



ارزیابی مشخصات مقاومتی مخلوط های آسفالتی حاوی پودر لاستیک

سید علی صحاف، سبحان سلیمانی گلسفیدی، رضا عطاریان

۱- استادیار راه و ترابری دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی دکترا، مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد
asahaf@um.ac.ir

خلاصه

استفاده از قیرهای لاستیکی به طور گسترده ای شناخته شده است. با افزودن پودر لاستیک، پیشرفت در خصوصیات دمای پایین مخلوط های آسفالتی اثبات شده است. ذرات لاستیکی می توانند تولید ترک را مسدود کنند و منجر به بهبود خصوصیات درجه حرارت پایین بایندر شوند. بررسی ها نشان می دهد که خصوصیات دمای پایین قیر اصلاح شده با پودر لاستیک (CRMB) توسط عواملی مانند خصوصیات آسفالت، خواص پودر لاستیک، دمای مخلوط کردن، زمان اختلاط، نوع مخلوط کردن و ترکیب آن وابسته است. در این مطالعه سعی شده تا با مرور تحقیقات صورت گرفته در زمینه قیر لاستیکی، مشخصات مقاومتی مخلوط های آسفالتی حاوی این افزودنی ارزیابی شده و مقایسه ای با مشخصات عملکردی مخلوط های آسفالتی فاقد افزودنی و دارای افزودنی های اصلاح کننده صورت پذیرد.

کلمات کلیدی: قیر لاستیکی، مخلوط آسفالتی، مشخصات مقاومتی، ارزیابی عملکرد

۱. تعریف قیر لاستیکی

تولید قیر لاستیکی یک فرآیند مشتمل بر عملیاتی است که لاستیک های فرسوده را به مواد آسفالتی مفید تبدیل می کند. افزودن لاستیک خرد شده به آسفالت به روشهای مختلفی انجام می شود. در حال حاضر، این روش ها به عنوان رویکرد مرطوب و رویکرد خشک طبقه بندی می شوند [۱]. ثابت شده است که اصلاح پودر لاستیک با استفاده از روش مرطوب باعث بهبود مقاومت در دمای کم مخلوط های آسفالتی می شود. روند تعامل بین پودر لاستیک و قیر اثر مستقیمی در بهبود عملکرد محصول نهایی دارد. با وجود جذب اجزای سبک در قیر، پودر لاستیک می تواند تا سه یا پنج برابر حجم اصلی خود متورم شود [۲]. عوامل زیادی بر خواص CRMB تأثیر دارند. این عوامل شامل نوع قیر، مقدار پودر لاستیک، نوع پودر لاستیک، اندازه ذرات، پارامترهای تولید از قبیل زمان اختلاط، دمای مخلوط کردن، نوع مخلوط کردن و غیره می باشند. انتخاب صحیح متغیرهای تولید تأثیر قابل توجهی در خواص CRMB دارند.

۱.۱. مزایای پودر لاستیک

پودر لاستیک سبب افزایش ویسکوزیته قیر در دماهای بالا و افزایش انعطاف پذیر در دماهای پایین می گردد. به عبارتی خواص رئولوژیکی قیر در دماهای سرد و گرم بهبود می یابد (سبب افزایش دامنه عملکردی می شود). کاهش صدای ناشی از ترافیک، مقاومت در برابر شیارشدگی و کاهش کرنش های ماندگار و افزایش عمر خستگی از دیگر مزایای استفاده از پودر لاستیک در مخلوط آسفالتی می باشد [۲ و ۱].

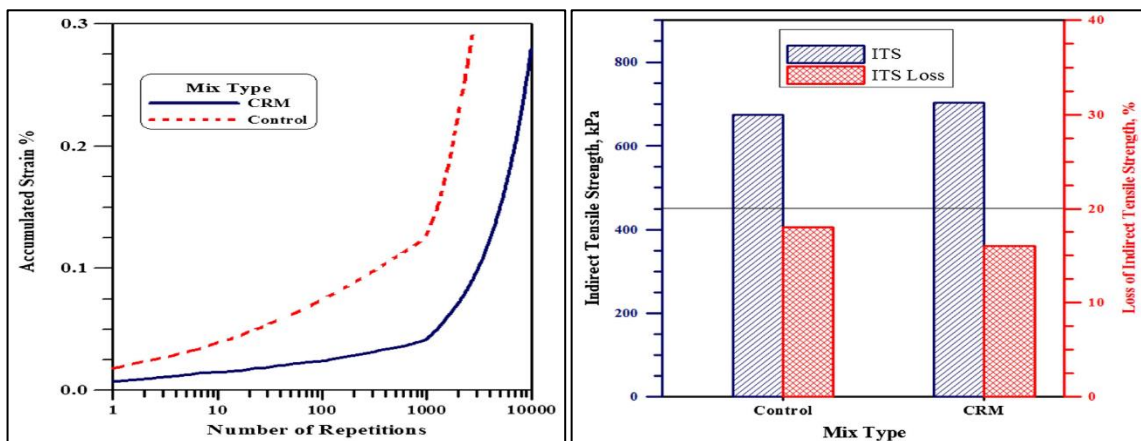
۲.۱. معایب پودر لاستیک

با افزایش درصد پودر لاستیک، فضای خالی مخلوط افزایش یافته و سبب افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط خواهد شد. با افزایش کندروانی قیر و به عبارتی با سخت شدن قیر، تراکم مخلوط با مشکل مواجه می شود. در کل با توجه به افزایش تایرهای بازتابی در دهه های اخیر استفاده از این ماده از لحاظ ملاحظات زیست محیطی و هم چنین منافع اقتصادی ناشی از عدم تراکم و دپوی این ضایعات ضروری به نظر می رسد [۳ و ۴].

۲. ارزیابی مشخصات مکانیکی و رئولوژیکی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک

۲.۱. استفاده از لاستیک در مخلوط بتن آسفالتی و ارزیابی عملکرد مخلوط

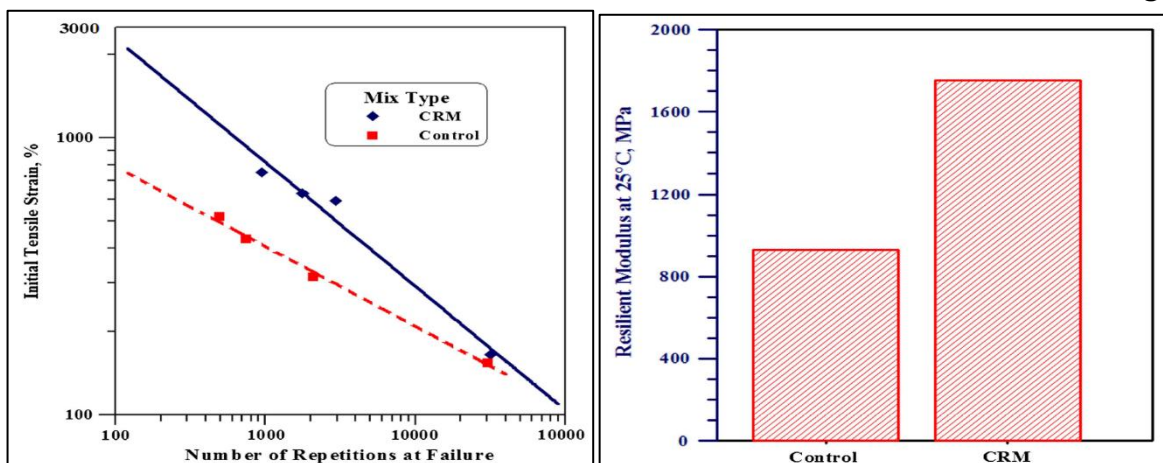
ماجد سلام و ابراهیم آسی در سال ۲۰۱۸ به بررسی استفاده از لاستیک در مخلوط بتن آسفالتی پرداختند و عملکرد مخلوط ها را مورد ارزیابی قرار دادند [۵]. مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت خزشی و عمر خستگی و مدول برجهنگی به عنوان آزمایش هایی که عملکرد مخلوط ها را ارزیابی کنند، انتخاب شدند.



شکل ۱- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم برای نمونه های شاهد و نمونه های دارای لاستیک [۵] شکل ۲- نتایج آزمایش خزش دینامیکی [۵]

طبق مطالعات ماجد سلام و ابراهیم آسی در شکل ۱ مشاهده می گردد که لاستیک میزان افت مقاومت کششی غیر مستقیم را کاهش می دهد. حداکثر میزان افت مقاومت کششی ۲۰ درصد مشاهده گردید. نتایج آزمایش خزش دینامیکی در شکل ۲ نشان داده شده است. این تست در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد و با محدودیت ۱۰۰۰۰ سیکل مورد ارزیابی قرار گرفت. رابطه بین کرنش تجمعی با تعداد سیکل های بار مطابق شکل ۲ نشان می دهد که لاستیک سبب کاهش تغییر شکل های ماندگار در نمونه ها می گردد که نشان دهنده این است که لاستیک ساختار متراکم تری در مخلوط آسفالتی ایجاد می نماید.

نتایج آزمایش مدول برجهنگی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- نتایج آزمایش مدول برجهنگی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد [۵] شکل ۴- نتایج آزمایش خستگی در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد [۵]

همچنین آنان دریافتند که مخلوط های دارای اصلاح کننده لاستیک مدول برجهنگی بیشتری را نسبت به نمونه های شاهد نشان می دهند. به عنوان مثال نمونه های شاهد دارای مدول برجهنگی به ۱۷۵۳ مگاپاسکال افزایش می یابد. (به عبارتی ۱۸۸/۵ درصد افزایش). علت این افزایش را با طبیعت کشسانی لاستیک می توان توجیه نمود که با افزودن لاستیک الاستیسیته مخلوط افزایش خواهد یافت.

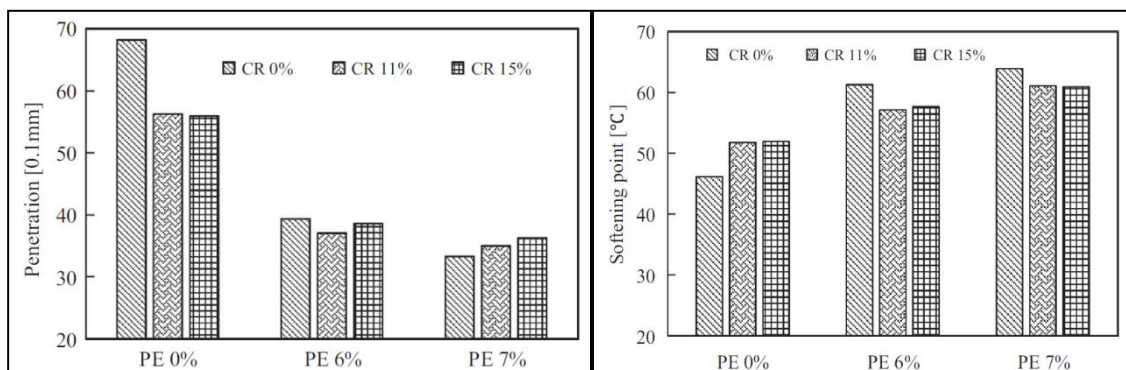
نتایج آزمایش خستگی در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد در شکل ۴ ارائه شده است.

محور قائم میزان کرنش و محور افقی تعداد سیکل های بار را نشان می دهد. تحلیل نتایج آزمایش خستگی نشان می دهد که لاستیک در افزایش عمر خستگی بسیار موثر می باشد. در واقع مشابه با تست برجهندگی با افزودن لاستیک، شاهد رفتار الاستیک تری از مخلوط آسفالتی خواهیم بود.

۲.۲. استفاده از تایر های بازیافتی وسایل نقلیه و پلی اتیلن بازیافتی به منظور بهبود خواص عملکردی روسازی

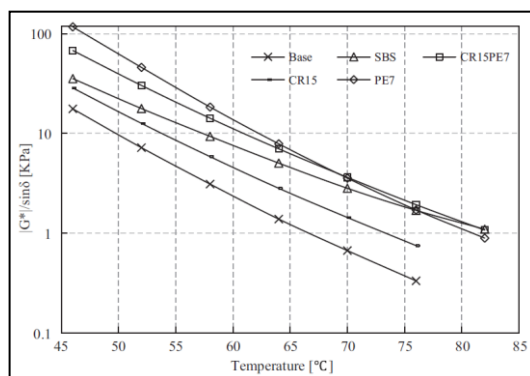
ژانوینگ یو و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی استفاده از تایر های بازیافتی وسایل نقلیه و پلی اتیلن بازیافتی حاصل از مواد پلاستیکی مصرف شده در خانه های شهروندان به منظور بهبود خواص عملکردی روسازی پرداختند [۶]. تست های آزمایشگاهی نظیر نقطه نرمی، نفوذ، ریمتر برش دینامیکی (DSR)، خزش برگشت پذیر (MSCR) و ریمتر تیر خمشی (BBR) به منظور مقایسه خصوصیات قیر مورد استفاده قرار گرفت.

طبق یافته های ژانوینگ یو و همکارانش مطابق با شکل ۵ نقطه نرمی با افزایش لاستیک و پلی اتیلن افزایش می یابد که نشان دهنده بهبود عملکرد در دماهای بالا است.



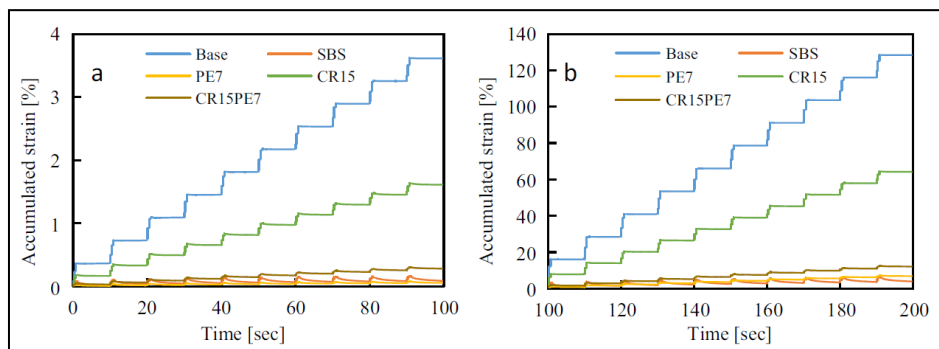
شکل ۵- تغییرات نقطه نرمی بر حسب درصد پلی اتیلن و پودر لاستیک [۶] شکل ۶- تغییرات نفوذ بر حسب درصد پلی اتیلن و پودر لاستیک [۶]

در ادامه این تحقیق نتایج آزمایش نفوذ مطابق شکل ۶ نشان می دهد که افزودن لاستیک و پلی اتیلن، میزان نفوذ کاهش می یابد. با اضافه نمودن لاستیک، قطعات لاستیکی باعث جذب فاز روغنی شده که باعث می شود مؤلفه آسفالتن قیر افزایش یافته و نهایتاً منجر به افزایش سختی گردد. واضح است که پلی اتیلن نقطه نرمی بیشتر و نفوذ کمتری را در مقایسه با لاستیک نشان می دهد. مطابق شکل ۷ افزودن لاستیک و پلی اتیلن سبب افزایش مقاومت برشی می شود به طوری که در ۷ درصد پلی اتیلن و در ۱۵ درصد لاستیک به همراه ۷ درصد پلی اتیلن، بیشترین مقادیر مقاومت برشی را دارا می باشند.

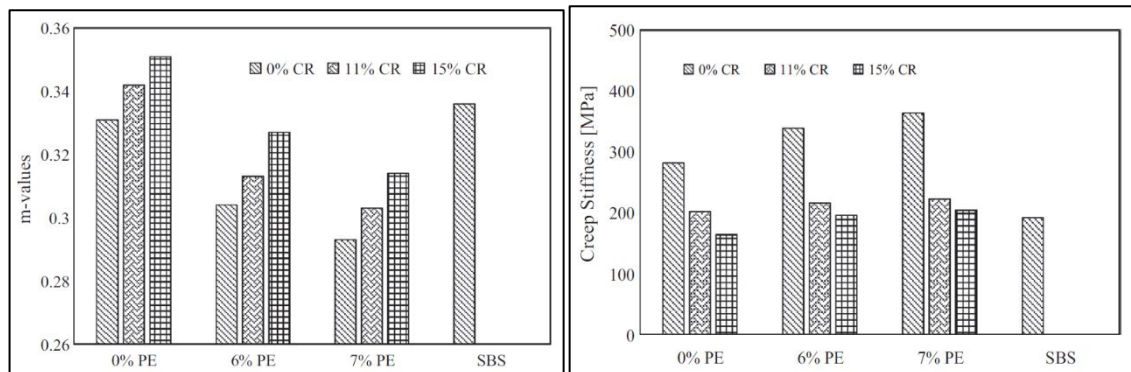


شکل ۷- تغییرات مقاومت برشی بر حسب دما برای مخلوط های لاستیکی، پلی اتیلن، SBS و نمونه های شاهد [۶]

لذا انتظار می رود که مقاومت در برابر تغییر شکل های ماندگار افزایش یابد. آزمایش خزش برگشت پذیر در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و در دو سطح تنش ۰/۱ kpa و ۳/۲ kpa انجام گردید. کرنش تجمعی در مقابل زمان بارگذاری و باربرداری در شکل ۸ نشان داده شده است.



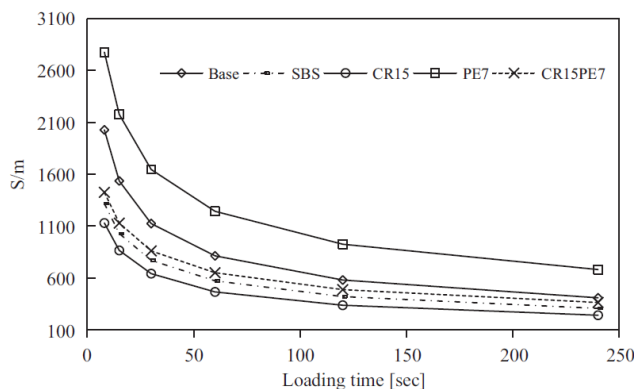
شکل ۸- نتایج آزمایش خزش برگشت پذیر در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد (a) سطح تنش ۰/۱ kpa (b) سطح تنش ۰/۳/۲ kpa [۶]
 بر اساس یافته های ژانیونگ یاو و همکارانش با مقایسه شکل (a) و (b) می توان نتیجه گرفت که افزایش تنش سبب افزایش کرنش تجمعی خزشی می شود. در تنش یکسان، با افزودن لاستیک و پلی اتیلن کرنش های خزشی کاهش می یابد. استفاده از پلی اتیلن مقادیر کرنش های خزشی کمترین مقدار را نشان می دهد.
 همچنین یافته های آنان نشان داد در نمونه های ترکیبی شامل ۱۵ درصد لاستیک و ۷ درصد پلی اتیلن کرنش تجمعی کمی بیشتر از نمونه های دارای ۷ درصد پلی اتیلن و نمونه های دارای SBS می باشد. آزمایش ریومتر تیرخمشی در پایین ترین دمای عملکردی قیر (۱۸- درجه سانتیگراد) انجام شد و مقادیر سختی خزشی (S) و m-value در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹- تغییرات سختی خزشی برای درصد های مختلف پلی اتیلن و پودر لاستیک [۶] شکل ۱۰- تغییرات m-value برای درصد های مختلف پلی اتیلن و پودر لاستیک [۶]

بر اساس نظرات ژانیونگ یاو و همکارانش، مسلماً نمونه قیری که دارای سختی خزشی کمتر و یا دارای مقادیر بزرگ تر m-value باشد عملکرد بهتری در دما های پایین خواهد داشت. با افزودن پلی اتیلن سختی خزشی به شدت افزایش یافته که نشان دهنده کاهش عملکرد در دمای پایین بوده و مستعد ترک می باشد.

زمانی که درصد لاستیک به میزان ۱۵ درصد افزایش می یابد، سختی خزشی قیر های ترکیبی مشابه با نمونه های دارای SBS کاهش می یابد. مقادیر m-value الگوی معکوسی را در مقایسه با سختی خزشی در شکل ۱۰ نشان می دهد. نرخ سختی خزشی بر m-value (S/m) محاسبه و بر حسب زمان بارگذاری در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نرخ سختی خمشی بر m-value (S/m) بر حسب زمان بارگذاری [۶]

بیشترین میزان این نرخ مربوط به ۷ درصد پلی اتیلن و کمترین میزان مربوط به ۱۵ درصد لاستیک می باشد.

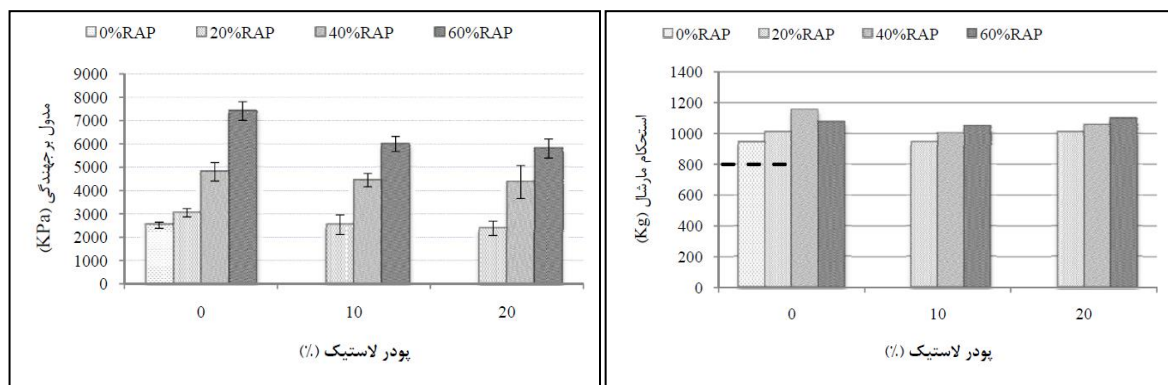
مشاهده می گردد که لاستیک فاکتور اصلی در بهبود عملکرد دمای پایین است. نرخ S/m برای قیر ترکیبی با ۷ درصد لاستیک کمتر از قیر پایه و تقریباً مشابه با اصلاح کننده ی S/m است.

۳. مقایسه مخلوط های آسفالتی حاوی پودر لاستیک و مخلوط های آسفالتی داغ فاقد اصلاح کننده

۱.۳. تأثیر پودر لاستیک و مصالح بازیافتی آسفالتی بر مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی گرم

بهبهانی و همکاران در سال ۱۳۹۳ در تحقیقی آزمایشگاهی تأثیر پودر لاستیک و مصالح بازیافتی آسفالتی بر مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی گرم را بررسی نمودند.

طبق مطالعات بهبهانی و همکارانش در شکل ۱۲ مشاهده می شود که در مورد همه نمونه های آزمایش شده، عدد مقاومت مارشال بیشتر از حداقل مشخص شده توسط آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (۸۰۰ کیلوگرم) می باشد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش درصد مصالح بازیافتی آسفالتی استحکام مارشال افزایش می یابد که علت آن سخت شدن قیر مخلوط به واسطه حضور قیر پیر شده ی موجود در مصالح بازیافتی آسفالتی در مخلوط آسفالتی می باشد. با افزودن ۱۰ درصد پودر لاستیک مقاومت مارشال کاهش می یابد. در حالی که مقاومت مارشال مخلوط های حاوی ۲۰ درصد پودر لاستیک اندکی افزایش می یابد که این موضوع می تواند ناشی از این موضوع باشد که ابتدا با افزودن پودر لاستیک سختی مخلوط کاهش پیدا می کند، اما با افزایش آن به ۲۰٪ ویسکوزیته قیر افزایش قابل ملاحظه ای پیدا کرده و در نتیجه باعث سختی مخلوط می شود. به طور کلی با افزایش درصد پودر لاستیک روند مشخصی در مقادیر مقاومت مارشال مشاهده نشد [۷].

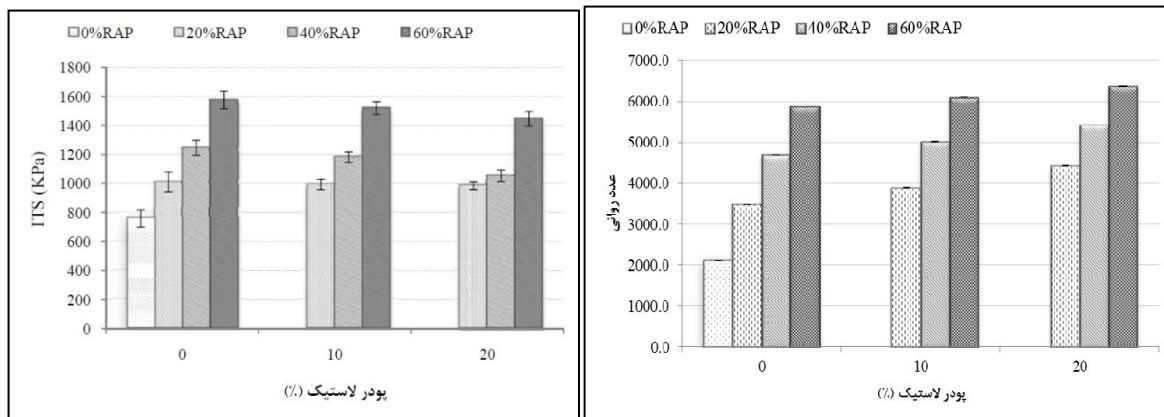


شکل ۱۲ - گراف استحکام مارشال برای نمونه های شاهد، بازیافتی و لاستیکی [۷] شکل ۱۳-مدول برجهنگی نمونه های مخلوط های آسفالتی [۷]

در ادامه تحقیق بهبهانی و همکارانش مقادیر مدول برجهنگی نمونه های مختلف در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با افزایش درصد مصالح بازیافتی آسفالتی مدول برجهنگی به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد که علت آن تأثیر قیر پیر شده موجود در مصالح بازیافتی آسفالتی می باشد که باعث سخت شدن مخلوط آسفالتی می گردد. از طرفی با افزایش پودر لاستیک مدول برجهنگی کاهش پیدا می کند. این

کاهش وقتی درصد پودر لاستیک از ۰ به ۱۰ افزایش می یابد، چشمگیر است، ولی وقتی از ۱۰ به ۲۰ افزایش می یابد، نسبت به حالت قبلی بسیار کمتر می باشد. کاهش مدول برجهندگی حاکی از آن است که با افزودن پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی انعطاف پذیری مخلوط بالا رفته و می توان نتیجه گرفت که با افزایش پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی عمر خستگی افزایش می یابد [۷].

در ادامه تحقیق آنان، نتایج آزمایش خزش دینامیکی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این آزمایش، هر چه مقادیر عدد روانی بیشتر باشد، مقاومت مخلوط در برابر شیار شدگی بیشتر خواهد بود. با افزایش درصد مصالح بازیافتی آسفالتی عدد روانی افزایش می یابد که علت آن تأثیر قیر پیر شده موجود در مصالح بازیافتی آسفالتی می باشد که باعث سخت شدن مخلوط آسفالتی می گردد. نتایج نشان می دهد که استفاده از درصد بالای خرده آسفالت در مقایسه با نمونه های معمولی سبب افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی می شود. از طرفی با افزایش پودر لاستیک عدد روانی افزایش پیدا می کند.

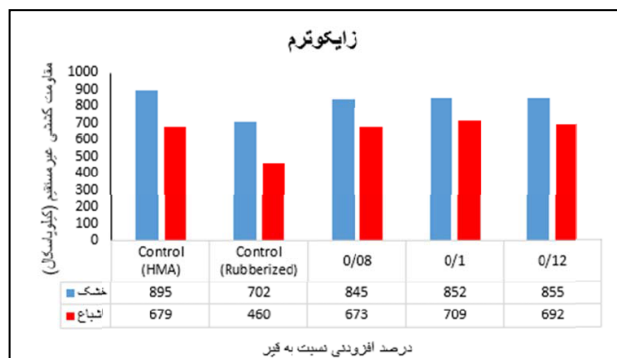


شکل ۱۴- عدد روانی نمونه های مخلوط های آسفالتی [۷] **شکل ۱۵- مقاومت کششی نمونه های ژیراتوری حاصل از آزمایش IIS [۷]**

نتایج شکل ۱۵ نشان می دهد که مقاومت کششی نمونه های آسفالتی با افزایش مصالح بازیافتی آسفالتی به طور قابل توجهی افزایش می یابد و افزایش پودر لاستیک مقاومت کششی را مقدار کمی کاهش می دهد. پودر لاستیک با جذب روغن های قیر، چسبندگی بین قیر و سنگ دانه ها را کاهش داده و باعث کاهش مقاومت کششی غیر مستقیم می شود. همچنین با توجه به وارفتگی نمونه های آسفالتی با افزایش مصالح بازیافتی آسفالتی و پودر لاستیک به ترتیب کاهش و افزایش می یابد. پس با افزودن مصالح بازیافتی آسفالتی به مخلوط آسفالتی سختی نمونه بالا رفته و در نتیجه مقاومت کششی آن بالا می رود، در حالی که این سخت شدگی باعث کاهش تغییر شکل و انعطاف پذیری می شود. افزودن پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی باعث افزایش تغییر شکل نمونه آسفالتی قبل از شکست شده و در نتیجه انعطاف پذیری را افزایش می دهد.

۲.۳. مقاومت آسفالت پودر لاستیکی گرم حاوی ماده ضد عریان شدگی در برابر حساسیت رطوبتی و مقایسه آن با مخلوط آسفالتی داغ

دارپرینان و همکاران در سال ۱۳۹۶ در پژوهشی دریافتند که استفاده همزمان از پودر لاستیک و افزودنی ضدعریان شدگی در مخلوط آسفالتی گرم باعث بهبود عملکرد طولانی و پتانسیل شیار شدگی و حساسیت رطوبتی در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ معمولی می شود. نمونه های آسفالتی لاستیکی بدون افزودنی مخلوط آسفالت گرم (WMA) و نمونه های آسفالت داغ (HMA) به عنوان شاهد در نظر گرفته می شود و هدف از این کار، مقایسه بین نمونه آسفالتی لاستیکی بدون افزودنی مخلوط آسفالت گرم (Rubberized) و نمونه های آسفالت داغ با مخلوط آسفالتی لاستیکی حاوی افزودنی های ضد عریان شدگی در مخلوط آسفالت گرم می باشد. براساس مطالعات دارپرینان و همکارانش مقاومت کششی مخلوط های WMA ساخته شده با افزودنی زایکوترم و همچنین مخلوط کنترلی HMA و Rubberized در شکل ۱۶ نشان داده شده است [۸].

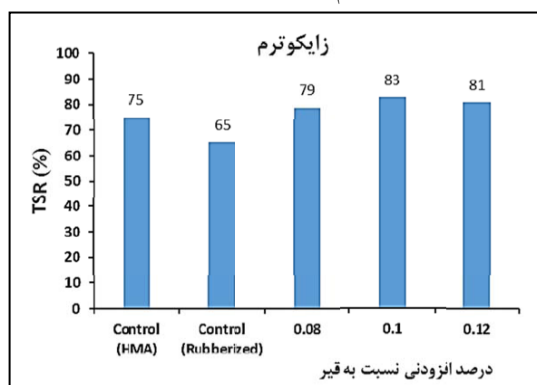


شکل ۱۶- مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط اصلاح شده با افزودنی زایکوترم و نمونه HMA و Rubberized [A]

همان طور که دیده می شود با اضافه شدن درصد افزودنی زایکوترم مقاومت کششی مخلوط در حالت خشک افزایش می یابد که در تمامی مقادیر افزودنی زایکوترم، مقاومت کششی کمتری نسبت به نمونه HMA و مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه Rubberized دارند. کاهش در حدود ۴٪ نسبت به نمونه HMA و افزایشی در حدود ۲۲٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد و بیشترین مقاومت کششی غیر مستقیم مربوط به نمونه اشباع حاوی ۰/۱ درصد افزودنی زایکوترم می باشد که افزایشی در حدود ۵۶٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد.

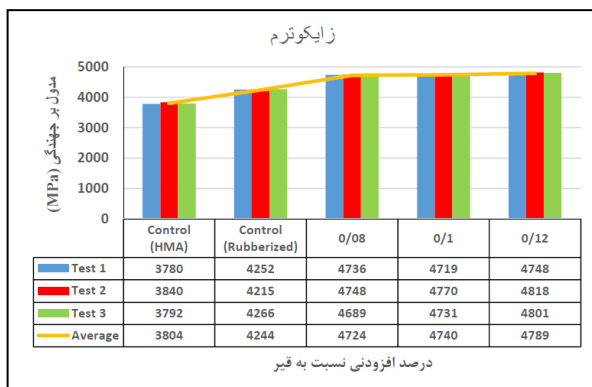
در ادامه این تحقیق مشاهده می گردد که براساس نتایج TSR در شکل ۱۷، برای مخلوط های آسفالتی حاوی زایکوترم منتخب با ۰/۰۸، ۰/۱ و ۰/۱۲ درصد به ترتیب افزایشی در حدود ۵٪، ۱۱٪ و ۸٪ نسبت به نمونه HMA و افزایشی در حدود ۲۲، ۲۸ و ۲۵٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد. یعنی نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط های آسفالتی گرم حاوی درصد های مختلف زایکوترم نسبت به نمونه HMA و Rubberized بیشتر بوده است، که دلیل آن کاهش کمتر مقاومت کششی این مخلوط در اثر رطوبت نسبت به دو مخلوط HMA و Rubberized می باشد. استفاده از نانو زایکوترم علاوه بر کاهش دمای اختلاط و تراکم، مقاومت رطوبتی مخلوط های آسفالتی گرم را نیز افزایش می دهد که دلیل بیشترین مقاومت کششی غیر مستقیم مربوط به نمونه خشک حاوی ۰/۱۲ درصد افزودنی زایکوترم می باشد که این مقدار مربوط به آن ترکیبات ارگانوسیلیکون موجود در این افزودنی می باشد.

تحلیل نتایج در شکل ۱۷ نشان می دهد که در افزودنی زایکوترم حداکثر مقدار پیشرفت TSR برای مقدار ۰/۱ درصد افزودنی زایکوترم رخ داده است که این مقدار به ترتیب افزایشی در حدود ۱۷ و ۲۸٪ نسبت به نمونه HMA و Rubberized دارد و مقدار بهینه افزودنی ۰/۱ درصد افزودنی زایکوترم مشخص شده است. با توجه به اینکه در آیین نامه حد مجاز مقدار TSR ۷۵٪ مشخص شده است و با توجه به نتایج این تحقیق در رابطه با آزمایش نسبت کشش غیر مستقیم (TSR)، تمامی نمونه های ساخته شده با زایکوترم در محدوده مجاز آیین نامه قرار گرفته است [A].



شکل ۱۷- نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط اصلاح شده با افزودنی زایکوترم و نمونه HMA و Rubberized [A]

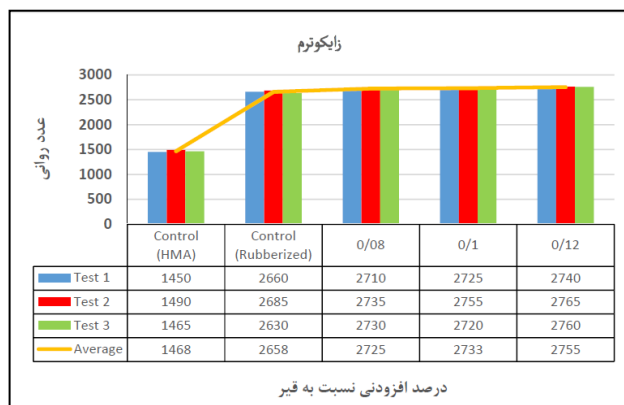
نتایج مدول بر جهندگی مخلوط اصلاح شده با افزودنی زایکوترم نسبت به نمونه های کنترلی HMA و Rubberized در شکل ۱۸ نشان داده شده است نتایج آزمون در شکل ۱۸ نشان می دهد که مدول بر جهندگی مخلوط های آسفالتی حاوی افزودنی زایکوترم با افزایش درصد افزودنی افزایش می یابد. مدول بر جهندگی برای زایکوترم منتخب با ۰/۰۸، ۰/۱، ۰/۱۲ درصد با ترتیب افزایشی در حدود ۲۵٪، ۲۵٪ و ۲۹٪ نسبت به نمونه HMA و افزایشی در حدود ۱۱٪، ۱۲٪ و ۱۳٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد. بیشترین مدول بر جهندگی مربوط به نمونه حاوی ۰/۱۲ درصد افزودنی زایکوترم می باشد که در آن مدول بر جهندگی برابر با ۴۷۸۹ مگاپاسکال می باشد [A].



شکل ۱۸-مدول برجهنگی مخلوط اصلاح شده با افزودنی زایکوترم و نمونه HMA و Rubberized [۸]

بر اساس یافته های دارپرنیان و همکارانش نتایج خزش دینامیکی برای مخلوط اصلاح شده با افزودنی زایکوترم نسبت به نمونه های کنترلی HMA و Rubberized در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

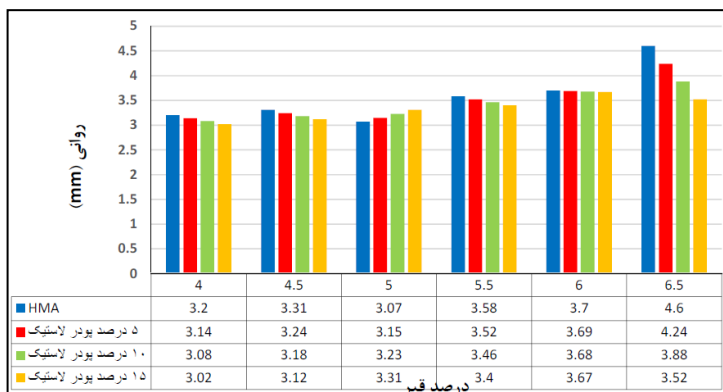
تحلیل نتایج در شکل ۱۹ نشان می دهد که با افزایش درصد افزودنی زایکوترم مقدار مقاومت آن در برابر شیار شدگی افزایش می یابد. عدد روانی برای زایکوترم منتخب با ۰/۰۸، ۰/۱، ۰/۱۲ درصد به ترتیب افزایشی در حدود ۰/۸۵٪، ۰/۸۶٪ و ۰/۸۸٪ نسبت به نمونه HMA و افزایشی در حدود ۰/۲٪، ۰/۳٪ و ۰/۴٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد. بیشترین مقدار مقاومت در برابر شیار شدگی مربوط به نمونه حاوی ۰/۱۲ درصد افزودنی زایکوترم می باشد که در آن عدد روانی برابر با ۲۷۵۵ می باشد.



شکل ۱۹-خزش دینامیکی مخلوط اصلاح شده با افزودنی زایکوترم و نمونه HMA و Rubberized [۸]

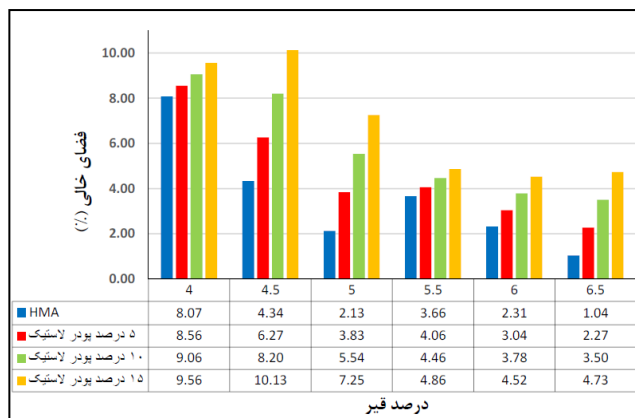
۳.۳. مقایسه خصوصیات مکانیکی آسفالت معمولی و آسفالت پودر لاستیکی

دارپرنیان و عبدی در سال ۱۳۹۶ استفاده از پودر لاستیک را در مخلوط آسفالتی ارزیابی نمودند. نتایج آزمایش ها نشان داده است که این آسفالت نسبت به آسفالت معمولی دارای مقاومت مارشال، مدول برجهنگی و کشش غیر مستقیم بیشتر و عمق شیارشدگی کمتری می باشد. در شکل ۲۰ نتایج آزمایش روانی آورده شده است. تحلیل نتایج آزمایش روانی نشان می دهد که در مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با (۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) پودر لاستیک، نسبت به نمونه های بدون پودر لاستیک کاهش پیدا می کند. میزان روانی مخلوط اصلاح شده با پودر لاستیک، نسبت به نمونه های بدون پودر لاستیک افزایش می یابد.



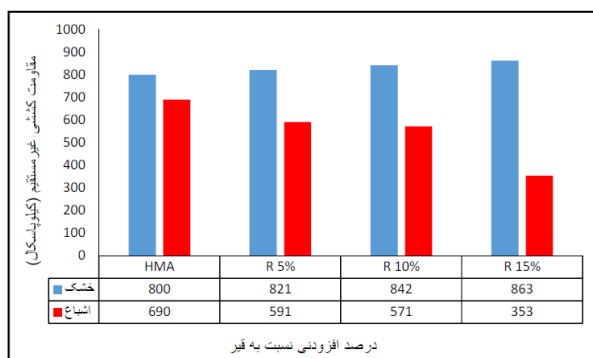
شکل ۲۰- مقایسه روانی آسفالت معمولی (HMA) و نمونه های اصلاح شده با پودر لاستیک در درصدهای مختلف قیر [۹]

طبق مطالعات دارپریان و عبدی در شکل ۲۱ نتایج آزمایش فضای خالی مخلوط های مختلف آورده شده است. نتایج آزمایش فضای خالی نشان می دهد که مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با (۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) پودر لاستیک، نسبت به نمونه های بدون پودر لاستیک افزایش می یابد. به دلیل فیزیکی بودن برهمکنش بین قیر و پودر لاستیک و پتانسیل بالای مخلوط نسبت به ناپایداری، به نظر می رسد پودر لاستیک نقش فیلر را ایفا می کند و باعث افزایش در صد فیلر در مخلوط آسفالتی شده و در نتیجه فضای خالی مخلوط افزایش می یابد [۹].



شکل ۲۱- مقایسه روانی آسفالت معمولی (HMA) و نمونه های اصلاح شده با پودر لاستیک در درصدهای مختلف قیر [۹]

در ادامه تحقیق در شکل ۲۲ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک و اشباع، نمونه های حاوی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ پودر لاستیک را نسبت به نمونه های آسفالت معمولی (HMA)، می توان مشاهده نمود. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۲۲ مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوطهای آسفالتی در حالت خشک با افزایش درصد پودر لاستیک افزایش می یابد، در حالی که با افزایش درصد پودر لاستیک میزان مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های اشباع مخلوط آسفالتی کاهش می یابد.

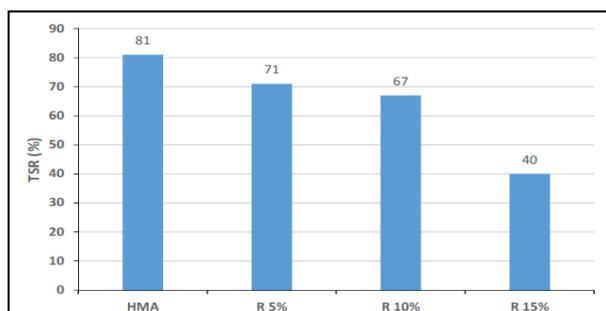


شکل ۲۲- مقاومت کششی غیر مستقیم خشک و اشباع آسفالت معمولی (HMA) و نمونه های اصلاح شده با پودر لاستیک در درصدهای مختلف قیر [۹]

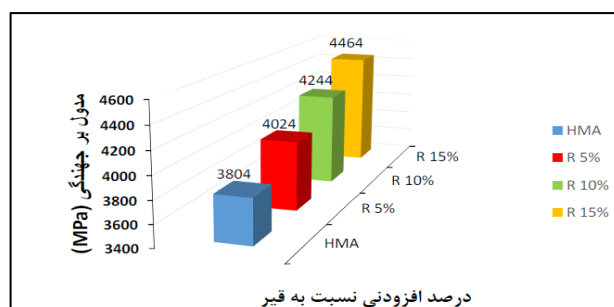
شکل ۲۳ نتایج نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم را در نمونه های حاوی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ پودر لاستیک، نسبت به نمونه های آسفالت معمولی

(HMA) نشان می دهد.

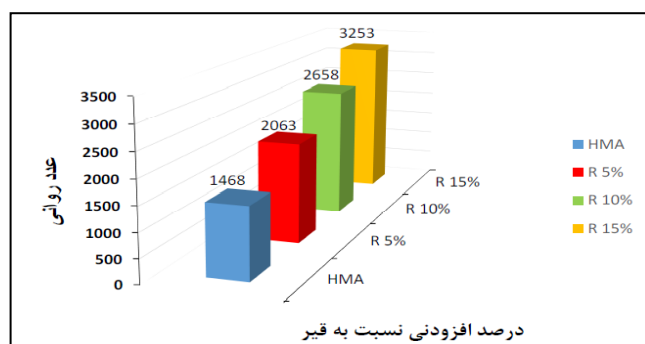
همانطور که مشاهده می شود که نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم برای نمونه های حاوی پودر لاستیک کمتر از آسفالت معمولی (HMA) می باشد. همچنین با افزایش درصد پودر لاستیک میزان نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط آسفالتی کاهش می یابد. در نتیجه حساسیت رطوبتی در مخلوط های آسفالتی لاستیکی با افزایش پودر لاستیکی افزایش می یابد [۹].



شکل ۲۳- نسبت مقاومت کششی آسفالت معمولی (HMA) و نمونه های اصلاح شده با پودر لاستیک در درصد های مختلف قیر [۹]
 نتایج مدول برجهنگی مخلوط اصلاح شده با افزودنی پودر لاستیک نسبت به نمونه های آسفالت معمولی (HMA) در شکل ۲۴ نشان داده شده است. براسا یافته های دارپریان و عبدی تحلیل نتایج نشان می دهد که مقدار مدول برجهنگی نمونه های حاوی پودر لاستیک ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ به ترتیب افزایشی حدود ۵، ۱۱ و ۱۷ درصد بیش از نمونه آسفالت معمولی (HMA) می باشد. یعنی اضافه کردن پودر لاستیک مدول بر جهنگی را نسبت به نمونه آسفالت معمولی (HMA) بدون پودر لاستیک افزایش می دهد.



شکل ۲۴- مدول برجهنگی در آسفالت معمولی (HMA) و نمونه های اصلاح شده با پودر لاستیک در درصد های مختلف قیر [۹]
 نتایج خزش دینامیکی مخلوط اصلاح شده با افزودنی پودر لاستیک نسبت به نمونه های آسفالت معمولی (HMA) در شکل ۲۵ نشان داده شده است. همچنین آنان دریافتند مقدار عدد روانی نمونه های حاوی پودر لاستیک بیشتر از نمونه آسفالت معمولی (HMA)، بدون پودر لاستیک می باشد. با افزایش پودر لاستیک عدد روانی نیز افزایش می یابد. عدد روانی نمونه های حاوی ۱۵٪ پودر لاستیک حدود ۲ برابر نسبت به آسفالت معمولی (HMA)، بدون پودر لاستیک افزایش می یابد. یعنی اضافه کردن پودر لاستیک مقاومت در برابر شیار شدگی را نسبت به آسفالت معمولی (HMA)، نمونه افزایش می دهد.



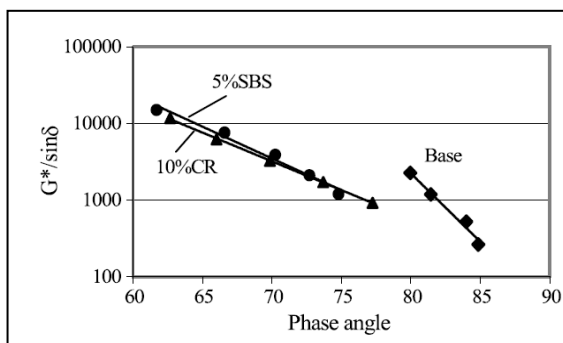
شکل ۲۵- خزش دینامیکی در آسفالت معمولی (HMA) و نمونه های اصلاح شده با پودر لاستیک در درصد های مختلف قیر [۹]

۴. مقایسه پودر لاستیک و افزودنی های اصلاح کننده خواص مخلوط آسفالتی

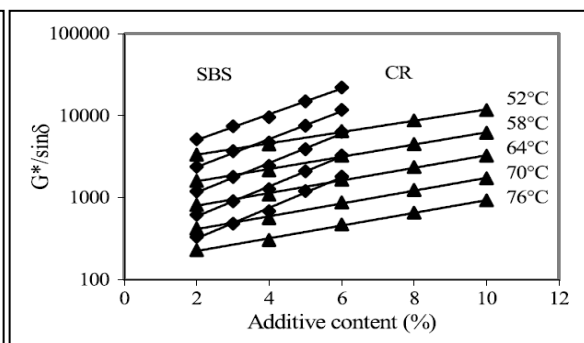
۱.۴. مقایسه خصوصیات رئولوژیکی و عملکرد مکانیکی اصلاح کننده پودر لاستیک و SBS

بهاوورال کوک و همکاران در سال ۲۰۱۳ در تحقیقی به مقایسه اصلاح کننده و پودر لاستیک و SBS پرداختند. خصوصیات رئولوژیکی و عملکرد مکانیکی قیر به وسیله ی آزمایش های ریومتر برش دینامیکی، ریومتر تیرچه خمشی و عملکرد مخلوط های آسفالتی به وسیله مدول سختی، خستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که درصد های بالای لاستیک سبب افزایش پاسخ الاستیک مخلوط و یا به عبارتی افزایش کرنش های برگشت پذیر نسبت به اصلاح کننده SBS می شود. میزان SBS در بازه ۲ تا ۶ درصد وزن قیر و در بازه های افزایشی یک درصدی اعمال گردید. میزان پودر لاستیک نیز در بازه ی ۲ تا ۱۰ درصد در نظر گرفته شد.

بر اساس مطالعات بهاوورال کوک و همکارانش در شکل ۲۶ مشاهده می شود که پارامتر شیارشدگی برای مخلوط های دارای اصلاح کننده SBS دارای بیشترین مقدار می باشد. این موضوع می تواند به علت افزایش مدول مختلط یا زاویه فازی کمتر و یا ترکیب هر دو عامل باشد. به منظور رسیدن پارامتر شیارشدگی یکسان باید درصد های بالایی از پودر لاستیک استفاده شود تا همتراز SBS گردد.



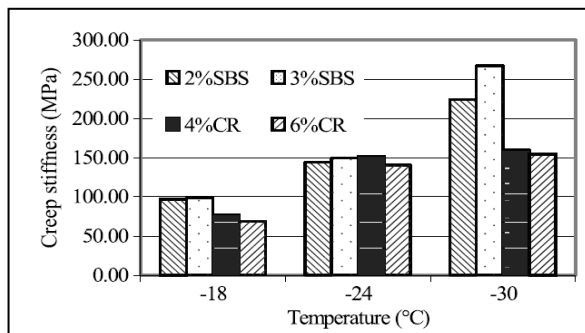
شکل ۲۷- تغییرات پارامتر شیارشدگی بر حسب زاویه فازی [۳۲]



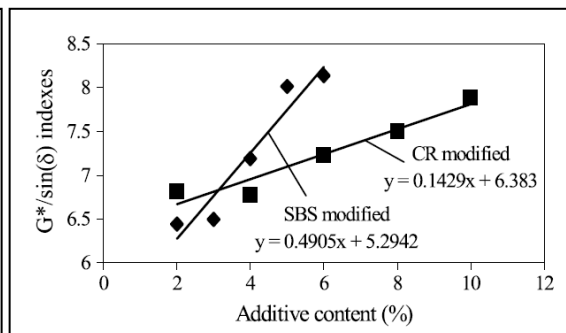
شکل ۲۶- تغییرات پارامتر شیارشدگی بر حسب درصد افزودنی [۳۲]

در ادامه تحقیق بهاوورال کوک و همکارانش تغییرات زاویه فازی با پارامتر شیارشدگی در شکل ۲۷ به منظور ارزیابی رفتار الاستیک قیر در سطح یکسان پارامتر شیارشدگی نشان داده شده است.

واضح است که قیر های اصلاح شده انعطاف پذیری بیشتری نسبت به قیر های پایه دارند. در مقادیر کم پارامتر شیارشدگی، اختلاف کمی بین مقادیر اصلاح شده و پایه مشاهده می شود. با افزایش پارامتر شیارشدگی، اختلاف کمی بین مقادیر اصلاح شده و پایه رو به افزایش می گذارد. به ازای پارامتر شیارشدگی یکسان برای مخلوط های اصلاح شده با قیر لاستیکی و مخلوط های پایه، زاویه فازی مخلوط های دارای قیر لاستیکی کمتر می باشد که نشان دهنده ی پاسخ الاستیک این مخلوط ها می باشد. شاخص پارامتر شیارشدگی با تقسیم این پارامتر در دمای ۵۲ درجه سانتیگراد به پارامتر مورد نظر در دمای ۷۶ درجه سانتیگراد به دست می آید (شکل ۲۸) [۳۲].

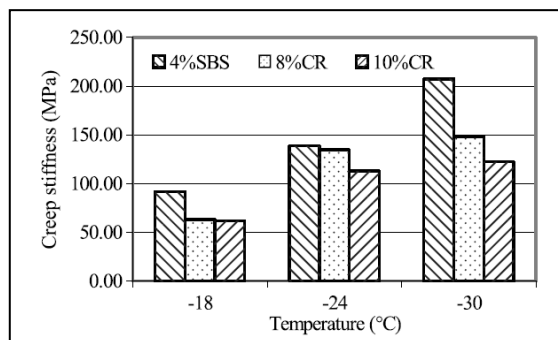


شکل ۲۸- تغییرات شاخص پارامتر شیارشدگی بر حسب درصد افزودنی [۳۲]



شکل ۲۹- تغییرات سختی خزشی قیر های دارای درجه عملکردی یکسان [۳۲]

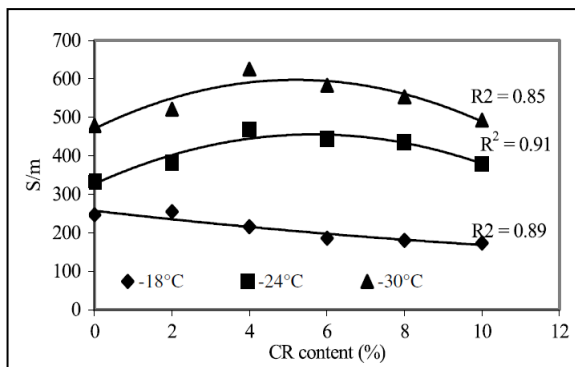
اصلاح کننده SBS شیب کمتری را نسبت به قیر لاستیکی نشان می دهد، که بیان می دارد حساسیت دمایی کمتری را در دما های بالا برای اصلاح کننده SBS شاهد هستیم. تغییرات سختی خزشی قیر های دارای یک درجه عملکردی در شکل های ۲۹ و ۳۰ نشان داده شده است.



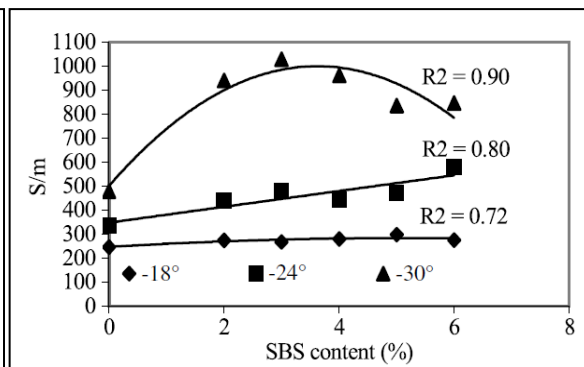
شکل ۳۰- تغییرات سختی خزشی قیر های دارای درجه عملکردی یکسان [۳۲]

بر اساس یافته های باهاوورال کوک و همکارانش در شکل ۲۸ همان طور که انتظار می رود تغییراتی در مقادیر سختی خزشی در دمای -۲۴- درجه سانتیگراد مشاهده نمی شود. در واقع در دماهای پایین عملکرد یکسان را شاهد هستیم. با این وجود قیر های لاستیکی انعطاف پذیرتر از SBS هستند چون مقادیر سختی کمتری را در دماهای -۱۸- و -۳۰- درجه سانتی گراد شاهد هستیم.

قیر های اصلاح شده با SBS در تمامی دماها دارای بیشترین سختی می باشند. افزایش در سختی خزشی سبب افزایش تنش های حرارتی می شود که باعث ایجاد ترک های حرارتی می گردند. هنگامی که m-value کاهش می یابد نرخ آزاد سازی تنش کاهش یافته و توانایی آزاد سازی تنش های حرارتی کاهش می یابد. چون مقادیر سختی کمتر و m-value بیشتر خصوصیات ضد ترک خوردگی خوبی را در دمای پایین نشان می دهد. نرخ s/m در شکل های ۳۱ و ۳۲ نشان داده شده است.

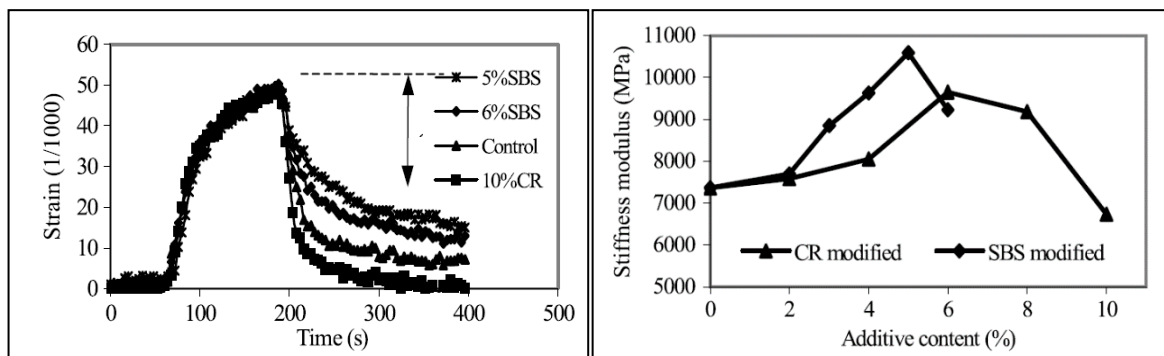


شکل ۳۲- تغییرات نرخ سختی بر حسب درصد پودر لاستیک [۱۰]



شکل ۳۱- تغییرات نرخ سختی بر حسب درصد SBS [۱۰]

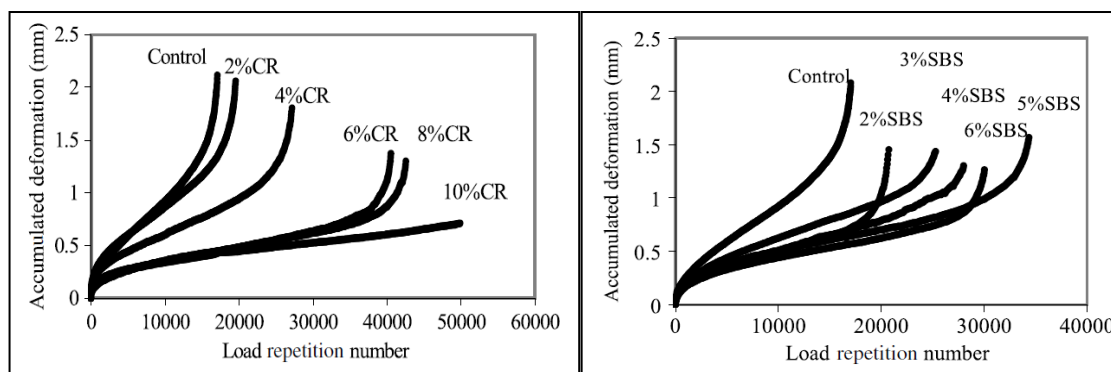
مشاهده می گردد که دما تاثیر متفاوتی را بر نرخ s/m برای مخلوط های اصلاح شده SBS و قیر لاستیکی می گذارد. مقادیر این نرخ با افزایش SBS به آرامی افزایش می یابد و برای قیر لاستیکی تا ۴ درصد افزایش یافته و در دمای -۲۴- درجه سانتیگراد شروع به کار می کند. الگوی مشابهی در دمای -۳۰- درجه سانتیگراد برای تمامی قیر ها مشاهده می گردد. کمترین نرخ مربوط به ۵ درصد SBS و ۱۰ درصد پودر لاستیک در دمای -۳۰- درجه سانتیگراد می باشد، که بدترین حالت ممکن برای روسازی است. مقادیر مدول سختی برای همه ی مخلوط ها در شکل ۳۳ نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۳۳- تغییرات مدول سختی بر حسب درصد افزودنی [۱۰] شکل ۳۴- رابطه زمان- کرنش برای مخلوط های کنترلی، ۶و ۱۰ درصد SBS و ۱۰ درصد پودر لاستیک [۱۰]

طبق یافته های آنان مشاهده می گردد مقادیر مدول سختی برای مخلوط های دارای قیر لاستیکی بین ۶۷۳۶ تا ۷۵۸۶ مگاپاسکال تغییر می کند. مخلوط های اصلاح شده با SBS با مدول سختی بیش از ۷۷۰۰ مگاپاسکال را نشان می دهند. درصد های بالای اصلاح کننده منجر به کاهش شدید مدول سختی خواهد شد. الاستیسیته مخلوط ها با مقایسه کرنش های برگشت پذیر در زمان بار ۳۰۰ میلی ثانیه ارزیابی شد. رابطه بین زمان کرنش برای مخلوط های کنترلی، ۶و ۱۰ درصد SBS و قیر لاستیکی ۱۰ درصد در شکل ۳۴ نشان داده شده است [۱۰].

شکل ۳۴ نشان می دهد که ۱۰ درصد پودر لاستیک بیشترین کرنش برگشت پذیر و به عبارتی بیشترین پاسخ الاستیک را نشان می دهد. ۵ و ۶ درصد SBS الاستیسیته کمتری را نسبت به مخلوط های کنترلی نشان می دهند. بر اساس نتایج آزمایش خستگی، تعداد تکرار هایی که منجر به شکست نمونه می شوند برای تمامی مخلوط ها در شکل های ۳۵ و ۳۶ نشان داده شده است.



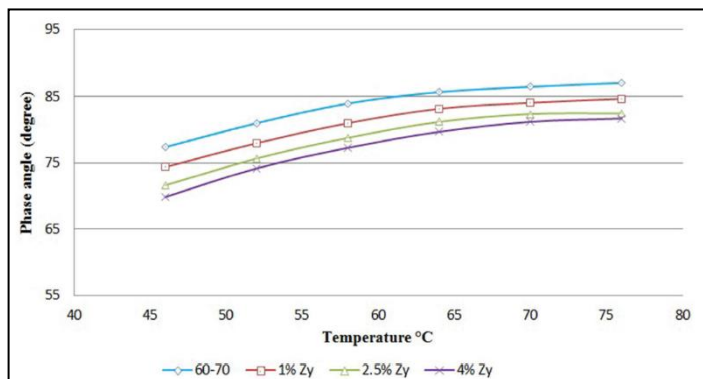
شکل ۳۵- کرنش تجمعی بر حسب تعداد تکرار بارگذاری در نمونه های دارای SBS [۱۰] شکل ۳۶- کرنش تجمعی بر حسب تعداد تکرار بارگذاری در نمونه های دارای پودر لاستیک [۱۰]

در بین تمامی مخلوط های دارای SBS، ۵ درصد از این افزودنی بیشترین تعداد سیکل بار تا رسیدن به گسیختگی را نشان می دهد. شکل ۳۶ نشان می دهد که تکرار های بار با افزایش درصد پودر لاستیک افزایش می یابد [۱۰].

۲.۴. بهبود عملکرد قیر در هنگام استفاده از لاستیک طی فرایند خشک با استفاده از افزودنی زایکوسل

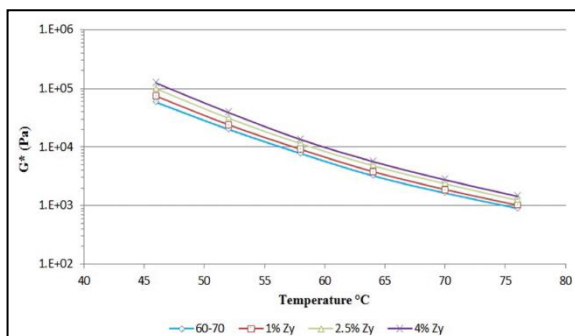
مهیاری عربانی و همکاران در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی به منظور بهبود عملکرد قیر در هنگام استفاده از لاستیک طی فرایند خشک، افزودنی زایکوسل نیز استفاده کردند. افزودنی زایکوسل در ۳ درصد وزنی ۱، ۲/۵ و ۴ درصد و لاستیک به میزان ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی قیر مورد استفاده قرار گرفت. اثرات زایکوسل بر خصوصیات قیر شامل دوام، نقطه نرمی، نفوذ، ویسکوزیته و ریومتر برش دینامیکی بررسی گردید. همچنین خصوصیات مکانیکی مخلوط شامل حساسیت رطوبتی، مقاومت کششی غیر مستقیم، مدول سختی، مقاومت شیارشدگی و رفتار خستگی ارزیابی گردید. نتایج تحقیق آنان نشان داد که افزودنی زایکوسل خصوصیات رئولوژیکی قیر را بهبود می بخشد و همچنین مقاومت در برابر شیارشدگی، حساسیت رطوبتی و عمر خستگی را افزایش می دهد. عملکرد مخلوط در اثر استفاده از درصد های بالای لاستیک کاهش می یابد، لذا در این درصد های مخرب زایکوسل سبب رفع بحران خواهد گردید.

بر اساس یافته های مهیار عربانی و همکارانش به منظور افزودن قطعات لاستیک ابتدا مصالح تا ۱۹۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شده و به مدت ۲۰ ثانیه قطعات لاستیک به آنها افزوده می گردد تا نمونه ای همگن ایجاد شود. شکل های ۳۷ و ۳۸ مقاومت برشی قیر و زاویه فازی قیر تحت تاثیر افزودنی زایکوسل می باشد.

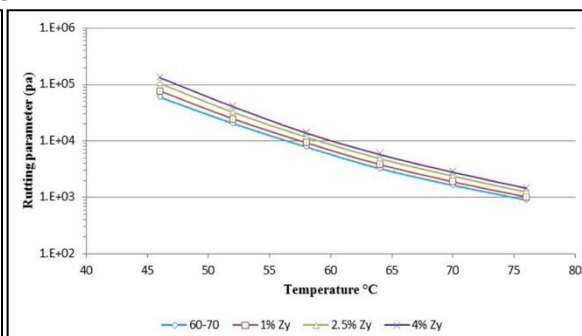


شکل ۳۷- تغییرات زاویه فازی بر حسب دما [۱۱]

قیر های دارای افزودنی زایکوسل زاویه فازی کمتری نسبت به قیر های پایه دارند. بنابراین افزودنی زایکوسل قابلیت برگشت پذیری تغییر شکل را طی بارگذاری، افزایش می دهد. پارامتر شیارشدگی قیر های پایه و اصلاح شده در شکل ۳۹ نشان داده شده است.

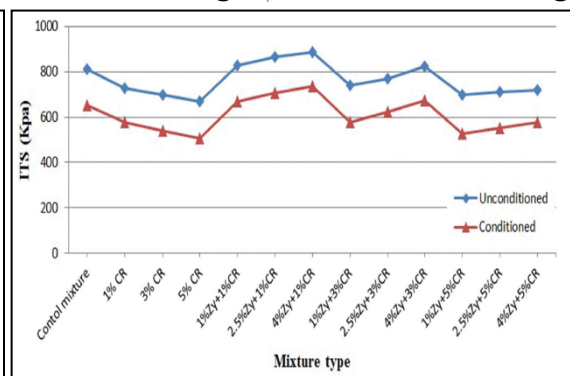
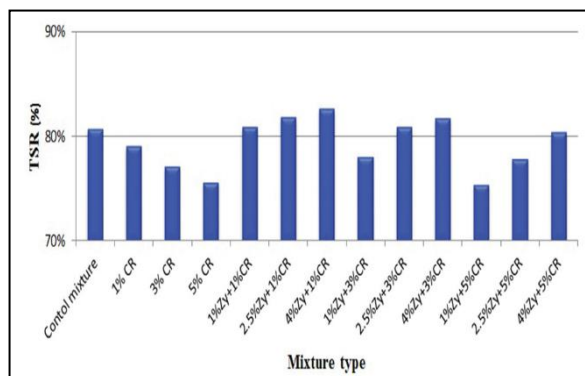


شکل ۳۸- تغییرات مقاومت برشی بر حسب دما [۱۱]



شکل ۳۹- تغییرات پارامتر شیارشدگی بر حسب دما [۱۱]

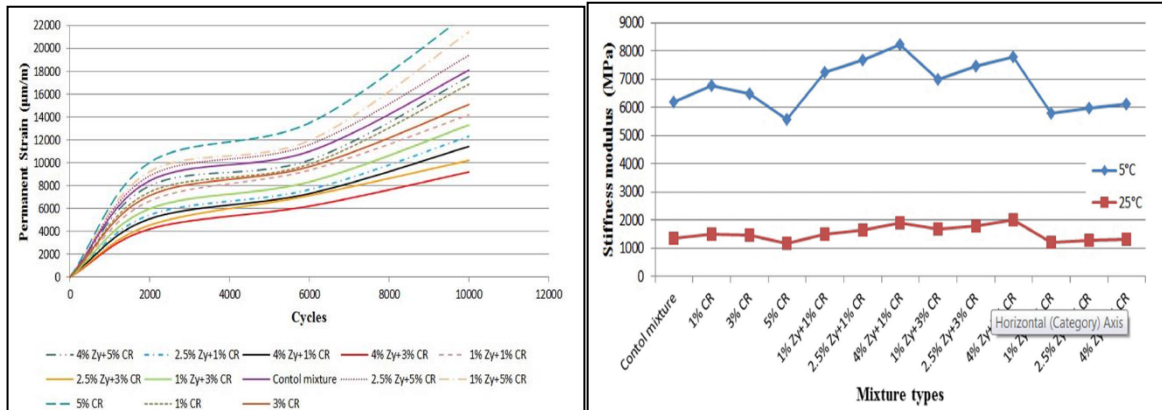
همچنین آنان دریافتند که بر اساس شکل ۳۹ مشاهده می شود که قیر های اصلاح شده دارای نرخ مقاومت برشی به زاویه فازی (G^*/δ) بهتری نسبت به قیر های پایه دارند و افزودنی زایکوسل سبب بهبود مقاومت شیارشدگی می شود. لذا زایکوسل سبب افزایش سختی قیرها خواهد گردید. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و نرخ TSR برای مخلوط های مختلف در شکل ۴۰ و ۴۱ نشان داده شده است.



شکل ۴۰- تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم برای مخلوط های مختلف [۱۱] شکل ۴۱- تغییرات نرخ مقاومت کششی غیر مستقیم برای مخلوط های مختلف [۱۱]

در ادامه تحقیق آنان، بر اساس شکل ۴۰ افزودن لاستیک سبب کاهش مقاومت کششی غیر مستقیم می گردد. الگوی کاهش مقاومت کششی غیر مستقیم با افزایش درصد لاستیک، افزایش می یابد. توجه این موضوع به این علت است که با افزایش لاستیک چسبندگی کاهش می یابد. همان طور که در شکل ۴۰ نشان داده شده است مخلوط آسفالتی دارای ۴ درصد زایکوسل و ۱ درصد لاستیک بیشترین مقاومت کششی را دارا می باشد. از نکات قابل توجه در تحقیق مهیار عربانی و همکارانش این بود که که الگوی افزایشی مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط خیس بیش از شرایط خشک می

باشد. به عبارتی می توان نتیجه گرفت که افزودنی زایکوسل چسبندگی بین قیر و قطعات لاستیک و مصالح سنگی را در شرایط خیس بهبود می بخشد. مطابق با شکل ۴۱ مشاهده می شود که با افزایش درصد لاستیک، نرخ مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع به خشک (TSR) برای تمامی نمونه ها کاهش می یابد. با افزودن زایکوسل به مخلوط این نرخ افزایش یافته و نتیجه می شود که این افزودنی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی را کاهش می دهد. به عنوان مثال افزودن ۴ درصد زایکوسل به نمونه دارای ۵ درصد لاستیک سبب افزایش TSR به میزان ۸۰ درصد می شود. به طور کلی مشاهده می گردد که لاستیک سبب افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی شده و لذا افزودنی زایکوسل اصلاح کننده خوبی برای جلوگیری از این پدیده است. مدول سختی نمونه های شاهد و اصلاح شده در دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتیگراد در شکل ۴۲ نشان داده شده است [۱۱].

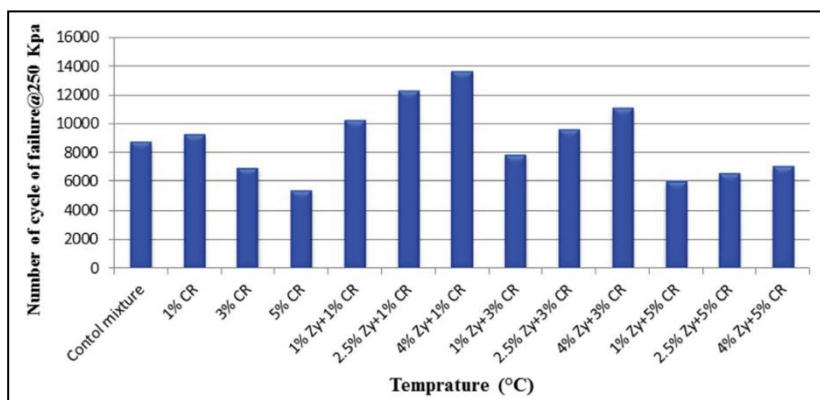


شکل ۴۲- تغییرات مدول سختی برای مخلوط های مختلف [۱۱] شکل ۴۳- تغییرات کرنش ماندگار بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای مخلوط های مختلف [۱۱]

همانطور که در شکل ۴۲ مشاهده می شود مخلوط های دارای ۱ و ۳ درصد لاستیک سختی بیشتری را نسبت به نمونه های شاهد نشان می دهند. با افزودن زایکوسل سختی مخلوط افزایش می یابد. مدول سختی مخلوط های دارای ۵ درصد لاستیک و مخلوط های شاهد کمترین میزان را نشان می دهد. فقدان چسبندگی قوی بین قیر پایه و قطعات لاستیک شاید علت کاهش مدول سختی در درصد های بالای لاستیک باشد. مطابق با شکل ۴۲ بیشترین مدول سختی به میزان ۸۲۲۶ مگاپاسکال در دمای ۵ درجه و برای نمونه برای ۴ درصد زایکوسل و ۱ درصد لاستیک می باشد. در شکل ۴۳ کرنش تجمعی در مقابل تعداد سیکل های بار در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است [۱۱].

مشاهده می گردد که به جز نمونه دارای ۵ درصد لاستیک، سایر نمونه های دارای لاستیک کرنش تجمعی کمتری را نسبت به نمونه های شاهد دارا می باشند. هم چنین افزودنی زایکوسل سبب کاهش کرنش های تجمعی می گردد. برای تمامی نمونه ها افزایش زایکوسل، مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش می دهد.

نتایج آزمایش خستگی برای هر مخلوط آسفالتی در شکل ۴۴ نشان داده شده است.



شکل ۴۴- شماره سیکل شکست در دمای متغیر برای مخلوط های مختلف [۱۱]

بر اساس شکل ۴۴ مشاهده می گردد که با افزودن درصد های مختلف زایکوسل تاثیر مثبتی بر عمر خستگی مخلوط های آسفالتی دیده می شود. با افزودن زایکوسل به مخلوط های آسفالتی، فضای خالی مخلوط کاهش یافته و مخلوط متراکم تر و مقاوم تری را در برابر بارگذاری ها شاهد هستیم.



دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۸ و ۷ خرداد ۱۳۹۹

دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران



۵. جمع بندی

در حال حاضر، استفاده از پودر لاستیک تولید شده از لاستیک تایر های بازیافتی برای اصلاح قیر نه تنها می تواند باعث بهبود خواص قیر شود، بلکه با کاهش لاستیک ضایعاتی در محل های دفن زباله مزایای اقتصادی و زیست محیطی را نیز تجسم می بخشد. به دلیل حساسیت کم به تغییرات دما، پودر لاستیک از سختی کمی برخوردار بوده و در شرایط درجه حرارت پایین بصورت الاستیک حفظ می شود. گزارش شده است که قیر اصلاح شده با پودر لاستیک (CRMB) از طریق بهبود چقرمگی شکست، عملکرد ترک دمای کم روسازی آسفالتی را بهبود می بخشد و مقاومت کششی را افزایش می دهد.

پودر لاستیک سبب کاهش تغییر شکل های ماندگار در نمونه ها می گردد که نشان دهنده این است که لاستیک ساختار متراکم تری در مخلوط آسفالتی ایجاد می نماید.

مخلوط های دارای اصلاح کننده لاستیک مدول برجهنگی بیشتری را نسبت به نمونه های آسفالت معمولی (HMA) نشان می دهند. مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوطهای آسفالتی در حالت خشک با افزایش درصد پودر لاستیک افزایش می یابد، در حالی که با افزایش درصد پودر لاستیک میزان مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های اشباع مخلوط آسفالتی کاهش می یابد. مقدار عدد روانی حاصل از آزمایش خزش نمونه های حاوی پودر لاستیک بیشتر از نمونه آسفالت معمولی (HMA)، بدون پودر لاستیک می باشد.

۶. منابع و مراجع

۱. Bahaia H., Davies R., Role of crumb rubber content and type in changing critical properties of asphalt binders", Journal of association of asphalt paving technology, pp: ۱۳۰-۱۶۲, ۱۹۹۵.
۲. Aflaki S., Tabatabaee N., "Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran", Construction and Building Materials ۲۳,۶, pp: ۲۱۴۱-۲۱۵۰, ۲۰۰۹.
۳. طباطبایی س.ح.، طباطبایی ن.، "مقایسه رئولوژیک و عملکردی قیرهای اصلاح شده"، پایان نامه کارشناسی ارشد، صنعتی شریف، ۱۳۸۸.
۴. Mogawer W. S., Stuart, K., LEE K., "EVALUATION OF EFFECTS OF DEICING ADDITIVES ON PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES", (No. ۱۲۲۸), ۱۹۸۹.
۵. M.sallam and I. Asi, "Improvement of Local Asphalt Concrete Binders Using Crumb Rubber," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. ۳۰, no. ۴, p. ۰۴۰۱۸۰-۴۸, Apr. ۲۰۱۸.
۶. Z. Yao, J. Zhang, F.Gao, S. Liu, and T. Yu, "Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen," Construction and Building, vol. ۱۷۰, pp. ۲۱۷-۲۲۴, May ۲۰۱۸.
۷. بهبهانی، ح؛ آقاپور، مسلم؛ باباگلی، رضوان؛ "بررسی آزمایشگاهی خصوصیات عملکردی مخلوط های آسفالتی لاستیکی حاوی درصد بالای RAP"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره سوم، ص ۲۱۵-۲۳۲، ۱۳۹۳.
۸. دارپرنیان، پیمان؛ عبدی، علی؛ گلچین، بابک؛ "ارزیابی حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی مخلوط آسفالتی گرم حاوی افزودنی ضد عریان شدگی با بکارگیری قیر لاستیکی"، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۲، ص ۱۶۹-۱۸۳، ۱۳۹۶.
۹. دارپرنیان، پیمان؛ عبدی، علی؛ "مقایسه خصوصیات مقاومتی آسفالت لاستیکی و آسفالت معمولی"، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۲، ص ۲۲۵-۲۳۹، ۱۳۹۶.
۱۰. B. Kök, M. Yilmaz, and A. Geçkil, "Evaluation of Low-Temperature and Elastic Properties of Crumb Rubber- and SBS-Modified Bitumen and Mixtures," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. ۲۵, no. ۲, pp. ۲۵۷-۲۶۵, Feb. ۲۰۱۳.
۱۱. M. Arabani, S. A. Tahami, and G. H. Hamed, "Performance evaluation of dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial," Road Materials and Pavement Design, vol. ۱۹, no. ۵, pp. ۱۲۴۱-۱۲۵۸, Mar. ۲۰۱۷.