

ارزیابی رئولوژیکی قیر پلیمری حاوی نانورس در بازه پیوسته دمایی تحت اثر پیش اختلاط

شاهین شعبانی*، استادیار گروه عمران-راه و ترابری، دانشگاه پیام نور تهران شمال

E-mail: Shabani@pnu.ac.ir

چکیده

در فرآیند اصلاح قیر به کمک افزودنیها بویژه در هنگام افزودن نانومواد، گاهی شرایط تولید نمونه بسیار سخت و بعضاً فقط در مقیاس آزمایشگاهی ممکن است. در این پژوهش سعی شد با اعمال تغییراتی در نحوه آماده سازی نمونه ها، شرایط فرآیندی تولید را آسانتر و در عین حال عملکرد نمونه ها را نیز بهبود بخشید. مطالعات نشان داده است، استفاده از پلیمر SBS (LG501) و نانورس (Cloisite-15A) خواص قیر را به نحو مطلوبی اصلاح کرده است. ساخت آمیخته ای از مواد افزودنی با استفاده از مخلوط کن داخلی، هدف اصلی این پژوهش در تسهیل اصلاح قیر است. چرا که اولاً به آماده سازی نانورس و افزایش فاصله بین صفحات آن کمک می کند و ثانیاً مراحل و مدت زمان افزودن مواد مختلف به قیر در مخلوط کن بر شی با دور بالا را کاهش می دهد. با انجام این روش، نه تنها در ساخت نمونه بلکه در خواص رئولوژیکی و نحوه پخش مواد در قیر بهبود حاصل می شود و حتی می توان شرایط کاهش دور اختلاط را مهیا کرد. با استفاده از آزمایش های کلاسیک (درجه نفوذ، نقطه نرمی و شکل پذیری) و آزمایش های انجام شده با استفاده از رئومتر برش دینامیکی، مانند تعیین رده عملکردی PG و آزمایش جاروب دما به بررسی و مقایسه خواص نمونه های اصلاح شده با روش های مختلف پرداخته شد. نتایج نشان داد استفاده از پیش اختلاط در مقایسه با روش عادی اختلاط، خواص قیر را بهبود بخشیده است. همچنین نتایج عملکردی مشابهی بین نمونه های حاوی پیش آمیخته با نمونه های اختلاط عادی در دور اختلاط کمتر مشاهده شد. کاهش دور اختلاط اثرات قابل توجهی بر بهبود پیر شدگی قیر داشت که برتری استفاده از روش پیش اختلاط را نشان می دهد. همچنین نمایش خواص اطمینان بخش در بازه پیوسته دمایی در نمونه های ساخته شده به روش پیش اختلاط مشهود بود. بطور کلی تغییر روش اصلاح قیر، اثر خود را هم بر کاهش پیرشدگی ناشی از فرآیند اختلاط و هم در تهیه مخلوط همگن تر و دارای خواص بهبود یافته ای اطمینان بخش نشان داد.

کلید واژه ها: شیارشدگی، آمیخته اصلی، پیش اختلاط، جاروب دما، رده عملکردی

۱. مقدمه

از پلیمرها در اصلاح خواص قیر و بهبود عملکرد آن در راه های آسفالتی، بسیار گسترده بوده و از میان تعداد زیاد پلیمرها، کوپلیمر SBS به علت خواص فیزیکی و مکانیکی و رفتار رئولوژیکی خود به یکی از بهترین اصلاح کننده های قیر بدل گشته است (یو و همکاران، ۲۰۰۷). این پلیمر ترموپلاستیک الاستومر، مورفولوژی دوگانه ای را از خود نشان می دهد: یک فاز سخت با دمای انتقال شیشه ای (Tg) حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد، به نام پلی استایرن، و یک بلاک پلی بوتادیان در وسط،

این سوال که به چه دلیل باید اقدام به اصلاح قیر نمود در سالهای اخیر به طور گسترده ای پاسخ داده شده است. رفتار پیچیده قیر در دمای سرویس دهی، ناشی از طبیعت پیچیده آن است. همچنین باید توجه داشت هرگونه فعالیت در جهت اصلاح آن مانند اعمال نیروی برشی بالا برای اختلاط، گرم و سرد شدن با اختلاف دمایی زیاد و غیره باعث تغییر در ساختار و در نتیجه رفتار قیر می شود که بر پیچیدگی آن می افزاید. استفاده

با دمای انتقال شیشه ای پایین (Tg) تقریباً برابر با ۹۰- درجه سانتیگراد (گلاستانی و همکاران، ۲۰۱۲؛ لیته، ۱۹۹۹). در این بازه دمایی (۹۰- تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد)، SBS دارای مدول سطح^۱ می باشد که این ویژگی باعث کاهش حساسیت حرارتی در بازه دمایی وسیع می شود (ونگ و همکاران، ۲۰۰۲). این ترکیب بلوک های پلیمری با دمای انتقال شیشه ای متفاوت، باعث رفتار ترکیبی الاستیک ناشی از بلاک لاستیکی و ترموپلاستیک می شود. به علت سختی استایرن و رفتار نرم بوتادیان، پتانسیل تغییر شکلهای ماندگار در مخلوط ها آسفالتی به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد (زاپین کاستیلو و همکاران، ۲۰۱۶). به علت سازگاری پایین بین قیر و SBS، علی الخصوص در دمای نگهداری بالا، تمایل به جدایی فاز (به علت تفاوت میان ترکیب بندی قیر و ریز ساختار پلیمر) میان این اصلاح کننده و قیر بالا می باشد که باعث کاهش پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده با SBS می شود (صادقپور گلو یک و همکاران، ۲۰۱۰). وقتی SBS و قیر با هم مخلوط می شوند چون وزن مولکولی زنجیره های پلیمری بزرگتر یا مساوی وزن مولکولی آسفالتن در قیر می باشد، پتانسیل جدایی فاز افزایش می یابد (گلاستانی و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین این ساختار غیر اشباع، با ایجاد شرایط مناسب برای نفوذ اکسیژن، افزایش پتانسیل اکسید شدن و پیرشدگی را به همراه خواهد داشت (تانگ و همکاران، ۲۰۱۰). به منظور رفع این نواقص، استفاده از علم نانو راهگشا می باشد، بطوریکه استفاده از نانورس در کاهش اختلاف چگالی پلیمر و قیر و همچنین خاصیت آنتی اکسیدان به منظور کاهش پتانسیل پیرشدگی کاربرد دارد (صادقپور گلو یک و همکاران، ۲۰۱۰؛ زاپین کاستیلو و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر موارد ذکر شده، نانورس به عنوان یک افزودنی مناسب برای قیر، بهبود خواص مکانیکی قیر را نیز به همراه خواهد داشت (یو و همکاران، ۲۰۱۱). پژوهشی در سال ۲۰۰۹، ابتدا با اقتصادی خواندن استفاده از نانورس توجیه استفاده آن را بیان کرد. در این تحقیق نیز استفاده از Cloisite-15A در مقایسه با Nanofill^۲ پیشنهاد

شد (غفارپور جهرمی و خدایی، ۲۰۰۹؛ غفارپور جهرمی، ۲۰۱۳). تحقیقات پیرامون استفاده از نانورس و میکروورس توسط محققان مصری انجام پذیرفت. افزایش نقطه نرمی تا ۱۲ درجه سانتیگراد و کاهش ۲۵٪ درجه نفوذ، افزایش ۲۲٪ و ۱۴۵٪ کندروانی در دماهای ۱۳۵ و ۱۵۰ درجه سانتیگراد نسبت به قیر پایه از جمله مشاهدات این پژوهش می باشد (الشفیع و همکاران، ۲۰۱۲). فنگ و نشان دادند وجود نانوذرات علاوه بر پلیمر، می تواند مقاومت در برابر پیر شدگی را بالا ببرد چرا که دو علت عمده پیر شدگی بلند مدت و کوتاه مدت (دما بالا و دور اختلاط) با وجود پلیمر به سه دلیل افزایش یافته و دلیل سوم می تواند تخریب پلیمر باشد. لذا تبدیل پلیمر به یک نانو کامپوزیت مناسب، پیشنهاد می شود (فانگ و همکاران، ۲۰۱۳). نانو کامپوزیت ها (نانو کامپوزیت های سیلیکاتی لایه ای) اساساً پلیمری دارای فیلر است که ماده نانوی پخش شده در آن حداقل در یکی از ابعاد خود مقیاس نانو داشته باشد (گوپتا و همکاران، ۲۰۰۵). استفاده از اصلاح سه فازی قیر/پلیمر/نانو در سال ۲۰۱۱ رویکرد جدیدی به منظور تامین هرچه بیشتر موارد اصلاحی قیر بود که به بررسی خواص و تغییرات و ویژگی های قیر پرداخت (سور شکومار، ۲۰۱۱). که در این پژوهش از اصلاح ۴ فازی قیر/پلیمر/نانورس/تسهیل کننده استفاده می شود. اصلاح آسفالت با استفاده از پلیمر و نانورس، باب جدیدی در گروه مواد اصلاح کننده آسفالت باز کرد و از آن به عنوان قیر اصلاح شده با نانو کامپوزیت یا PMAN^۲ نام برده شد (ایدت و همکاران، ۱۹۹۷؛ غفارپور جهرمی و خدایی، ۲۰۰۹). PMAN یک مخلوط سه تایی از پلیمر، نانو و قیر است که به دو صورت به قیر اضافه می شود. بدین صورت که یا به طور جدا- جدا با استفاده از مخلوط کن مناسب عمل اختلاط صورت می گیرد و یا ابتدا نانو و پلیمر با هم مخلوط شده و به صورت یک آمیخته اصلی پیش اختلاطی به قیر اضافه می شود (پولاکو و همکاران، ۲۰۰۸). مشاهدات نشان داد که روش اختلاط و ترکیب نانورس در آسفالت، تاثیر بسزایی در مورفولوژی

¹ Flat Modulus

² Polymer Modified Asphalt Nanocomposite

مخلوط حاصله، پراکنش و خصوصیات رئولوژی قیر دارد (پولاکو و همکاران، ۲۰۰۸؛ سور شکومار، ۲۰۱۱). در سال ۲۰۱۰ آقای تانگ و همکاران به بررسی نانوکامپوزیت با پایه SBS پرداختند که در آن میزان ۵٪ وزنی قیر، SBS به آن اضافه شده و میزان ۴٪ وزنی قیر نیز فیلر (سه نوع مختلف: نانو مونت موریلونیت، CaCO_3 با ابعاد حدود ۴۰ تا ۶۰ نانومتر و میکرو خاکستر بادی با ابعاد ۲ تا ۶ میکرومتر) استفاده شد. با اضافه کردن این سه نوع پودر و SBS به قیر، میزان درجه نفوذ کاهش پیدا کرده و کندروانی قیر افزایش پیدا کرد. تاثیر این سه نوع فیلر، بر نقطه نرمی متفاوت بوده است. نانو-مونت موریلونیت، عملکرد بسیار خوبی نسبت به دو فیلر دیگر داشته است. پژوهش آقای تانگ نشان داد SBS باعث تخریب مقاومت در برابر پیر شدگی شده و این درحالی است که بهترین مقاومت را نانوکامپوزیت SBS+Nanoclay داشته است (تانگ و همکاران، ۲۰۱۰). در سال ۲۰۱۲ آقای گلستانی و همکاران، طی یک پژوهش، استفاده از نانورس Cloisite 15A را به همراه دو نوع SBS با ساختار خطی و غیر خطی (شاخه ای) مورد بررسی قرار دادند. افزایش بیش از نسبت $\text{SBS/OMMT} = 100/50$ ساختار الاستیک آسفالت پلیمری را تخریب می کند (گلستانی و همکاران، ۲۰۱۲). پژوهشی دیگر در مصر در سال ۲۰۱۵ انجام پذیرفت که در آن به بررسی عمر خستگی روسازی آسفالتی با قیر اصلاح شده با نانوکامپوزیت SBS+Nanoclay پرداخته است. در این پژوهش نیز از پلیمر خطی با میزان ۵٪ وزنی و مقادیر متغیر نانورس در درصدهای ۲-۴-۶ و ۸ در صد وزنی قیر استفاده شد. در این پژوهش نیز علاوه بر بررسی قیر، مخلوط های آسفالتی نیز ساخته شده و آزمایشات کشش غیر مستقیم و خستگی بر روی مخلوط ها انجام شد. نتایج نشان داد استفاده از نانوکامپوزیت SBS+Nanoclay علاوه بر مشاهدات مشابه با تحقیقات دیگر (کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی) میزان مقاومت در برابر خستگی را در قیر تا ۳/۴ برابر قیر پایه افزایش می دهد. همچنین میزان ۵٪ پلیمر و ۶٪ نانورس، مقاومت کششی مخلوط آسفالتی را تا ۳ برابر قیر پایه افزایش داد. و در نهایت افزایش طول

عمر روسازی تا ۳ برابر پیش بینی شد (خداری، ۲۰۱۵). با توجه به موارد فوق، ترکیب نانورس و SBS می تواند قیر اصلاح شده با خواص مطلوب را در اختیار قرار دهد. لازم به ذکر است نوع نانورس و SBS مناسب در بیشتر پژوهش ها ب ترتیب Cloisite 15-A و پلیمر خطی 501 معرفی شده و درصدهای بهینه آنها در حالت ترکیبی، در بازه ۱/۵ تا ۲/۵ درصد برای نانورس و ۵٪ برای SBS بوده است. یک مهمترین مراحل اصلاح قیر، نحوه اصلاح آن می باشد که عوامل موجود در آن می تواند به طور مستقیم بر کیفیت قیر اثر بگذرد. بدیهی است مدت زمانی که قیر در دمای بالا باقی بماند باعث پیرشدگی قیر شده و همچنین نیروی برشی ممتد در آن بازه زمانی نیز بر کیفیت قیر پایه تاثیرگذار است. نانوکامپوزیت ها از ورود زنجیره های پلیمر در حالت مذاب به داخل لایه ها و طی یک فرایند ترمودینامیکی شکل می گیرند. این فرایند معمولاً تحت برش از مخلوط پلیمر و سیلیکات های لایه ای، در دمایی بیش از دمای نرم شدن پلیمر انجام می شود. بسته به میزان نفوذ پلیمر به درون پرکننده، ساختار متفاوتی حاصل خواهد شد که اگر پلیمر و پرکننده ناسازگار باشند محصول نهایی با ابعاد میکرو به جای نانو حاصل می شود. قیر غیر قطبی، آمورف با ساختار غیر کریستالی و دارای زنجیره های کمتری در مقایسه با سایر پلیمرها است که لازم است به منظور شرایط بهتر اختلاط به استفاده از نیروی برشی اقدام کرد. روش مذاب با استفاده از نیروی برشی مناسب ساختار رس را به صورت ورقه ای جدا از هم (ساختار پراکنشی) نزدیک می کند (رستگار و کویکی، ۲۰۰۸). در پژوهشی در سال ۲۰۰۸ روش اختلاط بدین صورت بود که ابتدا قیر تا دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد گرم شد و SBS به مدت ۱ دقیقه در دور ۲۰۰rpm با قیر مخلوط شد تا اختلاط اولیه انجام شود. سپس، دمای قیر به ۱۸۰ درجه سانتیگراد افزایش یافته و پلیمر SBS و قیر با سرعت ۳۰۰۰rpm به مدت ۳۰ دقیقه با هم ترکیب شدند (زیاری و همکاران، ۲۰۰۸).

در پژوهشی در سال ۲۰۰۲ نحوه اختلاط با استفاده از همزن برشی با دور ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۷۵ دقیقه به منظور ایجاد مخلوط همگن پلیمر و قیر بود (صدرالدینی و همکاران،

مواد، استفاده از پیش اختلاط پیشنهاد شد. با این تعریف که ابتدا مواد اصلاح کننده با استفاده از مخلوط کن داخلی^۱ و یا اکسترودر، ابتدا با یکدیگر مخلوط شده و سپس ماده حاصله با قیر مخلوط می شود. در سال ۲۰۰۲ با استفاده از اکسترودر و مخلوط کن داخلی اقدام به تولید ماده اصلاح کننده کردند که در آن به مدت ۱۰ دقیقه و با سرعت ۶۰rpm پلی استایرن و پلی بوتادیان با هم مخلوط شده و سپس ماده بدست آمده با استفاده از مخلوط کن برشی با دور ۱۴۰۰rpm با قیر مخلوط شد. دمای اختلاط و مدت زمان آن نیز ۱۷۰ درجه سانتیگراد و ۳۵ دقیقه بوده است (برزگری و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین در پژوهشی دیگر با استفاده از مخلوط کن داخلی پلیمر SBS در مخلوط کن داخلی که تا دمای ۱۹۰ درجه سانتیگراد گرم شده اضافه می شود. کل زمان تولید آمیخته اصلی ۱۳ دقیقه بوده است. مدت زمان اختلاط ۱ ساعت و دور آن ۴۰۰rpm بوده است (تیدجانی و ویکی، ۲۰۰۱). در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۶ دو روش برای تهیه نمونه ها انتخاب شد. روش اول با استفاده از اختلاط فیزیکی، به این معنا که مواد اصلاح کننده به طور جدا در مخلوط کن برشی به قیر اضافه می شوند و روش دوم که همان روش پیش اختلاط است. در این پژوهش نیز، دما و دور اختلاط افزودنی ها با قیر، ۱۸۰ درجه سانتیگراد و ۵۵۰rpm بوده و دما و دور پیش اختلاط نیز ۱۷۰ درجه سانتیگراد و دور ۶۰rpm بوده است (محمدی رودباری و همکاران، ۲۰۱۶).

مطالعات پیرامون افزودنی های مختلف در قیر در سالهای اخیر بسیار گسترده شده است بطوریکه مطالعات کاملی در رابطه با SBS و نانورس به صورت سه فازی نیز صورت گرفته است. اما باید توجه داشت صرفاً افزودن اصلاح کننده به قیر، مشکلاتی که به صورت علی با آنها مواجه هستیم را حل نمی کند. حال آنکه اضافه کردن برخی اصلاح کننده ها در مقیاس آزمایشگاهی نیز با مشکلاتی همراه است. همچنین بیشتر پژوهشگران صرفاً به بررسی خواص رئولوژی ناشی از افزودن اصلاح کننده ها پرداخته اند و توجهی به نحوه

در سال ۲۰۰۹ نیز به منظور اصلاح قیر با نانورس به تنهایی، با استفاده از مخلوط کن برشی، با اضافه کردن نانورس به قیر مذاب در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه با دور ۵۵۰rpm اقدام به تهیه قیر اصلاح شده کردند (غفارپور جهرمی و خدایی، ۲۰۰۹). افزایش زمان اختلاط در پژوهشی دیگر مشاهده شد که در آن پژوهشگران به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد و دور ۲۵۰۰rpm اقدام به اختلاط نانورس و قیر نمودند (الشفیع و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۵ با افزایش دور و کاهش زمان سعی در رسیدن به هدف اختلاط بهتر داشتند به طوریکه مدت زمان اختلاط رس و قیر ۳۰ دقیقه و دور اختلاط به ۵۲۰۰rpm افزایش یافت. همچنین دمای اختلاط در این پژوهش ۱۵۵ درجه سانتیگراد بود (کاووسی و برقابانی، ۲۰۱۵). به منظور اصلاح قیرهای اصلاح شده با پلیمر و نانورس، بدیهی است مکانیسم نمونه سازی با تفاوت هایی روبه روست. در این موارد که اغلب به صورت دو مرحله ای اقدام به نمونه سازی می شود به مواردی به طور خلاصه اشاره می شود. در سال ۲۰۰۹ آقای صادق پور و همکاران اقدام به اصلاح قیر با استفاده از SBS و OMMT کردند که در آن ابتدا قیر به دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد رسیده و سپس میزان ۵٪ SBS به آن اضافه شده و به مدت ۲ ساعت با دور ۴۰۰۰rpm سعی در تولید قیر همگن داشتند. در مرحله بعد با اضافه کردن نانورس با حفظ دما و دور اختلاط، به مدت ۳۰ دقیقه نیز قیر SBS و OMMT را مخلوط کردند (صادقپور گلوپیک و همکاران، ۲۰۱۰). در پژوهش دیگر، در دمای 180 ± 5 درجه سانتیگراد، قیر و SBS به مدت ۲ ساعت در دور ۴۵۰۰rpm مخلوط شدند و پس از آن با حفظ دما و کاهش دور به ۴۰۰۰rpm نانورس به مدت ۴۵ دقیقه درون قیر حاوی SBS مخلوط شد (لسور و لیتل، ۱۹۹۹). کاهش زمان اختلاط در دور و دمای مشابه تحقیقات قبل در پژوهش آقای تانگ مشاهده شد که مدت زمان اختلاط SBS را به ۱ ساعت کاهش داد (تانگ و همکاران، ۲۰۱۰). در نوع دیگری از اختلاط

¹ Internal mixer

است. پلیمر SBS مورد استفاده، دارای ساختار مولکولی خطی ساخت شرکت ال جی چم^۱ کره جنوبی با نام تجاری SBS 501LG می باشد که مشخصات آن در جدول ۲ قابل مشاهده است. نانورس از نوع Cloisite 15A می باشد. این ماده از نوع ارگانوفیلیک مونت موریلونیت (OMMT) می باشد که مشخصات آن در جدول شماره ۳ قابل مشاهده است. 15A یک مونت موریلونیت طبیعی اصلاح شده با یک نمک آمونیوم چهارتایی است. پارافین واکس مورد استفاده از نوع جامد پرک شده، تولید شرکت ANC امریکا با کد تجاری SP-173 بوده و مشخصات آن مطابق با جدول ۴ می باشد. واکس پارافینیک یک ترکیب هیدروکربنی سیر شده که در آن، تمامی اتم های کربن موجود در مولکول با پیوندهای ساده به یکدیگر متصل اند.

اختلاط، تخریب های ناشی از اعمال نیروی برشی بالا و مدت زمان باقی ماندن قیر در دمای بالا... نداشته اند. در این پژوهش به بررسی تغییرات خواص قیر ناشی از تغییر شرایط فرآیندی ساخت نمونه ها و اثر کاهش دور بر آنها می پردازد. فرض بر آنست با اصلاح روش ساخت نمونه با استفاده از پیش اختلاط، بتوان با کاهش دور به خواص نزدیک به اختلاط عادی دست یافت و در مرحله بعد با دور مشابه روش عادی، خواص مناسب تری را از نمونه های اصلاح شده برداشت کرد.

۲. مواد و روش ها

۲-۱. مواد

قیر مورد استفاده در این پژوهش، قیر خالص ۶۰/۷۰ بوده و مشخصات آن در جدول شماره ۱ قابل مشاهده

جدول ۱ مشخصات قیر و نتایج آزمایشات کفایت آن

آزمایش	درجه نفوذ (dmm)	نقطه نرمی (°C)	شکل پذیری (cm)	کندروانی در ۱۳۵ °C (Pa.s)	نقطه اشتعال (°C)
مقدار توصیه شده	۷۰-۶۰	۵۶-۴۹	حداقل ۱۰۰	حداکثر ۳	حداقل ۲۳۲
قیر پایه	۶۰	۵۰	بیش از ۱۰۰	۰/۳۶۶	۳۲۴

جدول ۲: مشخصات پلیمر استایرن بوتادین استایرن - LG501

مشخصات	واحد	مقدار	استاندارد
چگالی	g/cm ³	۰/۹۴	ISO 2781
مقدار استایرن	%	۳۱	LSYQS1D011
نقطه ذوب	°C	۱۸۰	-
TSV (ویسکوزیته انحلال در تولوئن)	est	۱۳/۴	ASTM D445
شکل ظاهری	-	گرانول	-
ساختار مولکولی	-	خطی	-

جدول ۴: مشخصات پارافین واکس

مشخصات	مقدار/نوع
خانواده شیمیایی	واکس معدنی
شکل ظاهری	جامد-پرک شده
رنگ	سفید
نقطه اشتعال	۲۰۴ °C
نقطه جوش	۳۴۳ °C

جدول ۳: مشخصات نانورس Cloisite-15A

مشخصات	مقدار/نوع
اصلاح کننده آلی	2M2HT ^۲
پایه	مونت موریلونیت
آنیون	کلراید
وزن مخصوص غیر مترکم (Kg/m ³)	۲۳۰
چگالی (g/cc)	۱/۶۶

ammonium

^۱ LG Chem

^۲ dimethyl, dihydrogenated tallow, quaternary

نقطه ذوب	۵۸/۹C°	سطح ویژه (m ² /g)	۹۴۰۰
مواد فرار	ناچیز	غلظت اصلاح کننده (meq/100g)	۱۲۵
انحلال در آب	ناچیز	قطر ذرات	۱۰ درصد کمتر از ۲ میکرومتر
چگالی بالک	۸۳۹ Kg/m ³		۵۰ درصد کمتر از ۶ میکرومتر
			۹۰ درصد کمتر از ۱۳ میکرومتر

۲-۲. روند آزمایشگاهی

۲-۲-۱. ساختن نمونه ها

تعداد ۱۲ نمونه قیری مورد بررسی قرار گرفت که در آن یک نمونه قیر پایه مطابق مشخصات ذکر شده و قیرهای حاوی SBS و پارافین واکس و نانورس در درصدهای متفاوت می باشد. یک نمونه بدون افزودنی که صرفاً در شرایط فرآیندی ساخت قرار گرفته نیز به

منظور بررسی تاثیر اعمال نیروی برشی در دمای بالا تهیه شد. به منظور اختلاط SBS در قیر، تمایل به دماهای زیاد برای کاهش گرانیروی و رسیدن به اختلاطی مناسب وجود دارد. از طرفی با افزایش دما، سرعت تخریب پلیمر حد بالای دمایی را برای اختلاط معین می کند. لذا ناحیه دمایی محدود به C° ۲۰۰ < دمای اختلاط < ۱۸۰ ایجاد می شود.

جدول ۵ مشخصات نمونه ها

Wax %	Nanoclay %	SBS %	دور اختلاط rpm	کد نمونه	شرایط فرآیندی
۰	۰	۰	۰	Neat	-
۰	۰	۰	۴۵۰۰	S-Neat	مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۰	۵	۴۵۰۰	HC0	مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۰/۵	۵	۴۵۰۰	HCL45	مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۱/۵	۵	۴۵۰۰	HCM45	مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۲/۵	۵	۴۵۰۰	HCH45	مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۰/۵	۵	۴۵۰۰	PCL45	پیش اختلاط + مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۱/۵	۵	۴۵۰۰	PCM45	پیش اختلاط + مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۲/۵	۵	۴۵۰۰	PCH45	پیش اختلاط + مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۰/۵	۵	۳۰۰۰	PCL30	پیش اختلاط + مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۱/۵	۵	۳۰۰۰	PCM30	پیش اختلاط + مخلوط کن برشی با دور بالا
۱/۵	۲/۵	۵	۳۰۰۰	PCH30	پیش اختلاط + مخلوط کن برشی با دور بالا

۲-۲-۱-۱. ساخت پیش آمیخته

به منظور ساخت نمونه های ردیف ۷ تا ۱۲ به روش پیش اختلاط، ابتدا باید مواد افزودنی (SBS، نانورس و پارافین واکس) با هم مخلوط شده و سپس به قیر اضافه شوند. سه آمیخته با نام های MB1، MB2، MB3 و ساخته شد که در آن میزان نانورس متغیر بوده که در جدول ۶ قابل مشاهده است. نکته دیگر در تهیه پیش اختلاط، انتخاب دستگاه تولید آمیخته اصلی بود. به منظور جلوگیری از جدایی فاز آمیخته اصلی تولیدی و تخمین زمان افزودن مواد، از دستگاه مخلوط کن داخلی استفاده شد. دستگاه مورد استفاده ساخت شرکت

Brabender آلمان بوده است. این دستگاه با استفاده از دو روتور در محفظه با ظرفیت ثابت و اعمال گشتاور، نیروی برشی به منظور اختلاط اعمال می کند. به منظور ساخت هر یک از آمیخته های پلیمری، دمای دستگاه را به ۱۸۰±۵ درجه سانتیگراد رسانده و به مدت ۳۰ دقیقه فرصت هم دمایی تمامی اجزا داده شد. با دور ۱۰rpm مخلوط کن شروع به کار کرده و سپس SBS وارد محفظه شد. نکته مهم در استفاده از دستگاه مخلوط کن داخلی، زیر نظر داشتن منحنی گشتاور خروجی از دستگاه بود که باید با توجه به آن اقدام به اضافه کردن سایر افزودنی ها کرد (شکل ۱). بعد از اضافه کردن

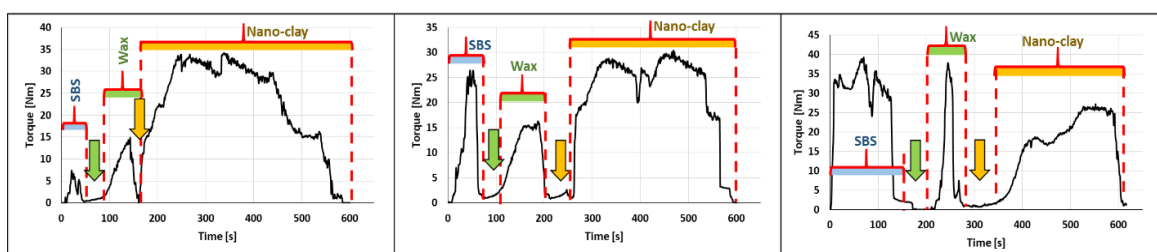
است. پس از کاهش مقدار گشتاور اقدام به افزودن تدریجی نانورس شد و پس از رویت کاهش نسبی گشتاور در پایان مدت ده دقیقه، پایان عمل اختلاط فرارسید. در نمودار آمیخته های شماره ۲ و ۳ قابل مشاهده است که به علت تفاوت میزان رس در آنها (افزایش)، تغییراتی مانند افزایش زمان اضافه کردن رس و کاهش گشتاور و بازه زمانی در دو افزودنی اول به علت کاهش مقدار، داشته که بدیهی می باشد.

SBS، با توجه به نمودار گشتاور و فرارسیدن زمان مناسب، پارافین واکس به تدریج به SBS اضافه شده که باعث ایجاد بستر مناسب برای اضافه کردن نانورس می شود. مدت زمان اختلاط در دور ۶۰ rpm، ۱۰ دقیقه بود.

همانطور که در نمودارها گشتاور-زمان شکل ۱ مشخص است این نمودار دارای سه بازه با گشتاور بالاست که در آن اضافه کردن هر یک از سه ماده را نشان می دهد. در بازه اول SBS اضافه شده و بعد از ذوب کامل که گشتاور کاهش یافته پارافین واکس اضافه شده

جدول ۶ مشخصات آمیخته های اصلی

	Materials	Percent	Amount (gr)	Sum	Extruded
1 st Masterbatch	SBS	-	99	138.6	136
	Nanoclay	10	9.9		
	Paraffin Wax	30	29.7		
2 nd Masterbatch	SBS	-	87	139.2	136
	Nanoclay	30	26.1		
	Paraffin wax	30	26.1		
3 rd Masterbatch	SBS	-	78	140.4	139
	Nanoclay	50	39		
	Paraffin wax	30	23.4		



شکل ۱: نمودار گشتاور-زمان - الف: پیش آمیخته ۱، ب: پیش آمیخته ۲، ج: پیش آمیخته ۳

تروپ استفاده شد. ترتیب اختلاط مواد در نمونه های HCO تا HCH45 بدین صورت بود که ابتدا SBS به مدت ۵۰ دقیقه در دور ۴۵۰۰ rpm تحت دمای ۱۸۰

۲-۲-۱-۲. اختلاط مواد با قیر
به منظور اختلاط مواد افزودنی، از دستگاه همزن برشی با دور بالا^۱ با نام تجاری کینماتیکا پلی

² Kinematica - Polytron

¹ High-Shear mixer

درجه سانتیگراد مخلوط شده سپس به منظور کاهش کندروانی، پارافین وکس به آن اضافه شده و ۱۰ دقیقه SBS اختلاط ادامه پیدا کرد. سپس نانورس به مخلوط قیر+SBS+ پارافین واکس اضافه شده و به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شد. نمونه های دارای آمیخته اصلی در یک مرحله به قیر اضافه شده و به مدت ۹۰ دقیقه عمل اختلاط آن با قیر انجام پذیرفت. یکی از برتری های ساخت آمیخته اصلی از مواد افزودنی را می توان تسهیل فرآیند اختلاط آن با قیر از منظر اجرایی بودن دانست.

۲-۲-۲. آزمایش پراش پرتوی ایکس XRD
در این پژوهش از دستگاه XRD مدل XRD 3003 PTS شرکت SEIFERT ساخت کشور آلمان استفاده شد. محدوده زاویه ای بین ۰/۵ تا ۱۰ درجه با فاصله ۰/۰۱ درجه در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتیگراد) و نرخ ۲ درجه در دقیقه تعیین و انجام شد. همچنین مشخصات اشعه از جمله طول موج، قدرت و امپراژ مورد استفاده به ترتیب ۰/۱۵۴ نانومتر، ۴۰kV و

۲-۲-۲. آزمایش پراش پرتوی ایکس XRD

۲-۲-۳. آزمایشات کلاسیک
آزمایشات مر سوم کلاسیک قیر شامل درجه نفوذ طبق استاندارد (ASTM D5M-13, 2013)، نقطه نرمی طبق استاندارد (ASTM D36 -14e1, 2014) و شکل پذیری در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد طبق استاندارد (ASTM-D113, 2007) انجام پذیرفت. همچنین با استفاده از دستگاه ویسکومتر دورانی بروکفیلد (مدل DV-2T) ویسکوزیته نمونه های قیر در دمای ۱۳۵ و ۱۶۵ درجه سانتیگراد مطابق استاندارد (ASTM D4402M-15, 2015) مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۷: نتایج زاویه پیک

Sample ID	Neat	S-Neat	HC0	HCL45	HCM45	HCH45	PCL45	PCM45	PCH45	PCL30	PCM30	PCH30
Peak 2θ 0.5 ≤ 2θ ≤ 10 (°)	-	-	-	1.81	1.95	2.11	0.9	1.20	1.26	1.85	1.97	2.20

۲-۲-۴. آزمایشات رئولوژیکی قیر

به منظور بررسی خواص و پارامترهای رئولوژیکی قیر از دستگاه رئومتر برش دینامیکی ساخت شرکت Anton-paar استفاده شد. اساسا پارامترهای مستخرج از این دستگاه شامل مدول مختلط برشی (G^*)، مدول ذخیره برشی (G')، مدول اتلاف برشی (G'') و زاویه اختلاف فاز می باشد (آیری، ۲۰۰۳).

۲-۲-۴-۱. آزمایش تعیین رده عملکردی دمای

بالا (PG)

این آزمایش مطابق با استاندارد (ASTM D7175-15, 2015) و مطابق با تحقیقات و گزارشات SHRP در

تغییرات درجه نفوذ در نمونه های Neat و S-Neat می توان به کاهش ۱۵ درصدی درجه نفوذ قیر، افزایش ۵ درصدی نقطه نرمی، کاهش ۸ درصدی شکل پذیری و افزایش ۲۰ درصدی PI پس از اعمال نیروی برشی با دور بالا اشاره کرد. همچنین با توجه به نمودار، نمونه های PCL30 و PCM30 و PCH30 اگر چه از نظر مقدار افزودنی با نمونه های PCH45، PCM45، PCL45 و همچنین HCH45 و HCM45 و HCL45 یکسان هستند اما به این علت که در دور پایین تر اختلاط صورت گرفته، میزان درجه نفوذ بیشتر (افزایش کمتر سفتی) در آنها قابل مشاهده است. با افزایش مقدار نانورس میزان حساسیت حرارتی کاهش می یابد (نقطه نرمی افزایش می یابد). باید توجه داشت نمونه های PCL30-PCM30-PCH30 به علت کاهش دور اختلاط، نفوذ پذیری بیشتری را داشتند در آزمایش نقطه نرمی مقدار کمتری را از خود نشان دادند. با افزایش مقدار افزودنی ها خاصیت شکل پذیری کاهش پیدا کرده است. نمونه های PCL30-PCM30-PCH30 به علت کمتر بودن دور اختلاط شکل پذیری مناسب تری داشتند و نمونه های HCH45-HCM45-HCL45 کمترین شکل پذیری را نسبت به نمونه های نظیر خود (ساخته شده به روش پیش اختلاط) داشتند. علت این امر را می توان عدم اطمینان از پخش مناسب مواد افزودنی دانست. کندروانی با اضافه کردن پلیمر و نانورس مطابق با انتظار افزایش یافته است. از آنجایی که پلیمرها می توانند اجزای با کندروانی کمتر قیر (نظیر روغن های اشباع) را جذب کنند، به آسانی با افزودن اصلاح کننده های پلیمری، می توان کندروانی قیر را افزایش داد. این مقدار در نمونه HCH45 به ۳ پاسکال-ثانیه رسیده که از منظر پمپاژ و اختلاط با سنگدانه های مشکلاتی را ایجاد کند. اما قیر اصلاح شده با همین مقدار افزودنی با روش های پیش اختلاط (نمونه های PCH45 و PCH30) کندروانی کمتری را از خود نشان داده است. علت این امر را در می توان در نوع اختلاط نمونه HCH45 دانست بطوریکه احتمال خارج شدن از همگن بودن (عدم پایداری ذخیره سازی مناسب) ناشی از کیفیت پایین تر اختلاط، بالاتر از روش پیش اختلاط

فرکانس ثابت ۱۰ رادیان بر ثانیه و در دماهای مختلف عملکردی انجام می پذیرد. آزمایش بر روی نمونه قرص در قالب مخصوص با قطر ۲۵ و ضخامت ۱ میلیمتر انجام می پذیرد. همچنین میزان زمان هم دمایی ۱۰ دقیقه مطابق با توصیه ها انجام می پذیرد. حداقل مجاز توصیه شده توسط آیین نامه برای پارامتر شیار شدگی Superpave، $(G^*/\text{Sin}\delta)$ ۱ کیلو پاسکال برای قیر پیرنشده و ۲/۲ کیلو پاسکال برای نمونه پیر شده می باشد. لذا هر کدام که در دمای پایین تری این مقدار را ارضا کرد به عنوان دمای بالای نمونه PG XX معرفی می شود.

۲-۲-۴-۲. آزمایش جاروب دما

این آزمایش نیز با استفاده از دستگاه DSR انجام شده و با نگاهی به پژوهش های پیشین (گارسیا مورالس و همکاران، ۲۰۰۶) نمونه ها با قطر ۲۵ و ضخامت ۱ میلیمتر مورد آزمایش قرار گرفتند. بازه دمایی آزمایش ۳۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد با نرخ ثابت افزایش دمای ۴ درجه در دقیقه انجام پذیرفت. فرکانس برابر با ۱۰ رادیان بر ثانیه (معادل ۱/۵۹ هرتز) و کرنش نوسانی ۱٪ معین شد. سایر موارد اجرایی اعم از زمان هم دمایی و ... مطابق با استاندارد (AASHTO T315-10, 2010) مربوط به تعیین رده عملکردی بالا انجام پذیرفت.

۲-۲-۵. آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

به منظور بررسی عملکرد دمای پایین، از این آزمایش برای تعیین سفتی و m-value نمونه های پیر شده کوتاه مدت و بلند مدت (PAV) استفاده شد. این آزمایش بر اساس استاندارد (AASHTO T315-10, 2010) انجام پذیرفت.

۳- نتایج و تحلیل آنها

۳-۱. آزمایشات کلاسیک

همانطور که در جدول ۸ ملاحظه می شود با افزایش مقدار مواد افزودنی در قیر درجه نفوذ کاهش یافته است. باید توجه داشت اعمال نیروی برشی با دور بالا نیز در سفت شدن قیر تاثیر گذار بوده بطوریکه با توجه به

قیرها را از حالت نیوتنی مشخص می‌نماید. مطابق با روش شل^۳ شاخص نفوذپذیری قیر بر در معادله (۵-۴) نشان داده شده است.

$$PI = \frac{1952 - 500 \log(\text{pen}_{25}) - 20 \times SP}{50 \log(\text{pen}_{25}) - SP - 120} \quad (1-3)$$

۳-۲-۳. PVN

فرضیات خطی بودن رابطه لگاریتم درجه نفوذ و حرارت و همچنین درجه نفوذ ۸۰۰ برای قیر در نقطه نرمی، بسیار محدود کننده می‌باشد. به همین دلیل محققان روش PVN را پیشنهاد کردند که بر اساس درجه نفوذ قیر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و کندروانی آن در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد، با استفاده از رابطه (۶-۴) تعیین می‌شود.

$$PVN = -1.5 \frac{(4.258 - 0.7967 \log(\text{pen}_{25})) - \log v}{(4.258 - 0.7969 \log(\text{pen}_{25})) - (3.46289 - 0.61094 \log(\text{pen}_{25}))} \quad (1-4)$$

در این روش هرگاه $PVN > -0.6$ باشد، نشانگر قیر با حساسیت حرارتی کم، $-1 < PVN < -0.6$ قیر با حساسیت حرارتی متوسط و $PVN < -1$ قیر با حساسیت حرارتی بالا می‌باشد و همواره شاخص درجه نفوذ اصلاح شده قیر، برای تهیه آسفالت نباید کمتر از ۰/۵- باشد.

است که باعث کاهش کندروانی نمونه PCH45 نسبت به نمونه HCH45 می‌شود. با توجه به نتایج کندروانی در این دما، محدوده تغییرات و همچنین مقادیر نوسان آن به طور قابل ملاحظه ای نسبت به کندروانی در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. با افزایش دما و نزدیک تر شدن دمای قیر به دمای ذوب پلیمر و در نتیجه حرکت روان تر اجزا، مقدار کندروانی در مجموع کاهش می‌یابد و به تبع آن نرخ تغییرات نیز کوچکتر می‌شود.

۳-۲. شاخص درجه نفوذ

۳-۲-۱. استاندارد

با تعریف شاخص نفوذپذیری قیر^۱، (PI) جهت تعیین حساسیت حرارتی^۲ قیرها خواهیم داشت:

$$PI = \frac{20 - 500m}{1 + 50m} \quad (1-1)$$

$$m = \frac{d \log P}{dT} = \frac{20 - PI}{10 - PI} \times \frac{1}{50} \quad (1-2)$$

۳-۲-۲. شل

مشاهدات نشان داده که نشانه درجه نفوذ PI، صرفاً حساسیت و سکوزیته قیر را نسبت به درجه حرارت نشان نمی‌دهد، بلکه کمیتی است که بیشتر، انحراف

جدول ۸ مشخصات فیزیکی نمونه‌ها

Properties / Sample ID	Penetration at 25°C [dmm] ASTM-D5	Softening point [°c] ASTM D36	Ductility at 25°C [cm] ASTM D113	PI (Standard)	PI (Sell)	PI (PVN)	Rotational Viscosity at 135°C [Cst]	Rotational Viscosity at 165°C [Cst]
Neat	60	50	>100	-0.77	-0.78	-0.89	366	106
S-Neat	51	52.3	96	-0.59	-0.60	-0.93	398	116
HC0	36	68.6	76	1.79	1.79	0.55	1600	415
HCL45	32	70.9	69	1.89	1.89	0.71	2020	423
HCM45	31	71	60	1.84	1.84	0.84	2292	434
HCH45	30	72.1	52	1.93	1.93	1.04	3000	464
PCL45	33	70	70	1.82	1.82	0.77	2050	430
PCM45	30	72	63	1.92	1.92	1.06	2817	534
PCH45	29	73.2	55	2.03	2.03	1.15	2900	590
PCL30	35	67.1	72	1.48	1.47	0.79	1976	420
PCM30	33	69	63	1.66	1.66	1.01	2491	450
PCH30	32	70.2	57	1.78	1.78	1.05	2641	480

³ The Shell Bitumen Handbook

¹ Penetration Index, PI

² Thermal Susceptibility

دمای عملکردی SHRP در تمامی نمونه های ثابت بوده و به میزان ۸۲ می‌باشد لذا در نمایش عدد دمای بالا، مقدار ۸۲ ذکر میشود (PGXX=PG82). با بررسی دمای دقیق عملکردی یا True PG در دو حالت پیرنشده و پیر شده، ملاحظه می شود که روند کاهش دمای عملکردی با اضافه کردن نانورس و درمقابل، دمای افزایشی عملکردی برای نمونه های RTFO مشهود است. علت این تقابل، تفاوت روند پیرشدگی با اضافه کردن نانورس بوده و لازم به تاکید است تمامی این تغییرات نسبت به تقسیم بندی SHRP به اندازه ای جزئی بوده که هیچکدام در افزایش یا کاهش درجه عملکردی SHRP موثر نبوده و این مقادیر صرفاً در مقیاس کوچک جهت نمایش نرخ تغییرات مورد بررسی قرار گرفت. نمونه های ساخته شده به روش پیش اختلاط با دور ۴۵۰۰rpm دمای عملکردی دقیق بالاتری را نسبت به نمونه های ساخته شده بدون پیش اختلاط داشته در حالی که این پارامتر در رابطه با نمونه های (PCH30-PCM30-PCL30) از سایر نمونه های نظیر خود پایین تر بوده است.

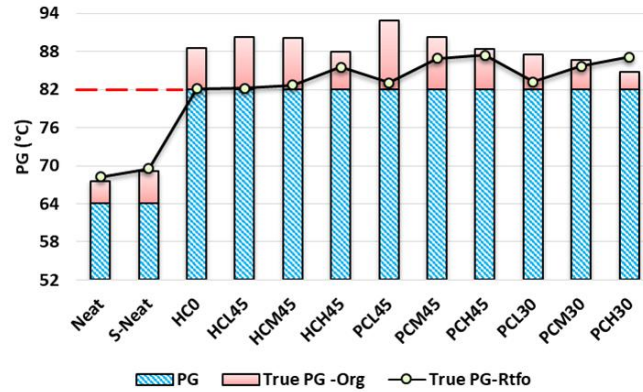
همانطور که ملاحظه می‌شود بازه شاخص درجه نفوذ قیرهای اصلاح شده در این آزمایش میانگینی برابر با ۱/۸۱ دارند و از این منظر حساسیت حرارتی قیرها به طور کلی بهبود یافته است. مقدار PI در نمونه شماره PCH45 با بیشترین میزان افزودنی که به صورت پیش اختلاط ساخته شده بیشترین مقدار PI را به علت الاستیسیته بالا از خود نشان می‌دهد. همچنین با بررسی نمونه های مشابه آن (HCH45 و PCH30) وضعیت نمونه PCH30 بهتر بوده که علت این امر را می‌توان ناشی از کاهش دور اختلاط دانست. که در صورت صرف نظر از تاثیر دور اختلاط، می‌توان گفت نمونه PCH30، مقدار قابل قبولی از شاخص درجه نفوذ (نسبت به نمونه های HCH45 و PCH45) از خود نشان داده است و نمونه شماره PCL30 نزدیک ترین PI به ۱ را دارد. البته لازم به ذکر است به طور کلی نمونه های با خاصیت الاستیسیته بالا، PI بالاتری را از خود نشان می‌دهند.

۳-۳. مشخصات رئولوژیکی

۳-۳-۱. آزمایش رده بندی عملکردی

جدول ۹ نتایج دمای بالا عملکردی

Sample ID	True PG (°c)		G*/Sinδ [pa]		PG Temp.
	RTFO	Org	RTFO	Org	PG-XX
Neat	68.2	67.5	4125	1650	64
S-Neat	69.5	69.2	5270	2060	64
HC0	82.1	88.5	2210	1900	82
HCL45	82.2	90.3	2330	2310	82
HCM45	82.7	90.1	2360	2030	82
HCH45	85.5	87.9	3070	1740	82
PCL45	83.1	92.9	2430	2490	82
PCM45	86.9	90.3	3570	2220	82
PCH45	87.4	88.4	3770	1930	82
PCL30	83.2	87.5	2500	1670	82
PCM30	85.7	86.6	3140	1490	82
PCH30	87.1	84.7	3600	1330	82



شکل ۲: نمودار مقایسه دمایی عملکردی SHRP و دمایی دقیق در دو حالت پیرنشده و پیش‌شده کوتاه مدت (RTFO)

متغیر دما عملکردی شارپ، دمایی عملکردی دقیق در دو حالت پیر شده و پیر نشده می‌تواند به کنترل کننده بودن هر کدام از متغیرها در تعیین دمایی عملکردی پی برد. به منظور تکمیل بازه دمایی عملکردی در دمایی پایین، از آزمایش BBR استفاده شد که نتایج آن در جدول ۱۰ قابل مشاهده است.

تأثیر نیروی برشی اختلاط بر دمایی عملکردی دقیق را می‌توان با مقایسه این پارامتر در نمونه‌های Neat و S-Neat مشاهده کرد که بین ۲ تا ۳ درصد می‌باشد که مشابه مقدار تغییرات میان نمونه‌های HCH45, HCM45, HCL45 و PCL30-PCM30 است. در شکل ۲ با توجه به سه

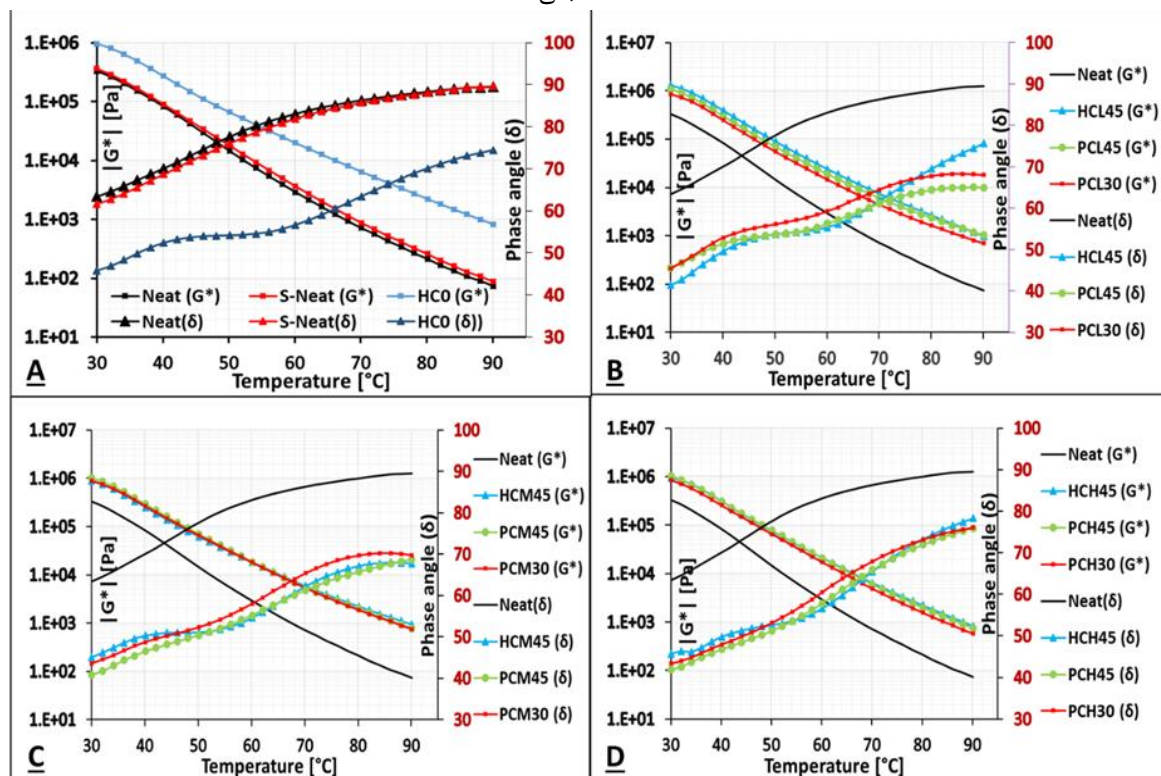
جدول ۱۰: طبقه بندی عملکردی نمونه‌های قیری

Sample ID	Neat	S-Neat	HC0	HCL45	HCM45	HCH45	PCL45	PCM45	PCH45	PCL30	PCM30	PCH30
PG	64	64	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
	16	16	10	10	10	10	10	10	10	16	10	10

تر)، در برابر این نوع خرابی مقاومت می‌باشد. این مهم با توجه و بررسی نمودارهای تغییرات G^* و زاویه اختلاف فاز (δ) و پارامترهای مستخرج از آنها قابل بررسی است.

۳-۳-۲. آزمایش جاروب دما

بطور کلی بر اساس پارامترهای سوپرپیو و توصیه های SHRP مخلوط آسفالتی تهیه شده از قیری که دارای G^* بالاتر و زاویه اختلاف فاز پایین تر (الاستیک



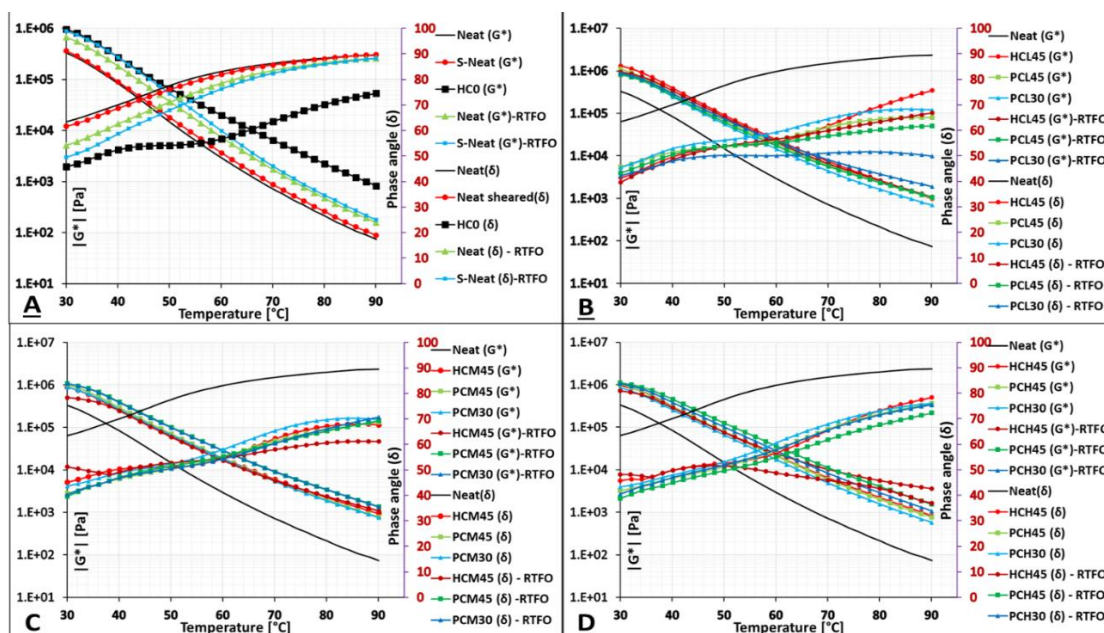
شکل ۳ نمودارهای مدول مختلط برشی و زاویه اختلاف فاز بر حسب دما - پیرنشده

نشان می‌دهد که ۵٪ آن را می‌توان به علت نیروی برشی کمتر اعمال شده بر روی نمونه شماره ۱۰ دانست. زاویه اختلاف فاز، در بازه دمایی ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد نمونه HCL45 خاصیت الاستیک تر داشته و نمونه های PCL30 و PCL45 بر هم منطبق اند. اما در بازه دمایی ۴۵ تا ۷۰ درجه سانتیگراد مقادیر نمونه های HCL45 و PCL45 یکسان بوده و شرایط الاستیک تری نسبت به نمونه PCL30 دارند. در دمای ۷۶ تا ۹۰ درجه سانتیگراد رفتار ایده‌آل و قابل قبول به ترتیب برای نمونه PCL30، PCL45 و پس از آن در نمونه HCL45 مشاهده شد که علت این امر ثبات همگن بودن در دمای بالا برای نمونه های ساخته شده به روش پیش اختلاط (حتی در دور پایین تر) را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار شکل ۳-C ملاحظه می‌شود پارامتر مدول مختلط برشی به طور قابل توجهی بر هم منطبق می‌باشد. علت این امر بدین صورت قابل توجیه است که با افزایش ناورس مقدار مدول مختلط در نمونه با دور پایین افزایش یافته و همچنین کیفیت اختلاط در نمونه های با دور بالا و تمایل به خروج از شرایط همگن بودن باعث انطباق این نتایج شده است. در رابطه

در نمودار شکل ۳-A می‌توان به تاثیر نیروی مخلوط کن برشی بر سفت تر شدن قیر اشاره کرد. این نتایج نشان می‌دهد نیروی برشی به میزان ۱۰٪ در افزایش مقدار G^* در بازه دمای ۳۰ تا ۵۰ درجه و افزایش ۱۵ تا ۲۰ درصدی آن در بازه ۵۰ تا ۹۰ درجه موثر بوده است. در رابطه با زاویه اختلاط فاز نیز میزان ۳ تا ۵ درصد کاهش مقدار آن در بازه دمایی ۳۰ تا ۷۶ درجه سانتیگراد مشهود است در حالی که این مقدار در دماهای بالا ۷۶ درجه سانتیگراد تفاوت این پارامتر تقریباً از بین رفته و در دمای نهایی ۹۰ درجه سانتیگراد مقدار زاویه اختلاف فاز نمونه شاهد و نمونه قیر شماره ۲ به ترتیب ۸۹/۶ و ۸۹/۵ درجه می‌باشد. باید توجه داشت این افزایش مدول مختلط و کاهش زاویه اختلاف فاز در ظاهر روندی مشابه با بهبود خواص داشته که شاید بتوان این مورد را از نقاط ضعف بررسی به روش SHRP عنوان کرد. در شکل ۳-B یکسان بودن پارامتر مدول مختلط برشی برای نمونه های HCL45 و PCL45 مشهود است که البته در دمای بالا نمونه شماره PCL45 افزایش مناسبی را نشان داده است. این مقدار به طور میانگین اختلاف حدود ۳۵ تا ۴۰ درصدی را

بوده که در بیشترین اختلاف خود در هیچ دمایی این اختلاف بیش از ۲۵٪ نشد. زاویه اختلاف فاز نمونه شماره PCH45 در مجموع روند قابل قبول تری را از خود نشان داده و نمونه شماره HCH45 اگر چه در بازه دمایی ۵۵ تا ۷۵ درجه سانتیگراد مقدار قابل قبولی را داشته اما در دمای پایین تر از ۵۵ درجه سانتیگراد و بالاتر از ۷۵ درجه سانتیگراد کاهش خاصیت الاستیک را نشان داده است.

با زاویه اختلاف فاز نمونه شماره PCM45 در مجموع روند ایده‌آل تری را از خود نشان داده است. البته در دمای بالا روند ایده‌آل به ترتیب برای نمونه های PCM45، HCM45 و PCM30 می‌باشد. در ضمن هیچکدام از نمونه ها زاویه اختلاف فاز بیشتر از ۶۹ درجه را از خود نشان ندادند. در نمودار شکل ۳- D مدول مختلط برای نمونه PCH30 کمتر از دو نمونه HCH45 و PCH45



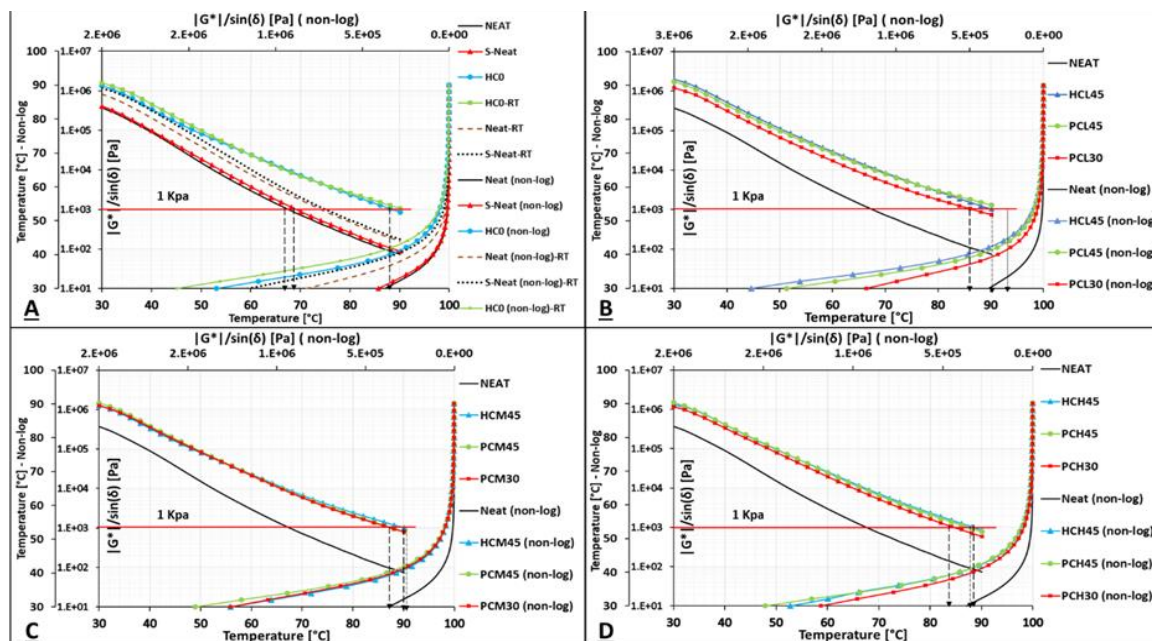
شکل ۴ نمودارهای مدول مختلط برشی و زاویه اختلاف فاز بر حسب دما برای نمونه های پیرنشده و پیرشده

بخش تری را از خود نشان دادند. به منظور بررسی مقاومت در برابر شیارشدگی با استفاده از آزمایش جاروب دما، می‌توان از معیار سنجش سوپرپیو ($G^*/\sin\delta$) استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۵ مشخص است با توجه به نتایج تغییرات مدول مختلط و زاویه اختلاف فاز با اعمال نیروی برشی اختلاط و همچنین پیرشدگی قیر، سفتی قیر بالا رفته و پارامتر شیارشدگی افزایش می‌یابد. باید توجه داشت از این تغییر به عنوان یک روند بهبود نباید نام برد. همچنین در نمونه HCO با افزودن پلیمر SBS و پارافین واکس افزایش قابل توجه بهبود خواص قابل مشاهده است. در نمودار شکل ۵-A مشخص است قیر پایه در هر دو حالت پیرشده و پیرنشده، حد بالای رده عملکردی به

A: میزان نانورس در سطح صفر، B: میزان نانورس در سطح کم، C: میزان نانورس در سطح متوسط، D: میزان نانورس در سطح بالا در شکل ۴ روند تغییرات نمونه بدون نانورس (HCO) بعد از اعمال پیرشدگی کوتاه مدت مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است روند کاهش زاویه اختلاف فاز از روند افزایش مدول مختلط در نمونه پیرشده محسوس‌تر است اما می‌توان از افزایش مقاومت در برابر پیرشدگی با افزودن پلیمر SBS و پارافین واکس سخن گفت. هرچند که با افزایش جزئی مدول مختلط همراه بوده است. در شرایط پیرشده، با توجه به نمودارهای شکل ۴ به طور کلی نمونه‌های ساخته شده به روش پیش اختلاط رفتار یکنواخت‌تر، و اطمینان

آن را به ۸۸ درجه سانتیگراد رسانده است. در محور ثانویه افقی و عمودی روند غیر لگاریتمی نمونه‌ها نشان داده شده است.

۷۰ درجه سانتیگراد نرسیده لذا دمای عملکردی هر دو ۶۴ درجه سانتیگراد می‌باشد. این موضوع در رابطه با نمونه HCO افزایش قابل توجه داشته که رده عملکردی



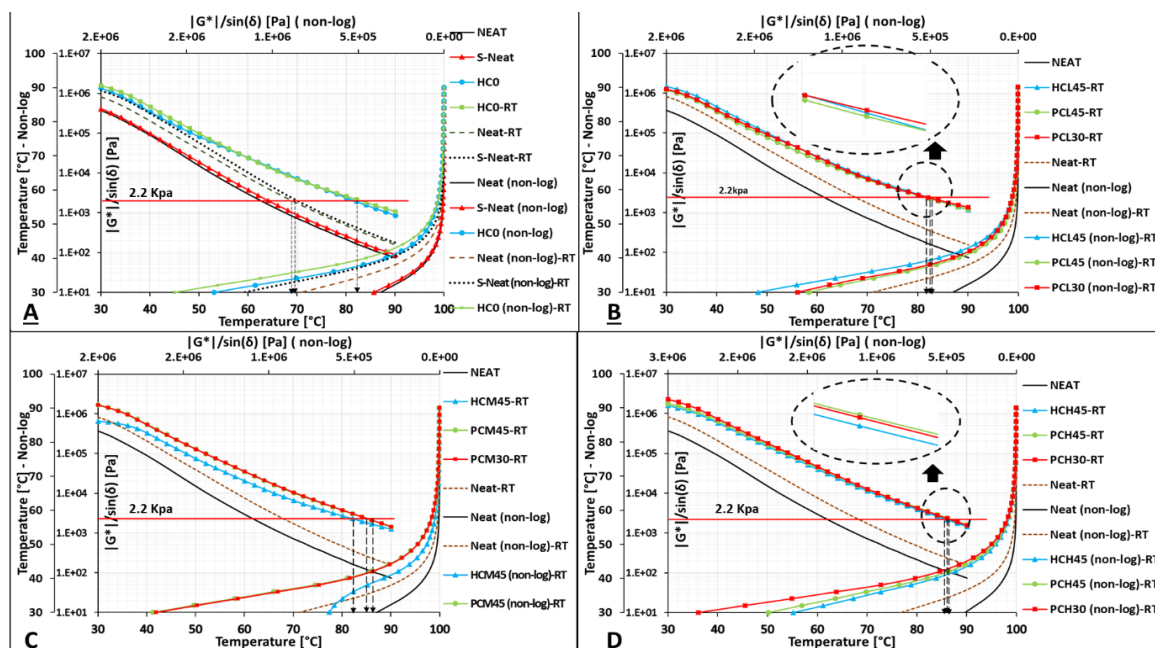
شکل ۵ نمودارهای پارامتر شیارشدگی بر حسب دما برای نمونه‌های پیرنشده-دو حالت لگاریتمی و غیر لگاریتمی

دقیق عملکردی نمونه PCM45 مقدار ۹۰/۳ درجه سانتیگراد استخراج شد که نسبت به نمونه‌های HCM45 و PCM30 (۹۰/۱ و ۸۶/۶ درجه سانتیگراد) بالاتر بوده است. در نمودار شکل ۵-D، بطور کلی نمونه‌های HCH45، PCH45 و PCH30 که دارای بیشترین مقدار نانورس می‌باشند، در مجموع دمای عملکردی پایین‌تری را نسبت به ترکیب درصد‌های دیگر داشته‌اند و همچنین تفاوت مقادیر پارامتر شیارشدگی در آنها افزایش یافته است.

در نمودار شکل ۶-B باید توجه داشت نمونه شماره PCL30 در فرآیند ساخت، کمتر از نمونه‌های HCL45 و PCL45 پیر شده لذا رده عملکردی بالاتری را از خود نشان داده است. البته مقدار دمای دقیق برای نمونه‌های PCL30-PCL45-HCL45 به ترتیب ۸۲/۲، ۸۳/۱، ۸۳/۲ درجه سانتیگراد می‌باشد که مشاهده می‌شود دمای عملکردی نمونه‌های PCL45 و PCL30 تقریباً یکسان بوده و می‌توان نتیجه گرفت دور

در نمودار شکل ۵-B ملاحظه می‌شود نمونه‌های ساخته شده در دور ۴۵۰۰ rpm، تقریباً بر هم منطبق‌اند. با توجه به نمودارها در حالت غیر لگاریتمی در دمای پایین، سفتی بیشتر نمونه HCL45 آشکار است. اما باید توجه داشت شیارشدگی از جمله خرابی‌های مختص دمای بالا بوده و بررسی منحنی در دمای بالاتر اهمیت بیشتری دارد که نمونه PCL45 در دمای نهایی آزمایش به میزان جزئی مقاومت بالاتری را از خود نشان داده است. نمونه PCL30 که دور اختلاط آن ۳۰۰۰ rpm بوده با نرخ کاهش مشابه نمودارهای دیگر تغییر داشته که ازین رو می‌توان اثر کاهش سفتی در نتیجه کاهش دور اختلاط را در آن دخیل دانست. هر دو نمونه HCL45 و PCL45 در دمای انتهایی آزمایش مقدار بالاتر از ۱ kpa را از خود نشان دادند که این مقدار برای نمونه PCL30، ۱ kpa در دمای ۸۷/۵ ثبت شد. نمودار شکل ۵-C با توجه به منحنی‌های می‌توان نزدیکی خواص و نتایج آزمایش در آنها علیرغم متغیر بودن فرآیند ساخت را مشاهده کرد. در میان آنها دمای

اختلاط پایین‌تر با آسیب کمتر به قیر در حین ساخت نمونه، می‌تواند بهبودی مشابه با دور بالاتر را ارائه کند.



شکل ۶: نمودارهای پارامتر شیارشدگی بر حسب دما برای نمونه‌های پیرشده-دو حالت لگاریتمی و غیر لگاریتمی

ایساسون، ۱۹۹۷؛ آیری، ۲۰۰۲). از آنجا که این زاویه در محاسبه سهم ویسکوز و سهم الاستیک (مولفه های X و y عدد موهومی مدول مختلط) نقش اساسی دارد، لذا با محاسبات ریاضیاتی می‌توان مقادیر سهم الاستیک (ذخیره) و سهم ویسکوز (اتلاف) را به راحتی محاسبه کرد. در جدول ۱۱ نتایج بررسی این پارامتر قابل مشاهده است.

مشاهده می‌شود نمونه‌هایی وجود دارند که در هیچ دمایی زاویه اختلاف فاز آنها به ۷۵ درجه نرسیده است لذا در این نمونه‌ها هرگز رفتار ویسکوز بر رفتار الاستیک غالب نمی‌شود. نمونه‌ها بعد از اعمال پیرشدگی کوتاه مدت روی آنها، کاهش محسوس زاویه اختلاف فاز داشتند به طوری که تنها سه نمونه از آنها S- neat، PCH30 و neat در بالاترین دمای خود زاویه اختلاف فاز بالاتر از ۷۵ درجه را نشان دادند. پارامتر زاویه اختلاف فاز به تنهایی دید کاملی نسبت به رفتار قیر نخواهد داد چرا که مدول مختلط کمیته برداری بوده که علاوه بر جهت (زاویه اختلاف فاز) دارای اندازه (قدر

با توجه به نمودار شکل ۶-C نمونه HCM45 رفتاری غیر اطمینان بخش در روند و نرخ تغییرات را دارا می‌باشد. دمای همانطور که ملاحظه می‌شود نمونه PCM45 در شرایط پیر شده کوتاه مدت به طور جزئی از نمونه PCM30 وضعیت مناسب‌تری را دارا می‌باشد هرچند که این تفاوت قابل اغماض است اما نسبت به نمونه HCM45 قابل توجه می‌باشد. در نمودار شکل ۶-D نزدیکی نمودارها بیشتر شده است. در دمای پایین اختلاف مقادیر در منحنی‌ها مشهود بوده اما در دمای بالا این مقدار کم شده و عملاً رفتار نمونه‌ها مشابه می‌باشد.

۳-۴. تعیین دمای تغییر رفتار قیر (T₇₅)

زاویه اختلاف فاز به عنوان یکی از پارامترهای مهم رئولوژیک در قیر همواره کمک شایانی در بررسی خواص رئولوژیکی قیر می‌نماید. معمولاً دمایی که در آن زاویه اختلاف فاز به ۷۵ درجه برسد، نقطه‌ای است که در آن رفتار ویسکوز قیر بر رفتار الاستیک آن غالب می‌شود (صادقپور گلوپیک و همکاران، ۲۰۱۰؛ لو و

مطلق مقدار مدول مختلط) می باشد که باعث تغییرات در سهم الاستیک و ویسکوز ماده خواهد شد.

جدول ۱۱: نتایج دمای تغییر رفتار قیر

	Sample ID	T _{75°}	δ	G'	G''	G*	Description
		[°c]	[°]	[pa]	[pa]	[pa]	
ORG.	Neat	46.5	75	6850	25400	26800	
	S-Neat	48.8	75	5650	21900	22200	
	HC0	-	75	220	793	823	δ _{max} = 74.5
	HCL45	89	75	284	1060	1090	
	HCM45	-	75	356	871	941	δ _{max} = 67.7
	HCH45	83.4	75	404	1500	1590	
	PCL45	-	75	437	938	1035	δ _{max} = 65
	PCM45	-	75	284	728	782	δ _{max} = 68.7
	PCH45	87.5	75	250	936	970	
	PCL30	-	75	260	643	694	δ _{max} = 68
	PCM30	-	75	260	710	759	δ _{max} = 69.7
	PCH30	85.6	75	225	838	870	
	RTFO.	Neat	55.2	75	4100	15500	16200
S-Neat		58.5	75	3300	12400	12900	
HC0		-	75	391	893	975	δ _{max} = 66.3
HCL45		-	75	423	988	1070	δ _{max} = 66.8
HCM45		-	75	526	953	1090	δ _{max} = 61.1
HCH45		-	75	66200	70700	96900	δ _{max} = 51.5
PCL45		-	75	504	937	1060	δ _{max} = 61.7
PCM45		-	75	472	1250	1340	δ _{max} = 69.2
PCH45		-	75	468	1460	1530	δ _{max} = 72.2
PCL30		-	75	2670	3360	4290	δ _{max} = 51.6
PCM30		-	75	449	1280	1360	δ _{max} = 70.7
PCH30		88.9	75	312	1175	1220	

۴. نتیجه گیری

- شاخص درجه نفوذ، به عنوان پارامتری برای بررسی حساسیت حرارتی قیر، با افزودن اصلاح کننده به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است.
 - با افزایش مقادیر اصلاح کننده، در بیشترین مقدار خود، نمونه ساخته شده به روش پیش‌اختلاط کندروانی کمتری از خود نشان داده و این درحالی است که نمونه شماره HCH45 دقیقاً در مرز ۳۰۰۰ سانتی استوکس قرار گرفت. تاثیر ۳ درصدی ناشی از کاهش دور از ۴۵۰۰rpm به ۳۰۰۰rpm نیز مشاهده شد.
- نتایج آزمایش دمای بالای PG که با استفاده از
- نتایج آزمایشات درجه نفوذ و نقطه نرمی نشان داد اثر نیروی برشی اختلاط بر آنها به ترتیب ۱۵٪ کاهش و ۵٪ افزایش مقدار بوده است. روند مناسب تر نتایج در نمونه های ساخته شده با آمیخته اصلی مشاهده شد.
 - نتایج آزمایش شکل پذیری نشان داد با افزایش مقادیر اصلاح کننده، مقدار شکل-پذیری کاهش می‌یابد. می‌توان گفت کاهش دور به مقدار ۱۵۰۰rpm، حدود ۴٪ در افزایش مقدار شکل‌پذیری موثر خواهد بود.

کاهش نرخ خزش دمای ۱۰- را پاس کرده‌اند. در نتایج آزمایش جاروب دما می‌توان گفت نمونه‌های ساخته شده به روش پیش‌اختلاط با دور 4500rpm عملکرد مناسب تری را از منظر رفتار اطمینان بخش در نرخ تغییرات، از خود نشان دادند. به طور کلی نتایج، حاکی از ارجحیت استفاده از روش پیش اختلاط در تولید قیرهای اصلاح شده بود. بدیهی است ادامه پژوهش‌ها در این زمینه، تولید قیرهای اصلاح شده با روش ساده تر و موثر تر را محیا خواهد کرد.

دستگاه رئومتر برشی دینامیکی انجام شد مقدار PG64 برای نمونه قیر خالص را نشان داد. این مقدار برای سایر نمونه‌های اصلاح شده PG82 را نشان داد. دمای عملکردی پایین برای قیر خالص مقدار ۱۶- را نشان داد. نکته قابل توجه این است که با اعمال نیروی برشی اختلاط و کاهش اجزای فرار قیر، مقدار $m\text{-value}$ از ۰/۳ کمتر شد و باعث کاهش رده عملکردی دمای پایین با مقدار بسیار نزدیک ۰/۲۹۹ شد. البته بدیهی است در صورتی که عدد نرخ خزش با دقت یک رقم اعشار مورد بررسی قرار گیرد می‌توان این نمونه را در دمای ۱۶- پاس شده دانست. نمونه‌های دیگر همگی با

مراجع

- AASHTO T315-10, (2010). "Standard Method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using dynamic shear rheometer (DSR)".
- Airey, G.D. (2002). "Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens". *Construction & Building Materials*, 16(8): 473-487.
- Airey, G.D. (2003). "Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens". *Fuel*, 82(14): 1709-1719.
- ASTM-D113. (2007). "Standard test method for ductility of bituminous materials". American Society for Testing & Materials.
- ASTM D36 / D36M-14e1, (2014). "Standard test method for softening point of bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4402 / D4402M-15, (2015). "Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5 / D5M-13, (2013). "Standard test method for penetration of bituminous materials". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D7175-15, (2015). "Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Barzegari, M.R., Yousefi, A.A., & Zeynali, M.E. (2002). "Bitumen modification via PS/PB Blend". 303-311.
- Eidt Jr, C.M., Gorbaty, M.L., Elspass, C.W., & Peiffer, D.G. (1997). "Thermoplastic elastomer-asphalt nanocomposite composition". U.S. Patent 5,652,284, issued July 29.
- El-Shafie, M., Ibrahim, J.M., & Abd El Rahman, A. (2012). "The addition effects of macro and nano clay on the performance of asphalt binder". *Egyptian Journal of Petroleum*, 21(2): 149-154.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S., & Li, Y. (2013). "Nanomaterials applied in asphalt modification: a review". *Journal of Materials Science & Technology*, 29(7): 589-594.
- Garcia-Morales, M., Portal, P., Navarro, F.J., & Gallegos, C. (2006). "Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen". *Fuel*, 85(7): 936-943.
- Ghaffarpour Jahromi, S., & Khodaii, A. (2009). "Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder". *Construction & Building Materials*, 23(8): 2894-2904.
- Ghaffarpour Jahromi, S. (2013). "Nanoclay-modified asphalt mixtures for eco-efficient construction". *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction: Materials, Processes & Applications*, 108
- Golestani, B., Hyun Nam, B., Moghadas Nejad, F., & Fallah, S. (2015). "Nanoclay application to asphalt concrete: Characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture". *Construction & Building Materials*, 91: 32-38.
- Golestani, B., Moghadas Nejad, F., & Sadehpour Galooyak, S. (2012). "Performance evaluation of linear and nonlinear nanocomposite modified asphalts". *Construction & Building Materials*, 35: 197-203.
- Gupta, R.K., Pasanovic-Zujo, V., & Bhattacharya, S.N. (2005). "Shear and extensional rheology of EVA/layered silicate-nanocomposites". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 128(2): 116-125.

- Kavussi, A., & Barghabany, P. (2015). "Investigating fatigue behavior of nanoclay and nano hydrated lime modified bitumen using LAS test". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(3): 04015136.
- Khodary, F. (2015). "Longer fatigue life for asphalt pavement using (SBS@ Clay) nanocomposite". *International Journal of Current Engineering & Technology*, 5(2).
- Leite, L.F.M. (1999). "Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero". Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Lesueur, D., & Little, D. (1999). "Effect of hydrated lime on rheology, fracture, and aging of bitumen". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1661: 93-105.
- Lu, X., & Isacson, U. (1997). "Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens". *Construction & Building Materials*, 11(1): 23-32
- Mohammadiroudbari, M., Tavakoli, A., Razavi Aghjeh, M.K., & Rahi, M. (2016). "Effect of nanoclay on the morphology of polyethylene modified bitumen". *Construction & Building Materials*, 116: 245-251.
- Polacco, G., Kříž, P., Filippi, S., Stastna, J., Biondi, D., & Zanzotto, L. (2008). "Rheological properties of asphalt/SBS/clay blends". *European Polymer Journal*, 44(11): 3512-3521.
- Rastegar, M., & Kokabi, M. (2008). "The effect of nanoclay on the morphology of polymer/bitumen blend". In 1st International Bitumen Conference, Tehran, Iran.
- Sadeghpour Galooyak, S., Dabir, B., Nazarbeygi, A.E., & Moeini, A. (2010). "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites". *Construction & Building Materials*, 24(3): 300-307.
- Sadradini, M. R., Kavussi, A., & Yousefi, A.A. (2002). "Improving bitumen properties by polymeric materials". 103-120.
- Sureshkumar, M. S. (2011). "Polymer modified asphalt nanocomposites (PMAN)". PhD diss., PhD Thesis, University of Pisa, Italy.
- Tang, X.D., He, Z.G., Xu, J., Wang, J.J., & Lin, T. (2010). "Effect of inorganic super fine powder on the property of SBS-modified asphalt". *The 7th National Conference on Functional Materials & Applications*.
- Tidjani, A., & Wilkie, C.A. (2001). "Photo-oxidation of polymeric-inorganic nanocomposites: chemical, thermal stability and fire retardancy investigations". *Polymer Degradation & Stability*, 74(1): 33-37.
- Weng, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K., & Fan, Y. (2002). "Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts". *Polymer Testing* 21, 3: 295-302.
- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q., & Goh, S.W. (2011). "Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization". *Construction & Building Materials*, 25(2): 1072-1078.
- Yu, J., Wang, L., Zeng, X., Wu, S., & Li, B. (2007). "Effect of montmorillonite on properties of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumen". *Polymer Engineering & Science*, 47(9): 1289-1295.
- Zapién-Castillo, S., Rivera-Armenta, J. L., Yolanda Chávez-Cinco, M., Adriana Salazar-Cruz, B., & Mendoza-Martínez. A.M. (2016). "Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite". *Construction & Building Materials*, 106: 349-356.
- Ziari, H., Abtahi, S.M., & Goli, A.H. (2008). "The effect of SBS polymer on the dynamic properties of asphalt". *Iran. J. Polym. Sci. Technol.,(In Persian)* 21: 370-465.