

## ارزیابی خصوصیات ویسکوالاستیک خطی مخلوط‌های آسفالتی کم‌انرژی اصلاح شده با پودر لاستیک

سعید مقیمی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
غلامعلی شفاابخش\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
حسن دیواندری، گروه مهندسی عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی  
Email: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

### چکیده

با توجه به مزایای مهم اقتصادی و زیست‌محیطی مخلوط آسفالت کم‌انرژی و نیاز به شناخت و بررسی بیشتر این آسفالت به دلیل اندک تحقیقات صورت گرفته، در این مقاله، به ارزیابی و بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک این نوع مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمایش مدول دینامیک پرداخته شد. به دلیل ضعف مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مزبور و با عنایت به ماهیت زیست-محیطی این نوع آسفالت، افزودنی سازگار با محیط‌زیست جهت اصلاح آن در اولویت قرار گرفت. از این رو، پودر لاستیک در سه سطح ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن قیر جهت اصلاح نمونه‌ها انتخاب گردید. نمونه‌های آسفالتی شاهد و اصلاح شده مطابق با روش سوپرپیو طراحی و متراکم شدند و جهت تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک آنها در دماها و فرکانس‌های مختلف تحت آزمایش مدول دینامیک قرار گرفتند. منحنی جامع مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که در دمای زیاد (فرکانس کم) بیشترین مدول دینامیک متعلق به مخلوط آسفالتی کم‌انرژی با ۱۵ درصد پودر لاستیک است. لذا، این مخلوط دارای بیشترین مقاومت شیارشدگی نسبت به سایر نمونه‌ها است. از طرفی، مقایسه منحنی جامع مخلوط‌های آسفالتی در دمای کم (فرکانس زیاد) به ترتیب نشان‌دهنده کم بودن سفتی نمونه‌های آسفالتی کم‌انرژی فاقد افزودنی و آسفالت کم‌انرژی دارای ۱۵ درصد افزودنی و مقاومت آنها در برابر ترک خوردگی بود. همچنین، ارزیابی خصوصیات ویسکوالاستیک نمونه‌های آزمایش مؤید این حقیقت بود که بیشترین خاصیت الاستیک متعلق به نمونه آسفالت کم‌انرژی اصلاح شده با ۱۵ درصد پودر لاستیک و ویسکوزترین مخلوط، نمونه آسفالتی داغ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت کم‌انرژی، پودر لاستیک، مدول دینامیک، ویسکوالاستیک خطی.

## ۱. مقدمه

وقوع انقلاب صنعتی در جهان و توسعه و پیشرفت تکنولوژی، آلودگی‌های زیست‌محیطی فراوانی را به دنبال داشته است که جوامع بشری را به شدت تهدید می‌کند. در حال حاضر، انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن کره زمین موجب تغییرات فراوانی در سیستم آب-وهوایی شده که عدم توجه به آنها، عواقب جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته است (گانفوس و ویزمن، ۲۰۲۱). در حال حاضر، راه‌حل‌های مقرون به صرفه‌ای وجود دارد که موجب سوق دادن جامعه جهانی به سمت اقتصادی پاک-تر و مقاوم‌تر می‌گردد. یکی از این راه‌حل‌ها، یافتن جایگزین‌هایی برای تولید آسفالت داغ (HMA) می‌باشد که به دلیل کاربرد زیاد آن، نقش مهمی جهت روکش سطح خیابان‌ها و جاده‌ها دارد (آکیستی و همکاران، ۲۰۱۱). HMA از اختلاط مصالح سنگی و قیر در دمای بیش از ۱۶۰ درجه سلسیوس تشکیل می‌شود که به علت دمای زیاد تولید، با مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای همچون  $CO_2$ ،  $SO_2$ ،  $CO$  و  $NO_x$  همراه است. این تأثیرات منفی زیست‌محیطی، تأثیری جز گرم شدن کره زمین ندارد (آکیستی و همکاران، ۲۰۱۱؛ رویو و همکاران، ۲۰۱۲؛ کاووسی و همکاران، ۲۰۱۴؛ صابری و همکاران، ۲۰۱۷؛ شیواکومار و سورشا، ۲۰۱۹). در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی جهت تولید مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از تکنولوژی‌های سبز صورت گرفته است که با کاهش دمای آسفالت در زمان تولید و تراکم موجب کم کردن نقاط منفی HMA شده است (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۴؛ رویو و همکاران، ۲۰۱۳). از جمله این اقدامات، تولید آسفالت کم‌انرژی (LEA) می‌باشد که جزو آسفالت‌های نیمه‌گرم (HWMA) با محدوده دمایی ۸۰-۱۰۰ درجه سلسیوس

است (دانجلو و همکاران، ۲۰۰۸؛ پرکینز و همکاران، ۲۰۰۹؛ ویتکاس و همکاران، ۲۰۱۶).

تکنولوژی آسفالت کم‌انرژی (LEA) برای اولین بار در سال ۲۰۰۶ میلادی توسط شرکت LEA-CO در فرانسه ایجاد شد. ساخت این آسفالت بر اساس پیروی از یک فرآیند ترتیبی می‌باشد، به طوری که در ابتدا مصالح سنگی به دو بخش درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم می‌شوند. مصالح درشت‌دانه همانند HMA تا دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس گرم شده و سپس با قیر داغ مخلوط می‌گردند. پس از ایجاد پوشش مناسب قیر و مصالح درشت‌دانه، مصالح ریزدانه به صورت مرطوب و در دمای محیط به مخلوط اضافه می‌گردند (خردمند و همکاران، ۲۰۱۴). اضافه شدن مصالح ریزدانه و رطوبت موجود در آن در مواجهه با مصالح درشت‌دانه و قیر موجب ایجاد کف در مخلوط شده و افزایش حجم قیر و کاهش کندروانی آن را به دنبال دارد. این موضوع امری سودمند قلمداد می‌شود و پوشش بهتر و سریع‌تر مصالح ریزدانه را نتیجه می‌دهد (آلارد و رومیر، ۲۰۱۱). از طرفی، پس از تماس مصالح ریزدانه مرطوب با مصالح درشت‌دانه قیراندود، هوای محبوس بین قیر و آب به اندازه کافی گرم شده و باعث تبدیل بخار آب به کف می‌گردد. اما از آنجا که این اتفاق در شرایط معمول در دمای کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد، دمای نهایی مخلوط در این فرآیند باید به صورت ایده‌آل کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس باشد. از جمله فواید دیگر این آسفالت، صرفه‌جویی قابل توجه آن در مصرف انرژی است که این موضوع به دلیل این واقعیت است که برای ایجاد پوشش قیری، تنها مصالح سنگی درشت‌دانه نیازمند دمایی بیشتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس هستند و هیچ انرژی جهت گرم کردن و خشک کردن مصالح ریزدانه مورد نیاز نمی‌باشد. همچنین، دمای کم این آسفالت در زمان اختلاط، تولید

<sup>3</sup>- Half warm mix asphalt

<sup>1</sup>- Hot mix asphalt

<sup>2</sup>- Low-energy asphalt

قبل از کوبیده شدن جهت بررسی میزان سخت‌شدگی قیر است. برای این منظور، از آزمایش مدل دینامیک به دلیل حساسیت این آزمایش به سختی قیر با تعیین نسبت مدول دینامیک مخلوط‌هایی که مجدداً گرم شده‌اند به نمونه‌های مترکم شده پس از اختلاط استفاده شد. طبق نتایج ارائه شده، نسبت مزبور برای مخلوط آسفالتی داغ ۲۰ درصد بزرگتر از مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم گزارش گردید که این اختلاف به علت حساسیت کمتر مخلوط LEA نسبت به پیرشدگی کوتاه‌مدت و سخت‌شدگی قیر قلمداد شد. از دیگر نتایج قابل توجه در پژوهش مذکور، برابر بودن این پارامتر برای مخلوط آسفالتی LEA و مخلوط اصلاح شده با آسفامین بود و همچنین، کمتر بودن این نسبت برای مخلوط آسفالتی کم‌انرژی نسبت به مخلوط گرم اصلاح شده با ساسوبیت از دیگر یافته‌های مهم این تحقیق گزارش گردید (بوناکوئیست و همکاران، ۲۰۱۱).

سامه و همکاران (۲۰۱۲)، به مقایسه مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی LEA و HMA و ترسیم نمودار جامع برای این آزمایش پرداختند. طبق نتایج به‌دست آمده، اختلاف چندانی بین مدول دینامیک مخلوط‌های یاد شده مشاهده نگردید، اگرچه مدول دینامیک مخلوط LEA در فرکانس‌های زیاد کمتر از مدول ثبت شده برای آسفالت HMA گزارش شد.

آلارد و گادفری (۲۰۱۱)، تأثیر روش‌های ساخت مخلوط‌های LEA بر مدول دینامیک و مقایسه آنها با آسفالت HMA را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق دلالت بر کاهش مدول دینامیک نمونه‌های LEA نسبت به نمونه آسفالت HMA داشت. در تحقیقی دیگر، زللو و همکاران (۲۰۱۳) خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی گرم و نیمه‌گرم را بررسی نمودند. برای این منظور، مدول دینامیک مخلوط‌های HMA و LEA و مخلوط‌های آسفالتی گرم اصلاح شده با ادورا، ساسوبیت

گازهای گلخانه‌ای و انتشار مواد فرار ناشی از حرارت دادن قیر را به حداقل می‌رساند. لذا، از این جهت، این آسفالت را می‌توان به عنوان مخلوطی سازگار با محیط و طبیعت نامید (رومیر و همکاران، ۲۰۰۶؛ هارد و همکاران، ۲۰۰۸؛ آلارد و همکاران، ۲۰۰۹a؛ آلارد و گادفری، ۲۰۱۱). علاوه بر این، ایجاد کف و به تبع آن کاهش ویسکوزیته قیر و نیز نرم بودن مخلوط به دلیل کاهش پیرشدگی قیر، از جمله عواملی است که موجب افزایش تراکم‌پذیری بیشتر این آسفالت می‌گردد (آلارد و همکاران، ۲۰۰۹b؛ گادفری و همکاران، ۲۰۰۹). افزایش ضریب ایمنی برای کارگران در زمان اجرا به جهت کم بودن دما و نیز نیاز کمتر حلال جهت شستن و نظافت تجهیزات در پایان عملیات اجرایی روزانه، از دیگر نکات برجسته استفاده از این مخلوط می‌باشد (گرگوری و هارد، ۲۰۰۷؛ کارتر و همکاران، ۲۰۱۰).

## ۲. مطالعات پیشین

از زمان ابداع مخلوط آسفالت کم‌انرژی تا کنون، تحقیقات کمی در خصوص مشخصات این آسفالت، به-خصوص خصوصیات ویسکوالاستیک آن، صورت گرفته است. در این بخش، به خلاصه‌ای از این تحقیقات اشاره می‌گردد.

از جمله تحقیقات صورت گرفته در خصوص مدول دینامیک آسفالت‌های LEA، پژوهشی است که در گزارش NCHRP<sup>1</sup>691 ارائه شده است. طبق نتایج این گزارش، مخلوط آسفالتی کم‌انرژی نسبت به مخلوط آسفالتی داغ، دارای مدول دینامیک کمتر در تمام بازه‌های فرکانسی و دمایی بود. دلیل این امر، سفتی بیشتر قیر به علت دمای زیادتر اختلاط و پخت در مخلوط‌های آسفالتی متداول گزارش گردید. دیگر ارزیابی صورت گرفته در این تحقیق، مقایسه مقدار حساسیت مخلوط‌های گرم و نیمه‌گرم نسبت به گرمایش مجدد آنها

<sup>1</sup>- National cooperative highway research program

### ۳. هدف تحقیق

هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی خصوصیات ویسکوالاستیک خطی آسفالت LEA می‌باشد. جهت پوشش تمام نقاط ضعف این آسفالت و نیز ماهیت زیست‌محیطی آن، از افزودنی پودر لاستیک جهت اصلاح قیر استفاده گردید. نمونه‌های آسفالت HMA و LEA فاقد افزودنی به عنوان نمونه‌های شاهد، جهت مقایسه تأثیر این افزودنی بر LEA و تعیین درصد بهینه آن به کار گرفته شد. جهت ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک این آسفالت، از آزمایش مدول دینامیک استفاده گردید و با ترسیم منحنی جامع و تعیین مدول دینامیک در بازه وسیع‌تری از دما و فرکانس، عملکرد این آسفالت و تأثیر افزودنی پودر لاستیک در بهبود خصوصیات آن هدف انجام این تحقیق قرار گرفت.

#### ۳-۱. مصالح سنگی و قیر

با توجه به حضور آب به عنوان یک عنصر اصلی در فرآیند تولید LEA و نیز آب‌دوست بودن مصالح سیلیسی و ضعف چسبندگی آنها با قیر، در این پژوهش، از مصالح آهکی جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردید. در جدول ۱، مشخصات این مصالح در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، حد وسط دانه‌بندی پیوسته مخلوط‌های آسفالتی داغ مربوط به قشر توپکا با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر ارائه شده در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران مطابق شکل ۱، به عنوان محدوده دانه‌بندی انتخاب گردید (آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۹۰). جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی نیز از قیر ۶۰/۷۰ استفاده شد که مشخصات فیزیکی آن مطابق جدول ۲ است.

و جنکور تعیین گردید. طبق نتایج به دست آمده، مخلوط‌های آسفالتی HMA و اصلاح شده با ساسوبیت مقادیر سفتی زیادتری را نسبت به سایر نمونه‌ها در فرکانس‌های کمتر از خود به جای گذاشتند. در حالی که برای نمونه‌های LEA و اصلاح شده با جنکور، مدول دینامیک تقریباً یکسانی گزارش شد. کمترین مدول دینامیک در این بازه فرکانسی، به نمونه اصلاح شده با ادورا تعلق گرفت. همچنین، بررسی منحنی جامع ترسیم شده از این آزمایش نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی HMA و اصلاح شده با ادورا دارای بیشترین سفتی در دماهای کم و میانی بودند و کمترین مقدار مدول دینامیک نیز نسبت به سایر نمونه‌ها در این بازه دمایی برای مخلوط LEA ثبت گردید.

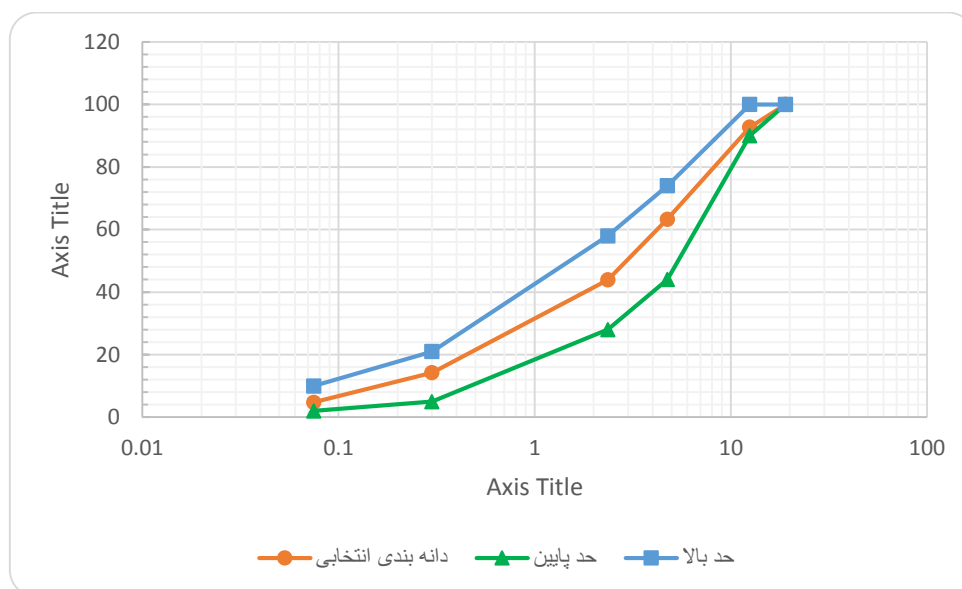
علاوه بر این، گرگوری و همکاران (۲۰۰۷)، در پروژه‌ای برای NYSDOT<sup>۱</sup> به بررسی آزمایشگاهی و میدانی مشخصات و عملکرد آسفالت کم‌انرژی اجرا شده در کشور فرانسه پرداختند. لذا، جهت انجام آزمایش‌های مورد نظر، نمونه‌های متعددی از آسفالت تولید شده در کارخانه برداشت و مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اهمیت مدول دینامیک و استفاده از نتایج آن در طراحی مخلوط مطابق NCHRP 9-29 این آزمایش در سه دما و چهار فرکانس مختلف برای نمونه‌های LEA و HMA انجام گرفت. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده کاهش مدول دینامیک نمونه‌های LEA نسبت به نمونه‌های HMA بود که این موضوع به دلیل پیرشدگی کمتر و در نتیجه سفتی کمتر قیر در حین تولید آسفالت بیان شد. همچنین، مقایسه نمونه‌های LEA ساخته شده با RAP<sup>۲</sup> و بدون RAP نشان‌دهنده افزایش مقادیر مدول دینامیک برای نمونه‌های دارای RAP بود که دلیل آن، مخلوط شدن قیر خالص و قیر موجود در RAP و در نهایت تبدیل قیری سفت‌تر برای مخلوط گزارش شد.

<sup>2</sup>- Reclaimed asphalt pavement

<sup>1</sup>- New York State Department of Transportation

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی

نتایج آزمایش			استاندارد	مشخصه
فیلر	ماسه	درشت دانه		
-	۶۹	-	AASHTO-T176	ارزش ماسه‌ای
-	-	۱۷	AASHTO-T96	درصد افت وزنی در برابر سایش
غیرخمیری	غیرخمیری	-	PI	حدود اتربرگ
-	-	-	PL	
غیرقابل تعیین	غیرقابل تعیین	-	LL	
-	-	۱۰۰	ASTM-D5821	درصد شکستگی مصالح سنگی در دو جبهه
-	۴۲/۵	-	ASTM-C1252	ضریب گوشه‌داری
-	-	کمتر از ۵ درصد	ASTM-D3625	تأثیر آب بر پوشش قیری مصالح سنگی
-	-	۱۵	BS-812	درصد تطویل
-	-	۱۴		درصد تورق
	۱		AASHTO-T104	درصد افت وزنی مصالح درشت‌دانه در برابر سولفات سدیم
	۳		AASHTO-T104	درصد افت وزنی مصالح ریزدانه در برابر سولفات سدیم



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر پایه

نتایج	روش آزمایش		آزمایش
	AASHTO	ASTM	
۱/۰۱۶	T228	D70	وزن مخصوص در ۲۵ °C
۶۳	T49	D5	درجه نفوذ در ۲۵ °C بر حسب ۱/۰ میلی‌متر
۴۹/۲	T53	D36	نقطه نرمی بر حسب درجه سلسیوس
۳۰۵	T48	D92	اشتعال بر حسب درجه سلسیوس
۷۷۳	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۲۰ °C (سانتی استوکس)
۳۴۲	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ °C (سانتی استوکس)
۱۴۱	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۶۰ °C (سانتی استوکس)
۰/۲۲	T179	D1754	لعب نازک قیر

### ۳-۲. افزودنی

از طرفی، تحقیقات صورت گرفته در خصوص عملکرد انواع پودر لاستیک و اندازه ذرات آن در اصلاح قیر و آسفالت نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با پودر لاستیک تولیدی به روش آسیاب محیطی به دلیل سطح ویژه بزرگتر و شکل نامنظم ذرات، دارای واکنش و فعل و انفعالات بهتری نسبت به قیر اصلاح شده با پودر به-دست آمده از روش برودتی می‌باشد (شیائو و همکاران، ۲۰۰۹b). همچنین، کاهش اندازه ذرات باعث افزایش مشخصاتی چون پایداری، ویسکوزیته، مدول سفتی قیر و مقاومت شیارشدگی آن می‌شود (جونز و همکاران، ۲۰۱۷). لذا، با توجه به ضعف آسفالت‌های LEA در برابر شیارشدگی، در این پژوهش استفاده از پودر لاستیک تولید شده به روش خردایش محیطی با اندازه ذرات درشت‌تر مورد هدف قرار گرفت و پودر با اندازه مش ۴۰ مطابق دانه‌بندی ارائه شده در جدول ۳ استفاده شد. همچنین، وفق تحقیقات گذشته جهت دستیابی به اختلاطی همگن با هدف رسیدن به بهترین شرایط عملکردی، دمای قیر در زمان اختلاط ۱۸۰ درجه سلسیوس انتخاب شد و از میکسر برش بالا با تعداد دوران ۲۰۰۰ دور بر دقیقه در مدت زمان ۲ ساعت استفاده گردید (آرتامندی و خالد، ۲۰۰۵؛ ممون و همکاران، ۲۰۱۳؛ مونرا و اوسا، ۲۰۱۴).

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم و نیز آسفالت کم‌انرژی، ضعف این مخلوط‌ها در برابر شیارشدگی به علت پیرشدگی کمتر قیر، ویسکوزیته کم آن و نرم بودن مخلوط محرز می‌باشد (وارگاس نردسبک و تیم ۲۰۱۲؛ شیائو و همکاران، ۲۰۰۹a؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۲؛ فخری و همکاران، ۲۰۱۳؛ زیاری و همکاران، ۲۰۱۳؛ لی و همکاران، ۲۰۱۵). از این‌رو، جهت پوشش دادن این ضعف و ارتقای سایر مشخصات آسفالت، از افزودنی پودر لاستیک، با توجه به خصوصیات شناخته شده آن، استفاده گردید. لازم به توضیح است که با توجه به ماهیت زیست‌محیطی آسفالت LEA و ارزان‌تر بودن پودر لاستیک نسبت به سایر افزودنی‌ها، این افزودنی بهترین انتخاب در این زمینه بود. لذا، استفاده از آن در راستای اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی تحقیق قرار گرفت. همچنین، با توجه به تحقیقات انجام شده در خصوص پودر لاستیک و تأثیر قابل توجه آن بر مشخصات عملکردی قیر و آسفالت در محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی قیر، در این پژوهش از پودر لاستیک در سه درصد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ استفاده گردید (برسی و همکاران، ۲۰۱۹).

لاستیک در سطحی معادل با واکنش فیزیکی ضروری به نظر می‌رسد، حل نشدن کامل ذرات افزودنی در داخل قیر می‌تواند مشکلات عدیده‌ای را به دنبال داشته باشد. قیر اصلاح شده با پودر لاستیک دارای ناهمگونی زیادی است و اختلاف بین چگالی قیر و ذرات لاستیک باعث ته‌نشین شدن این ذرات در داخل قیر شده و موجب کاهش قابلیت ذخیره‌سازی قیر اصلاح شده می‌گردد (برسی و همکاران، ۲۰۱۹). از این‌رو، در صورت عدم استفاده از افزودنی‌های تثبیت‌کننده در زمان اختلاط، قیر اصلاح شده پس از تولید باید در یک محدوده زمانی مشخص مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال، در ایالت کالیفرنیا، این بازه زمانی حداکثر به ۴ ساعت، در ایالت کانزاس به ۶ ساعت و در ایالت آریزونا به ۱۰ ساعت محدود شده است (محمدی راد و خباز، ۲۰۱۳). در این مقاله، با توجه به اهداف اقتصادی در تولید آسفالت LEA و قابل رقابت نمودن آن نسبت به آسفالت HMA، از افزودنی‌های تثبیت‌کننده در فرآیند اصلاح قیر استفاده نگردید. لذا، به جهت حذف نگرانی از عدم پایداری پودر لاستیک، قیر اصلاح شده بلافاصله پس از تولید، جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی به‌کار گرفته شد.

به طور کلی، واکنش پودر لاستیک و قیر در دو سطح فیزیکی و شیمیایی صورت می‌پذیرد. واکنش فیزیکی در دمای حدود ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه سلسیوس انجام می‌شود. در طول این واکنش، بخشی از ذرات کوچک لاستیک در داخل قیر حل می‌شود و یک ترکیب ژل‌مانند را به وجود می‌آورد. لازم به توضیح است که در این سطح از واکنش، تنها ۲۰ تا ۳۰ درصد ذرات پودر در داخل قیر حل می‌شود. زمانی که دما به ۲۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد، واکنش قیر و پودر لاستیک به سمت واکنشی شیمیایی میل می‌کند. در این مرحله از واکنش، سطح بالاتری از اکسیداسیون و تبخیر اتفاق می‌افتد. تحقیقات صورت گرفته در خصوص به‌کارگیری پودر لاستیک جهت اصلاح قیر نشان می‌دهد که حل شدن کامل پودر لاستیک در قیر مشخصات آن را بهبود نمی‌دهد. همچنین، افزایش دما می‌تواند باعث شکسته شدن زنجیره‌های بزرگ پلیمری شکل گرفته در داخل قیر گردد. لذا، بیشترین تأثیر پودر لاستیک در اصلاح قیر، زمانی اتفاق می‌افتد که فرایند حل شدن به صورت کامل صورت نپذیرد؛ اما قیر به اندازه کافی متورم شده و واکنش در سطحی معادل با واکنش فیزیکی انجام گیرد (محمدی راد و خباز، ۲۰۱۳). از طرفی، در شرایطی که نگه داشتن واکنش قیر و پودر

جدول ۳. دانه‌بندی پودر لاستیک

شماره الک	درصد عبوری
No. 30 (850 $\mu\text{m}$ )	۱۰۰
No. 40 (600 $\mu\text{m}$ )	۸۹
No. 50 (425 $\mu\text{m}$ )	۵۷/۷
No. 80 (300 $\mu\text{m}$ )	۲۳
No. 100 (150 $\mu\text{m}$ )	۱۸/۳

### ۳-۳. طرح اختلاط

در این تحقیق، جهت طراحی نمونه‌های LEA، دستورالعمل ارائه شده در گزارش NCHRP 691 ملاک عمل قرار گرفت. از این رو، روش اختلاط حجمی سوپریو مطابق استاندارد AASHTO'R35 برای ساخت نمونه‌های آسفالتی به کار گرفته شد. از جمله فاکتورهای مهم در ساخت آسفالت LEA، حداکثر اندازه مصالح ریزدانه می‌باشد که مطالعات صورت گرفته در خصوص این آسفالت نشان‌دهنده محدود شدن این عامل به ۲ تا ۳ میلی‌متر است (رومیر و همکاران، ۲۰۰۶؛ گریگوری و هارد، ۲۰۰۷؛ آلارد و همکاران، ۲۰۰۹a؛ گادفری و همکاران، ۲۰۰۹؛ آلارد و گادفری، ۲۰۱۱؛ سامه و همکاران، ۲۰۱۲). لذا، در این تحقیق از الک شماره ۸ به عنوان جداکننده بخش درشت‌دانه و ریزدانه مرطوب استفاده شد. از طرفی، مهمترین محدودیت در ساخت آسفالت LEA قرار گرفتن دمای اختلاط در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس است. همانطور که قبلاً به آن اشاره شد، دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در زمان اختلاط یک مقدار حدی به‌شمار می‌رود. بالا رفتن دمای اختلاط از این مقدار، موجب بخار شدن حجم زیادی از آب و کاهش مقدار کف در مخلوط می‌گردد. لذا، این امر، از دست یافتن به اهداف طرح، یعنی کاهش ویسکوزیته قیر و افزایش حجم آن جهت پوشش بهتر مصالح سنگی، می‌کاهد. همچنین، کمتر بودن دمای اختلاط از ۸۰ درجه سلسیوس نیز بر سفتی قیر می‌افزاید. در نتیجه، پوشش-پذیری مصالح سنگی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. قرار گرفتن دمای اختلاط در محدوده یاد شده وابسته به عوامل زیادی از جمله دمای مصالح سنگی درشت‌دانه، دمای قیر و درصد رطوبت مصالح ریزدانه است. وجود این متغیرها باعث پیچیدگی بسیار جهت دستیابی به این محدوده دمایی در زمان اختلاط می‌شود. جهت رفع این مشکل، گزارش NCHRP 691 متغیرهای

یادشده را به مقادیر خاصی محدود نموده است. بنا بر گزارش مزبور، درصد رطوبت مصالح ریزدانه بین ۳ تا ۴ درصد وزنی آن توصیه شده است. همچنین، به جهت اطمینان از خشک شدن مصالح درشت‌دانه، مصالح مزبور باید به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس در داخل آون قرار گیرد و مصالح ریزدانه نیز بدون حرارت دادن در دمای محیط به کار گرفته می‌شود. نکته دیگر در ساخت LEA انتخاب دمای قیر می‌باشد. بنا بر توصیه گزارش یاد شده، این دما به ۱۳۰ درجه سلسیوس محدود شده است (بوناکوئیست و همکاران، ۲۰۱۱). در این تحقیق، جهت ساخت نمونه‌های LEA مطابق آنچه بیان شد، ابتدا مصالح درشت‌دانه و قیر به ترتیب تا دمای ۱۷۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس گرم گردید. سپس، مصالح درشت‌دانه در همزنی سیمی با قیر مخلوط شد و پس از گذشت حداقل ۳۰ ثانیه و اطمینان از پوشش ۱۰۰ درصدی مخلوط به دست آمده، مصالح ریزدانه با میزان رطوبت ۳/۵ درصد وزنی به یکباره به مخلوط اضافه گردید. تماس رطوبت با قیر داغ موجب ایجاد کف مطابق شکل ۲ شد و پس از آن عملیات اختلاط تا پوشش کامل مصالح ریزدانه ادامه یافت. همچنین، با توجه به ضرورت قرار گرفتن محدوده دمایی LEA در بازه ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس و نیز ماهیت نیمه‌گرم بودن آن و تأثیر این دما در کاهش مصرف انرژی و تراکم‌پذیری آسفالت، دمای مخلوط پس از هر مرحله عملیات اختلاط ثبت گردید. نمونه‌های یاد شده در تعداد دورانی برابر با ۱۰۰ دور بر دقیقه با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده ژیراتوری مطابق استاندارد AASHTO T 312 متراکم شد. جهت تعیین درصد قیر بهینه، آزمایش‌های لازم روی نمونه‌های متراکم شده و متراکم نشده صورت پذیرفت و مشخصات حجمی مخلوط و درصد قیر بهینه و دمای نهایی اختلاط برای هر یک از نمونه‌های یاد شده مطابق جدول ۴ ثبت گردید.



جدول ۴. مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی

دمای اختلاط (°C)	Pa (%)	VFA (%)	VMA (%)	Va (%)	Gmb	Gmm	مشخصات مخلوط آسفالتی
۱۶۰	۴/۶	۷۳/۸۲	۱۴/۹۷	۳/۹۲	۲/۳۵۳	۲/۴۴۹	مخلوط آسفالتی HMA
۹۰	۴/۴	۷۲/۱۴	۱۴/۲۴	۳/۹۷	۲/۳۶۸	۲/۴۶۶	مخلوط آسفالتی LEA
۹۲	۴/۶	۷۳/۳۷	۱۵/۰۶	۴/۰۱	۲/۳۵۱	۲/۴۴۷	مخلوط آسفالتی LEA اصلاح شده با ۱۰ درصد پودر لاستیک
۹۲	۴/۷	۷۴/۰۵	۱۵/۱۶	۳/۹۳	۲/۳۵۳	۲/۴۴۹	مخلوط آسفالتی LEA اصلاح شده با ۱۵ درصد پودر لاستیک
۹۸	۵/۳	۷۴/۰۵	۱۵/۴۵	۳/۹۴	۲/۳۵۴	۲/۴۵۱	مخلوط آسفالتی LEA اصلاح شده با ۲۰ درصد پودر لاستیک



شکل ۲. ایجاد کف در نمونه LEA

می‌گذارد (تن و همکاران، ۲۰۲۰). میزان این تأخیر که زاویه فاز نام دارد، فاصله کرنش محوری از تنش فشاری می‌باشد که با  $\theta$  نمایش داده می‌شود. مطابق تعریف فوق، مدول مختلط مطابق رابطه (۱) تعریف می‌گردد (کوچیشی و همکاران، ۲۰۲۱).

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \theta)}} = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \theta)} \quad (1)$$

### ۳-۴. روش آزمایش

مدول دینامیک در مصالح ویسکوالاستیک خطی روشی بسیار کاربردی جهت ارزیابی و تحلیل رفتار مکانیکی آنها می‌باشد. این پارامتر در مصالح آسفالتی به عنوان مصالحی که اغلب رفتار ویسکوالاستیک خطی دارند نسبت تنش به کرنش تحت یک بارگذاری پیوسته سینوسی در یک دامنه فرکانس تعریف می‌شود. زمانی که مخلوط آسفالتی تحت یک تنش سینوسی قرار می‌گیرد، به طور مشابه کرنشی سینوسی را با تأخیر از خود به جای

به منظور تحلیل مشخصات ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی در محدوده وسیع‌تر دما و فرکانس، ایجاد یک منحنی جامع روشی مرسوم می‌باشد. این منحنی با استفاده از اصل برهم نهی زمان - دما ایجاد می‌شود. نکته اساسی در ترسیم این منحنی انتخاب یک دما به عنوان دمای مرجع و انتقال سایر داده‌ها به فرکانس معادل آن دمای مرجع با تعیین ضرایب انتقال می‌باشد که این ضرایب مطابق رابطه (۴) تعریف می‌شود (خسروی فر و همکاران، ۲۰۱۵).

$$\alpha_T = \frac{f}{fr} \quad , \quad \log(fr) = \log(\alpha_T) + \log(f) \quad (4)$$

که در آن  $\alpha_T$  ضریب انتقال به عنوان تابعی از دما،  $f$  فرکانس بارگذاری برحسب هرتز و  $fr$  فرکانس کاهش یافته در دمای مرجع بر حسب هرتز است.

همچنین، یک معادله درجه دو مطابق رابطه (۵) جهت ارائه رابطه لگاریتم ضریب انتقال و دما استفاده می‌شود.

$$\log(\alpha_T) = mT^2 + nT + P \quad (5)$$

که در آن  $\alpha_T$  ضریب انتقال،  $T$  دمای مورد نظر و  $m$ ،  $n$  و  $P$  پارامترهای برازش می‌باشند که از برازش منحنی قابل دستیابی‌اند.

جهت تعیین ضرایب انتقال، روش‌های مختلفی همچون معادلات<sup>۱</sup> WLF، آرنیوس و معادلات لگاریتمی - خطی ارائه شده است که در این تحقیق از روش آرنیوس به شرح رابطه (۶) جهت به‌دست آوردن ضرایب انتقال استفاده شده است (قابچی و همکاران، ۲۰۱۶؛ ویتزک، ۲۰۰۵).

$$\log(\alpha_T) = C \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (6)$$

که در آن  $T$  و  $T_r$  دمای آزمایش و دمای مرجع بر حسب کلونین می‌باشد.

پس از انتقال مدول‌های دینامیک به‌دست آمده در دماهای مختلف به مدول دینامیک معادل آن‌ها در دمای

که در آن  $E^*$  مدول مختلط،  $\sigma_0$  ماکزیمم تنش،  $\epsilon_0$  کرنش حداکثر،  $\theta$  زاویه فاز برحسب درجه،  $w$  فرکانس زاویه‌ای بر حسب درجه بر ثانیه و  $t$  زمان بر حسب ثانیه است.

به طور کلی، مدول مختلط از مجموع دو بخش به‌دست می‌آید. قسمت اول، انرژی ذخیره شده مصالح ویسکوالاستیک تحت تنش متناوب می‌باشد که مدول ذخیره شده نام دارد. این پارامتر، نشان‌دهنده رفتار الاستیک مخلوط آسفالتی است و قسمت دوم انرژی اتلاف شده می‌باشد که نشان‌دهنده رفتار ویسکوز مخلوط آسفالتی است. قدر مطلق مدول مختلط پارامتری است که مدول دینامیک نامیده می‌شود و توسط رابطه (۲) قابل تعیین می‌باشد (کوچیشی و همکاران، ۲۰۲۱).

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

که در آن  $|E^*|$  مدول دینامیک،  $E'$  مدول ذخیره یا مدول الاستیک و  $E''$  مدول تلف شده یا مدول ویسکوز می‌باشد. همچنین، زاویه فاز مطابق رابطه (۳) با تعیین نسبت مدول ذخیره شده به انرژی اتلاف شده به‌دست می‌آید که معیاری جهت اندازه‌گیری میرایی مواد می‌باشد (تن و همکاران، ۲۰۲۰).

$$\tan \theta = \frac{E''}{E'} \quad (3)$$

آزمایش مدول دینامیک روشی استاندارد و مرسوم جهت تعیین مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی در دماها و فرکانس‌های مختلف است. این آزمایش، ارائه‌دهنده مشخصاتی از مخلوط‌های آسفالتی است که سفتی و انعطاف‌پذیری آنها را تحت بارهای تکراری ترافیک عبوری در یک دمای مشخص نشان می‌دهد. مخلوط‌های آسفالتی سفت‌تر در دماهای بیشتر دارای مدول دینامیک بیشتر و زاویه فاز کمتری می‌باشند که این امر منجر به کرنش کمتر آنها تحت تنش به‌کار رفته شده و مقاومت زیادتر آنها در برابر شیارشدگی و البته ضعف آنها در برابر ترک‌خوردگی در دماهای کمتر را به دنبال دارد (پودولسکی و همکاران، ۲۰۲۱).

<sup>1</sup>- William-Lundley-Fry

اندازه‌گیری تغییرشکل‌های فشاری تجمعی در محل‌های از پیش تعیین‌شده نصب شد. پس از جایگذاری نمونه، دیسک فولادی روی آن قرار گرفت و نمونه آماده برگزاری گردید. جهت محافظت نمونه‌ها در برابر خرابی در زمان بارگذاری یک بار تماسی برابر با ۵ درصد بار دینامیک اعمال شد و در نهایت بار دینامیک به صورت سینوسی و چرخه‌ای به‌کار گرفته شد. لازم به توضیح است که با توجه به رفتار ویسکوالاستیک خطی مخلوط‌های آسفالتی، مقدار این بار جهت دست یافتن به کرنش‌های محوری ۵۰ تا ۱۵۰ میکرو استرین محدود گردید. در این پژوهش، آزمایش مدول دینامیک در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه تهران با به‌کارگیری دستگاه UTM 5P صورت پذیرفت و نمونه‌های مخلوط آسفالتی با انجام سه بار تکرار در فرکانس‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۵ و ۱۰ هرتز و در چهار دمای ۴/۴، ۲۱/۱، ۳۷/۸ و ۵۴/۴ درجه سلسیوس مطابق شکل ۳ تحت آزمایش قرار گرفت. همچنین، به منظور بازیابی نمونه‌ها، زمان استراحتی برابر با ۱۰ دقیقه در فواصل بارگذاری اعمال شد (AASHTO T342-11، ۲۰۱۱).

مرجع، نمودار جامع با برازش کلیه داده‌ها بر اساس یک مدل سیگموئید مطابق رابطه (۷) قابل تعیین می‌باشد.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(fr))}} \quad (7)$$

که در آن  $|E^*|$  مدول دینامیک بر حسب مگاپاسکال،  $fr$  فرکانس کاهش‌یافته بر حسب هرتز و  $\delta$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$  ضرایب تابع سیگموئید می‌باشند. مقادیر  $\delta$  و  $\beta$  را ضرایب شکل می‌نامند.  $\delta$  مجانب پایینی و  $\alpha$  اختلاف مجانب پایینی و بالایی در منحنی سیگموئید است. با استفاده از قابلیت سالور و روش بهینه‌سازی در نرم‌افزار اکسل، کلیه پارامترهای فوق به همراه ضریب C در رابطه آرنیوس به دست می‌آید (ویتزک، ۲۰۰۵).

در این پژوهش، آزمایش مدول دینامیک بر اساس استاندارد AASHTO T342-11 انجام گرفته است. ابتدا نمونه‌هایی استوانه‌ای در فضای خالی ۷٪ و در اندازه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد. سپس هر یک از نمونه‌ها جهت رسیدن به تعادل دمایی در داخل محفظه‌ای قرار گرفت. قبل از قرارگیری نمونه‌ها در قالب بارگذاری، کرنش‌سنج‌های محوری جهت



شکل ۳. نمونه استوانه‌ای در حین انجام آزمایش مدول دینامیک

## ۴. نتایج و تحلیل

### ۴-۱. منحنی جامع مدول دینامیک

منحنی جامع یکی از ابزارهای اساسی جهت بررسی و تحلیل رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی است. همانطور که در قسمت‌های قبل به آن پرداخته شد، ساخت این منحنی با انتخاب یک دما به‌عنوان دمای مرجع و انتقال سایر داده‌ها به کمک پارامتر انتقال<sup>۱</sup> و در نهایت برآزش مدل سیگموئید صورت می‌پذیرد. در این تحقیق، دمای ۲۱/۱ درجه سلسیوس به‌عنوان دمای مرجع در نظر گرفته شد و معادله پیشنهاد شده توسط آرنیوس جهت محاسبه ضرایب انتقال به‌کار گرفته شد. جهت تعیین مقادیر ضرایب تابع سیگموئید و مقدار ضریب C در معادله ضریب انتقال نیز از روش بهینه‌سازی توسط ابزار سالور در اکسل با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات غیرخطی استفاده گردید.

شکل ۴ ارائه‌دهنده منحنی‌های جامع مدول دینامیک نمونه‌های آزمایش است. همان‌طور که از بررسی منحنی‌های جامع قابل مشاهده است، منحنی جامع متعلق به نمونه فاقد افزودنی LEA پایین‌تر از منحنی جامع نمونه شاهد یا HMA قرار گرفته است. همچون نتایج سایر تحقیقات انجام شده درخصوص مخلوط‌های آسفالتی گرم و نیمه‌گرم، نمودار مزبور نشان‌دهنده کمتر بودن مدل دینامیک نمونه آسفالتی LEA نسبت به مدل دینامیک مخلوط آسفالتی داغ در تمام بازه‌های فرکانسی می‌باشد. دلیل این امر کاهش ویسکوزیته قیر و در نتیجه نرم‌تر شدن مخلوط قلمداد می‌گردد. با اضافه نمودن پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی کم‌انرژی، بر سفتی قیر افزوده می‌شود و همانطور که از نتایج پیداست این موضوع موجب افزایش مدول و بالا رفتن منحنی‌های جامع در تمام فرکانس‌ها برای نمونه‌های LEA اصلاح شده گردیده است. مقایسه منحنی جامع مخلوط آسفالتی شاهد

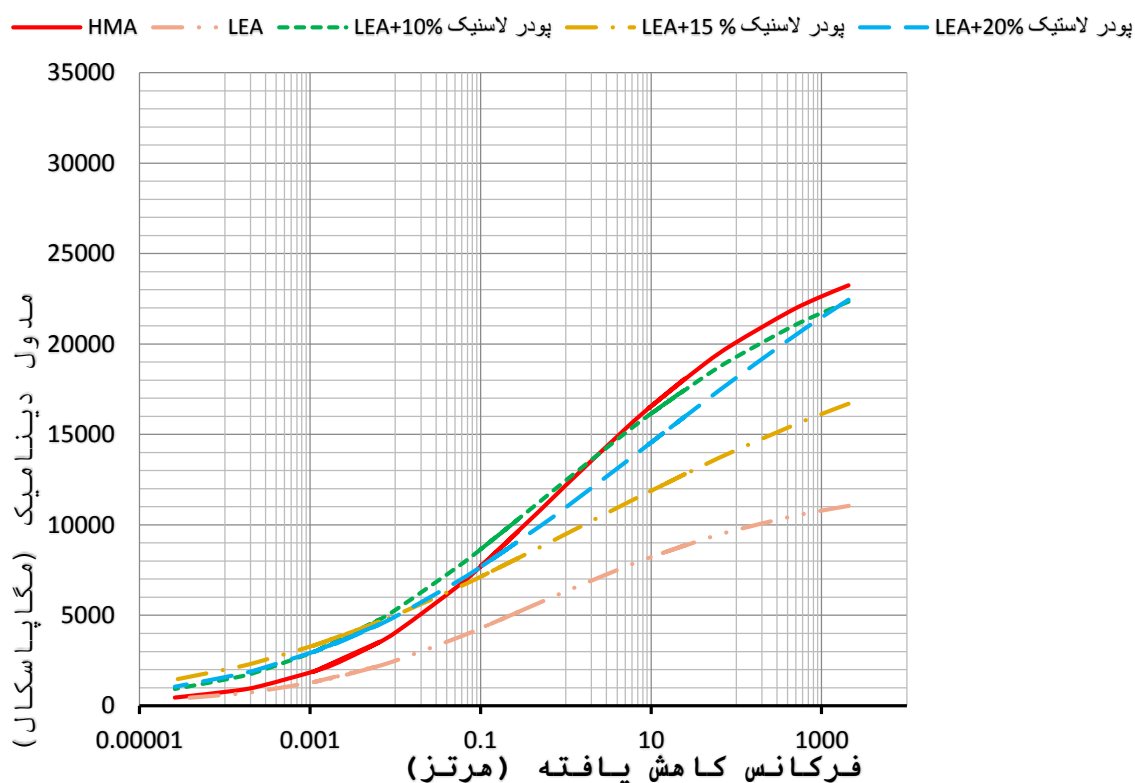
(HMA) با منحنی جامع مربوط به مخلوط‌های LEA اصلاح شده با پودر لاستیک، ارائه‌دهنده رویکردی متفاوت است. از آنجا که در دمای زیاد (فرکانس کم) تأثیر گرما در نرم شدن قیر بیشتر از ذرات پودر لاستیک می‌باشد، مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک به دلیل سختی بیشتر ذرات این افزودنی، سفت‌تر شده و در نتیجه مدول دینامیک بیشتری را نسبت به نمونه شاهد از خود به جای می‌گذارند. بنابراین، نمونه‌های LEA اصلاح شده با پودر لاستیک دارای مقاومت بیشتری در برابر شیارشدگی می‌باشند. دلیل دیگر این افزایش آن است که پودر لاستیک با اضافه شدن به قیر، با جذب روغن‌های آروماتیک، موجب تشکیل زنجیرهای پلیمری در داخل قیر می‌گردد. این پدیده نهایتاً تشکیل حالت ژل‌مانند برای قیر را به دنبال داشته و موجب افزایش کندروانی، افزایش الاستیسیته، افزایش فیلم قیر روی سنگدانه‌ها و پیوند قوی‌تر مخلوط می‌گردد. لذا، همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش مقدار پودر لاستیک از ۱۰ به ۱۵ درصد، بر سفتی مخلوط نیز افزوده شده به طوری که بیشترین مدول دینامیک بین نمونه‌های آزمایش برای نمونه LEA حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک ثبت گردیده است. از طرفی، افزایش درصد پودر لاستیک از ۱۵ به ۲۰ درصد، روندی معکوس را در زیاد شدن مدول دینامیک به‌جای گذاشته است. از آنجا که حضور بیشتر ذرات پودر لاستیک به دلیل جذب بیشتر روغن‌های موجود در قیر، موجب افزایش درصد بهینه قیر در این نمونه شده است، مدول دینامیک در این نمونه، بیشتر تحت تأثیر درصد قیر می‌باشد. لذا، افزایش درصد پودر لاستیک تأثیری در افزایش مدول دینامیک در این نمونه ندارد.

با افزایش فرکانس بارگذاری (کاهش دما) روند متفاوت در مقایسه مدل دینامیک نمونه‌های LEA اصلاح شده و نمونه شاهد (HMA) قابل مشاهده است. توجه به این نکته بسیار حائز اهمیت است که در اصلاح قیر

<sup>1</sup> - Shift factor

می‌گردد (محمدی راد و خباز، ۲۰۱۳؛ کاتمن و همکاران، ۲۰۱۵؛ عاملی و همکاران، ۲۰۲۰). این پدیده، در افزایش میزان پودر تا ۱۵ درصد قابل مشاهده است. اما با افزایش درصد پودر لاستیک از ۱۵ به ۲۰ درصد، به دلیل آنچه که در بالا به آن اشاره شد، مدول دینامیک بیشتر متأثر از میزان قیر در نمونه می‌باشد، و لذا افزایش درصد پودر تأثیری در کاهش مدول دینامیک ندارد.

توسط پودر لاستیک، تمام ذرات پودر در داخل قیر حل نمی‌شود و بخشی از آن به صورت دست نخورده باقی می‌ماند. بنابراین، ذرات پودر لاستیک باقی مانده مانند یک فیلر انعطاف‌پذیر در داخل مخلوط عمل کرده و از آنجا که در دمای کم، سفتی قیر از سفتی ذرات پودر لاستیک بیشتر است، وجود این ذرات موجب انعطاف‌پذیری مخلوط و در نتیجه کاهش چشمگیر مدول دینامیک آن



شکل ۴. منحنی جامع مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی

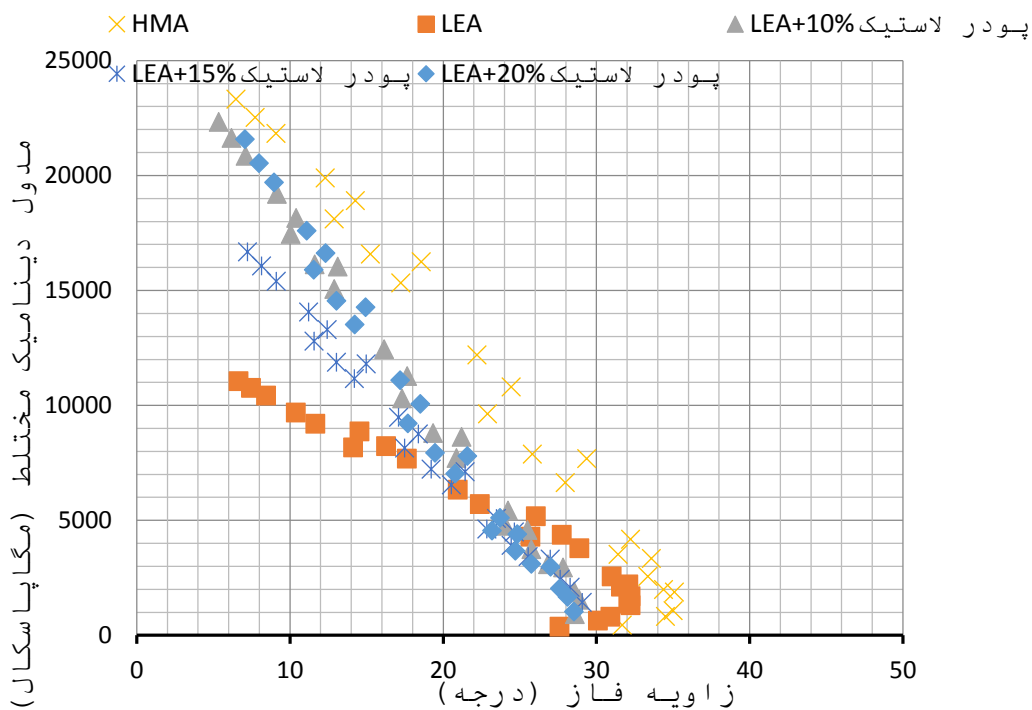
بیشتر است. از سوی دیگر، اگر زاویه فاز بیشتر باشد، مخلوط بیشتر حالت ویسکوز را دارد. همچنین، دیگر کاربرد این نمودار، ارزیابی میزان سفتی مخلوط می‌باشد. بدین صورت که زیاد بودن مدول دینامیک در این نمودار نشان‌دهنده میزان بالای سفتی مخلوط مورد آزمایش است (مورالس، ۲۰۱۳؛ منشینگ و همکاران، ۲۰۱۷). شکل ۵، ارائه‌دهنده این نمودار برای نمونه‌های HMA و سایر مخلوط‌های LEA می‌باشد. همانطور که از شکل

#### ۲-۴. نمودار Black space

نمودار black space نموداری است که ارائه‌دهنده مدول سفتی مختلط در برابر زاویه فاز مخلوط‌های آسفالتی است. این نمودار، ایزاری رئولوژیک است که از آن می‌توان جهت ارزیابی مشخصات مصالح، مانند سفتی و انعطاف‌پذیری مخلوط، استفاده کرد. نمودار black space به این صورت تفسیر می‌شود که اگر مخلوطی دارای زاویه فاز کمتر باشد، خاصیت الاستیک در آن مخلوط

ساختار قیر، خاصیت الاستیسیته مخلوط افزایش می‌یابد. اما این روند با افزایش درصد افزودنی از ۱۵ به ۲۰ درصد حالتی معکوس را به خود می‌گیرد که این امر به دلیل تأثیر منفی افزایش قیر بر میزان الاستیسیته نمونه حاوی ۲۰ درصد افزودنی است. همچنین، ارزیابی سفتی مخلوط‌های آزمایش نشان می‌دهد که در مخلوط HMA، به دلیل دمای زیادی اختلاط و تراکم، قیر دچار پیرشدگی و در نتیجه سخت‌شدگی بیشتر شده و لذا نمونه HMA سفت‌ترین مخلوط نسبت به سایر نمونه‌ها است. همچنین، نمونه LEA فاقد افزودنی به دلیل کندروانی کمتر قیر در زمان اختلاط و حضور آب و ایجاد کف، نرم‌تر بوده و از سفتی کمتری برخوردار است؛ امری که در تحقیقات سایر محققان نیز به آن اشاره شده است.

پیدا است، نمونه HMA دارای بیشترین زاویه فاز نسبت به سایر مخلوط‌ها می‌باشد. این موضوع، به دلیل درصد زیاد قیر در این مخلوط نسبت به نمونه LEA فاقد افزودنی و ویسکوز بودن قیر آن در مقایسه با نمونه‌های LEA حاوی افزودنی قلمداد می‌گردد. لذا، نمونه LEA فاقد افزودنی به دلیل زاویه فاز کمتر نسبت به نمونه HMA الاستیک‌تر است. با افزودن پودر لاستیک به مخلوط LEA، زاویه فاز کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد که این اتفاق به دلیل خاصیت الاستومری اصلاح‌کننده پودر لاستیک است. در این شرایط، بیشترین خاصیت الاستیک متعلق به نمونه LEA اصلاح شده با ۱۵ درصد پودر لاستیک است. به طوری که با افزایش درصد پودر لاستیک از ۱۰ به ۱۵ درصد، به دلیل افزایش تشکیل زنجیره‌های پلیمری در



شکل ۵. نمودار Black space مخلوط‌های آسفالتی

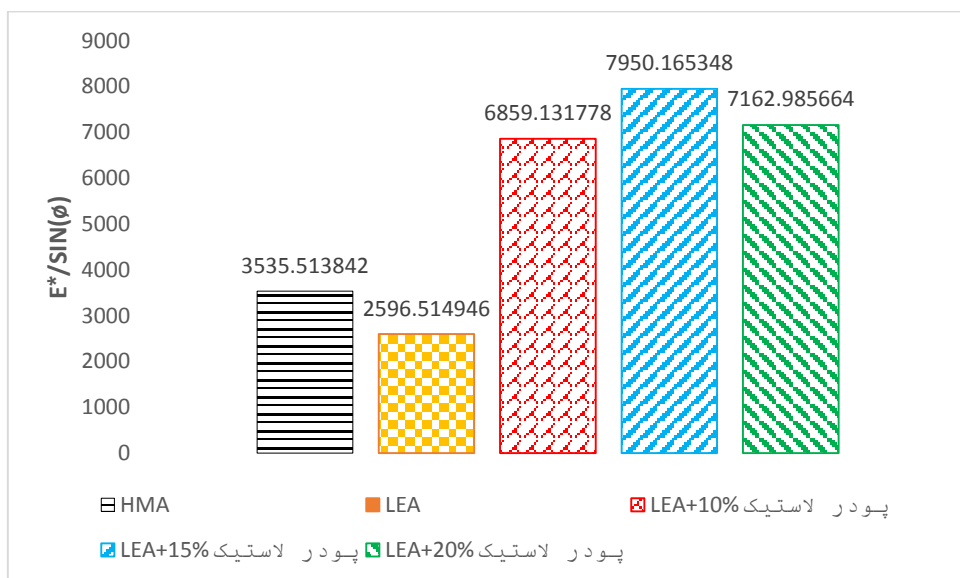
مدول دینامیک به سینوس زاویه فاز می‌باشد. ویتزک و همکاران (۲) با تعیین این نسبت در دمای ۵۴/۴ درجه سلسیوس و فرکانس ۵ هرتز، دریافتند که پارامتر مزبور

#### ۳-۴. پتانسیل شیارشدگی و خستگی

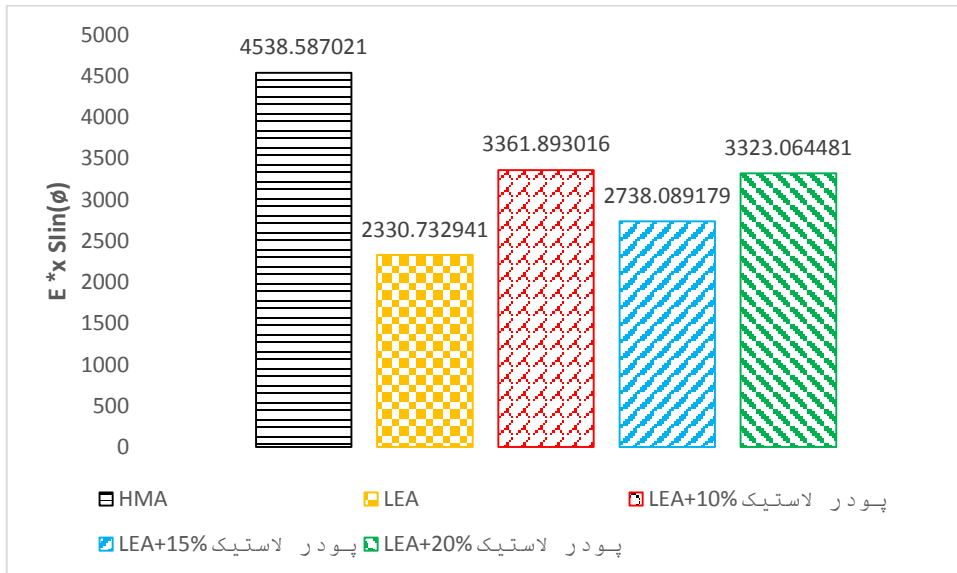
یکی از پارامترهای کاربردی جهت تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی، تعیین نسبت

هرتز بوده که معیار مناسبی برای مقایسه مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌های خستگی می‌باشد. همانطور که از شکل پیداست، نمونه HMA دارای بیشترین پارامتر ترک‌خوردگی و بیشترین مقاومت خستگی است. این امر می‌تواند به دلیل چسبندگی بیشتر قیر با مصالح سنگی و پیوستگی و انسجام بیشتر در ساختار کلی مخلوط قلمداد گردد. در این ارزیابی، نمونه LEA فاقد افزودنی ارائه‌دهنده کمترین مقاومت خستگی است. همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، دلیل ضعف این مخلوط، چسبندگی ضعیف قیر به مصالح سنگی به دلیل حضور آب و پیوستگی و انسجام کمتر آن می‌باشد. با افزودن پودر لاستیک به این مخلوط، ضعف در برابر ترک‌خوردگی بهبود می‌یابد. اما در مقایسه با نمونه HMA نقش رطوبت روی سطح مصالح کماکان در کاهش مقاومت خستگی پررنگ بوده و حضور افزودنی پودر لاستیک جوابگوی ضعف نمونه‌های LEA در برابر این خرابی نمی‌باشد.

تناسب بسیار مناسبی با پتانسیل شیارشدهای مخلوط‌های آسفالتی دارد. شکل ۶، ارائه‌دهنده مقادیر این پارامتر برای نمونه‌های آسفالتی HMA و LEA می‌باشد. همانطور که مشخص است، نمونه LEA فاقد افزودنی پارامتر شیارشدهای کمتر و مقاومت کمتری در برابر این خرابی نسبت به نمونه HMA دارد. کم بودن مقاومت این مخلوط همچون سایر مخلوط‌های آسفالتی گرم و نیمه‌گرم، به دلیل کم بودن کندروانی قیر و نرم بودن ساختار کلی مخلوط می‌باشد. با اضافه شدن پودر لاستیک، میزان الاستیسیته مخلوط افزایش می‌یابد. در نتیجه، تغییر شکل‌های ایجاد شده در دمای زیاد برگشت‌پذیر شده و نهایتاً منجر به کاهش میزان شیارشدهای این مخلوط می‌گردد. مقاومت ترک‌خوردگی از دیگر پارامترهایی است که با در اختیار داشتن مدول دینامیک و زاویه فاز قابل ارزیابی می‌باشد. این پارامتر، از حاصل ضرب مدول دینامیک در سینوس زاویه فاز در دماهای میانی تعیین می‌گردد. شکل ۷، نشان‌دهنده مقادیر مختلف این پارامتر در دمای ۲۱/۱ درجه سلسیوس و فرکانس ۵



شکل ۶. معیار شیارشدهای:  $E^*/\sin(\phi)$  در دمای ۵۴/۴ °C و فرکانس ۵ Hz



شکل ۷. معیار خستگی :  $E \times \sin(\theta)$  در دمای  $21/1 \text{ }^\circ\text{C}$  و فرکانس  $5 \text{ Hz}$

## ۵. نتیجه‌گیری

به نمونه آسفالت داغ به دلیل دمای زیادتر اختلاط و تراکم و در نتیجه پیرشدگی بیشتر آن نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.

- نمودار مدول دینامیک بر حسب زاویه فاز (منحنی black space) نشان داد که بیشترین خاصیت الاستیک متعلق به نمونه LEA اصلاح شده با ۱۵ درصد پودر لاستیک است و نمونه آسفالتی داغ ویسکوزترین مخلوط بین سایرین می‌باشد.
- ارزیابی میزان سفتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نمودار black space تأییدکننده سفتی بیشتر مخلوط آسفالتی داغ به دلیل پیرشدگی بیشتر و نرم‌تر بودن نمونه LEA فاقد افزودنی به دلیل کندروانی کمتر قیر در زمان اختلاط و حضور آب و ایجاد کف می‌باشد.
- پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامتر ویتراک نشان داد که بیشترین و کمترین مقاومت شیارشدگی به ترتیب متعلق به نمونه آسفالت کم‌انرژی حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک و نمونه آسفالت کم‌انرژی فاقد افزودنی می‌باشد.
- پتانسیل خستگی محاسبه شده برای نمونه‌های آزمایش، ارائه‌دهنده بیشترین مقاومت خستگی برای نمونه آسفالتی داغ و کمترین آن برای نمونه آسفالت کم‌انرژی فاقد افزودنی است.

در این مقاله، با انجام آزمایش مدول دینامیک و تعیین مدول و زاویه فاز در دماها و فرکانس‌های مختلف، رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی کم‌انرژی فاقد افزودنی و اصلاح شده با پودر لاستیک با مخلوط‌های آسفالتی داغ مطابق نتایج زیر مورد ارزیابی قرار گرفت:

- منحنی جامع مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که در دمای زیاد (فرکانس کم) بیشترین مدول دینامیک متعلق به مخلوط آسفالتی کم‌انرژی با ۱۵ درصد پودر لاستیک است. در این مخلوط زیست‌محیطی به دلیل آنکه سختی پودر لاستیک از قیر بیشتر بوده و تأثیر افزودنی نیز موجب برگشت‌پذیر بودن تغییرشکل‌های ماندگار می‌شود، مقاومت آن در برابر خرابی شیارشدگی نسبت به سایرین بیشتر است. در این ارزیابی، مخلوط آسفالتی فاقد افزودنی بیشترین پتانسیل شیارشدگی را دارد.
- مقایسه منحنی جامع مخلوط‌های آسفالتی در دمای کم (فرکانس زیاد) نشان‌دهنده نرم بودن مخلوط آسفالتی کم‌انرژی فاقد افزودنی نسبت به سایر نمونه‌ها است. در این ارزیابی، بیشترین سفتی متعلق



## ۶. مراجع

- نشریه ۲۳۴. ۱۳۹۰. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور.
- AASHTO T342-11. 2011. "Standard method of test for determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures". American Association of State and Highway Transportation Officials, USA.
- Akisetty, C., Xiao, F., Gandhi, T. and Amir Khanian S. 2011. "Estimating correlations between rheological and engineering properties of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm mix asphalt additive". *Constr. Build. Mater.*, 25(2): 950-956.
- Ameli, A., Norouzi, N., Hassanzadeh Khabbaz, E. and Babagoli, R. 2020. "Influence of anti stripping agents on performance of binders and asphalt mixtures containing crumb rubber and styrene-butadiene-rubber". *Constr. Build. Mater.*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119880>.
- Artamendi, I. and Khalid, H. 2005. "Dynamic and creep properties of binders modified with waste tyre rubber". *Proc. International Conferences on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim, Norway*.
- Bonaquist, R. 2011. "Mix design practices for warm mix asphalt". Research Report No. 691, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., USA.
- Bressi, S., Fiorentini, N., Huang J. and Losa, M. 2019. "Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: State of the art and statistics". *Coatings.*, 9(6): 384.
- Carter, A., Mainardis, O. and Perraton, D. 2010. "Design of half-warm asphalt mixes with additives". 89<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, H., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, J., Newcomb, D., Prowell, D., Sines, R. and Yeaton, B. 2008. "Warm-mix asphalt: European practice". Research Report No. FHWA-PL-08-007, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.
- Fakhri, M., Ghanizadeh, A. R. and Omrani, H. 2013. "Comparison of fatigue resistance of HMA and WMA mixtures modified by SBS". 2<sup>nd</sup> Conference of Transportation Research Group of India, Agra, India, pp. 168-177.
- Gaudefroy, V., Olard, F., Ridane, M., Beduneau, E. and de La Roche, C. 2009. "Laboratory environmental assessment of half-warm mix asphalts by means of the factorial experiment design approach". 88<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Ghabchi, R., Singh, D., Zaman, M. and Hossain, Z. 2016. "Laboratory characterisation of asphalt mixes containing RAP and RAS". *International Journal of Pavement Engineering.*, 179: 829-846.
- Gregory, A. and Harder, P. E. 2007. "LEA halfwarm mix paving report" Retrieved from LEA-UK website: <http://www.lea-uk.biz>.
- Gunfaus, M. T. and Waisman, H. 2021. "Assessing the adequacy of the global response to the Paris Agreement: Toward a full appraisal of climate ambition and action". *Earth System Governance.*, 8, <https://doi.org/10.1016/j.esg.2021.100102>
- Harder, G., LeGoff, Y., Loustau, A., Martineau, Y., Heritier, B. and Romier A. 2008. "Energy and environmental gains of warm and half-warm asphalt mix: Quantitative approach". 87<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Jones, D., Liang, Y. and Harvey, J. 2017. "Performance based specifications: Literature review on increasing crumb rubber usage by adding small amounts of crumb rubber modifier in hot mix asphalt". Pavement Research Center, University of California, USA.
- Katman, H. Y., Ibrahim, M. R., Karim, M. R., Mashaan, N. S. and Koting, S. 2015. "Evaluation of permanent deformation of unmodified and rubber-reinforced SMA asphalt mixtures using dynamic creep test". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, <https://doi.org/10.1155/2015/247149>
- Kavussi, A., Qorbani, M., Khodaii, A. and Haghshenas, H. F. 2014. "Moisture susceptibility of warm mix asphalt: A statistical analysis of the laboratory testing results". *Constr. Build. Mater.*, 52: 511-517.
- Kheradmand, B., Muniandy, R., Teik Hua, L., Bt. Yunus, R. and Solouki, A. 2014. "An overview of the emerging warm mix asphalt technology". *Int. J. Pavement Eng.*, 15: 79-94.
- Khosravifar, S., Schwartz, W. C. and Goulias, G. D. 2015. "Mechanistic structural properties of foamed asphalt stabilised base materials". *Int. J. Pavement Eng.*, 16(1): 27-38.
- Kuchiishi, A. K., Vasconcelos, K. and Bdiani Bernucci, L. L. 2021. "Effect of mixture composition on the mechanical behaviour of cold recycled asphalt mixtures". *International Journal of Pavement Engineering.*, 22(8): 984-994.

- Li, X., Xie, Z., Fan, W., Wang, L. and Shen, J. 2015. "Selecting warm mix asphalt additives by the properties of warm mix asphalt mixtures– China experience". *Baltic J. Road Bridge Eng.*, 10(1): 79-88.
- Memon, N. A., Ansari, K. and Alamani, Z. A. 2013. "Effect of variation in blending variables on the properties of CRMB". *Mehran Univ. Res. J. Eng. Technol.*, 32(2): 175-182.
- Mensching, J. D., Rowe, M. G. and Daniel, J. S. 2017. "A mixture-based black space parameter for low-temperature performance of hot mix asphalt". *Road Mater. Pavement Design*, 18: 404-425, doi/10.1080/14680629.2016.1266770
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamed, G. and Roshani, H. 2014. "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements". *Road Mater. Pavement Design.*, 15: 207-219.
- Mohammadi Rodd, I. I. and Khabbaz, H. 2013. "Challenges associated with optimisation of blending, mixing and compaction temperatures for asphalt mixture modified with crumb rubber modifier (CRM)". *Appl. Mech. Mater.*, 256-259: 1837-1844.
- Morales Vega, A. M. 2013. "Exploring the black space of compressive and shear modulus". Master Thesis, University of Arkansas, USA.
- Munera, J. C. and Ossa, E. A. 2014. "Polymer modified bitumen: Optimization and selection". *Mater. Design*, 62: 91-97.
- Olard, F., Jullien, A., Baudru, Y., Ventura, A. and Tamagny, P. 2009. "Environmental comparison at industrial scale of hot and half-warm mix asphalt manufacturing processes". 88<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Olard, F., Beduneau, E., Seignez, N., Dupriet, S. and Bonneau, D. 2009. "Laboratory performance-based assessment of half-warm mix asphalts with high recycling rate by means of the factorial experiment design approach". *Adv. Test. Character. Bitumin. Mater.*, Retrieved from <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9780203092989/chapters/10.1201%2F9780203092989-70>
- Olard, F. and Gaudefroy V. 2011. "Laboratory assessment of mechanical performance and fume emissions of LEA® HWMA (90°C) vs. traditional HMA (160°C)". 2<sup>nd</sup> International Warm-mix Conference, St. Louis, USA.
- Olard, F. and Romier, A. 2011. "Low emission and low energy asphalts for sustainable road construction The European experience of LEA process". Retrieved from LEA-UK website: <http://www.lea-uk.biz>
- Perkins, S. W. 2009. "Synthesis of warm mix asphalt paving strategies for use in montana highway construction". Research Report No. FHWA/MT-09-009/8117-38, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.
- Podolsky, H. J., Chen, C., Buss, F. B., Williams, R. C. and Cochran, W. E. 2021. "Effect of bio-derived/chemical additives on HMA and WMA compaction and dynamic modulus performance". *Int. J. Pavement Eng.*, 22(5): 613-624.
- Romier, A., Audeon, M., David, J., Martineau, Y. and Olard, F. 2006. "Low-energy asphalt with performance of hot-mix asphalt". *Transp. Res. Record: J. Transp. Res. Board*, 1962(1): 101-112.
- Rubio, C. M., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F. 2012. "Warm mix asphalt: An overview". *J. Clean. Prod.*, 24: 76-84.
- Rubio, M. D. C., Moreno, F., Martínez-Echevarría, M. J., Martínez, G. and Vázquez, J. M. 2013. "Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt". *J. Clean. Prod.*, 41: 1-6.
- Saberi, K. F., Fakhri, M. and Azami, A. 2017. "Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber". *J. Clean. Prod.*, 165: 1125-1132.
- Shiva Kumar, G. and Suresha, S.N. 2019. "State of the art review on mix design and mechanical properties of warm mix asphalt". *Road Mater. Pavement Design.*, 20: 1501-1524.
- Somé, C., Gaudefroy, V. and Delaunay, D. 2012. "Warm mix asphalt: Mechanical performance assessment and coating quality evaluation". 2<sup>nd</sup> International Symposium on Asphalt Pavement and Environment, Ann Arbor, USA.
- Tan, G., Wang, W., Cheng, Y., Wang, Y. and Zhu, Y. 2020. "Master curve establishment and complex modulus evaluation of SBS-modified asphalt mixture reinforced with basalt fiber based on generalized sigmoidal model". *J. Polym.*, 12(7): 1586. <https://doi.org/10.3390/polym12071586>
- Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A., Vorobjovas, V. and Perveneckas, Z. 2016. "Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties". *Constr. Build. Mater.*, 112: 800-806.
- Vargas-Nordbeck, A. and Timm, D. H. 2012. "Rutting characterization of warm mix asphalt and high RAP mixtures". *Road Mater. Pavement Design.*, 13(1): 1-20.
- Witczak, M. W. 2002. "Simple performance test for superpave mix design". Research Report No. 465, National Cooperative Highway Research Program, Washington D.C., USA.

- Witczak, M. W. 2005. "Simple performance tests: Summary of recommended methods and database". Research Report No. 547, National Cooperative Highway Research Program, Washington D.C., USA.
- Xiao, F., Amirhanian, S. N., Shen, J. and Putman, B. 2009a. "Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures". *J. Constr. Build. Mater.*, 23: 1028-1034.
- Xiao, F., Wenbin Zhao, Z. and Amirhanian, S. N. 2009b. "Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives". *Constr. Build. Mater.*, 23: 3144-3151.
- Zeleeuw, H., Paugh, C., Corrigan, M., Belagutti, S. and Ramakrishnareddy, J. 2013. "Laboratory evaluation of the mechanical properties of plant-produced warm-mix asphalt mixtures". *Road Mater. Pavement Design.*, 14(1): 49-70.
- Zhao, W., Xiao, F., Amirhanian, S. N. and Putman, B. J. 2012. "Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 31: 265-272.
- Ziari, H., Behbahani, H., Izadi, A. and Nasr, D. 2013. "Long term performance of warm mix asphalt versus hot mix asphalt". *J. Central South Univ.*, 20: 256-266.