کاربرد پودر لاستیک در مخلوط‌های آسفالتی و ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد آن

علی‌اصغر اکبری نسرکانی

شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

چکیده

یک راهکار عملی برای رها شدن از لاستیک‌های فرسوده و کمک به محیط زیست آن است که تایرهای ضایعاتی را خرد و در روسازی‌های آسفالتی به کار برد. اما پیش از آن باید از بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک اطمینان حاصل کرد. پودر لاستیک به سه روش کلی تر، خشک و فراترکیبی در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش مخلوط آسفالتی شاهد و اصلاح شده با ۱۰٪ و ۲۰٪ پودر لاستیک به روش تر در دماها و فرکانس‌های مختلف تحت آزمایش مدول دینامیکی قرار گرفتند و خصوصیات ویسکوالاستیک خطی و عملکردی آنها مورد مقایسه قرار گرفت. با رسم منحنی جامع مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مختلف، ملاحظه شد اصلاح قیر با پودر لاستیک حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش درصد پودر لاستیک، مقاومت در برابر ترک خوردگی دماهای پایین، مقاومت در برابر ترک‌های خستگی و مقاومت در برابر خرابی شیارشدگی افزایش می‌یابد.

۱– مقدمه

به منظور بهبود خواص و رفتار قیر و در نتیجه بهبود عملکرد و دوام مخلوط‌های آسفالتی، علاوه بر قیر و مصالح متداول تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی، از مواد دیگری به نام افزودنی‌ها استفاده می‌شود. افزودنی‌ها موادی هستند که یا از پیش به قیر افزوده شده یا در حین تهیهٔ مخلوط‌های آسفالتی به واحد مخلوط کنندهٔ کارخانهٔ آسفالت اضافه می‌شوند. این ترکیبات طیف وسیعی از مواد معدنی، آلی، طبیعی و صنعتی را در بر می‌گیرند.

پودر لاستیک از مشهورترین اصلاح‌کننده‌های قیر به شمار می‌رود و تحقیق درباره قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و استفاده از آن در آمریکا، کانادا و سایر کشورها به چندین دهه قبل بازمی‌گردد. مطالعات و تجربیات گذشته نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با پودر لاستیک دارای مزایای بسیاری نظیر افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی‌های سطحی، خستگی و انعکاسی، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالتی، افزایش نقطه نرمی و حالت ارتجاعی قیر، کاهش حساسیت حرارتی، کاهش هزینه‌های نگهداری، کاهش صدای ترافیک، افزایش دوام روسازی آسفالتی و افزایش ایمنی ترافیک با مقاومت اصطکاکی بهتر و کاهش میزان آب پخش شده بر شیشه‌های اتومبیل‌ها در حین رانندگی زیر باران شدید و در نتیجه دید بهتر می‌باشد [۱-٤]. اخیراً استفاده از پودر لاستیک یک راهکار عملی برای خلاص شدن از تایرهای فرسوده است که در اکثر کشورها به ضایعات دردسرسازی تبدیل شده

است. به عنوان مثال، لایه آسفالتی اصطکاکی با دانه‌بندی باز (OGFC[1]) و میان‌لایه جاذب تنش (SAMI[2]) به ترتیب به طور متوسط ۵۳۰ و ۲۰۰۰ حلقه لاستیک فرسوده در هر خط در هر کیلومتر مصرف می‌کنند [۵].

پودر لاستیک دومین پلیمر مورد استفاده برای اصلاح و بهبود قیر پس از SBS است [۷]. تحقیقات بسیاری بر روی عوامل تأثیرگذار بر قیرهای حاوی پودر لاستیک انجام شده است و این نتیجه حاصل شده است که میزان بهبود عملکرد قیر پایه به عوامل بسیاری مانند اندازه ذرات پودر لاستیک، بافت سطحی ذرات پودر لاستیک، شرایط اختلاط قیر و پودر لاستیک، خصوصیات شیمیایی و فیزیکی قیر پایه و منبع تهیه آن بستگی دارد [۱۰-۷].

پودر لاستیک انواع مختلفی دارد، منابع آنها گسترده و اجزای تشکیل دهنده آنها متفاوت است؛ بنابراین، اثر آنها در اصلاح قیر پایه نیز مشابه نخواهد بود. قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک بایستی به طور صحیح انتخاب، طراحی، تولید و اجرا شوند تا عملکرد روسازی آسفالتی را بهبود بخشند [٤].

۲- عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودر لاستیک

۲-۱- عملکرد قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک

فرآیند افزودن پودر لاستیک به مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند به دو دسته گسترده تقسیم شود: فرآیند خشک و فرآیند تر. در فرآیند خشک، پودر لاستیک به سنگدانه‌ها افزوده می‌شود قبل از آن‌که قیر به مخلوط اضافه شود. در فرآیند تر، ابتـــدا قیـــر و پودر لاستیک در دمای بالا (۲۱۰-۱۷۷ درجه سانتیگراد) و شرایط مشخص مخلوط می‌شوند و سپس قیر اصلاح شده با سنگدانه‌ها مخلوط می‌شود. ذرات پودر لاستیک در فرآیند خشک معمولاً درشت‌تر از فرآیند تر هستند و به عنوان جزئی از دانه‌بندی سنگدانه‌ها محسوب می‌شوند (فیلر پودر لاستیکی نامیده می‌شود). در حالی که در فرآیند تر، ذرات ریز پودر لاستیک کاملاً با قیر واکنش می‌دهند و مشخصات قیر را بهبود می‌بخشند [٤].

پدیده جداشدگی در قیرهای حاوی پودر لاستیک رخ می‌دهد که این مشکل مهمی در پروژه‌ها به شمار می‌رود. سرعت ته نشینی ذرات پودر لاستیک در قیر پایه به گرانروی، چگالی قیر پایه و چگالی ذرات بستگی دارد و با مجذور شعاع اندازه ذرات پودر لاستیک متناسب است [۱۱]. افزودن پودر لاستیک به قیر گرانروی آن را افزایش می‌دهد و با افزایش مقدار پودر لاستیک مقدار گرانروی افزایش بیشتری می‌یابد [۱۲].

افزایش درصد پودر لاستیک نقطه نرمی قیر اصلاح شده را افزایش می‌دهد و مقاومت آن در برابر جاری شدن در دماهای بالا را بهبود می‌بخشد [۱۳، ١٤]. همچنین افزایش مقدار پودر لاستیک، مقاومت قیر اصلاح‌شده در برابر شیارشدگی را بهبود می‌دهد [۸، ۱۵ و ١٦].

با افزایش درصد پودر لاستیک، درجه نفوذ و کشش‌پذیری قیر اصلاح‌شده در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد و بازگشت الاستیک[3] آن افزایش می‌یابد. افزایش بازگشت الاستیک غالباً منجر به بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا و پایین می‌گردد [١٤، ١٦]. افزایش درصد پودر لاستیک مقاومت در برابر خستگی قیر اصلاح شده را افزایش می‌دهد و مقاومت آن در برابر ترک‌خوردگی در دماهای میانی بهبود می‌یابد [۱۵].

افزایش درصد پودر لاستیک کشش‌پذیری قیر اصلاح شده را در دماهای پایین کاهش می‌دهد. این در حالی است

[1] Open Graded Friction Course
[2] Stress Absorbing Membrane Interlayer
[3] Elastic Recovery

که نتیجه آزمایش رئومتر تیرچه خمشی[4] نشان می‌دهد که با افزایش درصد پودر لاستیک سختی خزشی کاهش می‌یابد، در نتیجه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دماهای پایین افزایش می‌یابد [۱۲، ۱۳].

افزایش درصد پودر لاستیک شاخص نفوذ[5] قیر اصلاح شده را افزایش می‌دهد. همچنین منحنی مدول مرکب برشی[6] و زاویه فاز[7] در آزمایش جاروب دما[8] و جاروب فرکانس[9] با دستگاه DSR نیز با افزایش درصد پودر لاستیک مسطح‌تر می‌شود و حساسیت حرارتی قیر اصلاح‌شده کاهش می‌یابد [۱۳، ۱۶]. همچنین افزایش درصد پودر لاستیک، انرژی فعالسازی قیر اصلاح شده را افزایش می‌دهد که بیانگر کاهش حساسیت حرارتی آن است [۱۴].

۲-۲- عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودر لاستیک

تحقیقات نشان داده است رفتار خستگی مخلوط آسفالتی حاوی پودر لاستیک نسبت به مخلوط شاهد، بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است. همچنین پودر لاستیک مقاومت در برابر پیرشدگی را نیز بهبود بخشیده است. قیر پیر شده، حساسیت مخلوط آسفالتی را نسبت به سطح تنش یا کرنش افزایش می‌دهد و ریسک بالقوه ترک‌های انقباضی و خستگی را بیشتر می‌کند در حالی که پودر لاستیک در بهبود پیرشدگی و توسعه عملکرد بلندمدت مخلوط آسفالتی مفید است [۱۹، ۲۰].

نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره شکاف دار (SCB[10]) نشان داد که عملکرد خستگی مخلوط‌های ساخته شده با پودر لاستیک به روش خشک و تر از مخلوط‌های شاهد بهتر است [۲۱-۲۳].

با افزایش درصد پودر لاستیک تا ۲۰٪، حداکثر بار تحمل شده و عمر خستگی افزایش می‌یابد. اما پس از آن با افزایش مقدار پودر لاستیک این مقدار بار تحمل شده و عمر خستگی کاهش می‌یابد. در ضمن در مخلوط‌های ساخته‌شده با قیر حاوی پودر لاستیک، مخلوط‌های با دانه‌بندی باز رفتار و عملکرد بهتر و عمر خستگی بیشتری نسبت به دانه‌بندی پیوسته دارند [۲۴].

۳- برنامه آزمایشگاهی

این پژوهش در شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با مقادیر مختلف پودر لاستیک و تهیه شده به روش تر در دماها و فرکانس‌های مختلف را با استفاده از آزمایش مدول دینامیکی مورد بررسی قرار داده است. در ادامه روش ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها توضیح داده می‌شود.

۳-۱- مواد و مصالح

رده‌بندی عملکردی قیر استفاده شده در این تحقیق PG58-22 است که به ترتیب با ۱۰٪ و ۲۰٪ وزنی پودر لاستیک مخلوط شده است. پودر لاستیک با اندازه ۰/۶-۰ میلیمتر تهیه و بر روی الک‌های مختلف طبق ASTM D5644 الک شد. سپس با توجه به ذرات موجود، دانه‌بندی ۲۰ مش (طبق ASTM D5603) درصد عبوری از الک‌های ۲۰#، ۳۰#، ۵۰# و ۸۰# به ترتیب برابر ۱۰۰، ۹۲، ۸ و ۰ انتخاب شد. پودر لاستیک مورد استفاده، از بازیافت لاستیک فرسوده کامیون به روش خرد کردن در دمای محیط تهیه شد. مصالح سنگی آهکی شکسته نیز از معدن اسب‌چران تهیه گردید. درصدهای عبوری از الک‌های ۱۹، ۱۲/۵، ۴/۷۵، ۲/۳۶، ۰/۳ و ۰/۰۷۵ میلیمتر به ترتیب برابر

[4] Bending Beam Rheometer
[5] Penetration Index
[6] Complex Shear Modulus, G*
[7] Phase Angle
[8] Temperature Sweep
[9] Frequency Sweep
[10] Notched Semi-Circular Bendibg Test

۱۰۰، ۹۲، ۵۵، ۳۸، ۱۰ و ۳ انتخاب شد. قیرهای اصلاح‌شده با پودر لاستیک با استفاده از مخلوط‌کن با سرعت برش بالا مخلوط شدند. قیر خالص در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد با ٪۱۰ و ٪۲۰ وزن قیر، پودر لاستیک و با سرعت ۶۵۰۰ rpm به مدت یک ساعت مخلوط شد. از روش طرح اختلاط سوپرپیو جهت تعیین مقدار قیر بهینه استفاده گردید. مقدار قیر بهینه با توجه به چگالی ۹۶ درصدی و تعداد چرخش طرح (Nd ۱۵۸)، معادل ٪۵/۵ به‌دست آمد. سپس نمونه‌ها با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۱۵۰ میلیمتر و درصد فضای خالی ٪۴±٪۰/۵ به روش ASTM D6925 متراکم شدند.

۳-۲- آزمایش مدول دینامیکی

با انجام آزمایش مدول دینامیکی بر روی مخلوط آسفالتی، مقادیر مدول دینامیکی و زاویه فاز نمونه آسفالتی در دماها و فرکانس‌های مختلف بارگذاری اندازه گیری و با برازش آن‌ها بر یک منحنی جامع، منحنی مشخصه مخلوط آسفالتی مورد نظر حاصل شد که از آن در طراحی ضخامت و تحلیل عملکرد روسازی استفاده می‌شود. این آزمایش طبق استاندارد AASHTO T 342 انجام شد. زمان مناسب مورد نیاز برای هر نمونه تا رسیدن به تعادل دمایی با توجه به دمای نمونه، دمای محیط و دمای هدف تعیین گردید. در این پژوهش، این آزمایش بر روی یک نمونه از دمای پایین به سمت دمای بالا و در هر دما از فرکانس بیشتر به کمتر انجام شد. محفظه دمایی بر روی یک دما تنظیم و به نمونه اجازه داده شد تا به تعادل دمایی برسد. سپس آزمایش مدول دینامیکی در فرکانس‌های مختلف انجام شد. در ادامه دما را افزایش داده و این فرآیند در هر دما تکرار گردید. سیستم جمع آوری و پردازش داده‌ها محاسبه ویژگی‌های ویسکوالاستیک خطی ماده با استفاده از نتایج پنج سیکل آخر هر فرکانس انجام شد. در این حالت فرض می‌شود پاسخ دینامیکی کرنش به یک حالت ثابت و پایدار رسیده است. جدول ۱ خلاصه‌ای از شرایط انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه‌ای از شرایط آزمایش مدول دینامیکی

دماهای آزمایش	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ (درجه سانتیگراد)
فرکانس‌ها در جاروب فرکانسی	۲۵، ۱۰، ۵، ۱، ۰/۵، ۰/۱ (هرتز)
تعداد سیکل در هر فرکانس	۲۰۶، ۲۰۶، ۱۰۶، ۲۶، ۱۵، ۱۵ (طبق ترتیب فوق)
حدود کرنش دینامیکی	سطوح تنش باید به نحوی کنترل شوند که کرنش برگشت‌پذیر بین ۵۰ تا ۱۵۰ میکروکرنش باشد.
پیش بارگذاری	۲۰۰ سیکل در فرکانس ۲۵ هرتز

۳-۳- مفاهیم نظری در آزمایش مدول دینامیکی

عدد مختلطی که در یک ماده ویسکوالاستیک خطی، تحت یک بار سینوسی پیوسته، تنش را به کرنش مرتبط می‌سازد، مدول مختلط نامیده می‌شود. بنابراین مدول مختلط به صورت رابطه ۱ تعریف می‌گردد:

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}(\cos\varphi + i\sin\varphi) = E' + iE'' \quad (۱)$$

که در آن σ_0 دامنه تنش، ε_0 دامنه کرنش و زاویه φ میزان تأخیر در کرنش ایجاد شده پس از اعمال بار است. مدول دینامیکی عبارت است از اندازه بردار مدول مختلط در صفحه مختلط؛ به عبارت دیگر طبق تعریف، مدول دینامیکی برابر با نسبت دامنه تنش دینامیکی به کرنش دینامیکی است (رابطه ۲).

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (۲)$$

رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی به سرعت بارگذاری و دما وابسته است. در نتیجه صحیح‌تر آن است

که مدول مختلط را به صورت $E^*(\omega,T)$ نشان دهیم. اثر دما و نرخ بارگذاری بر ویژگی‌های ویسکوالاستیک می‌توانند با اصل برهم نهی دما- زمان متناظر شوند. به کمک این اصل می‌توان با انتقال داده‌های آزمایش مدول دینامیکی در دماها و فرکانس‌های مختلف به موازات محور زمان یا فرکانس بارگذاری، یک منحنی جامع رسم کرد. تابع ضریب انتقال بر حسب دما را می‌توان با یک چندجمله‌ای درجه دوم برازش کرد (رابطه ۳).

$$\log a(T) = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 \qquad (۳)$$

که در آن ضریب انتقال به صورت تابعی از دما، دمای موردنظر و ضرایب چندجمله‌ای درجه دوم هستند. توابع مختلفی برای برازش بر منحنی جامع مدول دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش از روشی که پلینن و همکاران ارائه کردند، استفاده شده است. طبق این روش رابطه مدول دینامیکی با فرکانس کاهش یافته به صورت رابطه ٤ است.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta-\gamma\log f_R}} \qquad (٤)$$

که در آن $|E^*|$ مدول دینامیکی، f_R فرکانس کاهش یافته، δ مقدار مدول حداقل، α دامنه مقادیر مدول و β و γ ضرایب شکل هستند. پارامتر γ شیب تابع (نرخ تغییر بین مینیمم و ماکسیمم) و β محل افقی نقطه عطف را مشخص می‌کند.

۴- نتایج و تحلیل آن‌ها

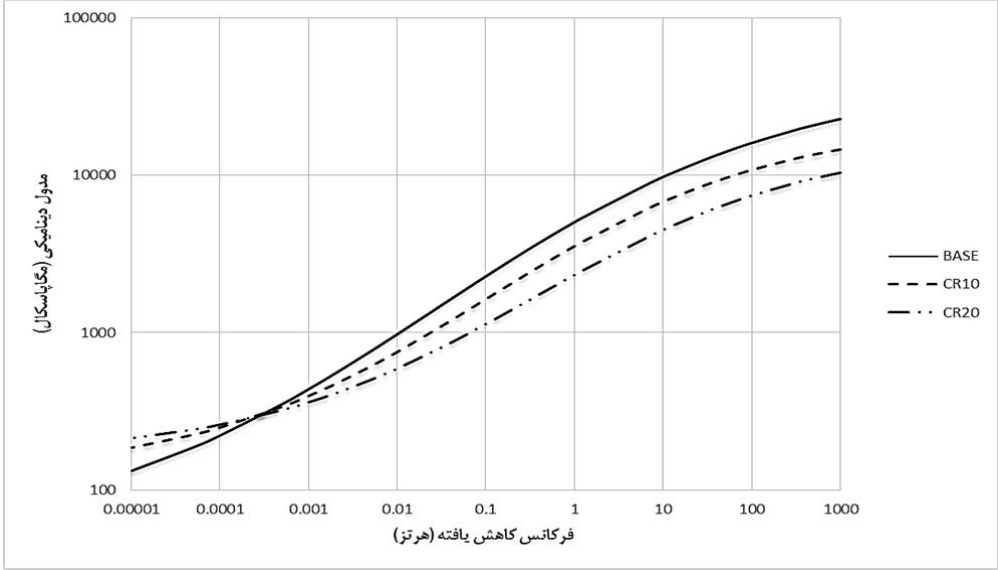
خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مدول دینامیکی در سطح کرنش‌های پایین تعیین می‌شود. مدول دینامیکی، زاویه فاز، فرکانس و دما چهار پارامتر اصلی این آزمایش هستند که برای تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

خصوصیات ویسکوالاستیک هر مخلوط آسفالتی، ویژگی بنیادی آن مخلوط است که امکان مقایسه رفتار و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مختلف با یکدیگر را فراهم می‌سازد. در شکل‌های ۱ تا ۳ منحنی جامع مدول دینامیکی و زاویه فاز مخلوط‌های مختلف به کمک اصل برهم نهی دما- زمان رسم شده است. در رسم منحنی جامع مدول دینامیکی، دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، به عنوان دمای مرجع انتخاب شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی با افزایش دما (کاهش فرکانس)، کاهش می‌یابد و برعکس. در بالاترین فرکانس‌ها (دماهای پایین)، بیشترین مقدار مدول دینامیکی و در پایین‌ترین فرکانس‌ها (دماهای بالا)، کمترین مقدار مدول دینامیکی مربوط به مخلوط شاهد است ،یعنی پودر لاستیک عملکرد در دماهای بالا و پایین را نسبت به مخلوط شاهد بهبود می‌بخشند. مخلوط آسفالتی مطلوب، آن است که در دماهای بالا مقدار مدول بیشتری داشته باشد، یعنی سفت‌تر باشد تا در برابر شیارشدگی مقاوم باشد و از سوی دیگر در دماهای پایین مدول دینامیکی کمتری داشته باشد، یعنی نرم‌تر باشد تا پتانسیل ترک خوردن آن کاهش یابد.

در فرکانس‌های پایین (دماهای بالا) با افزایش درصد پودر لاستیک مقدار مدول دینامیکی افزایش می‌یابد. یعنی افزایش درصد پودر لاستیک باعث بهبود عملکرد در دماهای بالا و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود. این یافته همخوانی مناسبی با نتایج گذشته دارد و صحت پژوهش‌های پیشین را تأیید می‌کند. بیشترین مقدار مدول دینامیکی در این فرکانس‌ها، یعنی بهترین عملکرد در دماهای بالا، مربوط به مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ۲۰ درصد پودر لاستیک است. مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ۱۰ درصد پودر لاستیک نیز مقدار مدول بیشتری (عملکرد بهتری) نسبت به مخلوط شاهد دارد. علت این

مسأله به افزایش گرانروی و افزایش سفتی قیرهای اصلاح‌شده بازمی‌گردد که باعث می‌شود مقاومت شیارشدگی بهتری در این مخلوط‌ها مشاهده شود.

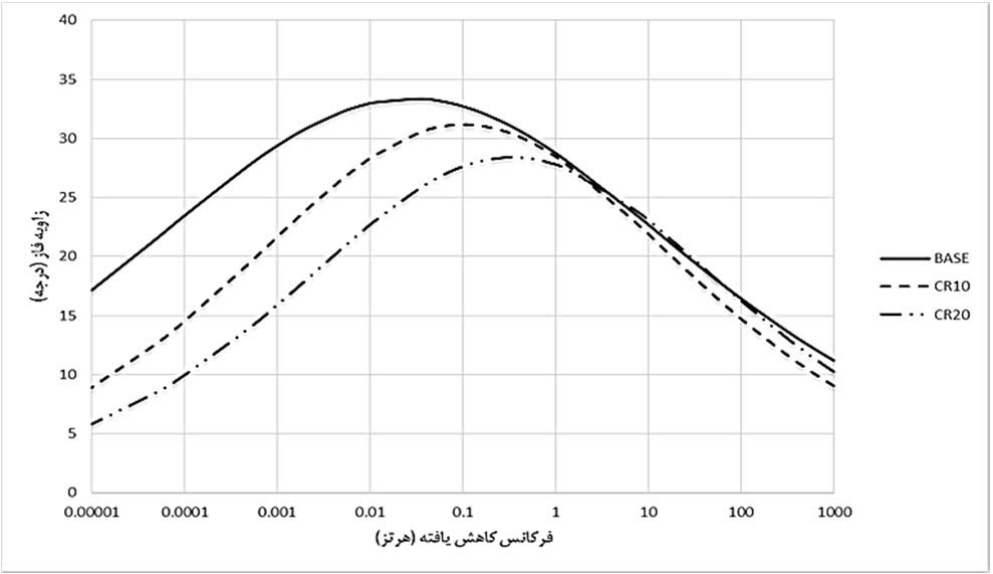


شکل ۱- منحنی جامع مدول دینامیکی مخلوط‌های مختلف درفضای لگاریتمی

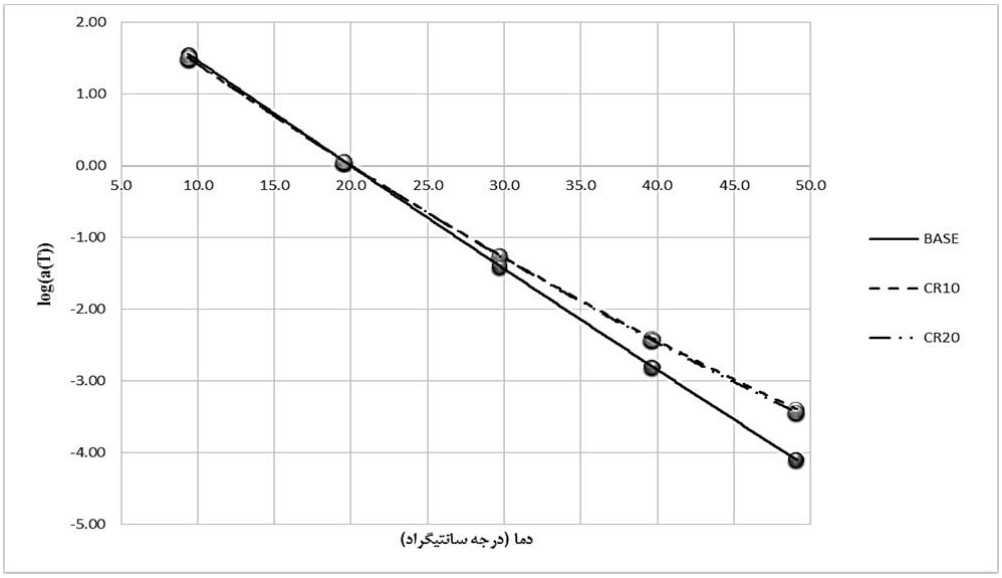
در فرکانس‌های بالا (دماهای پایین) با افزایش درصد پودر لاستیک مقدار مدول دینامیکی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد و مقاومت در برابر ترک خوردگی دماهای پایین بهبود می‌یابد. کمترین مقدار مدول دینامیکی در این فرکانس‌ها، یعنی بهترین عملکرد در دماهای پایین مربوط به مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ۲۰ درصد پودر لاستیک است. لازم به ذکر است تمامی مخلوط‌ها مقدار مدول کمتری (عملکرد بهتری) نسبت به مخلوط شاهد دارند. ذرات پودر لاستیک در دماهای پایین که قیر پایه بسیار سفت و سخت می‌شود، نرم و انعطاف‌پذیر باقی می‌مانند که منجر به نرم شدن کل مخلوط و کاهش مدول دینامیکی در دماهای پایین می‌شود.

مقدار مدول دینامیکی در دماهای میانی را می‌توان برای مقایسه عملکرد در دمای متوسط و مقاومت در برابر خستگی در نظر گرفت. مقایسه مقادیر مدول دینامیکی مخلوط‌های مختلف در دماهای میانی نشان می‌دهد که با افزایش درصد پودر لاستیک، سفتی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. احتمالاً به دلیل حالت کنترل کرنش در آزمایش خستگی تیرچه خمشی، عمر خستگی با افزایش درصد پودر لاستیک افزایش خواهد یافت.

اصلاح‌کننده‌های الاستومری نظیر پودر لاستیک که در این پژوهش استفاده شده است، معمولاً الاستیسیته مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهند. به منظور مقایسه این مسأله، منحنی جامع زاویه فاز در شکل ۲ رسم شده است. بر اساس تئوری ویسکوالاستیسیته هر چه زاویه فاز ماده کوچکتر باشد، رفتار آن الاستیک‌تر است. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود در فرکانس‌های بالا، با افزایش درصد پودر لاستیک مقدار زاویه فاز تغییر چندانی نمی‌کند، اما در فرکانس‌های پایین، زاویه فاز کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد مخلوط اصلاح‌شده با پودر لاستیک الاستیک‌تر است.



شکل ۲- منحنی جامع زاویه فاز مخلوط‌های مختلف



شکل ۳- لگاریتم ضریب انتقال بر حسب دما

لگاریتم ضرایب انتقال در اصل برهم نهی دما- زمان بر حسب دما در شکل ۳ رسم شده است. نکته قابل توجه در این شکل و معادلات درجه دوم برازش شده بر آنها این است که افزایش درصد پودر لاستیک تأثیری بر ضرایب انتقال نداشته و ضریب انتقال دمایی مخلوط‌های اصلاح‌شده با ۱۰ درصد و ۲۰ درصد پودر لاستیک یکسان به دست آمده است.

۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت اصلاح قیر با پودر لاستیک حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد. همچنین، می‌توان انتظار داشت که با افزایش درصد پودر لاستیک، مقاومت در برابر ترک خوردگی دماهای پایین، مقاومت در برابر ترک‌های خستگی و مقاومت در برابر خرابی شیارشدگی افزایش یابد. این

بدان معنی است که اصلاح قیر با پودر لاستیک مخصوصاً به میزان ۲۰ درصد وزنی قیر پایه، عملکرد مخلوط آسفالتی را بسیار بهبود می‌بخشد.

۶- مراجع

1. Hicks, Russell G., et al. "Crumb Rubber Modifier (CRM) in Asphalt Pavement: Summary of Practices in Arizona, California, and Florida." NASA 19980011594 (1995).
2. Liang, Robert Y., and Suckhong Lee. "Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixture." Transportation research record 1530.1 (1996): 11-17.
3. Huang, Baoshan, et al. "Louisiana experience with crumb rubber modified hot-mix asphalt pavement." Transportation Research Record 1789.1 (2002): 1-13.
4. Caltrans. "Asphalt rubber usage guide." (2006).
5. Amirkhanian, Serji N., and Mary ML Corley. "Utilization of Rubberized Asphalt in the United States." International Symposium on Pavement Recycling. (2005).
6. Shen, Junan, et al. "Recycling of Laboratory-Prepared Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures Containing Crumb Rubber–Modified Binders in Hot-Mix Asphalt." Transportation Research Record 1962.1 (2006): 71-78.
7. Yildirim, Yetkin. "Polymer modified asphalt binders." Construction and Building Materials 21.1 (2007): 66-72.
8. Lee, Soon-Jae, Chandra K. Akisetty, and Serji N. Amirkhanian. "The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements." Construction and Building Materials 22.7 (2008): 1368-1376.
9. Navarro, F. J., et al. "Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens." Fuel83.14-15 (2004): 2041-2049.
10. Bahia, Hussain U., and Robert Davies. "Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders." Asphalt paving technology 63 (1994): 414-414.
11. Shen, Zhong, and Guo-Ting Wang. "Colloid and surface chemistry." Chinese Chemical industry express, Beijing 9 (1997).
12. Ziari, Hasan, Ahmad Goli, and Amir Amini. "Effect of crumb rubber modifier on the performance properties of rubberized binders." Journal of Materials in Civil Engineering 28.12 (2016).
13. Liu, Shutang, et al. "Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt." Construction and Building Materials 23.7 (2009): 2701-2708.
14. Cong, Peiliang, et al. "Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts." Construction and Building Materials 40 (2013): 632-641.
15. Lyons, Kimberly. "Evaluation of rubber modified porous asphalt mixtures." (2012).
16. Nejad, Fereidoon Moghadas, et al. "Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods." Construction and Building Materials 26.1 (2012): 481-489.
17. Aflaki, Sassan, and Nader Tabatabaee. "Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran." Construction and Building Materials 23.6 (2009): 2141-2150.
18. Raad, Lutfi, and Stephan Saboundjian. "Fatigue behavior of rubber-modified pavements." Transportation research record: journal of the transportation research board 1639 (1998): 73-82.
19. Airey, Gordon D., Mujibur M. Rahman, and Andrew C. Collop. "Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method." International Journal of Pavement Engineering 4.2 (2003): 105-119.
20. Wang, Hainian, and Zhanping You. "Intermediate temperature fatigue and low temperature cracking properties of rubber asphalt binder." ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems. 2011. 4121-4131.
21. Arabani, M., and B. Ferdowsi. "Laboratory evaluating and comparison of the SCB Test results with other common tests for HMA mixtures." Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials (2007): 20-22.
22. Liu, Jing Hui. "Fatigue life evaluation of asphalt rubber mixtures using semi-circular bending test." Advanced Materials Research. Vol. 255. Trans Tech Publications (2011).
23. Wang, Hainian, et al. "Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixture." Construction and Building Materials 47 (2013): 1342-1349.