

عملکرد نانورس و کربنات کلسیم رسوبی بر مشخصات مکانیکی مخلوط آسفالتی

سعید غفارپور جهرمی^{۱*}، شهرام وثوق^۲، نبی اله احمدی^۳ و بهروز عندلیبی زاده^۴

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

^۲ مربی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

^۳ مدرس دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

^۴ مدرس دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

(تاریخ دریافت ۱۳۸۷/۱۲/۰۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۸۹/۰۹/۱۴، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۵/۰۵)

چکیده

استفاده از مواد و مصالح مختلف در بهبود خصوصیات رفتاری قیرها همواره مدنظر محققان بسیاری بوده است تا بدین ترتیب بتوانند عمر روسازیهای آسفالتی را افزایش دهند. در این مقاله تاثیر دو نوع اصلاح کننده نوین شامل کربنات کلسیم رسوبی و نانورس، با ساخت نمونه‌هایی به روش تراکمی مارشال، مورد کنکاش قرار می‌گیرد. در این تحقیق از آزمون تجربی مارشال و همچنین دیگر آزمون‌های عملکردی متداول چون کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و خستگی قطری نیز به منظور مقایسه تاثیر اصلاح کننده استفاده می‌شود. این آزمایشها در شرایط دمایی و بارگذاری مختلف انجام شده‌اند. نتایج این تحقیق به وضوح بیانگر تاثیر اصلاح کننده نانورس در بهبود چسبندگی قیر و افزایش پایداری مارشال، مقاومت کششی، مدول برجهندگی و رفتار خزشی است اما عملکرد مناسبی در رفتار خستگی ندارد زیرا با کاهش انعطاف پذیری قیر، رفتار نمونه‌ها را ترد می‌کند. اصلاح کننده کربنات کلسیم رسوبی، تاثیر چندانی بر پایداری مارشال و مقاومت کششی ندارد و رفتار خزشی آن در دماهای بالا ضعیف است اما مدول برجهندگی و رفتار خستگی را بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده، مخلوط آسفالتی، کربنات کلسیم رسوبی، نانورس، مشخصات مهندسی و مکانیکی

مقدمه

شده است [۲]. بسیاری از فیلرها تنها نقش پرکننده دارند و در فضاهای خالی مصالح قرار می‌گیرند و اصولاً هیچ نوع واکنش شیمیایی و نقش خاصی در تغییر خواص شیمیایی قیر ندارند اما برخی دیگر، خواص قیر را با انجام واکنش‌های شیمیایی تحت تاثیر قرار می‌دهند که بعنوان فیلرهای فعال واکنش‌زا شناخته می‌شوند. فعالیت فیلر (Filler Activity) بیانگر میزان نقش فیلر در انجام واکنش و ترکیب شیمیایی و فعالیت سطحی با قیر است [۲].

بازبینی ادبیات فنی

درباره فیلر و نقش آن بر مخلوط‌های بتن آسفالتی، تحقیقات و بررسی‌های متعددی صورت گرفته است که قدمت آن به ۸۵ سال اخیر برمی‌گردد. نخستین پژوهشگری که در این زمینه گزارشی را ارائه داد، Cliff Richardson در سال ۱۹۴۱ بود. وی بر این نکته تاکید نمود که فیلر تنها نقش پرکننده نداشته و بصورت یک عامل فیزیکی-شیمیایی در مخلوط عمل می‌کند [۳]. در تحقیقات محققان مختلف، تاثیر نوع، میزان و خصوصیات فیزیکی فیلرهای معدنی مختلف چون پودر سنگ، آهک هیدراته، رس، آزبست و غیره همراه با قیرهای مختلف (اصلاح شده یا اصلاح نشده)،

در ساخت بتن آسفالتی گرم، همواره کاربرد مواد معدنی بسیار ریز و نرم با ابعاد کوچکتر از ۰/۶ میلی‌متر یعنی عبوری از الک ۳۰ پیش‌بینی می‌شود که فیلر نامیده می‌شوند [۱]. درصد قابل توجهی از فیلر از الک شماره ۲۰۰ عبور می‌کند و بایستی عاری از مواد رسی و آلی باشد. همچنین دامنه خمیری آن از ۴ تجاوز ننماید اما اگر از سیمان یا آهک شکفته بعنوان فیلر استفاده می‌شود، رعایت گام خمیری ضرورتی ندارد. نتایج تحقیقات متعدد نشان داده است که فیلر با تاثیر بر کارایی، اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی دارد. فیلر فضای بین ذرات درشت را پر کرده و سبب افزایش مقاومت، تراکم، چگالی و در نهایت باربری مخلوط می‌گردد. علاوه بر آن میزان ضربه‌پذیری را افزایش داده و تغییرشکل نسبی را کاهش می‌دهد. همچنین مقاومت فشاری و برشی بتن آسفالتی را از طریق بهبود چسبندگی قیر و ملات قیری با سنگدانه‌ها افزایش می‌دهد. با تمامی محسنات فوق، مصرف بیش از حد فیلر در بتن آسفالتی سبب کاهش تخلخل، افزایش سفتی و شکنندگی مخلوط شده و نتایج منفی را در بر خواهد داشت. بر این اساس نسبت فیلر به قیر بین ۰/۶ تا ۱/۲ محدود

از نظر کمی مورد بررسی زیادی قرار گرفته است. در اغلب این تحقیقات نمونه‌ها به روش تراکمی متفاوت در مقیاس آزمایشگاهی و یا میدانی و از نظر کمی و به منظور تعیین تاثیر نوع و میزان فیلر بر مشخصات مکانیکی تحت ارزیابی قرار گرفته‌اند [۴، ۵، ۶، ۷ و ۸].

سفتی ملات قیری ناشی از تاثیر متقابل قیر و ذرات فیلر بعلاوه جاذبه و جذب سطحی را استحکام فیزیکی-شیمیایی می‌نامند و فرض می‌شود مستقل از حجم اشباع شده توسط فیلر است. این استحکام ناشی از چسبندگی بسیار محکم ذرات فیلر و لایه‌های قیر است که دگرگونی لایه‌های قیر را باعث می‌شوند. با افزایش نسبت فیلر بخشی زیادی از حجم توسط این ذرات ریز اشغال می‌شود و بعنوان ماده‌ای صلب با تماس بین دانه‌ای، اسکلت ملات قیری شکل می‌گیرد. افزایش سفتی ملات قیری با افزایش نقطه نرمی، کاهش درجه نفوذ، افزایش گرانبوی و افزایش G^* (مدول دینامیکی در رنومتر برشی) همراه است و همواره بین مشخصات فیزیکی فیلر و بخصوص دانه‌بندی و سطح ویژه با سفتی ملات قیری ارتباط مستقیمی وجود دارد [۶]. مطالعات و تحقیقات انجام یافته به خوبی روشن ساخته است که نامنظمی ذرات فیلر، عامل بالقوه‌ای جهت تشدید فعالیت سطحی است. فعالیت سطحی بیانگر میزان جذب قیر توسط ذرات فیلر است که اساسا تابع خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و ترکیب مواد معدنی و همچنین تابع نامنظمی هندسی ذرات است [۵]. جذب سطحی بین فاز جامد و مایع چسبنده در ملات قیری تابع عوامل متعددی است که عبارتند از: ترکیب و گروه شیمیایی قیر، خصوصیات فیزیکی، هندسی و شیمیایی فیلر، بافت سطحی و نامنظمی‌های سطوح، سطح ویژه و وزن مخصوص [۶]. مکانیسم جذب سطحی موجب کاهش انرژی بین سطوح فازهای مختلف می‌شود که این امر با متصاعد شدن گرما به خارج صورت می‌گیرد عبارتی جذب سطحی حرارت‌زا است و میزان گرمای آزاد شده متاثر از میزان واکنش اتمها و مولکولهای جذب‌شده در سطوح فاز جامد می‌باشد. بدین جهت مقدار انرژی آزاد شده را می‌توان بعنوان معیاری برای بیان شدت جذب سطحی و با اندازه‌گیری مقدار گرمای آزاد شده بوسیله واکنش‌های داخلی، مورد ارزیابی قرار داد. بعنوان نمونه مقدار گرمای حاصله از واکنش‌های شیمیایی بسیار زیاد است و تابع سطح ویژه ذرات فیلر است [۹]. محقق بنام Ishai و همکارانش در سال ۱۹۷۷ تاثیر فیلرهای مختلف معدنی و فیلر آهک هیدراته را بر چسبندگی قیر و سنگدانه مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که فیلرهای معدنی تنها با افزایش گرانبوی بر چسبندگی بین قیر و دانه‌ها اثرگذاراند درحالیکه فیلر آهک هیدراته هم بصورت فیزیکی

و هم بصورت شیمیایی حتی در حضور آب باعث بهبود چسبندگی قیر و مصالح سنگی می‌شود [۱۰]. همچنین Ishai و Craus در سال ۱۹۹۶ تاثیر برخی مشخصات سنگدانه و فیلر را بر رفتار و دوام مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که در اغلب فیلرها با تمامی عوامل فیزیکی-شیمیایی، گرایش متحدی وجود دارد که با افزایش شدت جذب سطحی، ترکیب بی‌قاعدگی‌های هندسی بزرگتر می‌شود. این اثر ترکیبی باعث تقویت پیوند فیلر-قیر شده و قیر ثابت را افزایش می‌دهد. پیامد این اثر باعث غلظت بالای ملات قیری و افزایش مقاومت مخلوط خواهد بود. شدت جذب سطحی که با گرمای اندرکنش فیلر-قیر ارزیابی می‌شود، عامل مهمی در بیان ظرفیت فیزیکی-شیمیایی فیلر و تاثیر آن بر رفتار و دوام مخلوط آسفالتی است [۱۱]. در سال ۱۹۹۸ Kandhal و همکارانش ارتباط بین خصوصیات فیلرهای معدنی و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را از نظر تغییرشکل دائمی، ترک خستگی و حساسیت رطوبتی مورد بررسی قرار دادند. آنها با اطلاع از اینکه ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون اثر محسوسی بر مشخصات مخلوط دارند، به دنبال یافتن مهمترین فاکتورهای اثرگذار بر رفتار خستگی، تغییرشکل ماندگار و حساسیت رطوبتی بودند. نتیجه‌گیری آنها نشان داد که اندازه ذرات بیشترین تاثیر را بر عملکرد مخلوط دارد بطوریکه تغییرشکل ماندگار و سختی مخلوط، با کاهش اندازه ذرات فیلرهای معدنی بهبودی قابل توجهی می‌یابد [۱۲]. محقق دیگری بنام Hodgkinson و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به بررسی نقش فیلر بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. آنها دریافتند که فیلرهای غیرفعال تاثیر قابل توجهی بر مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط خشک و غوطه‌ور در مقایسه با نمونه‌های بدون فیلر ندارد اما میزان چسبندگی قیر تاثیر فزاینده‌ای بر مقاومت کششی غیرمستقیم دارد [۱۳]. همچنین Dallas و همکارانش در سال ۲۰۰۵ با بررسی تاثیر آهک هیدراته و پودر آهک بر چسبندگی قیر، اندرکنش شیمیایی و فیزیکی این نوع فیلر را مورد بررسی قرار دادند. آزمایشهای رئولوژیکی مختلفی با رنومتر برشی دینامیکی و رنومتر تیر خمشی همراه با تست‌های عملکردی چون خستگی و خزش در این بررسی بکار گرفته شدند. نتایج این بررسی به وضوح نشان داد که فیلر آهک هیدراته، شروع، رشد و توسعه میکروتراکها را به تاخیر می‌اندازد و جریان برش ویسکوالاستیک و پلاستیک ملات قیری و مخلوط آسفالتی تحت تاثیر این نوع فیلر قرار دارد. بر اساس یک مدل رئولوژیکی در مقیاس نانو، اندرکنش فیزیکی و شیمیایی آهک هیدراته بر میکروساختار قیر مورد ارزیابی قرار گرفت. این تحقیق نشان داد که آهک هیدراته در دماهای مختلف، اندرکنش شیمیایی بیشتری در مقایسه

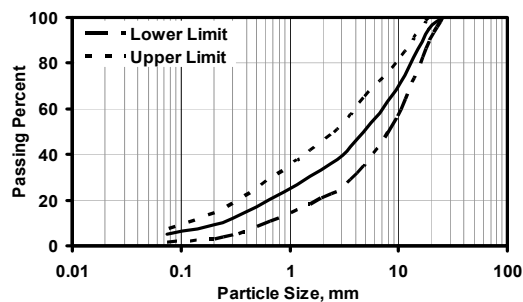
آنها را بهبود دهد لذا انتظار می‌رود بتوانند تاثیر مشابهی بر رفتار قیر و ویژگی‌های مهندسی مخلوط‌های آسفالتی داشته باشند.

کربنات کلسیم رسوبی که به PCC معروف است یکی از مشتقات آهک، حاصل یک سنتز مهار شده است که مرفولوژی و اندازه ذرات آن بسیار کوچک است. ذرات PCC پس از تولید توسط یک ترکیب آلی به ضخامت ۲ تا ۳ میکرون پوشش داده می‌شود. در این پژوهش از کربنات کلسیم رسوبی ساخت شرکت باریت دلیجان استفاده گردید و مشخصات فیزیکی و هندسی کربنات کلسیم رسوبی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۴ آمده است.

نانورس‌ها، کانی‌های رس هستند که حداقل یکی از ابعاد آنها در حد نانومتر است و غالباً بعنوان پرکننده به منظور اصلاح خواص پلیمرها بکارگرفته می‌شوند. خالص بودن و ظرفیت تبادل کاتیونی، دو خصوصیت مهم برای موفقیت نانورس‌ها در استحکام پلیمرها محسوب می‌شود [۱۷]. با جداسازی صفحات رس از یکدیگر، نانورس بوجود می‌آید که دارای سطح ویژه و فعال بسیار بزرگی بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ متر مربع در هر گرم است. این سطح بزرگ و فعال باعث می‌شود همواره اندرکنش شدیدی بین نانورس و محیط اطرافش (مثلاً قیر) وجود داشته باشد. در این پژوهش از یک نوع نانورس معروف و سازگار با قیر تحت عنوان تجاری Cloisite-15A استفاده می‌شود که مشخصات آن در جدول ۵ آمده است.

بررسی ساختار قیر و اصلاح کننده‌ها قیر و کربنات کلسیم رسوبی

از لحاظ شیمیایی، کربنات کلسیم توسط پکتین‌ها یعنی رنگ‌های آلی گیاهی پوشش داده می‌شود. فیلم بسیار نازک این پوشش (۲ تا ۳ میکرون) بر روی ذرات بسیار ریز PPC، می‌تواند در حرارت بالا و با اختلاط کافی و مناسب، قیر غیراشباع را اشباع نماید. علاوه بر آن کربن‌های آزاد شده با پر کردن فضاهای خالی، با زنجیره‌های قیر پیوندهای قوی ایجاد می‌کنند که باعث افزایش گرانروی و بالا رفتن



شکل ۱: توزیع دانه بندی مصالح سنگی

با پودر آهک دارد. سطح اندرکنش هر نوع فیلر تابع نوع قیر و دمای آزمایش است [۱۴]. در سال ۲۰۰۵، Lackner و همکارانش تاثیر شکل هندسی و کانی‌شناسی فیلر را بر رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای پایین مورد ارزیابی قرار دادند. با بکارگیری آزمایش رئومتر تیر خمشی از یک مدل چند مقیاسی به منظور پیش‌بینی مشخصات خزشی ملات قیری در دمای پایین استفاده شد. در این مدل ذرات فیلر بعنوان ذرات جامد با شکل کروی و ملات قیری هموزن فرض می‌شود. نتایج این تحقیق که بر روی چند قیر متفاوت انجام شده است نشان داد که خزش در دمای پایین، مستقل از شکل و کانی‌شناسی فیلر است. عبارتی ذرات فیلر شروع به چرخش کرده در حالیکه ذرات بزرگتر در دماهای بالا چرخش دارند لذا وی استنباط کرد که ذرات فیلر بر رفتار ویسکوز ملات قیری اثرگذارند [۱۵]. همچنین نتایج این تحقیق به وضوح نشان داد هر دو نوع فیلر باعث افزایش عمر خستگی می‌شوند هر چند سفتی مخلوط نیز تحت تاثیر فیلر افزایش می‌یابد. عبارتی فیلر مقاومت در برابر رشد میکروتکرکها را افزایش می‌دهد و سرعت رشد خرابی و بخصوص خرابی تجمعی را کاهش می‌دهد. در این بین آهک هیدراته تاثیر بیشتری در مقایسه با پودر آهک دارد. همچنین عمر خستگی به نوع قیر نیز وابسته است بطوریکه در جمع‌بندی اندرکنش فیزیکی- شیمیایی تمامی مصالح یعنی فیلر، قیر، جنس و ترکیب شیمیایی مصالح سنگی نیز بر رفتار خستگی اثرگذار است.

مواد و مصالح مورد استفاده

در این پژوهش از نوعی مصالح سنگی شکسته (جنس رودخانه‌ای معدن متوساک شهریار تهران) و با دانه‌بندی مصالح سنگی مطابق آیین‌نامه روسازی ایران استفاده شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین بخش عبوری از الک ۲۰۰ بعنوان فیلر و به میزان ۵ درصد بکار گرفته شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی و همچنین ترکیب شیمیایی آن به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آمده است. قیر بکار گرفته شده در این پژوهش از نوع ۶۰/۷۰ است که از شرکت نفت پاسارگاد گرفته شده است و مشخصات رئولوژیکی و فیزیکی آن در جدول ۳ آمده است.

اصلاح کننده‌های نوین نیز شامل نانورس (Nanoclay) و کربنات کلسیم رسوبی (Precipitated Calcium Carbonate) هستند. ترکیب قیر و نانورس به روش XRD کنترل می‌شود اما واکنش قیر و کربنات کلسیم رسوبی بدلیل وجود زنجیره‌های کربن در قیر و ترکیب شیمیایی کربنات کلسیم رسوبی (CaO) در دمای ذوب قیر (حدود ۱۵۰ درجه) حتمی خواهد بود [۱۶]. افزودن این مواد به پلیمرهای مختلف توانسته است خواص مکانیکی

جدول ۴: مشخصات فیزیکی و هندسی کربنات کلسیم رسوبی

Test Type	Test Method	Result
Density	ASTM C188	2.7
Specific Gravity	ASTM C168	1890 kg/m ³
Fineness	ASTM C204	6200 cm ² /g
pH	pH meter	8.9
Molar mass	**	100.1 gr
Diameter	**	4 – 15 μm
Heat Capacity	**	0.19
Boiling Point	**	899 °C
Melting Point	**	1339 °C
Type of Crystal	**	Calsit-Aragonite
Surface Texture	**	Soft

** According to Producer Information

جدول ۵: مشخصات نانورس

Properties	Cloisite-15A	
Organic Modifier	MT2EtOH	
Base	Montmorunit	
Anion	Chloride	
Non Compaction Gravity	230 kg/m ³	
Density	1.66	
Surface Area	9400 m ² /g	
XRD Ray	d' = 31.5 Å	
Plastic Limit	88.2	
Water Content	< 2 %	
Loss of weight after flash fire	30 %	
Diameter	10 %	< 2 μm
	50 %	< 6 μm
	90 %	< 13 μm

. According to Producer Information

جدول ۱: مشخصات سنگدانه‌های ریزدانه

Test Type	Test Method	Result
Density	ASTM C128	2.68 g/cm ³
Specific Gravity	ASTM C128	2.71 g/cm ³
Water Absorption	ASTM C128	0.32 %
Plastic Limit	ASTM D4318	Non Plastic
Sand Equivalent	ASTM D2419	89 %

جدول ۲: درصد وزنی و ترکیب شیمیایی مصالح سنگی

0.48	TiO ₂	67.6	SiO ₂
0.18	MnO	9.8	CaO
0.119	P ₂ O ₅	7	Al ₂ O ₃
0.067	BaO	4	Fe ₂ O ₃
0.053	S	2.67	K ₂ O
0.012	La ₂ O ₃	0.72	Na ₂ O
0.0028	Co ₃ O ₄	0.65	MgO

جدول ۳: مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی قیر

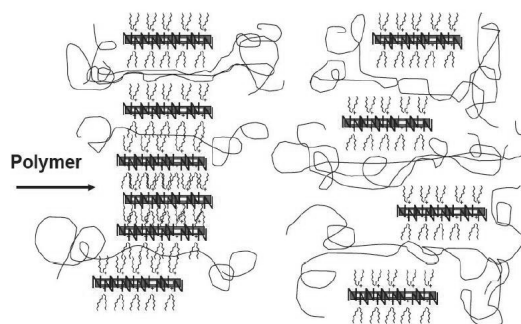
Test Type	Test Method	Result
Softening Point	ASTM D36	54 °C
Penetration	ASTM D5	63
Fire Points	ASTM D92	243 °C
Ductility	ASTM D113	>100 cm
Breaking	EN 12593	14
Loss on Heating	ASTM D6	0.05 %
Density	ASTM D70	1.045
Bitumen Content	ASTM D4	99.5 %
Malten	**	75 %
Asphalten	**	27.2 %

** According to Producer Information

اختلاط برای تمامی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد تا پدیده پیرشدگی نسبتاً یکسان باشد (جدول ۶).

سازگاری پلیمر (قیر) و نانورس شرط اساسی در دستیابی به یک توزیع همگن در مقیاس نانو است. دو نوع ساختار شناخته‌شده از لحاظ نحوه قرارگیر صفحات نانورس در فضای پلیمر (قیر) شامل ساختار "لایه‌ای" و "پراکنشی" در شکل ۲ نشان داده شده است. پراکنش مناسب درصد اندکی نانورس در پلیمر (قیر) می‌تواند باعث بهبود مشخصاتی چون مقاومت، دوام، پایداری حرارتی و مقاومت در برابر حلال‌های آلی گردد. اگر صفحات رس بخوبی پراکنده نشوند یا پلیمر (قیر) بخوبی نتواند در بین صفحات بصورت ساختار لایه‌ای یا پراکنشی قرار گیرند، ممکن است بهبود خاصی حاصل نشود [۱۸].

در ساختار لایه‌ای، پلیمر بین لایه‌های رس نفوذ می‌کند و فاصله بین‌لایه‌ها را افزایش می‌دهد اما هنوز لایه‌ها ارتباط فضایی خوبی با یکدیگر دارند و موازی هستند. در ساختار پراکنشی، لایه‌های رس کاملاً از یکدیگر جدا می‌شوند و لایه‌ها بطور مجزا درون پلیمر پخش می‌شوند. این ساختار باعث حداکثر تقویت در بستر پلیمری می‌شود [۱۹]. حصول ساختار پراکنشی با آنالیز پراش اشعه ایکس XRD مورد بررسی و تایید قرار گرفت.



شکل ۲: ساختار لایه‌ای (Intercalate) و پراکنشی (Exfoliation) نانوکامپوزیت رس و پلیمر [۱۷]

چسبندگی قیر با سنگدانه می‌گردد. باقیمانده ذرات کربنات کلسیم که در واکنش شیمیایی وارد نمی‌شوند، می‌توانند دانه‌بندی مصالح فیلر را کامل کند و بخش بسیار ریز منحنی دانه‌بندی را پوشش دهد. همچنین بررسی‌های میدانی نشان داده است پدیده روزدگی (Bleeding) قیر در مناطق گرمسیر با استفاده از این نوع اصلاح‌کننده کاهش می‌یابد که علت آن ایجاد حفره‌هایی در ابعاد میکرو در قیر است [۱۶].

قیر و نانورس

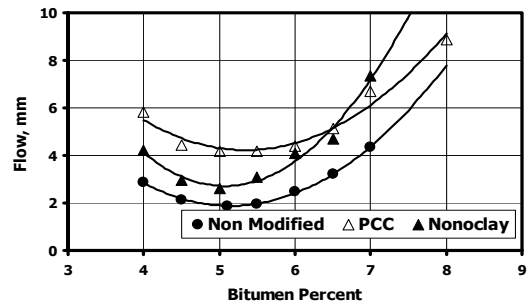
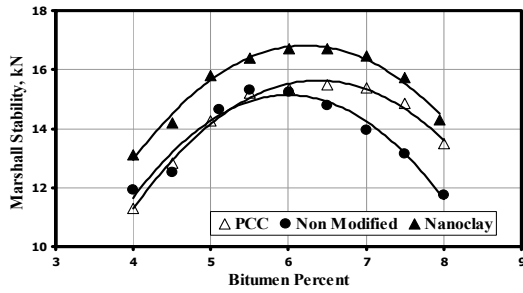
ترکیب نانورس با قیر به روش مذاب یعنی یک فرآیند ترمودینامیکی و بدون حضور هر نوع سازگارکننده انجام شد. اختلاط به روش مذاب با دمای مناسب و تحت تنش برشی اعمالی توسط پره دیسکی دنداندار انجام شد و به روش سعی و خطا با تکنیک XRD، کارایی و ساختار ترکیب مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از ذوب توسط هیتر برقی درحالیکه توسط همزن به هم زده می‌شود، پودر نانورس به تدریج و توسط نمک‌پاش به آن اضافه می‌شود تا از ایجاد توده‌های نانورس در قیر ممانعت شود. در زمان اختلاط، دلیل بالا بودن دما و سرعت پره، نفوذ و تماس حبابهای هوا با قیر اجتناب‌ناپذیر بوده و اکسیداسیون تسریع می‌گردد. لذا پارامترهای متعددی چون مدت زمان، سرعت و دمای

جدول ۶: پارامترهای اختلاط اصلاح‌کننده‌ها با قیر

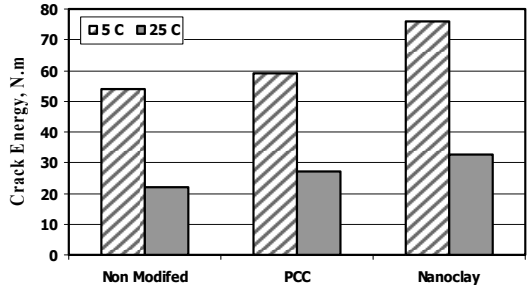
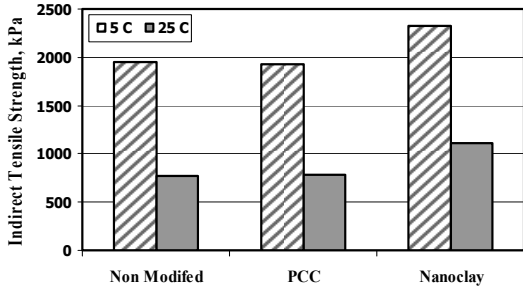
Parameter	PCC	Nanoclay
Temperature	150 °C	150 °C
Bitumen Viscosity	170-190 Sct	170-190 Sct
Wight percent	20 %	4 %
Speed Mixture	300 r/min	500 r/min
Time of Mixing	20 min	25 min

جدول ۷: مشخصات و ابعاد نمونه، دما و شرایط بارگذاری در آزمایش‌ها

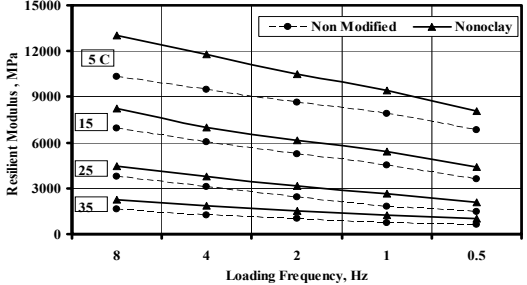
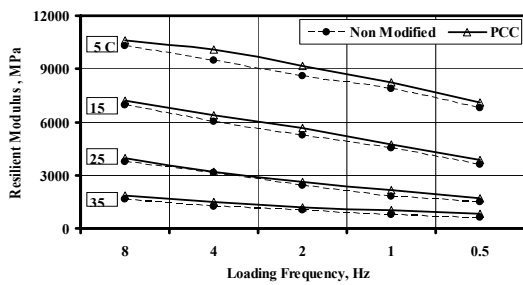
Test	Loading properties	Loading pulse	Temperature
Marshall	0.85 mm/sec	Constant	30
Indirect Tensile	0.85 mm/sec	Constant	5, 25
Resilient Modulus	10 % of indirect tensile strength	Rest time 10 times of loading time	5, 35
Dynamic Creep	1 Hz , 2 level in each temperature	Loading 800 ms and Rest time 200 ms	40, 60
Diametric Fatigue	Cyclic, Tension control method	Loading 125 ms and rest time 50 ms at 5 °C	5, 25



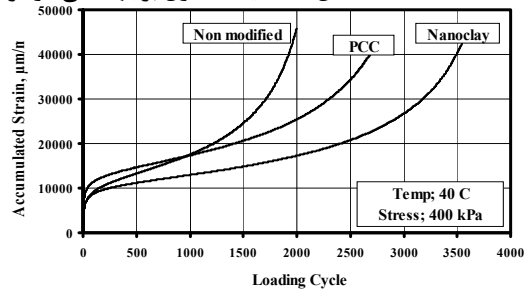
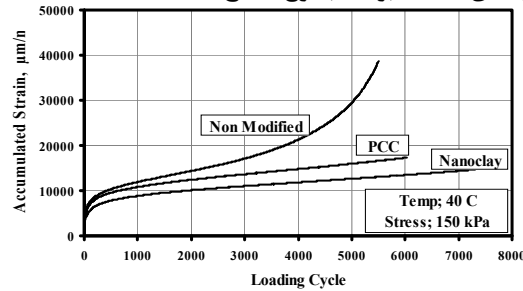
شکل ۳: مقایسه تغییرات پایداری مارشال و روانی بر حسب نوع اصلاح کننده



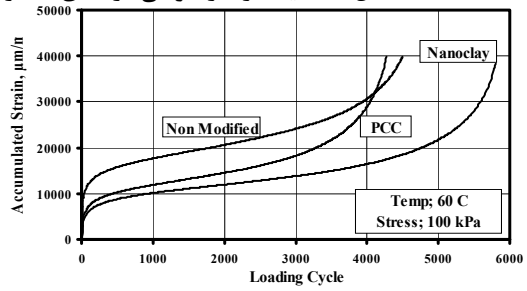
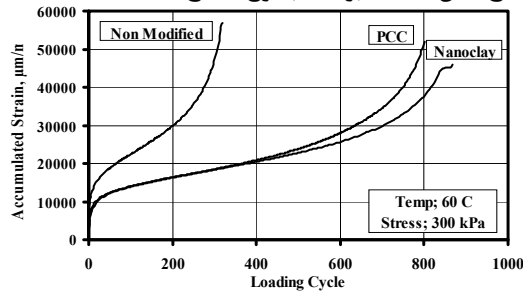
شکل ۴: مقایسه مقاومت کششی غیرمستقیم و انرژی شکست بر حسب نوع اصلاح کننده



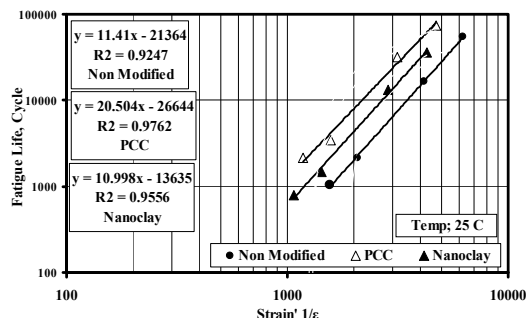
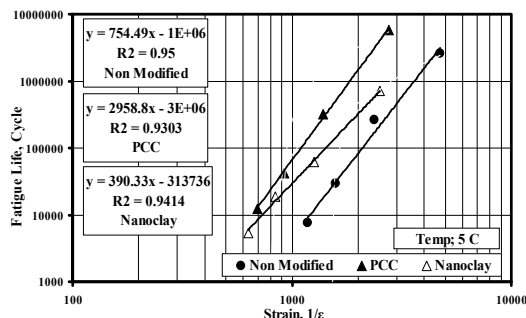
شکل ۵: مقایسه مدول برجهنگی در فرکانس و دمای مختلف بر حسب نوع اصلاح کننده



شکل ۶: مقایسه رفتار خزشی در دمای ۴۰ درجه و سطح تنش مختلف بر حسب نوع اصلاح کننده



شکل ۷: مقایسه رفتار خزشی در دمای ۶۰ درجه و سطح تنش مختلف بر حسب نوع اصلاح کننده



شکل ۸: مقایسه رفتار خستگی در دما و سطح تنش مختلف بر حسب نوع اصلاح کننده

و گرانروی و مقاومت برشی قیر می‌شود. افزایش گرانروی بر تلاش تراکمی مخلوط تاثیر می‌گذارد که با افزایش ضخامت غشای قیری در اطراف سنگدانه‌ها همراه است. افزودن نانورس چسبندگی قیر را به شدت افزایش می‌دهد که حاصل آن افزایش سفتی، مقاومت برشی و پایداری مارشال و کاهش روانی است.

مقاومت کششی غیرمستقیم و انرژی شکست

شکل ۴ بیانگر مقاومت کششی غیرمستقیم و با اندازه‌گیری سطح زیر منحنی در طول آزمایش، انرژی تلف شده تا گسیختگی نمونه تعیین می‌شود. مقاومت کششی و انرژی شکست با کاهش دما افزایش می‌یابد زیرا سختی نمونه افزایش یافته و نیروی بیشتری برای شکست لازم است. افزایش انرژی شکست بیانگر این واقعیت است که مخلوط طاق‌ت بیشتری در مقابل جذب بار دارد. افزایش انرژی (سطح زیر منحنی) متناظر از مقدار بار حداکثر و تغییر شکل نمونه است با کاهش دما رفتار مخلوط ترد شده و تغییر شکل‌های متناظر با گسیختگی کاهش می‌یابد. اصلاح کننده کربنات کلسیم رسوبی، تغییر محسوس در مقاومت کششی ایجاد نمی‌کند اما انرژی شکست و گسیختگی را در دمای ۲۵ درجه افزایش می‌دهد. این پدیده ناشی از تاثیر این نوع اصلاح کننده در افزایش انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری مخلوط است که به دنبال آن طاق‌ت مصالح یعنی جذب و استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد. شکل‌پذیری این مخلوط ناشی از وجود حبابهای بسیار ریز موجود در قیر اصلاح شده است.

همانگونه که شکل ۴ نشان می‌دهد، اصلاح کننده نانورس با تغییر در ساختار قیر و افزایش چسبندگی، مقاومت کششی نمونه‌ها را تا حد قابل توجهی افزایش می‌دهد (۲۱ درصد در دمای ۵ درجه و ۳۵ درصد در دمای ۲۵ درجه). همچنین این اصلاح کننده انرژی متناظر با شروع گسیختگی را افزایش داده و با تغییر رفتار مخلوط، باعث می‌شود شکست نمونه‌ها به حالت گسیختگی ترد نزدیک شود. در این نوع گسیختگی، ترک‌ها بصورت موضعی در نقاطی که تمرکز تنش بیشتر است اتفاق افتاده و سپس با

ارزیابی مشخصات مهندسی مخلوط آسفالتی

به منظور ارزیابی تاثیر اصلاح کننده‌ها بر مشخصات مهندسی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش‌های مختلفی چون مارشال، کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و خستگی قطری روی نمونه‌های حاوی قیر اصلاح شده و اصلاح نشده توسط دستگاه UTM۲۵ در شرایط دمایی و بارگذاری متفاوت به شرح جدول ۷ انجام شدند. نتایج این آزمایشها در شکل‌های ۳ الی ۸ آمده است.

ارزیابی و بحث نتایج

پایداری مارشال و روانی

شکل ۳ نشان می‌دهد اصلاح کننده کربنات کلسیم رسوبی، قیر بهینه را تا یک درصد افزایش می‌دهد هرچند افزایش قابل توجهی در پایداری مارشال ایجاد نمی‌شود. این نتیجه احتمالا می‌تواند ناشی از دو پدیده باشد: اول اینکه ترکیب کربنات کلسیم رسوبی با قیر در دمای بالا باعث سوختن پوشش آلی می‌شود که باعث آزاد شدن مقدار اندکی حباب‌های بسیار ریز اکسیژن و هیدروژن می‌شود و وجود آنها کاهش مقاومت مخلوط را در پی خواهد داشت. دوم اینکه افزودن کربنات کلسیم رسوبی باعث افزایش گرانروی و چسبندگی قیر اصلاح شده می‌شود. از آنجا که تلاش تراکمی ثابت است، کاهش تراکم و افزایش حجم هوا در زمان ساخت را به دنبال دارد که نتیجه آن کاهش مقاومت و پایداری مارشال خواهد بود. در چنین شرایطی با افزایش دمای ذوب قیر، بایستی گرانروی کاهش یابد تا به تراکم مناسب دست یابیم. به نظر می‌رسد دمای ذوب قیر اصلاح شده، متناسب با مقدار کربنات کلسیم رسوبی، افزایش نیافته است تا به گرانروی مناسب (بر اساس استاندارد ASTM D1۵۵۹ حدود 170 ± 20 سانتی استوکس) دست یابیم.

شکل ۳ نشان می‌دهد اصلاح قیر با افزودن نانورس، مقدار قیر بهینه را اندکی افزایش می‌دهد هرچند میزان نانورس در قیر اصلاح شده بسیار اندک است. ارزیابی‌های رئولوژیکی نشان داد که افزودن نانورس باعث افزایش سفتی

یکدیگر جمع شده و شکست را باعث می‌گردند. این رفتار نشان می‌دهد افزایش انرژی شکست و طاقت نمونه‌ها، ناشی از افزایش مقاومت شکست است نه شکل‌پذیری، زیرا نانورس باعث کاهش انعطاف‌پذیری قیر می‌شود.

مدول برجهندگی

کاهش دما و افزایش فرکانس بارگذاری، بطور قابل ملاحظه‌ای مدول برجهندگی را افزایش می‌دهد. در دمای ثابت با افزایش فرکانس بارگذاری از ۵/۰ هرتز به ۸ هرتز، مدول برجهندگی تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد. همچنین حجم هوا یکی از پارامترهای اثرگذار بر مدول برجهندگی است بطوریکه هرچه حجم هوا کمتر باشد، مدول برجهندگی افزایش بیشتری می‌یابد (شکل ۵).

اصلاح‌کننده کربنات کلسیم رسوبی علاوه بر افزایش قابل توجه در مقاومت کششی و مارشال، مدول برجهندگی را اندکی افزایش می‌دهد. این نتیجه ممکن است اندکی غیرعادی به نظر برسد زیرا همانگونه که قبلاً اشاره شد این نوع اصلاح‌کننده، حباب‌های بسیار ریزی در ملات قیری ایجاد می‌کند که وجود آنها بایستی کاهش مدول برجهندگی را باعث شود. لذا این نتیجه ممکن متاثر از عوامل دیگری باشد که مهمترین آنها خطا در تخمین نسبت پواسون است بدین معنی که با اعمال بار فشاری قائم، بدلیل وجود حبابهای بسار ریز، بخشی از انرژی جذب و مستهلک شده و در نتیجه میزان کرنش‌های جانبی کاهش می‌یابد و نسبت پواسون افزایش می‌یابد.

اصلاح‌کننده نانورس با تغییر ساختار شبکه‌ای قیر، غلظت و چسبندگی قیر را افزایش داده و به دنبال آن مدول برجهندگی نیز افزایش قابل توجهی داشته است. اصلاح‌کننده نانورس انعطاف‌پذیری قیر را کاهش می‌دهد لذا در دماهای پایین، رفتار نمونه‌ها ترد و رفتار ویسکوالاستیک به رفتار الاستیک نزدیک می‌شود یعنی سختی مخلوط افزایش یافته، کرنش ارتجاعی بزرگتر شده و مدول برجهندگی افزایش بیشتری در دماهای پایین دارد. این رفتار پیامد پخش مناسب صفحات نانورس در ماتریس قیر است. در هر پالس بارگذاری، بخشی از انرژی توسط این صفحات جذب می‌شود که در پالس استراحت، با تغییر شکل ارتجاعی استهلاک می‌یابد. لذا برهم‌کنش و اندرکنش این صفحات با ترکیبات و زنجیرهای قیر در جذب و استهلاک انرژی که با تغییرشکلهای ارتجاعی همراه است، دلیل اصلی افزایش مدول برجهندگی مخلوط می‌باشد.

خزش دینامیک

رفتار خزشی تابع سطح تنش و دمای آزمایش است بطوریکه با کاهش سطح تنش و یا دمای آزمایش، تعداد

سیکل بزرگتری برای بروز تغییرشکل‌های برشی و شروع فاز سوم رفتار خزشی لازم است. همچنین کرنش ماندگار و تغییرشکل تجمعی نیز کاهش می‌یابد.

شکل ۶ و ۷ رفتار خزشی نمونه‌ها در شرایط دمایی و بارگذاری مختلف را نشان می‌دهد. اصلاح‌کننده کربنات کلسیم رسوبی تاثیر قابل توجهی بر کرنش ماندگار در فاز اول و همچنین شیب منحنی خزش در فاز دوم ندارد اما می‌تواند شروع فاز سوم را به تاخیر اندازد یعنی تعداد سیکل متناظر با تغییرشکل‌های برشی افزایش می‌یابد. این رفتار با کاهش دما و یا سطح تنش متمایزتر می‌شود. همانگونه که قبلاً اشاره شد، کربنات کلسیم رسوبی، از یک طرف حبابهای بسیار ریزی در قیر ایجاد کرده و از طرف دیگر واکنش شیمیایی آن باعث افزایش چسبندگی قیر می‌گردد. لذا تحت سیکلهای اولیه بارگذاری انتظار می‌رود ابتدا اندکی تغییرشکل تراکمی داشته باشیم ولی در ادامه سیکل بارگذاری، چسبندگی قیر حاکم می‌شود و مقاومت در برابر تغییرشکل‌های برشی افزایش یافته و تغییرشکل ماندگار کاهش می‌یابد. این نوع اصلاح‌کننده تاثیر قابل توجهی بر رفتار خزشی در دمای ۶۰ درجه ندارد که این نتیجه می‌تواند ناشی از درصد قیر بهینه نسبتاً بالا باشد. افزایش میزان قیر، ضخامت غشایی اطراف سنگدانه‌ها افزایش یافته و انتظار می‌رود در دماهای بالا که رفتار ویسکوپلاستیک حاکم است، تغییرشکل‌های ماندگار برشی نیز بیشتر باشد. لذا به نظر می‌رسد این نوع اصلاح‌کننده کارایی مناسبی در مقابل تغییرشکل ماندگار در دماهای بالا ندارد.

اصلاح‌کننده نانورس با تغییر در ساختار قیر و بهبود چسبندگی و افزایش مقاومت برشی (گرانروی) نشان می‌دهد که در تمامی سطوح تنش، تعداد سیکل متناظر به شروع فاز سوم افزایش می‌یابد و تغییرشکل ماندگار متناظر را نیز تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. این رفتار تاثیر نانورس در بهبود عملکرد قیر در مقابله با گسیختگی‌های برشی در دماهای بالا را نشان می‌دهد و حاکی از کاهش حساسیت حرارتی قیر است. پخش صفحات نانورس و نفوذ آنها در فضای مولکولهای سنگین قیر، عملکردی همانند مسلح‌کننده دارد که باعث افزایش مقاومت برشی و چسبندگی قیر شده است. در هنگام اعمال تنشهای سیکلی در هر پالس، بخشی از انرژی توسط تغییرشکل‌های ارتجاعی و بخش دیگری بجای شکستن پیوندهای شیمیایی روی سطح شکست، از طریق تغییرشکل‌های غیرارتجاعی و ماندگار برشی، پخش و استهلاک می‌یابد.

خستگی قطری

اگر سطح تنش ثابت باشد، با کاهش دما و افزایش سختی نمونه‌ها، کرنش کششی کاهش یافته و عمر خستگی

شده و در نتیجه میزان کرنش‌های جانبی کاهش یابد. نتایج آزمایش خزش دینامیکی روی این نمونه‌ها نشان داد که تغییر شکل‌های تراکمی نسبتاً بزرگی در سیکل‌های اولیه بارگذاری رخ می‌دهد که علت می‌تواند آن وجود حباب‌های بسیار ریز هوا و عدم تراکم مناسب نمونه‌ها در زمان ساخت باشد اما در ادامه سیکل بارگذاری، چسبندگی قیر حاکم شده که باعث افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های برشی و در نتیجه کاهش تغییر شکل ماندگار در نمونه‌ها شد. این نوع اصلاح کننده تاثیر قابل توجهی بر رفتار خزشی در دماهای بالا ندارد زیرا درصد قیر بهینه نسبتاً بالا بوده و ضخامت غشایی قیری سنگدانه‌ها زیاد است. در نتیجه در دماهای بالا که رفتار ویسکوپلاستیک حاکم است، تغییر شکل‌های ماندگار برشی افزایش می‌یابد.

نانورس: درصد اندکی نانورس تاثیر قابل توجهی بر مشخصات رئولوژیکی قیر دارد. صفحات نانورس با سطح ویژه زیاد، سطح فعال بسیار بزرگی با قیر فراهم می‌کند. از طرف دیگر با قرارگیری و پراکنش مناسب در بین مولکول‌های قیر، ساختار خوشه‌ای قیر متحول شده و همانند یک مسلح کننده عمل خواهد کرد. نانورس با تغییر در ساختار قیر و افزایش چسبندگی، مقاومت کششی نمونه‌ها و انرژی متناظر با گسیختگی را افزایش داده و با تغییر رفتار مخلوط، باعث کاهش شکل پذیری و گسیختگی ترد نمونه‌ها می‌شود. این امر از نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم حاصل گردید. تحت سیکل‌های بارگذاری، بخشی از انرژی توسط این صفحات جذب شده و در پالس استراحت، با تغییر شکل ارتجاعی استهلاک می‌یابد. این عملکرد شاید دلیل اصلی افزایش مدول برجهندگی مخلوط‌ها باشد. مقایسه نتایج آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌های حاوی نانورس با نمونه‌های شاهد نشان داد که در دماهای بالا با کاهش حساسیت حرارتی تحت سیکل‌های بارگذاری خزشی، رفتار نمونه‌های حاوی نانورس بهتر است. این امر می‌تواند به این علت باشد که در بارگذاری سیکلی، بخشی از انرژی توسط تغییر شکل‌های ارتجاعی و بخشی دیگری بجای شکستن پیوندهای شیمیایی روی سطح شکست، از طریق تغییر شکل‌های غیرارتجاعی و ماندگار برشی، پخش و استهلاک می‌یابد. بررسی نتایج آزمایش خستگی قطری نشان داد که این اصلاح کننده توانایی مناسبی برای بهبود رفتار خستگی مخلوط آسفالتی ندارد. کاهش انعطاف پذیری قیر و در نتیجه رفتار ترد مخلوط آسفالتی می‌تواند حاصل این امر باشد.

متناظر افزایش می‌یابد. همچنین حجم هوا یکی از عوامل موثر بر رفتار خستگی است بطوریکه با افزایش حجم هوا، عمر خستگی نیز کاهش می‌یابد [۲۰]. تحلیل رگرسیون نتایج نشان دهنده ارتباط مناسب سطح کرنش با عمر خستگی است و ضریب R^2 نزدیک به یک است. همچنین شیب منحنی خستگی در دمای ۵ درجه همواره بیش از شیب منحنی در دمای ۲۵ درجه است.

تاثیر دما بر رفتار خستگی بر مبنای تنش بسیار فاحش تر از رابطه خستگی بر حسب کرنش است. در شکل ۸ انتظار می‌رود بدلیل تاثیر دما بر سختی نمونه‌ها، مقدار کرنش نیز تحت تاثیر قرار گرفته و بایستی روابط خستگی بر مبنای کرنش مستقل از دما، بر یکدیگر منطبق شوند [۲۰]. اما در این پژوهش بدلیل آنکه ضریبان بار در هر دما متفاوت هستند، منحنی‌ها کمی با یکدیگر فاصله دارند زیرا در دمای ۵ درجه بارگذاری بدون دوره استراحت است.

اصلاح کننده نانورس توانایی مناسبی برای بهبود رفتار خستگی بخصوص در دماهای پایین ندارد هر چند عملکرد آن در دمای بالا نیز بسیار اندک است. این رفتار ناشی از اندرکنش ذرات نانورس و توزیع مناسب صفحات رس در ساختار قیر است که باعث کاهش انعطاف پذیری قیر و در نتیجه رفتار ترد مخلوط آسفالتی می‌شود. رفتار ترد در دماهای پایین بارزتر خواهد بود و باعث می‌شود نمونه‌ها تحت سیکل بارگذاری کمتری به گسیختگی برسند.

جمع بندی و نتیجه گیری

کربنات کلسیم رسوبی: کربنات کلسیم رسوبی با داشتن ترکیبات آهکی و پوشش مواد آلی، فعالیت زیادی با قیر دارد و با جذب ترکیبات قطبی قیر و کربن‌های آزاد شده از پوشش آلی در این اصلاح کننده باشد که ترکیبات غیراشباع قیر را اشباع می‌کند. وجود حباب‌های بسیار ریز هوا ناشی از سوختن پوشش آلی این نوع افزودنی و همچنین افزایش گرانبوی قیر، باعث افزایش تلاش تراکمی و عدم تراکم مناسب نمونه شده و کاهش پایداری مارشال و مقاومت کششی را باعث می‌شود اما انرژی متناظر با شکست را با شکل پذیری بیشتر، افزایش می‌دهد. کاهش مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی کربنات کلسیم رسوبی می‌تواند بدلیل حباب‌های بسیار ریز هوا ناشی از سوختن پوشش آلی باشد که باعث می‌شوند بخشی از انرژی جذب و مستهلک

مراجع

1. Introduction office of technical affairs (2003), "Technical Properties of road", Report Number 101, Tehran, Iran
2. Puzinauskas, V.P.,(1969). "Filler in Asphalt Mixtures" The Asphalt Institute Research Report 69-2.
3. Richardson, C. (1941). "The Modern Asphalt Pavements." John Wiley & Sons, Inc., New York.

4. Ishai, I. and Craus, J. (1996). "Effects of Some Aggregate and Filler Characteristics on Behavior and Durability of Asphalt Paving Mixtures" Transportation Research Record 1530, National Research Council, Washington, D.C., pp. 75-86.
 5. Craus, J., Ishai, I., and Sides, A. (1978). "*Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixtures*" Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists, Vol. 47, pp. 558-588.
 6. Kulkarni, M.B. (1998). "*A Study of Mineral Fillers and Their Effect on Mix Properties*" North Carolina State University.
 7. Kim Y. and Dallas, N. (2003). "*Mechanistic Evaluation of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics*" Transportation Research Board, Washington, D.C.
 8. Sebaaly, P. E., Hitti, E. and Weitzel, D. (2003). "*Effectiveness of lime in hot-mix asphalt pavements*" Transportation Research Record 1832, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 34-41.
 9. Shashidhar, N. and Romero, P. (1998). "*Factors affecting the stiffening potential of mineral fillers*" Transportation Research Record 1638, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp 94-100.
 10. Ishai L. and Joseph G. (1977). "*Effect of Filler on Aggregate-Bitumen Adhesion Properties in Bituminous Mixtures.*" Assoc. Asphalt Paving Technologists, 46, pp. 547-558.
 11. Ishai, I. and Craus, J. (1996). "Effects of Some Aggregate and Filler Characteristics on Behavior and Durability of Asphalt Paving Mixtures" Transportation Research Record 1530, National Research Council, Washington, D.C., pp. 75-86.
 12. Kennedy T. (1977). "*Characterization of Asphalt Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test*" Assoc. Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, pp. 132-159.
 13. Hodgkinson A. and Visser A.T. (2004). "*The Role of Fillers and Cementitious Binders When Recycling with Foamed Bitumen or Bitumen Emulsion*" Proc. 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa.
 14. Karasahin M. and Terzi S. (2004). "*Use of Marble Waste Dust in the Mixture of Asphaltic Concrete as Mineral Filler*", Europe Bitumen, Viyana.
 15. Lachner R., Markus S., Ronald B. and Josef E. (2005). "*Is Low-Temperature Creep of Asphalt Mastic Independent of Filler Shape and Mineralogy? Arguments from Multiscale Analysis*" J. of Materials in Civil Engineering, pp 485-491.
 16. Roghanizad A.A. and Jalali A. (2008). "*Bitumen Modification Using Precipitated Calcium Carbonate (P.C.C.) Coated with Polymeric Compounds*" 1st International Bitumen Conference, Tehran, Iran.
 17. Ke Y.C and stroeve, P. (2005). "*Polymer-Layered Silicate and Silica Nanocomposites*", Elsevier science publishers B.V., Amsterdam.
 18. Rastegar M. and Kokabi M. (2008). "*The Effect of Nanoclay on the Morphology of Polymer/Bitumen Blend*", 1st International Bitumen Conference, Tehran, Iran.
 19. Pinnavaia T.J. and Beall, G.W. (2000). "*Polymer-Clay Nanocomposites*", John Wiley and Sons Ltd, England.
 20. Medani, T.O. (1999). "*A Simplified Procedure for Estimation of the Fatigue and Crack Growth Characteristics of Asphaltic Mixes,*" MSc. Thesis, International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, Delft, the Netherlands.
-