه عملکرد افزودنی‌ها، ارتباط میان ویژگی‌های الکترومغناطیسی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مشخص شود.

۲- پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، هم‌زمان با توسعه سامانه‌های انتقال توان بی‌سیم، مطالعات متعددی بر توسعه مخلوط‌های آسفالتی با خواص الکتریکی و مغناطیسی مناسب متمرکز شده‌اند. آسفالت معمولی به دلیل نفوذپذیری مغناطیسی پایین و ماهیت عایق الکتریکی، توانایی محدودی در انتقال میدان مغناطیسی و ایجاد کوپلینگ مؤثر بین سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده دارد که می‌تواند بازده انتقال توان را کاهش دهد [۷]. استفاده از افزودنی‌های رسانا و مغناطیسی با هدف اصلاح خواص الکتریکی و بهبود عملکرد روسازی‌های هوشمند مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزودن مواد کربنی و فلزی می‌تواند علاوه بر افزایش رسانایی الکتریکی، بر عملکرد مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی نیز تأثیرگذار باشد. در میان افزودنی‌های کربنی، کربن‌سیاه، گرافیت و بیوچار به دلیل ساختار مناسب و قابلیت تشکیل شبکه‌های رسانا در فاز قیری، کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که کربن‌سیاه می‌تواند با افزایش هدایت الکتریکی قیر، مقاومت آن در برابر پیرشدگی و پایداری خواص رئولوژیکی را بهبود بخشد [۸]. افزودن گرافیت با کاهش مقاومت الکتریکی مخلوط آسفالتی، موجب افزایش رسانایی الکتریکی و بهبود قابلیت انتقال جریان در آن می‌شود [۹]. علاوه بر این، بیوچار ۱ به‌عنوان یک ماده کربنی پایدار، با کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های دائمی، به‌ویژه در دماهای بالا، می‌تواند عملکرد قیر اصلاح‌شده را بهبود بخشد [۱۰]. در کنار مواد کربنی، افزودنی‌های فلزی و الیاف رسانا نیز به‌عنوان گزینه‌هایی مؤثر برای بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی و الکتریکی مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعات نشان می‌دهد این افزودنی‌ها می‌توانند با افزایش استحکام و مقاومت خستگی، کاهش فضای خالی و بهبود ویژگی‌های حجمی، عملکرد کلی روسازی‌های آسفالتی را ارتقا دهند [۱۱].

همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از الیاف فولادی و مواد مغناطیسی می‌تواند به‌طور هم‌زمان موجب بهبود خواص الکتریکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی شود. الیاف فولادی با کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، عملکرد مکانیکی مخلوط را ارتقا می‌دهند. از سوی دیگر، فریت به دلیل خواص مغناطیسی مناسب، پایداری حرارتی و سازگاری قابل قبول با مصالح آسفالتی، به‌عنوان یکی از گزینه‌های مؤثر برای بهبود انتقال میدان مغناطیسی در روسازی‌های هوشمند مطرح است. همچنین، افزودن فریت می‌تواند با افزایش مقاومت مارشال، بهبود چسبندگی قیر و مصالح سنگی و کاهش حساسیت رطوبتی، عملکرد کلی مخلوط آسفالتی را بهبود بخشد [۱۲، ۱۳]. افزودنی‌های رسانا و بازیافتی می‌توانند ضمن حفظ عملکرد مکانیکی روسازی، قابلیت‌هایی مانند هدایت الکتریکی و پاسخ حرارتی را به مخلوط‌های آسفالتی اضافه کنند. برای نمونه، براده آلومینیوم با حفظ ویژگی‌های مقاومتی و حجمی مخلوط، ظرفیت مناسبی برای توسعه روسازی‌های پایدار و کاهش آثار زیست‌محیطی دارد. همچنین، الیاف کربنی در مقایسه با برخی فیلرهای رسانا مانند گرافیت و کربن‌سیاه، قابلیت بیشتری در افزایش هدایت الکتریکی مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهند [۱۴، ۱۵]. گرافیت و الیاف

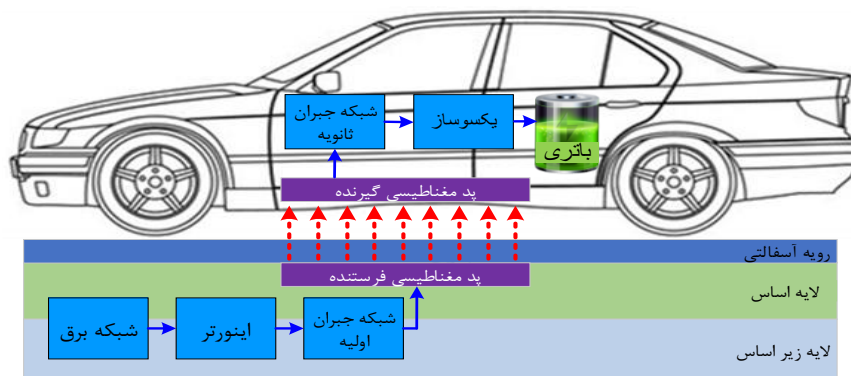
^۱ Biochar

کربنی علاوه بر افزایش رسانایی الکتریکی، می‌تواند مقاومت در برابر شیارشدگی و سایر پارامترهای مکانیکی مخلوط آسفالتی را بهبود دهند [۱۶]. استفاده از گرافیت به‌عنوان یک ماده افزایش‌دهنده رسانایی حرارتی، موجب بهبود انتقال حرارت در روسازی شده و می‌تواند زمان ذوب برف را کاهش دهد؛ به‌طوری‌که افزایش حدود ۲۰ درصد گرافیت، زمان ذوب برف را تقریباً به نصف کاهش داده است [۱۷].

اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مواد رسانا و مغناطیسی، ضمن حفظ الزامات عملکردی روسازی، ظرفیت مناسبی برای توسعه روسازی‌های هوشمند و زیرساخت‌های موردنیاز شارژ بی‌سیم خودروهای برقی فراهم می‌کند. با این حال، عملکرد این مخلوط‌ها به نوع، مقدار و ویژگی‌های افزودنی و همچنین شرایط محیطی و دمایی وابسته است و دستیابی به تعادل مناسب میان خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی همچنان یکی از چالش‌های اساسی در توسعه این فناوری محسوب می‌شود. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که بخش عمده مطالعات بر بهبود یک یا چند ویژگی مشخص از مخلوط‌های آسفالتی متمرکز بوده و ارزیابی هم‌زمان قابلیت انتقال توان القایی و عملکرد مکانیکی آن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، شناخت رفتار مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده و انتخاب افزودنی مناسب، نقشی اساسی در دستیابی به روسازی‌هایی دارد که بتوانند هم‌زمان الزامات سازه‌ای روسازی و نیازهای انتقال بی‌سیم انرژی را برآورده سازند. بر همین اساس، پژوهش حاضر با بررسی اثر فریت، گرافیت و بیوپار بر عملکرد الکترومغناطیسی و رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، گامی در جهت شناسایی ظرفیت این مواد برای توسعه روسازی‌های هوشمند و فراهم‌سازی زمینه کاربرد آن‌ها در زیرساخت‌های نوین حمل‌ونقل و شارژ بی‌سیم خودروهای برقی برداشته است.

۱-۲- فناوری انتقال توان القایی

سامانه انتقال توان القایی با بهره‌گیری از القای الکترومغناطیسی، امکان انتقال بی‌سیم انرژی بین سیم‌پیچ اولیه مستقر در روسازی و سیم‌پیچ ثانویه نصب‌شده روی خودرو را بدون نیاز به تماس فیزیکی فراهم می‌کند [۲۰]. عملکرد مؤثر این سامانه به عواملی همچون توان انتقالی، بازده انتقال توان و فاصله هوایی بین سیم‌پیچ‌ها وابسته است. این فناوری در دو حالت شارژ ایستا و پویا قابل استفاده بوده و در حالت پویا، امکان تأمین پیوسته انرژی خودرو در حین حرکت را فراهم می‌سازد. به دلیل ماهیت بدون تماس و قابلیت انتقال توان مناسب، انتقال توان القایی گزینه‌ای مطلوب برای توسعه جاده‌های برقی و زیرساخت‌های شارژ بی‌سیم خودروهای برقی محسوب می‌شود [۱۹، ۱۸، ۱]. استفاده از سامانه انتقال توان القایی برای شارژ بی‌سیم خودروهای برقی، با حذف نیاز به اتصال فیزیکی و دستی، می‌تواند کارایی و قابلیت بهره‌برداری از این خودروها را ارتقا دهد. این فناوری با امکان انتقال انرژی در شرایط توقف و حین حرکت، بخشی از محدودیت‌های سامانه‌های شارژ هادی، از جمله زمان‌بر بودن فرآیند شارژ، نگرانی از محدودیت برد حرکتی، نیاز به باتری‌های با ظرفیت بالا و هزینه اولیه قابل توجه را کاهش می‌دهد. همچنین، تأمین انرژی در طول مسیر می‌تواند وابستگی به باتری‌های بزرگ و سنگین را کاهش داده و زمینه را برای توسعه زیرساخت‌های پیشرفته و یکپارچه حمل‌ونقل برقی فراهم سازد [۳]. یک سیستم IPT معمولی شامل دو جزء اصلی است همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. فرستنده الکترومغناطیسی تعبیه شده در سطح روسازی و گیرنده میدان مغناطیسی نصب شده زیر خودرو نصب می‌گردد هنگامی که یک خودروی برقی بر روی جاده‌ای که سیم‌پیچ اولیه در آن تعبیه شده حرکت می‌کند، سیم‌پیچ ثانویه تغییرات میدان مغناطیسی را حس کرده، و در سیم‌پیچ‌های ثانویه ولتاژ القا می‌شود [۲۵].



شکل ۱- سیستم شارژ بی‌سیم با استفاده از انتقال توان القایی.

۳- مصالح مصرفی

در این پژوهش، به‌منظور تهیه و ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده، از قیر، مصالح سنگدانه‌ای و افزودنی‌های عملکردی استفاده شد. قیر به‌عنوان ماده چسباننده، نقش اصلی در پیوستگی اجزای مخلوط و تأمین رفتار مناسب آن دارد، درحالی‌که سنگدانه‌ها بخش عمده ساختار و اسکلت مقاوم مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهند. همچنین، افزودنی‌های مورد استفاده با هدف اصلاح ویژگی‌های مکانیکی و ایجاد قابلیت انتقال مناسب توان القایی به مخلوط افزوده شدند. در ادامه، مشخصات و ویژگی‌های قیر، سنگدانه‌ها و افزودنی‌های مورد استفاده به‌صورت جداگانه ارائه می‌شود.

۳-۱- قیر

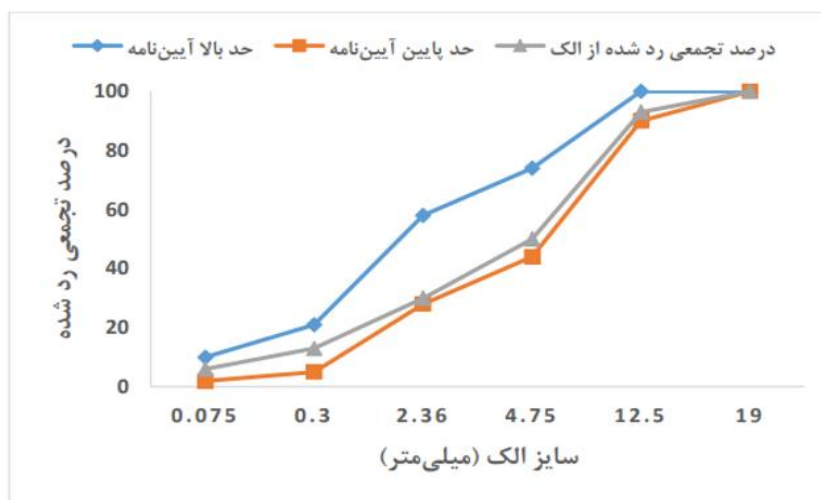
انتخاب نوع قیر مناسب با توجه به شرایط اقلیمی، نوع و میزان ترافیک، کیفیت مصالح و شرایط اجرایی پروژه انجام می‌شود و مشخصات فنی هر پروژه مبنای تعیین نوع قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱]. در این پژوهش، از قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ تهیه‌شده از پالایشگاه تهران استفاده شد. به‌منظور بررسی کیفیت، یکنواختی و انطباق قیر با الزامات استاندارد، خواص فیزیکی و رئولوژیکی آن مطابق روش‌های استاندارد ASTM تعیین و نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه شده است. انتخاب این نوع قیر با توجه به شرایط موردنظر برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی پژوهش انجام گرفت.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی قیر خالص ۶۰-۷۰ مورد استفاده در پژوهش

ویژگی	مقادیر مجاز نشریه ۲۳۴	نتایج آزمایش	روش آزمایش
وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	-	۱/۰۲	ASTM D70
درجه نفوذ (۰/۱۰ میلی‌متر)	۶۰ تا ۷۰ میلی‌متر	۶۵	ASTM D5
نقطه نرمی	۴۹ تا ۵۶ درجه سانتی‌گراد	۵۰/۸	ASTM D36
نقطه اشتعال	حداقل ۲۳۲ درجه سلسیوس	۳۰۶	ASTM D92
کشش پذیری	حداقل ۱۰۰ سانتی‌متر	+۱۰۰	ASTM D113

۳-۲- دانه بندی

دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از نوع متراکم بوده و بر اساس حدود دانه‌بندی تعیین‌شده در جدول ۹-۱ نشریه ۲۳۴، آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران انتخاب شد. منحنی دانه‌بندی مصالح مطابق شکل ۲ ترسیم و با محدوده‌های مشخص‌شده در آیین‌نامه مقایسه گردید. نتایج نشان داد که منحنی دانه‌بندی در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار داشته و پیوستگی مناسبی بین اندازه‌های مختلف ذرات وجود دارد. این نوع دانه‌بندی با ایجاد ساختار متراکم و توزیع مناسب ذرات، زمینه مناسبی برای دستیابی به خواص مکانیکی و عملکردی مطلوب مخلوط آسفالتی فراهم می‌کند.



شکل ۲ - منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در مخلوط آسفالتی

۳-۳- مصالح سنگی

مصالح سنگی انواع آسفالت گرم باید سخت، محکم، بادوام، تمیز، مکعبی شکل و عاری از هرگونه مواد آلی و رسی، شیبستی، پوشش خاکی و دانه‌های سست بوده و برای هر قطعه از پروژه، حتی الامکان از یک معدن تهیه شده باشد. مصالح درشت، متوسط و ریز در صورت لزوم باید قبل از مصرف شسته شوند [۲۲].

مصالح مورد استفاده در این پژوهش از نوع سیلیسی واز کارخانه آسفالت آکام‌شن در نزدیکی شهریار در غرب تهران تهیه شده است. مصالح سنگی که برای ساخت انواع لایه‌های آسفالت به کار می‌روند باید دارای حداقل مشخصات فنی تعیین شده توسط ASTM و AASHTO باشند. مشخصات مصالح مصرفی سنگی در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی

محدوده مجاز مطابق نشریه ۲۳۴		نتایج	ویژگی
آستر	رویه		
۲/۵	۲/۵	۲٪	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)
۲/۸	۲/۸	۲٪	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریز دانه)
۴۰	۳۰	۱۸٪	حداکثر افت وزنی لس آنجلس (مصالح درشت دانه)
-	-	۲/۵۲۱	وزن مخصوص مصالح ریز دانه (gr/cm^3)
-	-	۲/۴۸۲	وزن مخصوص مصالح درشت دانه (gr/cm^3)

۳-۴- افزودنی‌های مورد استفاده در مخلوط آسفالتی

در این پژوهش، اصلاح هم‌زمان خواص مکانیکی و الکترومغناطیسی مخلوط آسفالتی، از افزودنی‌های فریت، گرافیت و بیوچار استفاده شد. انتخاب این مواد بر اساس ویژگی‌های مغناطیسی، رسانایی و قابلیت اثرگذاری آن‌ها بر عملکرد مخلوط انجام گرفت. افزودنی‌ها پس از آماده‌سازی با درصد‌های تعیین‌شده به مخلوط آسفالتی اضافه شدند تا تأثیر آن‌ها بر بازده انتقال توان و رفتار مکانیکی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. مشخصات هر یک از افزودنی‌ها در ادامه ارائه شده است. در جدول ۳، ترکیبات منتخب، مقدار مصرف، مبنای محاسبه درصد، درصد قیر ثابت و منبع مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر منتخب افزودنی‌ها بر اساس مطالعات پیشین

نوع افزودنی	درصد افزودنی‌ها	درصد قیر ثابت	مرجع
شاهد	۰٪	۵/۵٪ وزنی مخلوط	-
فریت	جایگزینی ۱۰٪ فیلر	۵/۵٪ وزنی مخلوط	[۱۳]
بیوچار	۱۰٪	۵/۵٪ وزنی مخلوط	[۱۰]
گرافیت	۱۰٪	۵/۵٪ وزنی مخلوط	[۹]

۳-۵- فریت

فریت نوعی ماده مغناطیسی بر پایه اکسید آهن است که از ترکیب اکسید آهن با عناصری مانند باریوم، استرانسیوم، منگنز، نیکل و روی تشکیل می‌شود این ماده به دلیل ریزدانه بودن، سطح ویژه مناسب، درصد قابل توجه اکسید آهن، شکل مناسب ذرات و چسبندگی مطلوب با قیر، قابلیت استفاده به‌عنوان جایگزین یا مکمل فیلرهای متداول در مخلوط‌های آسفالتی را دارد. در این پژوهش فریت به‌صورت پودر بوده و نمای ظاهری آن در شکل ۳ ارائه شده است. فریت علاوه بر تأثیرگذاری بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط، می‌تواند با ایجاد ویژگی‌های مغناطیسی، ظرفیت روسازی را برای کاربردهایی نظیر سامانه‌های انتقال توان القایی، حسگرهای هوشمند و فناوری‌های ارتباطی وسیله نقلیه و زیرساخت‌ها را افزایش دهد [۱۳].



شکل ۳- پودر فریت مورد استفاده در تهیه مخلوط آسفالتی

۳-۶- گرافیت

گرافیت پودری به‌عنوان یکی از مواد کربنی با رسانایی الکتریکی مناسب، در این پژوهش به‌عنوان فیلر رسانا در مخلوط آسفالتی استفاده شد. پودر گرافیت مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۴ ارائه شده است. این ماده با اندازه متوسط ذرات حدود ۱۵۰ میکرومتر و درصد بالای کربن، قابلیت ایجاد مسیرهای پیوسته رسانا در ساختار مخلوط و در نتیجه افزایش رسانایی الکتریکی روسازی را دارد. به‌کارگیری گرافیت در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند در توسعه روسازی‌های هوشمند و سامانه‌های گرمایش الکتریکی مؤثر باشد؛ به‌گونه‌ای که عبور جریان الکتریکی از مخلوط، با ایجاد گرمای ناشی از مقاومت الکتریکی، امکان ذوب برف و یخ را در سطح راه، پل‌ها و باندهای فرودگاه فراهم می‌کند. این فناوری علاوه بر ارتقای ایمنی تردد در شرایط یخبندان، با کاهش نیاز به مواد یخ‌زدا، می‌تواند مصرف مواد شیمیایی و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها را نیز کاهش دهد [۹].

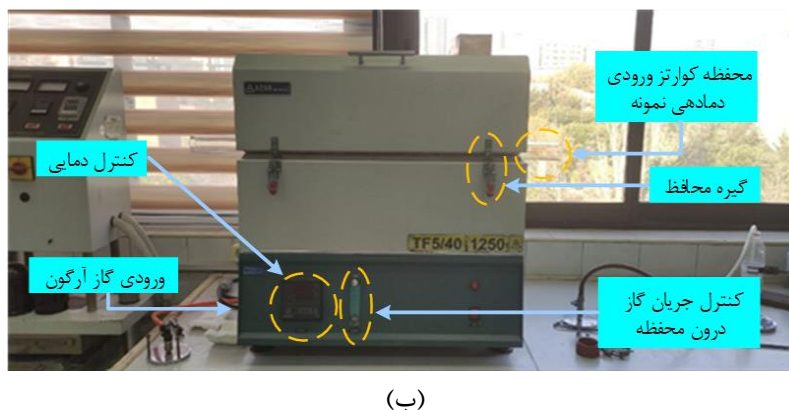


شکل ۴- پودر گرافیت مورد استفاده در تهیه مخلوط آسفالتی

۳-۷- بیوچار

بیوچار ماده‌ای کربنی با ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و محتوای کربن قابل توجه است که از طریق پیرولیز زیست‌توده‌های آلی تولید می‌شود. نمای شماتیک فرآیند تولید بیوچار از زیست‌توده آلی به روش پیرولیز در شکل ۵ ارائه

شده است. ویژگی‌های آن به نوع ماده اولیه و شرایط فرآیند تولید وابسته بوده و به دلیل ماهیت پایدار و قابلیت استفاده از پسماندهای آلی، در توسعه مصالح پایدار مورد توجه قرار گرفته است. در مخلوط‌های آسفالتی، بیوپار می‌تواند با افزایش ویسکوزیته قیر، بهبود چسبندگی، کاهش نفوذپذیری آب و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، عملکرد و دوام روسازی را ارتقا دهد. ساختار متخلخل و سطح ویژه بالای آن نیز موجب برهم‌کنش مناسب با قیر و بهبود عملکرد مخلوط، به‌ویژه در دماهای بالا، می‌شود [۱۰].



شکل ۵- (الف) نمای شماتیک فرآیند تولید بیوپار از زیست‌توده آلی به روش پیرولیز، (ب) دستگاه پیرولیز مورد استفاده برای تولید بیوپار

۳-۸- روش تولید بیوپار

ابتدا مواد اولیه طبیعی شامل ضایعات کشاورزی و چوبی مانند شاخه‌های درخت کاج، پوست گردو، چوب درخت سرو و پوست انار به‌طور کامل شست‌وشو داده شدند و پس از خشک شدن، در آسیاب دستی به شکل پودر ریز خرد شدند. سپس پودر به‌دست‌آمده به مدت ۱۲ ساعت تحت اتمسفر آرگون ۹۹/۹۹٪ تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پیرولیز شد. شکل ۵-

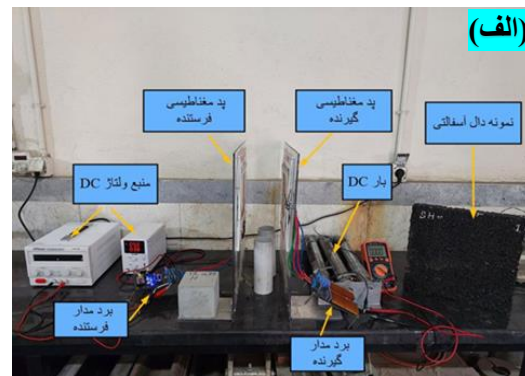
(ب) پس از این فرآیند، مواد حاصل دوباره آسیاب شدند و شست‌وشوی اسیدی بر روی آن‌ها انجام گرفت تا تمامی ناخالصی‌های سطح کربن حذف شوند. رسوبات جمع‌آوری شده چندین بار با آب مقطر شست‌وشو داده شدند تا pH آن‌ها به حدود ۶ برسد. در ادامه، مواد حاصل تحت دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند تا رطوبت کاملاً از بین برود و آماده استفاده در مراحل بعدی پژوهش گردیدند. این فرآیند دقیق، اطمینان می‌دهد که بیوپار به‌دست‌آمده از نظر فیزیکی و شیمیایی خالص، یکنواخت و با کیفیت مناسب برای مخلوط شدن با آسفالت باشد.

۴- آزمایش‌ها

به‌منظور ارزیابی جامع عملکرد الکتریکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های مختلف، مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی در شرایط کنترل‌شده انجام شد. در بخش الکتریکی، آزمایش انتقال توان القایی برای بررسی تأثیر نوع افزودنی بر توان خروجی و بازده انتقال انرژی به کار گرفته شد. در بخش مکانیکی نیز آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای برای ارزیابی ظرفیت باربری، انرژی جذب‌شده، رفتار شکست نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای دستیابی به مقایسه‌ای معتبر، شرایط ساخت، ابعاد نمونه‌ها و متغیرهای اجرایی هر آزمایش در تمام گروه‌ها ثابت نگه داشته شد و نوع افزودنی به‌عنوان متغیر اصلی مطالعه در نظر گرفته شد. جزئیات تجهیزات، نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها، شرایط انجام آزمون‌ها و پارامترهای استخراج‌شده در بخش‌های بعد ارائه می‌شود.

۴-۱- آزمایش انتقال توان القایی (IPT)

به‌منظور بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف بر عملکرد سامانه انتقال توان القایی، طبق شکل ۶، در این آزمایش از دو پد فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود که شامل سیم‌پیچ دایره‌ای مسی روی پایه‌های شیشه‌ای با خاصیت عایق الکتریکی هستند و در فاصله‌ای ثابت از یکدیگر قرار دارند (شکل ۶-الف). سیم‌های متصل به سیم‌پیچ‌ها به منبع ولتاژ DC وصل شده و دال آسفالتی با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر بین پد مغناطیسی فرستنده و گیرنده قرار می‌گیرد، سپس توان خروجی ثبت و اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۶-ب). در این آزمایش، بازده سیستم در حضور دال‌های آسفالتی مختلف ارزیابی شد. سامانه‌ی انتقال توان القایی با جبران‌سازی سری در هر دو سوی فرستنده و گیرنده پیاده‌سازی شد و اجزای تنظیم روی بسامد یکسان قرار گرفت تا پیوند میدان مغناطیسی بهینه و بازده در وضعیت هم‌نوسانی بیشینه شود. برای ایزوله کردن اثر افزودنی‌ها، فاصله‌ی عمودی پد تا دال و هم‌راستایی فرستنده و گیرنده در تمام آزمون‌ها ثابت نگه داشته شد. مشخصات کوئل‌ها و مدار جبران‌سازی در طول همه‌ی آزمون‌ها بدون تغییر ماند و پیش از هر نوبت کنترل شد تا پایداری تنظیم رزونانسی و امکان مقایسه‌ی معتبر فراهم باشد. توان ورودی و خروجی با توان‌سنج دقیق اندازه‌گیری و بازده به‌صورت میانگین چند تکرار مستقل گزارش شد. همه‌ی نمونه‌ها شاهد، فریت، گرافیت و بیوپار با ابعاد و درصدهای یکسان و بر سکوی آزمون مشترک ارزیابی شدند و تنها متغیر مقایسه، نوع افزودنی بر مخلوط‌های آسفالتی بود.



شکل ۶ - (الف) اجزای سیستم IPT، (ب) آزمایش IPT از نمونه های آسفالتی

۴-۲- آزمایش خمش نیم دایره

به منظور ارزیابی رفتار شکست و مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمون خمش نیم‌دایره‌ای استفاده شد. این آزمون به دلیل سادگی اجرا، هزینه نسبتاً پایین، زمان کوتاه آزمایش و قابلیت انجام بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی و مغزه‌های استخراج‌شده از روسازی، روش مناسبی برای بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی محسوب می‌شود. همچنین، منحنی بارجابجایی حاصل از آزمون امکان ارزیابی و مقایسه شاخص‌هایی نظیر بار اوج، جابه‌جایی متناظر با بار اوج، انرژی جذب‌شده و رفتار نمونه پس از رسیدن به بار اوج را فراهم می‌کند. بر این اساس، آزمون SCB در این پژوهش برای مقایسه رفتار مکانیکی نمونه‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های مختلف در شرایط دمایی موردنظر به کار گرفته شد. آزمون خمش نیم‌دایره‌ای بر اساس دستورالعمل‌های مربوط به ارزیابی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی انجام شد. با توجه به تأثیر عواملی همچون ابعاد نمونه، طول شیار، فاصله تکیه‌گاه‌ها، دمای آزمون و نرخ بارگذاری بر نتایج، شرایط اجرایی آزمایش برای تمامی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، مغزه‌های استوانه‌ای به دو نیمه متقارن برش داده شده و در مرکز لبه مستقیم هر نمونه، شیار اولیه ایجاد شد تا تمرکز تنش، محل آغاز ترک کنترل شود. پس از برش و شیارزنی، نمونه‌های مربوط به آزمون در دمای محیط حداقل به مدت ۴ ساعت قرار گرفتند تا دمای آن‌ها پیش از بارگذاری به شرایط یکنواخت برسد [۲۴، ۲۳]. آزمون با نصب فیکسچر خمش سه‌نقطه‌ای بر روی دستگاه بارگذاری و تنظیم فاصله مرکز تا مرکز تکیه‌گاه‌های غلتکی برابر با ۱۲۰ میلی‌متر انجام گرفت. نمونه نیم‌دایره‌ای به گونه‌ای روی تکیه‌گاه‌ها قرار داده شد که شیار اولیه در مرکز دهانه و در راستای محل اعمال بار قرار گیرد. پس از کنترل هم‌راستایی نمونه، شیار، تکیه‌گاه‌ها و میله بارگذاری، بارگذاری تحت کنترل جابه‌جایی و با نرخ ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد و تا رسیدن به معیار توقف تعیین‌شده ادامه یافت. در طول آزمایش، مقادیر بار و جابه‌جایی به صورت پیوسته ثبت و منحنی بارجابجایی هر نمونه استخراج شد. به منظور تحلیل رفتار شکست، منحنی بارجابجایی به دو ناحیه شامل مرحله پیش از بار اوج و مرحله پس از بار اوج تقسیم شد. همچنین، انرژی جذب‌شده تا بار اوج از طریق محاسبه مساحت زیر منحنی بارجابجایی تا نقطه بار اوج و با استفاده از انتگرال‌گیری عددی به روش دوزنقه‌ای تعیین گردید. به منظور فراهم کردن شرایط یکسان برای مقایسه نمونه‌ها، ابعاد نمونه، هندسه شیار، فاصله تکیه‌گاه‌ها، نرخ بارگذاری، دمای آزمون و مدت زمان شرطی‌سازی در تمامی آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شد. در نهایت، عملکرد نمونه‌های مختلف بر اساس بار اوج، جابه‌جایی متناظر با بار اوج و انرژی جذب‌شده تا بار اوج مورد مقایسه قرار گرفت. ارزیابی و مقایسه رفتار شکست نمونه‌های آسفالتی در آزمون خمش نیم‌دایره‌ای، سه پارامتر اصلی شامل بار اوج، جابه‌جایی متناظر با بار اوج و انرژی جذب‌شده تا بار اوج از منحنی بارجابجایی استخراج شد. روابط مورد استفاده

برای محاسبه این پارامترها در ادامه ارائه می‌شوند. بار اوج به‌عنوان بیشترین مقدار بار ثبت‌شده در طول آزمون خمشی نیم‌دایره‌ای تعریف می‌شود و بیانگر حداکثر ظرفیت باربری نمونه پیش از آغاز کاهش بار است. این پارامتر از منحنی بارجابجایی استخراج شده و مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$P_{max} = \max(P_i) \quad (1)$$

P_{max} : بار اوج یا حداکثر بار ثبت‌شده، بر حسب نیوتن

P_i : مقدار بار ثبت‌شده در هر نقطه از آزمایش، بر حسب نیوتن

این پارامتر نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت باربری نمونه پیش از شروع افت محسوس مقاومت است. هرچه P_{max} بیشتر باشد، نمونه در برابر اعمال بار مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. جابه‌جایی متناظر با بار اوج به میزان تغییرشکل نمونه در لحظه رسیدن بار اعمالی به بیشترین مقدار خود اطلاق می‌شود. این پارامتر بیانگر میزان تغییرشکل نمونه پیش از رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری بوده و از منحنی بارجابجایی استخراج می‌شود؛ مطابق رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$\delta_{P_{max}} = \delta(P_{max}) \quad (2)$$

$\delta_{P_{max}}$: جابه‌جایی متناظر با بار اوج، بر حسب mm

P_{max} : بار اوج

$\delta(P_{max})$: جابه‌جایی نمونه در نقطه رسیدن به بار اوج

انرژی جذب‌شده تا بار اوج بیانگر میزان انرژی مکانیکی جذب‌شده توسط نمونه از آغاز بارگذاری تا رسیدن به حداکثر بار است. این پارامتر از مساحت زیر منحنی بارجابجایی تا نقطه بار اوج محاسبه شده و نشان‌دهنده ظرفیت نمونه در جذب انرژی پیش از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری است. در معادله (۳) تعریف می‌گردد:

$$E_{P_{max}} = \int_0^{\delta_{P_{max}}} P(\delta) d\delta \quad (3)$$

انرژی جذب‌شده تا بار اوج یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی قابلیت جذب انرژی و رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی است. این پارامتر بیانگر میزان انرژی مکانیکی جذب‌شده توسط نمونه از آغاز بارگذاری تا رسیدن به حداکثر بار است. انرژی جذب‌شده با محاسبه مساحت زیر منحنی بارجابجایی تا نقطه بار اوج تعیین می‌شود. با توجه به گسسته بودن داده‌های حاصل از آزمایش، انرژی جذب‌شده تا بار اوج از طریق رابطه (۴) و با استفاده از روش انتگرال‌گیری عددی دوزنقه‌ای محاسبه و به‌دست می‌آید:

$$E_{P_{max}} \approx \sum_{n=1}^{i-1} \left(\frac{P_{i+1} + P_i}{2} \right) (\delta_{i+1} - \delta_i) \quad (4)$$

$E_{P_{max}}$: انرژی جذب‌شده تا بار اوج، بر حسب نیوتن‌میلی‌متر

P_{i+1} , P_i : بار در دو نقطه متوالی

δ_{i+1} , δ_i : جابه‌جایی متناظر با دو نقطه متوالی

n : تعداد نقاط ثبت‌شده تا رسیدن به بار اوج

۵- نتایج و بحث

نتایج این پژوهش حاصل از ارزیابی عملکرد الکترومغناطیسی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های مختلف ارائه و تحلیل می‌شود. ابتدا عملکرد سامانه انتقال توان القایی بر اساس توان خروجی و بازده انتقال توان بررسی شده و سپس رفتار مکانیکی نمونه‌ها در آزمون خمش نیم‌دایره‌ای با استفاده از پارامترهای بار اوج، جابه‌جایی متناظر با بار اوج و انرژی جذب‌شده تا بار اوج مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۵-۱- نتایج آزمایش انتقال توان القایی (IPT)

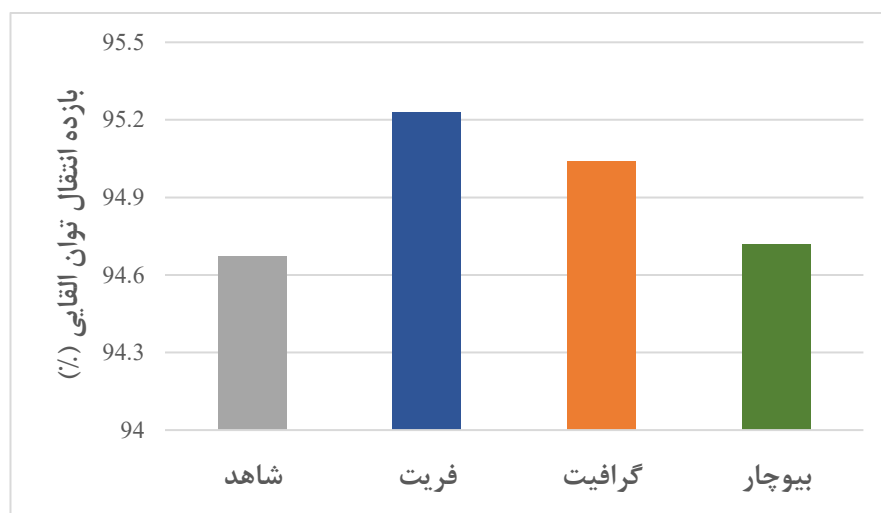
نتایج نشان می‌دهد که نوع افزودنی اثر محسوسی بر بازده انتقال توان القایی نمونه‌های آسفالتی داشته است. نمونه شاهد با بازده ۹۴/۶۷٪ عملکرد مناسبی در انتقال توان از خود نشان داد. با افزودن فریت، بازده به ۹۵/۲۳٪ افزایش یافت که بالاترین مقدار در میان نمونه‌های مورد بررسی بود. این افزایش را می‌توان به خواص مغناطیسی فریت و نقش آن در بهبود کوپلینگ میدان مغناطیسی میان فرستنده و گیرنده نسبت داد. نمونه حاوی گرافیت نیز با بازده ۹۵/۰۴٪ عملکردی نزدیک به فریت نشان داد و تنها اندکی پایین‌تر از آن قرار گرفت. بازده نمونه بیوچار ۹۴/۷۲٪ بود که اختلاف بسیار محدودی با نمونه شاهد داشت. در مجموع، تمامی نمونه‌ها بازدهی بیش از ۹۴ درصد را حفظ کردند که بیانگر عدم ایجاد اختلال قابل توجه افزودنی‌ها در فرآیند انتقال بی‌سیم انرژی است در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین، افزایش بازده در نمونه‌های فریت و گرافیت نشان می‌دهد که این افزودنی‌ها، علاوه بر قابلیت اصلاح خواص مخلوط آسفالتی، می‌توانند با حفظ یا بهبود شرایط انتقال میدان، برای توسعه روسازی‌های مجهز به سامانه انتقال توان القایی مناسب باشند.

جدول ۴- نتایج آزمایش انتقال توان القایی

نوع نمونه	بازده انتقال توان	تغییر نسبت به شاهد
شاهد	۹۴/۶۷٪	-
فریت	۹۵/۲۳٪	+۰/۵۶
گرافیت	۹۵/۰۴٪	+۰/۳۷
بیوچار	۹۴/۷۲٪	+۰/۰۵

شکل ۷ تغییر نوع افزودنی باعث جابه‌جایی محدودی در سطح بازده انتقال توان شده است، اما روند کلی عملکرد نمونه‌ها در محدوده‌ای پایدار باقی می‌ماند. ارتفاع ستون‌ها بیانگر آن است که افزودنی‌های فریت و گرافیت نسبت به نمونه شاهد روند افزایشی ایجاد کرده‌اند، در حالی که بیوچار تغییر بسیار محدودی در بازده ایجاد کرده است. نزدیکی عملکرد فریت و گرافیت

نشان‌دهنده قابلیت این دو افزودنی در حفظ شرایط مناسب انتقال توان در ساختار مخلوط آسفالتی است. از سوی دیگر، اختلاف اندک میان مقادیر نمونه‌ها نشان می‌دهد که تغییر ترکیب مخلوط، اثر تعیین‌کننده‌ای بر عملکرد سامانه القایی نداشته است. بنابراین، از منظر عملکرد انتقال توان، استفاده از افزودنی‌ها می‌تواند بدون تحمیل افت محسوس در بازده، امکان اصلاح هم‌زمان سایر ویژگی‌های مخلوط آسفالتی را فراهم سازد.



شکل ۷ - مقایسه‌ی بازده نمونه شاهد با نمونه‌های اصلاح‌شده

۵-۲- نتایج آزمایش خمشی نیم دایره ای SCB

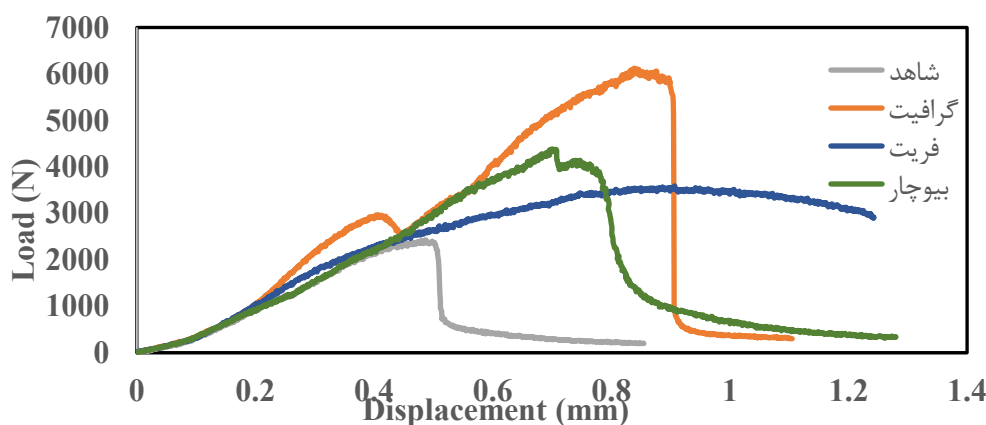
مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آغاز و گسترش ترک، یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی عملکرد مکانیکی روسازی است و به‌طور مستقیم تحت تأثیر دما و ویژگی‌های مصالح تشکیل‌دهنده قرار دارد. به‌منظور بررسی اثر افزودنی‌های مورد مطالعه بر رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی، آزمون خمشی نیم‌دایره‌ای در سه دمای ۱۰-، ۰ و ۲۵+ درجه سانتی‌گراد انجام شد. آزمون‌ها برای چهار نوع مخلوط شامل نمونه شاهد و نمونه‌های اصلاح‌شده با فریت، گرافیت و بیوچار اجرا گردید. انتخاب سطوح دمایی مذکور، امکان بررسی تغییرات پاسخ مکانیکی مخلوط‌ها در شرایط دمایی مختلف، از رفتار نسبتاً ترد در دمای پایین تا رفتار شکل‌پذیرتر در دمای بالاتر، را فراهم کرد. در هر آزمون، بار و جابه‌جایی ثبت و منحنی بارجابه‌جایی نمونه‌ها استخراج شد. شکل ۸ نحوه استقرار نمونه و اجرای آزمون خمشی نیم‌دایره‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نحوه قرارگیری نمونه نیم‌دایره‌ای و اجرای آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

۵-۳- نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد

با توجه به حساسیت مخلوط‌های آسفالتی به ترک‌خوردگی در دماهای پایین، رفتار مکانیکی نمونه‌ها در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد با استفاده از منحنی‌های بارجابه‌جایی حاصل از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای بررسی شد. شکل ۹ منحنی‌های بارجابه‌جایی نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی‌های مختلف را در این دما نشان می‌دهد.



شکل ۹- منحنی‌های بار-جابه‌جایی حاصل از آزمایش SCB برای نمونه‌های مورد بررسی در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد

نوع افزودنی بر ظرفیت باربری، انرژی جذب‌شده و رفتار نمونه‌ها پس از اوج تأثیرگذار است. در شاخه پیش از اوج، نمونه گرافیتی بالاترین سطح بار و بیشترین مساحت زیر منحنی را دارد. بار اوج و انرژی جذب‌شده این نمونه نسبت به شاهد به ترتیب حدود ۱۵۱ و ۳۰۱ درصد افزایش یافته‌اند. وجود افت موضعی و افزایش مجدد بار در بخش میانی منحنی نشان می‌دهد پاسخ گرافیت پیش از اوج کاملاً یکنواخت نیست؛ با این حال، نمونه پس از این افت توانسته است بار بیشتری تحمل کند و به بالاترین مقدار اوج در میان نمونه‌ها برسد.

منحنی بیوپار افزایش یکنواخت‌تری دارد و در مقایسه با شاهد، در سطح بار بالاتر و دامنه جابه‌جایی بیشتری امتداد یافته است. افزودن بیوپار موجب افزایش حدود ۸۰ درصدی بار اوج و ۱۳۷ درصدی انرژی جذب‌شده تا اوج نسبت به شاهد شده است. این نتایج نشان می‌دهد بیوپار ضمن افزایش ظرفیت باربری، امکان تحمل جابه‌جایی بیشتری را نیز پیش از رسیدن به اوج فراهم کرده و از این نظر، رفتاری متعادل‌تر از نمونه گرافیتی نشان داده است.

نمونه فریت رفتار متفاوتی دارد. منحنی این نمونه به‌جای تشکیل یک اوج تیز، دارای ناحیه‌ای پهن و نسبتاً پایدار است و بار در دامنه بیشتری از جابه‌جایی حفظ می‌شود. بار اوج و انرژی جذب‌شده فریت نسبت به شاهد به‌ترتیب حدود ۴۷ و ۲۳۳ درصد افزایش یافته‌اند. اختلاف میان میزان افزایش بار و انرژی نشان می‌دهد مزیت اصلی نمونه حاوی فریت نه دستیابی به بالاترین بار اوج، بلکه گستردگی بیشتر منحنی بارجابه‌جایی و توانایی حفظ بار در جابه‌جایی‌های بالاتر است. این رفتار بیانگر قابلیت مناسب‌تر نمونه فریتی در تحمل تغییرشکل و جذب انرژی پس از رسیدن به بار اوج بوده و می‌تواند به بهبود رفتار شکل‌پذیر و پایداری مکانیکی مخلوط در برابر گسترش شکست کمک کند.

تفاوت نمونه‌ها در شاخه پس از اوج آشکارتر است. منحنی گرافیت پس از رسیدن به بیشترین بار، افتی سریع و تقریباً عمودی نشان می‌دهد که با یک پاسخ ترد سازگار است. نمونه شاهد نیز پس از اوج به‌سرعت بخش عمده ظرفیت باربری خود را از دست می‌دهد. در نمونه بیوپار، افت اولیه بار ملایم‌تر و شاخه نزولی طولانی‌تر است؛ بنابراین کاهش ظرفیت باربری آن نسبت به گرافیت و شاهد تدریجی‌تر رخ داده است، هرچند در ادامه مقدار بار به سطح پایینی می‌رسد.

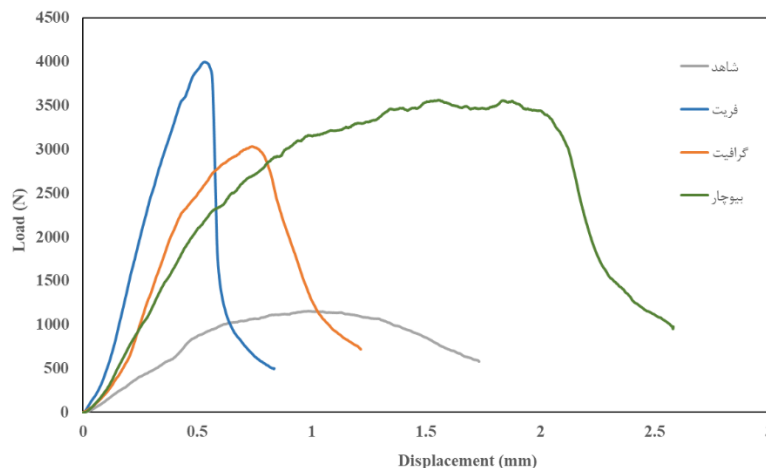
در مقابل، فریت پس از رسیدن به اوج افت ناگهانی نشان نمی‌دهد و تا پایان محدوده ثبت‌شده بخش زیادی از بار اوج را حفظ می‌کند. در مجموع، گرافیت بیشترین ظرفیت باربری و انرژی پیش از اوج، فریت بیشترین قابلیت حفظ بار پس از اوج و بیوپار متعادل‌ترین ترکیب بار و جابه‌جایی را نشان می‌دهد. مقادیر کمی حداکثر بار شکست و انرژی جذب‌شده تا اوج برای نمونه‌های مورد بررسی در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد در جدول ۵ ارائه شده است. نمونه گرافیتی بالاترین مقادیر بار شکست و انرژی جذب‌شده تا اوج را در میان نمونه‌های بررسی‌شده به خود اختصاص داده است. نمونه بیوپار نیز عملکردی بالاتر از نمونه شاهد نشان می‌دهد، در حالی که نمونه فریت با وجود بار شکست پایین‌تر نسبت به گرافیت و بیوپار، انرژی جذب‌شده تا اوج مطلوبی را ارائه کرده است که بیانگر گستردگی بیشتر پاسخ آن در ناحیه بارجابه‌جایی است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده تفاوت در ظرفیت باربری و قابلیت جذب انرژی نمونه‌های اصلاح‌شده در شرایط دمای پایین است.

جدول ۵- حداکثر بار شکست و انرژی جذب‌شده تا اوج نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۰- سانتی‌گراد

نمونه	حداکثر بار شکست (N)	انرژی جذب‌شده تا اوج (N.mm)
شاهد	۲۴۴۷/۸	۵۹۲/۴
بیوپار	۴۴۱۳/۶	۱۴۰۷
گرافیت	۶۱۳۳/۷	۲۳۷۷/۳
فریت	۳۵۹۱/۴	۱۹۷۲/۷

۵-۴- آزمایش خمش نیم دایره ای در دمای ۰ درجه سانتی‌گراد

به‌منظور بررسی تأثیر افزودنی‌ها بر رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمایی، نتایج آزمایش در دمای صفر درجه سانتی‌گراد ارزیابی شد. شکل ۱۰ منحنی‌های بارجابه‌جایی نمونه‌های اصلاح‌شده را در این دما نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - منحنی‌های بار جابه‌جایی حاصل از آزمایش SCB برای نمونه‌های مورد بررسی در دمای صفر درجه سانتی‌گراد

افزودنی‌ها تأثیر متفاوتی بر ظرفیت باربری، دامنه جابه‌جایی و نحوه افت بار نمونه‌ها در دمای صفر درجه سانتی‌گراد دارند. در شاخه پیش از اوج، فریت بیشترین بار را تحمل کرده و بار اوج آن حدود ۲۳۹ درصد بیشتر از شاهد است. باین‌حال، منحنی فریت شیب زیادی دارد و در جابه‌جایی نسبتاً کمی به اوج می‌رسد. بنابراین، افزایش ظرفیت باربری این نمونه با محدود شدن دامنه تغییر شکل پیش از اوج همراه بوده است. باریک‌بودن منحنی نیز سبب شده افزایش انرژی جذب‌شده فریت نسبت به شاهد، با وجود بار اوج زیاد، تنها حدود ۳۹ درصد باشد.

بیوپار رفتار متفاوتی نشان می‌دهد. منحنی این نمونه در دامنه وسیعی از جابه‌جایی در سطح بار بالا باقی می‌ماند و به جای یک اوج تیز، چند نوسان محدود در ناحیه نزدیک به اوج دارد. بار اوج بیوپار حدود ۲۰۳ درصد و انرژی جذب‌شده آن حدود ۳۵۲ درصد بیشتر از شاهد است. بیشتر بودن چشمگیر افزایش انرژی نسبت به افزایش بار نشان می‌دهد مزیت اصلی بیوپار تنها افزایش ظرفیت باربری نیست، بلکه حفظ بار در دامنه بیشتری از جابه‌جایی است. بر این اساس، بیوپار مناسب‌ترین عملکرد پیش از اوج را از نظر ترکیب بار، جابه‌جایی و انرژی جذب‌شده نشان می‌دهد.

منحنی گرافیت در شاخه صعودی رفتاری نسبتاً یکنواخت دارد و پس از بیوپار و فریت، در رتبه بعدی ظرفیت باربری قرار می‌گیرد. بار اوج و انرژی جذب‌شده گرافیت نسبت به شاهد به ترتیب حدود ۱۵۶ و ۵۲ درصد افزایش یافته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد گرافیت ظرفیت باربری نمونه را بهبود داده است، اما دامنه جابه‌جایی آن تا اوج کمتر از بیوپار است؛ از این‌رو، انرژی جذب‌شده آن نیز پایین‌تر از بیوپار قرار می‌گیرد.

تفاوت نمونه‌ها در شاخه پس از اوج آشکارتر است. فریت پس از رسیدن به بیشترین بار، افتی بسیار سریع نشان می‌دهد و در فاصله کوتاهی بخش عمده ظرفیت خود را از دست می‌دهد. این شکل منحنی با یک پاسخ سخت و ترد سازگار است. گرافیت نیز پس از اوج افت قابل توجهی دارد، اما کاهش بار آن نسبت به فریت در دامنه جابه‌جایی بیشتری رخ می‌دهد. در مقابل، افت بار بیوپار تدریجی‌تر است و نمونه پس از اوج نیز برای مدت بیشتری بخشی از ظرفیت باربری خود را حفظ می‌کند. بنابراین، رفتار پس از اوج بیوپار نسبت به فریت و گرافیت پایدارتر ارزیابی می‌شود.

نمونه شاهد کمترین ظرفیت باربری و انرژی را دارد، اما افت بار پس از اوج آن نسبتاً ملایم است و در پایان محدوده ثبت‌شده هنوز حدود نیمی از بار اوج حفظ می‌شود. مقادیر کمی حداکثر بار شکست و انرژی جذب تا اوج نمونه‌ها در دمای

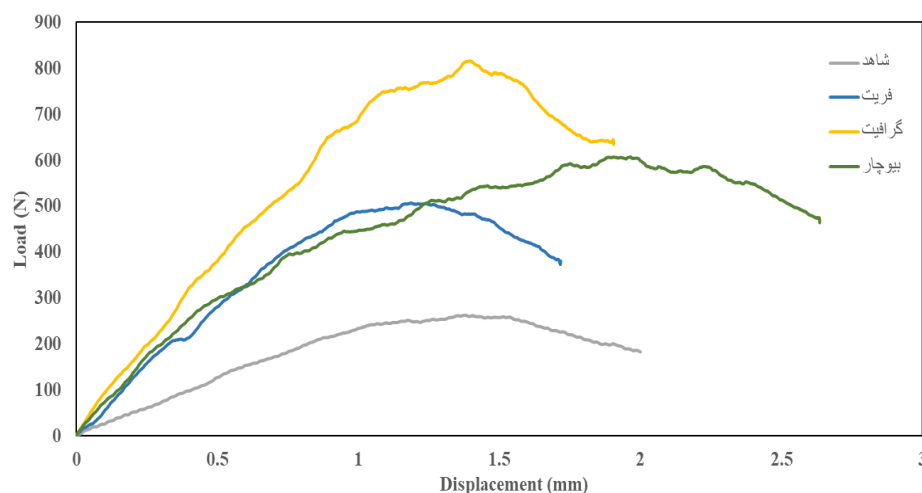
صفر درجه سانتی‌گراد در جدول ۶ ارائه شده است. مقایسه این دو شاخص نشان می‌دهد که ترتیب عملکرد نمونه‌ها از نظر ظرفیت باربری الزاماً با ترتیب آن‌ها از نظر جذب انرژی یکسان نیست. در حالی که فریت بالاترین ظرفیت باربری را در میان نمونه‌ها نشان می‌دهد، انرژی جذب تا اوج آن نسبت به بیوچار به مراتب کمتر است؛ موضوعی که بیانگر تفاوت در نحوه توزیع تغییرشکل و جذب انرژی پیش از رسیدن به بار اوج است. بیوچار با ثبت بالاترین انرژی جذب‌شده تا اوج، توانایی بیشتری در جذب انرژی مکانیکی تا نقطه اوج نشان می‌دهد و گرافیت نیز از نظر هر دو شاخص در سطحی بالاتر از نمونه شاهد قرار می‌گیرد. در مجموع، ارزیابی عملکرد مکانیکی در دمای صفر درجه سانتی‌گراد تنها بر اساس حداکثر بار شکست کافی نبوده و بررسی هم‌زمان ظرفیت باربری و انرژی جذب‌شده، تصویر دقیق‌تری از رفتار نمونه‌های اصلاح‌شده ارائه می‌دهد.

جدول ۶- حداکثر بار شکست و انرژی جذب‌شده تا اوج نمونه‌های آسفالتی دمای ۰ درجه سانتی‌گراد

نمونه	حداکثر بار شکست (N)	انرژی جذب‌شده تا اوج (N.mm)
بیوچار	۳۶۶۷	۳۶۰۰/۸
فریت	۴۱۰۱/۸	۱۱۰۷/۲
گرافیت	۳۰۹۹/۹	۱۲۱۳/۵
شاهد	۱۲۰۹/۷	۷۹۶/۱

۵-۵- نتایج آزمایش خمش نیم دایره ای در دمای ۲۵+ درجه سانتی‌گراد

به‌منظور بررسی تأثیر افزودنی‌ها بر رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی در دمای محیط، نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دمای ۲۵+ درجه سانتی‌گراد ارزیابی شد. شکل ۱۱ منحنی‌های بار جابه‌جایی نمونه شاهد و نمونه‌های اصلاح‌شده را در این دما نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- منحنی‌های بار جابه‌جایی حاصل از آزمایش SCB برای نمونه‌های مورد بررسی در دمای ۲۵+ درجه

آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، تمام نمونه‌ها پس از رسیدن به بیشینه بار، کاهش تدریجی و بدون سقوط ناگهانی

دارند. این شکل منحنی با رفتار نرم‌تر مخلوط آسفالتی در دمای بالاتر سازگار است.

در شاخه پیش از اوج، نمونه گرافیتی بیشترین ظرفیت باربری را نشان می‌دهد و حداکثر بار آن حدود ۱۸۰ درصد بیشتر از شاهد است. شیب نسبتاً زیاد شاخه صعودی و قرار گرفتن منحنی در سطحی بالاتر از سایر نمونه‌ها، بیانگر تأثیر مناسب گرافیت بر ظرفیت تحمل بار است. انرژی جذب‌شده این نمونه نیز حدود ۱۶۶ درصد بیشتر از شاهد است. باین‌حال، اوج گرافیت در جابه‌جایی کمتری نسبت به بیوپار رخ می‌دهد؛ بنابراین مزیت اصلی آن بیشتر در افزایش ظرفیت باربری نمایان می‌شود. بیوپار پس از گرافیت بیشترین بار را تحمل می‌کند، اما منحنی آن تا جابه‌جایی بیشتری ادامه یافته و دیرتر به نقطه اوج می‌رسد. در نتیجه، با وجود بار اوج کمتر از گرافیت، بیشترین انرژی جذب‌شده تا اوج به بیوپار اختصاص دارد. انرژی این نمونه حدود ۲۱۰ درصد و بار اوج آن حدود ۱۱۵ درصد بیشتر از شاهد است. این اختلاف نشان می‌دهد بهبود عملکرد بیوپار بیش از آنکه تنها ناشی از افزایش بار باشد، به حفظ بار در دامنه وسیع‌تری از جابه‌جایی مربوط است. بر این اساس، بیوپار متعادل‌ترین ترکیب ظرفیت باربری و تغییر شکل را در این دما ارائه می‌دهد. نمونه فریت عملکردی میانی دارد. حداکثر بار آن حدود ۷۹ درصد بیشتر از شاهد است، اما به دلیل وقوع اوج در جابه‌جایی کمتر و محدودتر بودن سطح زیر منحنی، افزایش انرژی آن نسبت به شاهد حدود ۳۶ درصد است. بنابراین، فریت در دمای ۲۵ درجه موجب افزایش ظرفیت باربری شده، ولی اثر آن بر انرژی جذب‌شده به اندازه گرافیت و بیوپار نیست. نمونه شاهد نیز کمترین سطح بار را در تمام دامنه جابه‌جایی نشان می‌دهد، هرچند منحنی آن بدون افت ناگهانی تا جابه‌جایی نسبتاً زیادی امتداد یافته است.

در شاخه پس از اوج، هر چهار نمونه بخشی قابل توجه از بار بیشینه خود را حفظ می‌کنند. کاهش بار در گرافیت، بیوپار و فریت تدریجی است و هیچ‌یک از منحنی‌ها به سطوح نزدیک صفر نمی‌رسند. نمونه گرافیت پس از اوج نیز بیشترین بار مطلق را حفظ می‌کند، درحالی‌که بیوپار شاخه پس از اوج طولانی‌تری دارد.

مقادیر کمی حداکثر بار شکست و انرژی جذب‌شده تا اوج نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در جدول ۷ ارائه شده است. مقایسه این دو شاخص نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت باربری الزاماً به افزایش متناسب انرژی جذب‌شده منجر نمی‌شود. نمونه گرافیتی بالاترین مقدار بار شکست را به خود اختصاص داده و از نظر انرژی جذب‌شده تا اوج نیز در سطح بالایی قرار دارد، درحالی‌که بیوپار با وجود بار شکست پایین‌تر، بیشترین انرژی جذب‌شده تا اوج را نشان می‌دهد. این تفاوت بیانگر آن است که رفتار بیوپار بیشتر تحت تأثیر قابلیت تغییر شکل و جذب انرژی در محدوده وسیع‌تری از جابه‌جایی قرار دارد. نمونه فریت نیز افزایش قابل توجهی در بار شکست نسبت به شاهد ایجاد کرده، اما انرژی جذب‌شده تا اوج آن پایین‌تر از گرافیت و بیوپار است. در مجموع، نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، گرافیت بیشتر از منظر ظرفیت باربری و بیوپار از نظر قابلیت جذب انرژی عملکرد مطلوبی ارائه می‌کنند، در حالی‌که فریت عملکردی بینابینی از این دو شاخص دارد.

جدول ۷- حداکثر بار شکست و انرژی جذب‌شده تا اوج نمونه‌های آسفالتی دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

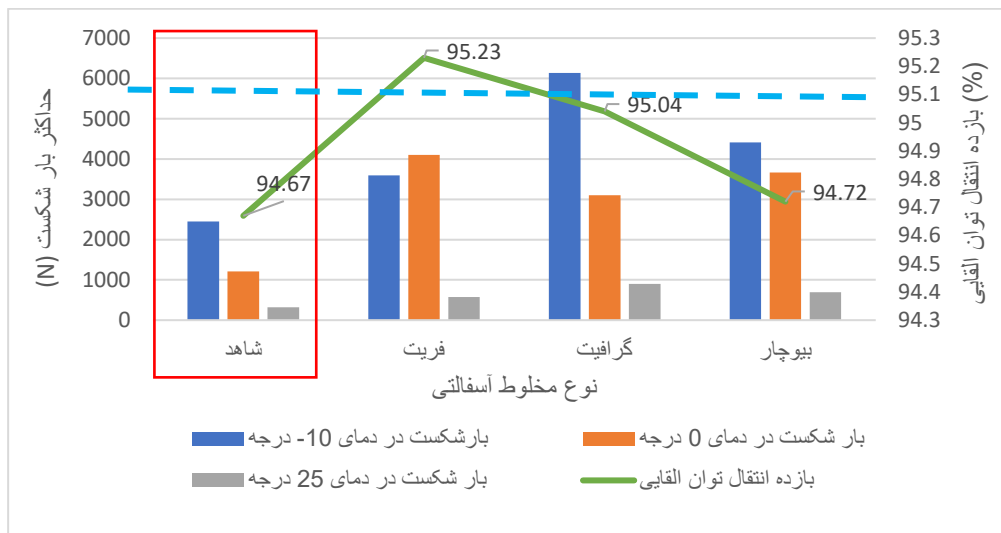
نمونه	حداکثر بار شکست (N)	انرژی جذب‌شده تا اوج (N.mm)
شاهد	۳۲۱/۳	۲۸۶/۵
فریت	۵۷۶/۵	۳۸۹/۲
گرافیت	۸۹۷/۹	۷۶۳/۳
بیوپار	۶۸۹/۹	۸۸۷/۱

۵-۶- ارزیابی عملکرد مکانیکی و القایی مخلوط آسفالتی

نتایج شکل ۱۲ نشان می‌دهد که اثر دما بر حداکثر بار شکست به نوع افزودنی وابسته است. حداکثر بار شکست بیانگر بیشترین ظرفیت باربری مخلوط پیش از وقوع شکست است. افزایش دما، به‌طور کلی، موجب کاهش این شاخص می‌شود؛ به‌گونه‌ای که کمترین مقادیر بار شکست اغلب نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه مشاهده شده است. این کاهش را می‌توان به افت سختی قیر و کاهش توانایی مخلوط برای تحمل بار متمرکز در دماهای بالاتر نسبت داد. با این حال، افزایش بار شکست در دمای پایین عمدتاً نشان‌دهنده سخت‌تر شدن مخلوط است و نباید به‌تنهایی به‌عنوان بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی تفسیر شود. گرافیت در دماهای ۱۰- و ۲۵ درجه بیشترین حداکثر بار شکست را ایجاد کرده و در دمای صفر نیز ظرفیت باربری آن به‌طور محسوسی بیشتر از نمونه شاهد بوده است. این نمونه هم‌زمان بازده انتقال توان القایی بالایی نشان می‌دهد؛ بنابراین، گرافیت از مناسب‌ترین افزودنی‌ها برای دستیابی هم‌زمان به ظرفیت باربری و عملکرد القایی مطلوب محسوب می‌شود. با وجود کاهش بار شکست گرافیت در اثر افزایش دما، برتری آن در دو دمای ۱۰- و ۲۵ درجه نشان می‌دهد که اثر تقویتی این افزودنی به یک شرایط دمایی خاص محدود نیست.

فریت در هر سه دما موجب افزایش بار شکست نسبت به نمونه شاهد شده است، اما روند تغییرات آن با دما یکنواخت نیست. بیشترین بار شکست فریت در دمای صفر مشاهده می‌شود؛ درحالی‌که مقدار آن در دماهای ۱۰- و ۲۵ درجه کاهش می‌یابد. این رفتار نشان می‌دهد که تأثیر مکانیکی فریت به شرایط دمایی وابسته بوده و بهترین عملکرد آن در دمای میانی حاصل شده است. از سوی دیگر، فریت بیشترین بازده انتقال توان القایی را دارد و از این نظر، مناسب‌ترین افزودنی برای تقویت پاسخ القایی مخلوط شناخته می‌شود.

بیوپار در تمام دماها بار شکست را نسبت به نمونه شاهد افزایش داده است. عملکرد مناسب آن در دماهای ۱۰- و صفر درجه نشان می‌دهد که این افزودنی می‌تواند ظرفیت باربری مخلوط را بهبود دهد؛ با این حال، کاهش بار شکست در دمای ۲۵ درجه بیانگر تضعیف اثر تقویتی آن با افزایش دما است. در مجموع، گرافیت با ارائه ظرفیت باربری مناسب در گستره دمایی آزمایش و بازده القایی مطلوب، بهترین عملکرد ترکیبی را نشان داد. فریت نیز بیشترین بازده انتقال توان القایی و بالاترین بار شکست در دمای صفر را به خود اختصاص داد، در حالی‌که بیوپار در تمامی دماهای بررسی‌شده عملکرد مکانیکی بهتری نسبت به نمونه شاهد داشت. نتایج بیانگر آن است که عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تابعی هم‌زمان از نوع افزودنی و دمای بهره‌برداری بوده و برتری هر افزودنی به شاخص ارزیابی وابسته است. بنابراین، توسعه روسازی‌های مناسب برای انتقال توان القایی مستلزم ایجاد توازن میان ظرفیت باربری، قابلیت جذب انرژی و بازده انتقال توان است؛ موضوعی که می‌تواند مبنای انتخاب و بهینه‌سازی افزودنی‌ها در روسازی‌های هوشمند قرار گیرد.



شکل ۱۲ - مقایسه بار شکست در دماهای مختلف و بازده انتقال توان القایی

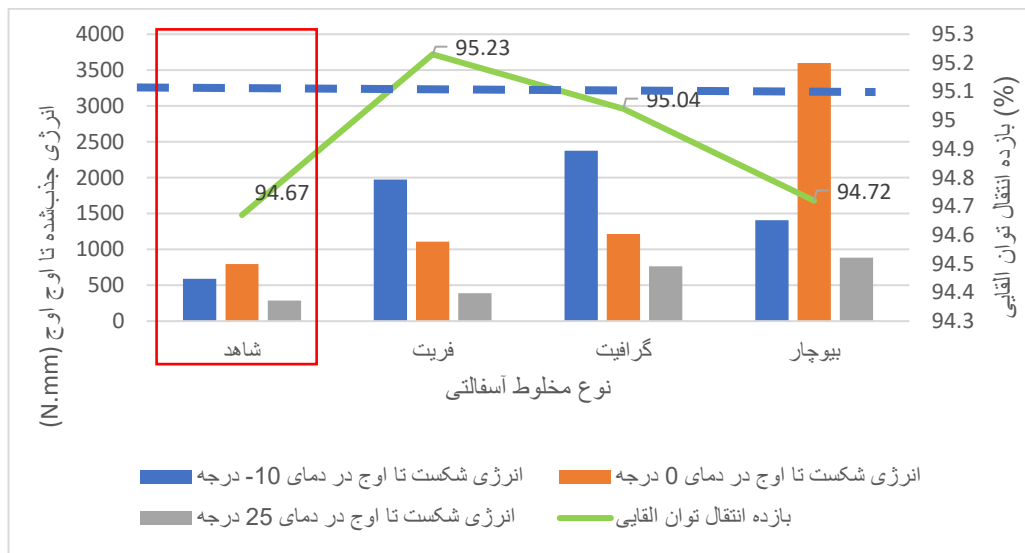
انرژی جذب‌شده تا اوج، بیانگر میزان انرژی جذب‌شده توسط مخلوط در مرحله پیش از رسیدن به حداکثر بار است و می‌تواند ارزیابی جامع‌تری از ترکیب ظرفیت باربری و قابلیت تغییرشکل نمونه ارائه دهد. نتایج شکل ۱۳ نشان می‌دهد که اثر دما بر این شاخص به نوع افزودنی وابسته است و نمونه‌ها در دماهای مختلف، رفتار یکسانی ندارند.

نمونه حاوی گرافیت در دمای -۱۰ درجه بیشترین انرژی جذب‌شده تا اوج را نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است که گرافیت در شرایط سرد، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، توانایی مخلوط در جذب انرژی تا پیش از رسیدن به بار اوج را نیز بهبود می‌دهد. با افزایش دما، انرژی جذب‌شده تا اوج این نمونه کاهش می‌یابد؛ بنابراین، اثر گرافیت بر این شاخص در شرایط سرد برجسته‌تر است. بازده بالای انتقال توان القایی گرافیت نیز نشان‌دهنده عملکرد مناسب آن از نظر ویژگی‌های مکانیکی و القایی است.

فریت در دمای -۱۰ درجه انرژی جذب‌شده تا اوج بیشتری نسبت به نمونه شاهد ایجاد کرده است، اما با افزایش دما این مقدار به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که تأثیر فریت بر افزایش ظرفیت جذب انرژی عمدتاً در شرایط سرد نمایان می‌شود. با این حال، بیشترین بازده انتقال توان القایی به فریت اختصاص دارد؛ از این‌رو، مزیت اصلی این افزودنی را می‌توان ایجاد پاسخ القایی مطلوب، همراه با بهبود انرژی جذب‌شده تا اوج در دمای پایین دانست.

بیوچار در دماهای صفر و ۲۵ درجه بیشترین انرژی جذب‌شده تا اوج را ایجاد کرده است. افزایش قابل‌توجه انرژی جذب‌شده تا اوج این نمونه، به‌ویژه در دمای صفر، نشان می‌دهد که بیوچار توانایی مخلوط در تحمل بار و تغییرشکل پیش از رسیدن به نقطه اوج را بهبود می‌بخشد. بنابراین، اثر اصلی بیوچار بیشتر در افزایش ظرفیت جذب انرژی در دماهای میانی و بالاتر مشاهده می‌شود.

در مجموع، گرافیت در شرایط سرد، بیوچار در دماهای صفر و ۲۵ درجه و فریت از نظر بازده انتقال توان القایی عملکرد برتری نشان داده‌اند



شکل ۱۳ - مقایسه انرژی جذب‌شده تا اوج در دماهای مختلف و بازده انتقال توان القایی مخلوط‌های آسفالتی

۶- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد با هدف توسعه روسازی‌های هوشمند و فراهم‌سازی زیرساخت‌های نوین در راستای حمل‌ونقل پایدار و شارژ بی‌سیم خودروهای برقی، عملکرد هم‌زمان مکانیکی و انتقال توان القایی مخلوط‌های آسفالتی حاوی فریت، گرافیت و بیوپار بررسی شد. در این راستا، اثر نوع افزودنی و دمای بهره‌برداری بر شاخص‌های مکانیکی و قابلیت انتقال توان القایی مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت تا میزان سازگاری این مواد با الزامات عملکردی روسازی و سامانه‌های شارژ بی‌سیم مشخص شود. نتایج نشان داد که هر یک از افزودنی‌های مورد بررسی، ویژگی‌ها و مزایای متفاوتی را در شرایط دمایی مختلف ایجاد می‌کنند و عملکرد آن‌ها تنها بر اساس یک شاخص قابل ارزیابی نیست. بنابراین، انتخاب افزودنی مناسب باید بر مبنای ایجاد توازن میان ظرفیت باربری، مقاومت و انرژی شکست از یک طرف و بازده انتقال توان القایی از سوی دیگر انجام شود. بر اساس نتایج حاصل، می‌توان عملکرد افزودنی‌ها را به‌صورت زیر جمع‌بندی کرد:

- ۱- گرافیت: ارائه متعادل‌ترین عملکرد مکانیکی و القایی، با بیشترین بار شکست در دماهای ۱۰- و ۲۵ درجه سانتی‌گراد و بازده بالای انتقال توان القایی.
- ۲- فریت: دستیابی به بالاترین بازده انتقال توان القایی و بیشترین ظرفیت باربری در دمای صفر درجه سانتی‌گراد، همراه با بهبود قابل توجه انرژی جذب‌شده تا اوج در شرایط سرد.
- ۳- بیوپار: افزایش بار شکست در تمامی دماهای مورد بررسی و بهبود قابل توجه انرژی جذب‌شده تا اوج، به‌ویژه در دماهای صفر و ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

۷- مراجع

- [1] Kusuma, I., R. Kusumoputro, and A. Iswadi, *Electric Vehicle Review: BEV, PHEV, HEV, or FCEV?* Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur, 2025. 10(1): p. 70–83.
- [2] Bozhi, et al., *A review of wireless pavement system based on the inductive power transfer in electric vehicles*. Sustainability, 2023. 15(20): p. 14893.
- [3] Aghcheghloo, P.D., et al., *Evaluation of the behavior of the interface zone between an asphalt mixture and an inductive power transfer pad*. Construction and Building Materials, 2024. 411: p. 134038.
- [4] Chen, F., et al., *Dynamic application of the Inductive Power Transfer (IPT) systems in an electrified road: Dielectric power loss due to pavement materials*. Construction and Building Materials, 2017. 147: p. 9–16.
- [5] Sirgani, P.B., R.B. Mallick, and S. Nazarian, *Characterizing Pavement Material Properties for Thermal Modeling of Embedded Wireless Power Transfer Systems*. Transportation Research Record, 2026. 2680(4): p. 307–318.
- [6] Soares, L. and H. Wang, *A study on renewed perspectives of electrified road for wireless power transfer of electric vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022. 158: p. 112110.
- [7] Boada-Parra, G., et al., *Multivariable Evaluation of Wireless Power Transfer in Electrified Pavements with Magnetite-Modified Asphalt Mixtures*. Sensors, 2025. 25(21): p. 6646.
- [8] Cong, P., P. Xu, and S. Chen, *Effects of carbon black on the anti aging, rheological and conductive properties of SBS/asphalt/carbon black composites*. Construction and Building Materials, 2014. 52: p. 306–313.
- [9] Wu, S., et al., *Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers*. Carbon, 2005. 43(7): p. 1358–1363.
- [10] Wani, I. and A. Garg, *Critical review on use of biochar as a modifier in asphaltic binders for pavement construction: I. Wani, A. Garg*. Environment, Development and Sustainability, 2024: p. 1–22.
- [11] Al-Tuwayyij, H. and S.I. Sarsam, *Influence of Iron-filings on Marshall and volumetric properties of asphalt concrete*. Civil Engineering Journal, 2020. 6(9): p. 1684–1696.
- [12] Messaoud, M., B. Glaoui, and O. Abdelkhalek, *The effect of adding steel fibers and graphite on mechanical and electrical behaviors of asphalt concrete*. Civil Engineering Journal, 2022. 8(2): p. 348–361.
- [13] Nabiun, N. and M.M. Khabiri, *Mechanical and moisture susceptibility properties of HMA containing ferrite for their use in magnetic asphalt*. Construction and Building Materials, 2016. 113: p. 691–697.
- [14] Joni, H.H., H.H. Zghair, and A.A. Mohammed, *The effect of recycled concrete aggregate and aluminum filings on the properties of hot asphalt mixture*. J Adv Res Civ Env Eng, 2018. 5(3): p. 18–25.
- [15] Shaopeng, W., C. Mingyu, and Z. Jizhe, *Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale slabs*. Applied Thermal Engineering, 2011. 31(10): p. 1582–1587.

- [16] Khattak, M.J., et al., *The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology*. Construction and Building Materials, 2012. 30: p. 257–264.
- [17] Vo, H.V., D.-W. Park, and S. Dessouky, *Simulation of snow melting pavement performance using measured thermal properties of graphite-modified asphalt mixture*. Road Materials and Pavement Design, 2015. 16(3): p. 696–706.
- [18] Covic, G.A. and J.T. Boys, *Inductive power transfer*. Proceedings of the IEEE, 2013. 101(6): p. 1276–1289.
- [19] Covic, G.A. and J.T. Boys, *Modern trends in inductive power transfer for transportation applications*. IEEE Journal of Emerging and Selected topics in power electronics, 2013. 1(1): p. 28–41.
- [20] Dogani Aghcheghloo, P., *Development of a Robust IPT Pavement System for Wireless Charging of EVs*. 2024, ResearchSpace Auckland.
۲۱. جولایی، ا.ا.م.ز.س.، بررسی تاثیر آلودگی های تانکر حمل قیر بر کیفیت قیر (نقطه نرمی و درج نفوذ، هشتمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی_سازمان راهداری حمل و نقل جاده ای، معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران. ۱۳۹۵: تهران.
۲۲. مشخصات عمومی فنی راه، نشریه ۱۰۱، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، تجدیدنظر دوم. ۱۳۹۲.
۲۳. م.ح.پ لنبر، بکارگیری آزمایش خمش نیم دایره های برای تعیین عوامل اصلی در طرح اختلاط مخلوطهای آسفالتی مقاوم در برابر ترک خوردگی موثر با استفاده از روش تاگچی. ۱۴۰۰.
- [24] Liu, J., et al., *Evaluation of self-healing properties of asphalt mixture containing steel slag under microwave heating: Mechanical, thermal transfer and voids microstructural characteristics*. Journal of Cleaner Production, 2022. 342: p. 130932.
- [25] Yao, Y., X. Chen, J. Li, H. Hu, D. Vizzari, and Y. Peng, *Towards sustainable and efficient inductive charging pavement systems: Current progress and future directions*. Construction and Building Materials, 2024. 449: p. 138532.