



وزارت راه و شهرسازی  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



معاونت فنی و عمرانی  
شهرداری تهران



نیروآسفالت

شماره: ۹۴۳۱۴/م ف ۲۰۱

تاریخ: ۱۳۹۴/۰۹/۲۴

پیوست: ندارد



### به نام خدا

### گواهی پذیرش مقاله

احتراماً، بدینوسیله گواهی می‌شود مقاله جناب آقای هادی گلشنی با عنوان " بررسی تأثیر کاربرد پودر میکرو سیلیس در بهبود مقاومت شیارشدگی مخلوط های آسفالتی داغ " توسط کمیته علمی هفتمین همایش ملی قیروآسفالت که در تاریخ ۲۴ الی ۲۶ آذرماه سال ۱۳۹۴ در محل مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی برگزار شد، به صورت شفاهی مورد پذیرش قرار گرفت و در مجموعه چکیده مقالات همایش چاپ گردید.

فریدون مقدس نژاد

رئیس کمیته علمی هفتمین همایش ملی قیرو آسفالت ایران



## بررسی تأثیر کاربرد پودر میکروسیلیس در بهبود مقاومت شیارشدهای مخلوط‌های آسفالتی داغ

هادی گلشنی<sup>۱</sup>، منصور قلعه نوی<sup>۲</sup>، سیدعلی صحاف<sup>۳</sup>

### چکیده

روسازی آسفالتی با هدف تحمل بارها و ترافیک سنگین در ساخت راه‌ها بکار می‌رود. افزایش روزافزون بارهای محوری و ترافیک سنگین وسایل نقلیه، منجر به وقوع خرابی‌هایی همچون شیارشدهای، خستگی، خرابی رطوبتی و... در روسازی می‌شود که از این میان، شیارشدهای یکی از مهمترین خرابی‌ها در روسازی بخصوص در دمای بالا به شمار می‌رود که منجر به کاهش عمر سرویس‌دهی روسازی می‌شود. در سال‌های اخیر تحقیقات بسیار زیادی در جهت بهبود مقاومت روسازی آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی وسایل نقلیه انجام شده است. برای این هدف محققان، راه‌های مختلفی همچون تغییر دانه‌بندی مصالح سنگی و افزودن مواد مختلف جهت اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی را بررسی کردند. یکی از این راه‌ها بکاربردن مواد افزودنی در بهبود خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی می‌باشد. هدف از این پژوهش بکاربردن میکروسیلیس در روسازی آسفالتی به منظور دستیابی به مخلوط آسفالتی با قدرت باربری بالا و مقاوم در برابر تغییر شکل‌های ماندگار می‌باشد. بدین منظور آزمایشات عملکردی قیر (درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش‌پذیری و کندروانی چرخشی) و مخلوط آسفالتی (بارگذاری محوری تکرارشونده) با درصدهای مختلف پودر میکروسیلیس صورت گرفت و مدلسازی با نتایج بدست آمده با نرم‌افزار جهت دستیابی به مدل پیش‌بینی خزش انجام شد. نتایج آزمایشات نشان داد که کاربرد میکروسیلیس ویژگی‌های قیر خالص را بهبود بخشیده و حساسیت حرارتی قیر را کاهش می‌دهد و باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارهای وارده می‌شود.

**واژگان کلیدی:** مخلوط آسفالتی، آزمایشات عملکردی، شیارشدهای، میکروسیلیس، مدلسازی

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری - دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، گروه عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار، گروه عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

# بررسی تأثیر کاربرد پودر میکروسیلیس در بهبود مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی داغ

هادی گلشنی<sup>۱</sup>، منصور قلعه نوی<sup>۲</sup>، سیدعلی صحاف<sup>۳</sup>.

## چکیده

روسازی آسفالتی با هدف تحمل بارها و ترافیک سنگین در ساخت راه‌ها بکار می‌رود. افزایش روزافزون بارهای محوری و ترافیک سنگین وسایل نقلیه، منجر به وقوع خرابی‌هایی همچون شیارشدگی، خستگی، خرابی رطوبتی و... در روسازی می‌شود که از این میان، شیارشدگی یکی از مهمترین خرابی‌ها در روسازی بخصوص در دمای بالا به شمار می‌رود که منجر به کاهش عمر سرویس‌دهی روسازی می‌شود. در سال‌های اخیر تحقیقات بسیار زیادی در جهت بهبود مقاومت روسازی آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی وسایل نقلیه انجام شده است. برای این هدف محققان، راه‌های مختلفی همچون تغییر دانه‌بندی مصالح سنگی و افزودن مواد مختلف جهت اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی را بررسی کردند. یکی از این راه‌ها بکاربردن مواد افزودنی در بهبود خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی می‌باشد. هدف از این پژوهش بکاربردن میکروسیلیس در روسازی آسفالتی به منظور دستیابی به مخلوط آسفالتی با قدرت باربری بالا و مقاوم در برابر تغییر شکل‌های ماندگار می‌باشد. بدین منظور آزمایشات عملکردی قیر(درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش پذیری و کندروانی چرخشی) و مخلوط آسفالتی (بارگذاری محوری تکرارشونده) با درصدهای مختلف پودر میکروسیلیس صورت گرفت و مدلسازی با نتایج بدست آمده با نرم‌افزار جهت دستیابی به مدل پیش‌بینی خزش انجام شد. نتایج آزمایشات نشان داد که کاربرد میکروسیلیس ویژگی‌های قیر خالص را بهبود بخشیده و حساسیت حرارتی قیر را کاهش می‌دهد و باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارهای وارده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** مخلوط آسفالتی، آزمایشات عملکردی، شیارشدگی، میکرو سیلیس، مدلسازی.

## ۱- مقدمه

افزایش روز افزون میزان آمد و شد، خصوصاً آمد و شد با بار محوری سنگین در دهه‌های اخیر موجب گردیده که در بسیاری از کشورها روند خرابی روسازی آسفالتی در مقابل عوامل مختلف، سرعت بیشتری گرفته و از این بابت خساراتی را متوجه صنعت راهسازی کشورها گرداند. بدین سبب مواردی که منتهی به افزایش دوام و کیفیت مطلوب روسازی‌های آسفالتی شده و از خرابی‌های زودرس لایه‌های آسفالتی جلوگیری نماید، مورد توجه پژوهشگران و دست اندرکاران صنعت راهسازی در

---

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری- دانشگاه فردوسی مشهد- ۰۹۱۵۵۱۳۶۱۲۰  
golshani2535@yahoo.com  
۲- دانشیار، گروه عمران- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد- ۰۹۱۵۱۵۸۲۶۹۲  
ghalenovi@um.ac.ir  
۳- استادیار، گروه عمران- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد- ۰۹۱۵۳۱۵۲۵۶۵  
asahaf@um.ac.ir

دهه‌های اخیر قرار گرفته است. ارتباط اساسی بین خواص و رفتار قیر با خواص و رفتار مخلوط‌های آسفالتی باعث گردیده که قیر نیز به عنوان یکی از عوامل مؤثر اصلی در عملکرد مطلوب مخلوط‌های آسفالتی همواره مورد توجه قرار گیرد. یکی از مهمترین خرابی‌های روسازی که استفاده از قیرها را تحت‌الشعاع قرار داده، تغییر شکل ماندگار (شیارشده‌گی) می‌باشد. شیارشده‌گی را می‌توان یک پدیده ناشی از بارگذاری تکرارشونده با تنش ثابت تلقی کرد. برای عملکرد مناسب و پایداری روسازی آسفالتی، قیر مصرفی بایستی ضمن دارا بودن دوام، از رفتار و عملکرد مناسبی نیز برخوردار باشد. از تغییرات و آسیب‌پذیری‌های قیر در اثر عوامل مختلف نمی‌توان به‌طور کامل جلوگیری کرد، اما می‌توان آنها را به تأخیر انداخت و یا کاهش داد و در نهایت محدود نمود. لذا افزودنی‌های مختلفی برای کنترل خواص قیر به کار گرفته شده‌اند و امروزه بحث اصلاح خواص قیر با مواد مختلف مطرح است. در سه دهه اخیر یکی از مؤثرترین افزودنی‌های قیر، پلیمرها بوده‌اند. اما جداسدن فاز-های قیر و پلیمر به دلیل اختلاف دانسیته میان آنها، بدون شک یکی از بزرگترین مشکلات قیرهای پلیمری می‌باشد. تحقیقات بسیاری برای حل این مشکل صورت گرفته است. در تحقیقات جدید، با رشد و تکامل نانو کامپوزیت‌ها، مسئله استفاده از ذرات در مقیاس نانو و میکرو جهت جلوگیری از جدایش فازها مطرح شده است.

## ۲- تجربیات و سوابق گذشته

به نسبت اطلاعات منتشر یافته درخصوص کاربرد میکروسیلیس در بتن، اطلاعات اندکی در ارتباط با اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی با میکروسیلیس موجود است. غفارپور و همکاران، آزمایشات مقایسه‌ای رئولوژیکی بر روی قیر و آزمایشات مکانیکی را در مخلوط آسفالتی و قیر اصلاح شده با نانورُس انجام دادند. نتایج نشان داد که نانورُس می‌تواند خصوصیات نظیر پایداری، مدول ارتجاعی و مقاومت کشش غیر مستقیم را بهبود بخشد [۱].

Goh, S.W و همکاران دریافتند که در اکثر موارد افزودن نانورُس و میکروفیبرکربن، حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها را بهبود بخشیده و یا پتانسیل خرابی رطوبتی را کاهش می‌دهد [۲].

تحقیقاتی توسط گیل و مولنار و سایر همکارانشان در زمینه اثر افزودن ذرات نانورُس بر رفتار رئولوژیکی قیر در فاز نخست و سپس بر مخلوط آسفالتی صورت گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که افزودن نانورُس منجر به بهبود برخی خواص قیر از جمله افزایش سفتی قیر و افزایش مقاومت شیارشده‌گی مخلوط آسفالتی، افزایش مقاومت پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت و تخریب برخی خواص دیگر از جمله کاهش مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی در دمای پایین می‌گردد [۳]. سورشلکومار<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ درخصوص تأثیر افزودن رُس در مخلوط‌های آسفالتی پلیمری، دریافتند که رُس یک تأثیر سازگار با آسفالت و پلیمر دارد و سازگاری زیاد بین رُس و پلیمر می‌تواند منجر به پراکندگی بهتر پلیمر در آسفالت شود. بنابراین بر خصوصیات نهایی رئولوژیکی سیستم‌های تحت مطالعه تأثیر می‌گذارد [۴].

خدادادی و همکاران تأثیر افزودن نانورُس را بر عملکرد بلند مدت روسازی آسفالتی بررسی کردند. آزمایش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد و قیراصلاح شده در تنش‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ Kpa انجام شد. نتایج آزمایش نشان داد که افزودن ۲٪ نانورُس، عمر خستگی روسازی آسفالتی را افزایش می‌دهد [۵].

برون و کراس در سال ۱۹۸۷ یک مطالعه وسیع ملی در رابطه با شیارشده‌گی مخلوط‌های آسفالتی در ایالات متحده گزارشی را ارائه کردند. نتیجه این مطالعه به منظور تعیین محل شیارشده‌گی، این بود که بخش زیادی از شیارشده‌گی در ۳ تا ۴ اینچ (۷۵ و ۱۰۰ میلیمتر) بالای لایه‌ی بتن آسفالتی رخ می‌دهد. آنها همچنین دریافتند که شیارشده‌گی در ساب‌گرید به‌طور کلی ناچیز است [۶].

در سال ۱۳۹۰ میرعبدالعظیمی و عربانی، شیارشده‌گی در مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که نمونه‌های آسفالت شیشه‌ای عملکرد بسیار بهتری را در مقایسه با نمونه‌های آسفالت ساده در برابر تغییر شکل

<sup>4</sup> Sureshlcumar

وابسته به زمان از خود بروز می‌دهند. با افزایش درصد خرده شیشه به دلیل بالارفتن مدول سختی، قفل و بست میان دانه‌های بهتر به همراه زبری بیشتر حاصل از تیزگوشگی ذرات خرده شیشه، از میزان تغییر شکل‌های پایدار در نمونه‌های آسفالتی می‌کاهد. اما با افزایش درصد خرده شیشه به میزانی بیش از درصد بهینه، لغزش تدریجی ذرات خرده شیشه را بدنبال داشته و بر میزان تغییر شکل‌های پایدار نمونه‌های آسفالتی حاوی خرده شیشه افزوده می‌شود [۷].

غفاریپور و همکاران، تحقیقاتی در زمینه اصلاح قیر با مواد پلیمری مانند SBS و لاستیک استایرن (SBR) و اتیلن وینیل استات (EVA) انجام داده‌اند. نتایج مطالعات انجام شده بر روی SBS نشان داد که SBS خصوصیات رئولوژیکی قیر را به علت ساختار شبکه‌ای پلیمر بهبود بخشیده و سبب افزایش مدول سختی، نقطه نرمی و سفتی قیر می‌شوند [۸]. در پژوهشی که در سال ۲۰۰۸ توسط عربانی و همکاران انجام گرفت، قابلیت خزشی مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده لاستیک ضایعاتی در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی معمول مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که افزودن خرده لاستیک ضایعاتی به صورت قابل ملاحظه قابلیت نمونه‌های آسفالتی را در برابر پدیده گودی مسیر چرخ‌ها افزایش می‌دهد. دلیل این امر، افزایش انعطاف پذیری و تأثیر بر خصوصیات سختی نمونه‌ها و قیر مصرفی و همچنین تغییر در بافت نمونه‌ها عنوان گردید. [۹]. از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ چندین تحقیق توسط عربانی و همکاران بر روی خصوصیات آسفالت مسلح شده به نخ تایر ضایعاتی صورت پذیرفته است. در این پژوهش‌ها خصوصیات مختلف مکانیکی نمونه‌های آسفالتی تحت بارگذاری دینامیکی توسط دستگاه آزمایش آسفالت ناتینگهام (NAT)<sup>۵</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده، نخ تایر به سبب خصوصیات منحصر به فردی نظیر مقاومت کششی بالا می‌تواند به عنوان یک افزودنی مناسب جهت کاهش اثرات مخرب بارهای ترافیکی عمل نماید. نخ تایر به جهت مقاومت بالا، قادر است تا علاوه بر به تأخیر انداختن ایجاد ترک در لایه‌های زیرین روسازی آسفالتی، از روند گسترش ترک‌ها به لایه‌های بالایی نیز جلوگیری به عمل آورد [۱۰]. در سال ۱۳۹۲ کاووسی و بختیاری اثر پارامترهای دما و نوع ماده‌ی افزودنی بر خرابی‌های وابسته به رطوبت، نظیر شیارشدگی را در مخلوط‌های آسفالتی داغ بررسی کردند و نتایج تحلیل آنها نشان داد که با کاهش دما و افزایش درصد افزودنی، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داغ در برابر شیارشدگی بهبود می‌یابد [۱۱].

### ۳- هدف از انجام تحقیق

هدف از انجام این تحقیق، آشنایی با خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیر، افزودنی‌های مورد استفاده در قیرها و همچنین ارزیابی بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی داغ با اصلاح و بهبود خواص قیر با استفاده از میکروسیلیس می‌باشد تا بتوان راهکاری مناسب جهت افزایش قابلیت روسازی‌های آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی و کاهش پدیده شیارشدگی ارائه نمود.

### ۴- تغییر شکل ماندگار (شیار شدگی)

شیارشدگی در روسازی‌های آسفالتی بصورت فرورفتگی‌های طولی در زیر مسیر چرخ‌ها نمایان شده و یا با برآمدگی‌های کناره همراه است. شیارشدگی عمر خدمت‌دهی مفید روسازی را کاهش داده و با تحت تأثیر قراردادن خصوصیات کنترلی وسیله نقلیه، خطرات جدی را برای استفاده‌کنندگان از راه ایجاد می‌کند [۱۲]. این پدیده می‌تواند ظرفیت زهکشی سطح روسازی را کاهش دهد. افزایش عمق شیار منجر به ایجاد مشکلات زیادی در ایمنی راه‌ها می‌شود. هنگامی که عمق شیارشدگی در حدود ۵ میلیمتر است، آب را در خود نگه داشته و منتج به پتانسیل هیدروپلانینگ<sup>۶</sup> می‌شود [۱۳].

<sup>5</sup> Nottingham Asphalt Tester

<sup>6</sup> Hydroplaning

## ۵- مطالعات آزمایشگاهی

### ۵-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی استفاده شده، از نوع مصالح سیلیسی بوده و از معدنی واقع در شمال شرق مشهد به دست آمده، دانه‌بندی مورد استفاده، مقدار میانگین حدود بالا و پایین دانه‌بندی تعیین شده در نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور می‌باشد [۱۴].

جدول ۱: دانه بندی مصالح سنگی منتخب مطابق با محدوده دانه بندی نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی

اندازه الک	#۲۰۰	#۵۰	#۸	#۴	۳/۸"	۱/۲"	۳/۴"	۱"
درصد عبوری	۶	۱۳	۴۳	۵۹	-	۹۵	۱۰۰	-

### ۵-۲- قیر

قیر مورد استفاده، قیر خالص ۶۰-۷۰ پالایشگاه اصفهان با درجه نفوذ (dmm) ۶۶/۲، نقطه نرمی  $50/18^{\circ}\text{C}$  و کشش پذیری (cm) ۱۱۰/۵ می‌باشد.

### ۵-۳- میکروسیلیس

میکروسیلیس مصرفی نیز از کارخانه فروسیلیس ایران واقع در سمنان با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی جدول ذیل تهیه شده است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس

پارامتر	مقدار
CaO (%)	۰/۴۵
SiO <sub>2</sub> (%)	۹۰/۳۶
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	۰/۷۱
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	۱/۳۱
MgO (%)	۰/۹۷
SO <sub>3</sub> (%)	۰/۴۱
K <sub>2</sub> O (%)	۱/۵۲
Na <sub>2</sub> O (%)	۰/۴۵
Loss of ignition (%)	۳/۱۱
Specific gravity	۲/۲
Specific surface area (m <sup>2</sup> /kg)	۲۱۰۸۰

### ۵-۴- اختلاط مصالح

برای تهیه نمونه‌های حاوی قیر و پودر میکروسیلیس، پس از حرارت دادن قیر، میکروسیلیس با درصدهای ۰.۳٪ و ۰.۵٪ و ۰.۷٪ و ۱.۰٪ به آن اضافه شده و با میکسر برشی دور بالا مخلوط می‌شود تا به حالت همگن و یکنواخت درآید.

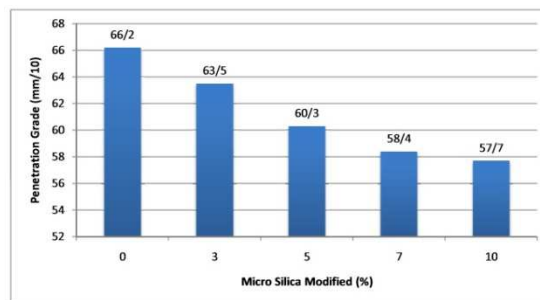
## ۶- آزمون‌های آزمایشگاهی

به منظور تعیین مشخصات فیزیکی و رفتار قیرهای پایه و اصلاح شده و مقایسه آنها با یکدیگر، و تعیین درصد بهینه میکروسیلیس از آزمایش‌های کلاسیک قیر شامل درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش پذیری و آزمایش‌های شارپ شامل کندروانی چرخشی و رئومتر برشی دینامیکی [۱۵ و ۱۶] و همچنین برای دستیابی به درصد بهینه قیر در مخلوط آسفالتی نیز از روش طرح اختلاط مارشال (ASTM D-1559) [۱۷] استفاده شده است. میزان تغییر شکل مخلوط آسفالتی توسط آزمایش بارگذاری محوری تکرارشونده تحت تنش ثابت (RLA) اندازه‌گیری شده است. این آزمایش امکان بررسی تأثیر متغیرهای مختلف مانند تنش، دما و زمان را در مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی فراهم می‌سازد [۱۸].

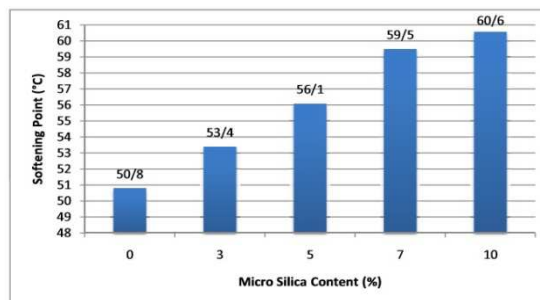
آزمایش‌های کلاسیک درجه نفوذ، نقطه نرمی و کشش پذیری قیر براساس توصیه انستیتو آسفالت برای قیرهای خالص کاربرد دارد اما در این پژوهش فقط به منظور قیاس بین خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیرهای خالص و اصلاح شده از این آزمایش‌ها استفاده شده است.

## ۷- نتایج آزمایشگاهی و بحث‌ها

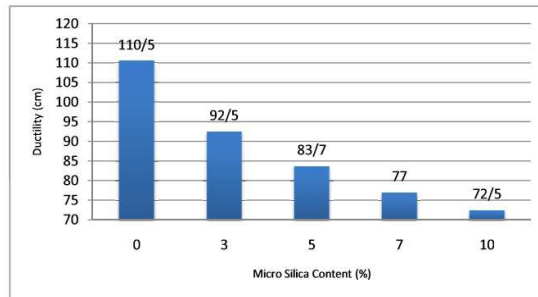
نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش پذیری، ویسکوزیته چرخشی و رئومتر برش دینامیکی قیر پایه و اصلاح شده با میکروسیلیس مطابق نمودارهای زیر می‌باشد:



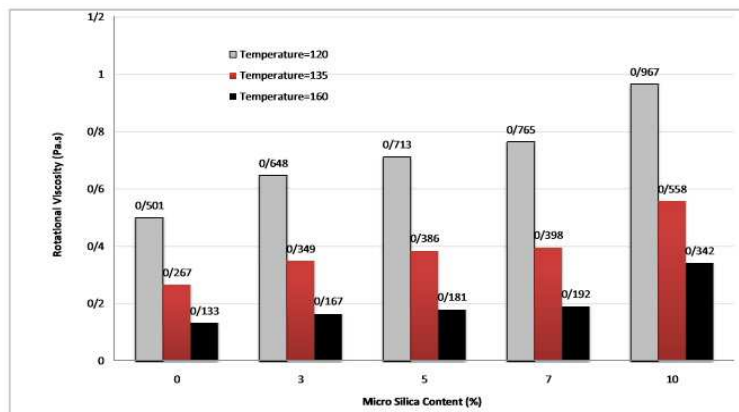
شکل ۱: درجه نفوذ قیر پایه و اصلاح شده با میکروسیلیس



شکل ۲: نقطه نرمی قیر پایه و اصلاح شده با میکروسیلیس



شکل ۳: کشش پذیری قیر پایه و اصلاح شده با میکروسیلیس



شکل ۴: نمودار نتایج ویسکوزیته چرخشی قیر پایه و اصلاح شده با میکروسیلیس

همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود با افزودن میکروسیلیس به قیر، درجه نفوذ کاهش می‌یابد که نشان دهنده افزایش سختی قیر می‌باشد. در شکل ۲ ملاحظه می‌شود افزودن میکروسیلیس به قیر و افزایش مقادیر آن سبب افزایش نقطه نرمی قیر می‌شود که نشان از کاهش حساسیت قیر در برابر دماهای بالا می‌باشد. شکل ۳ نشان می‌دهد که افزودن میکروسیلیس به قیر سبب می‌شود قیر در اثر کشش نسبت به قیر خالص زودتر گسیخته شود، علت آن افزایش کندروانی و سختی قیر در اثر افزودن میکروسیلیس می‌باشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که افزودن میکروسیلیس کندروانی قیر را افزایش می‌دهد. این بدین معنی است که افزودن میکروسیلیس به قیر باعث افزایش سفتی قیر در بالاترین دمای عملکردی روسازی شده که این موضوع منجر به بهبود مقاومت روسازی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار می‌گردد. همچنین شکل ۴ نشان می‌دهد که تمام مقادیر کندروانی در دمای کمتر از ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد مقدار تعیین شده در استاندارد سوپریپو (کمتر از ۳ پاسکال ثانیه) را ارضاء می‌کند. کندروانی قیر قابلیت پمپاژ، اختلاط و کارایی آسفالت را مشخص می‌کند. کندروانی زیاد منجر به دمای اختلاط و تراکم بالا می‌گردد.

از نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش پذیری، کندروانی چرخشی و رئومتر برش دینامیکی به منظور تعیین درصد بهینه میکروسیلیس استفاده شد. با استفاده از نمودارهای حاصل از نتایج آزمایش‌های فوق مشاهده می‌شود که در نقطه ۰.۷ میکروسیلیس نمودارها، تغییر شیب می‌دهند و مقادیر با ۱۰٪ میکروسیلیس تغییر ناچیزی نسبت به مقادیر متناظر خود در ۰.۷ میکروسیلیس دارند، و بر این اساس مقدار ۰.۷ میکروسیلیس بعنوان درصد بهینه میکروسیلیس انتخاب شد. برای ارزیابی اثر افزودن پودر میکروسیلیس بر روی مقاومت شیارشدگی، آزمایش رئومتر برش دینامیکی در دماهای ۴۶، ۵۰، ۵۸، ۶۴، ۷۰، ۷۶ و ۸۲ درجه سانتی‌گراد بر روی قیر اصلی و قیر اصلاح شده با میزان بهینه میکروسیلیس صورت گرفت.

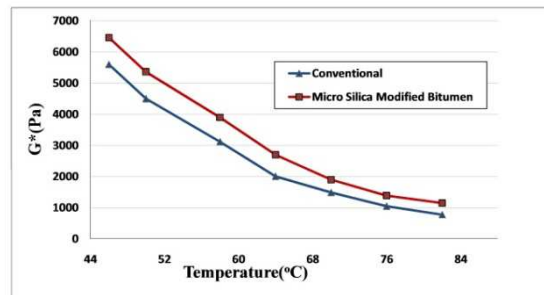
شیارشدگی، نتیجه اصلی تغییرشکل در سطح لایه روسازی است که اثر طبیعی بارگذاری سیکلی و تحت تنش ثابت در نظر گرفته می‌شود. در طی هر سیکل بارگذاری ترافیک عبوری، مقدار ثابتی کار برای تغییر شکل روسازی انجام می‌گیرد.



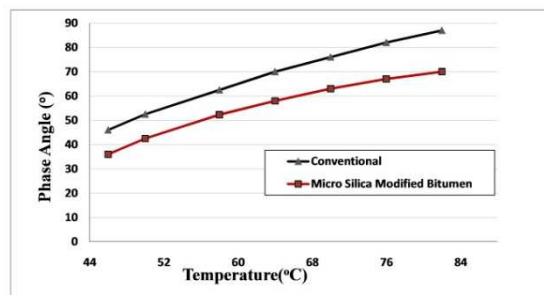
بخشی از کار انجام گرفته بر اثر حرکت ارتجاعی و برگشتی سطح لایه روسازی مستهلک می‌گردد و این در حالی است که بخش باقیمانده کار موجود که با WC نشان داده می‌شود موجب ایجاد تغییرشکل و گرما در سطح روسازی می‌شود. بر این اساس برای کاهش شیارشدگی می‌بایست مقدار WC که در رابطه ۱ به آن اشاره شده کاهش یابد [۱۹].

$$W_C = \pi \sigma_0^2 \left( \frac{1}{G^*} \right) \frac{1}{\sin \delta} \quad (1)$$

شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند که مدول برشی، هم برای قیر معمولی و هم اصلاح شده با افزایش دما کاهش و زاویه اختلاف فاز افزایش می‌یابد. این افزایش و کاهش برای نمونه‌های اصلاح شده با شیب کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد اتفاق می‌افتد. این بدین معنی است که نمونه‌های حاوی میکروسیلیس حساسیت کمتری نسبت به تغییرات دما دارند. بعبارت دیگر قیرهای اصلاح شده توانایی بالاتری در نگهداری ظرفیت ویسکوالاستیک قیر در مقایسه با نمونه‌های معمولی دارند.



شکل ۵: مدول کل تنش برشی در برابر دما



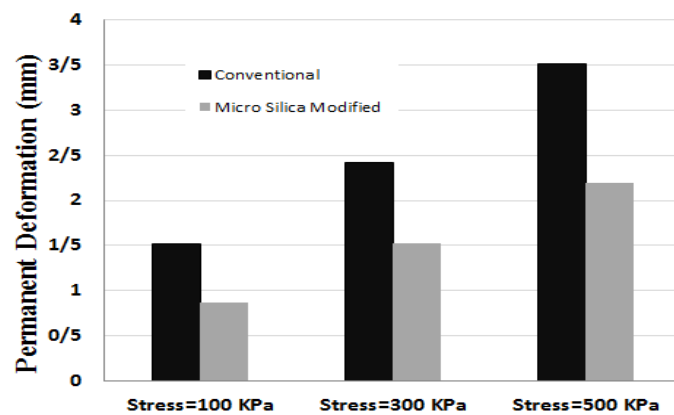
شکل ۶: زاویه اختلاف فاز در برابر دما

جدول ۷: پارامترهای مارشال در نمونه‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده با میکروسیلیس

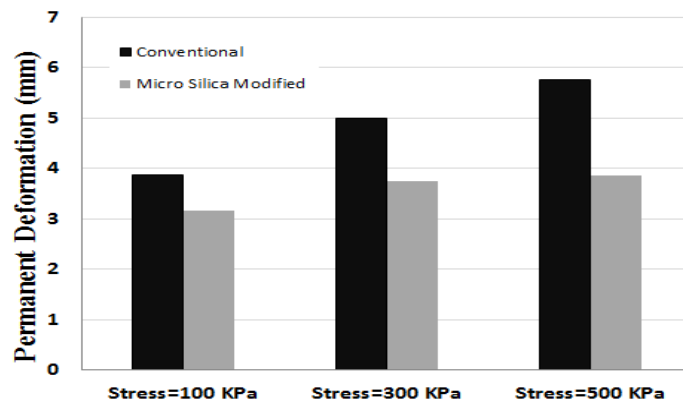
شماره آزمایش	Pb	Stability	Flow	Void	VMA	VFA	نوع آسفالت
۱	۴/۷	۱۱۷۸	۲/۳۲	۴/۹۵	۱۴/۵۸	۶۶/۰۵	اصلاح شده
۲	۵	۱۳۲۰	۲/۴۳	۴/۰۸	۱۴/۰۸	۷۱/۰۴	اصلاح شده
۳	۵/۳	۱۲۶۹	۲/۹۲	۳/۳۹	۱۴/۷۲	۶۶/۹۹	اصلاح شده
۴	۵/۵	۱۰۷۶	۳/۶۲	۲/۹۹	۱۵/۷۰	۸۰/۹۳	اصلاح شده
۵	۴/۷	۹۰۰	۲/۲۶	۵/۷۱	۱۵/۴۳	۶۳/۰۲	معمولی
۶	۵	۱۰۲۴	۲/۳۴	۴/۷۳	۱۵/۰۳	۶۸/۵۲	معمولی
۷	۵/۳	۱۰۹۵	۲/۸۷	۴/۰۵	۱۴/۶۸	۷۲/۴۱	معمولی
۸	۵/۵	۹۸۰	۳/۴۷	۳/۰۳	۱۵/۴۸	۸۰/۴۲	معمولی

برای این منظور نمونه هایی با درصدهای مختلف قیر (۴/۷، ۵، ۵/۳، ۵/۵) تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های مارشال در شکل ارائه شده است. با توجه به منحنی نتایج آزمایش مارشال، درصد قیر بهینه برای مصالح سنگی ۵/۳ درصد تعیین شد.

تغییر شکل ماندگار، همان تغییر شکل‌های پلاستیک زیر بارهای تکراری می‌باشند. آزمایش بارگذاری محوری تکراری جهت تعیین تأثیر پارامترهای مختلف بر روی مقاومت تغییر شکل‌های دائمی و رفتار خزش مخلوط‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده با میکروسیلیس بکار می‌رود. شکل‌های ۸ و ۷ مقادیر تغییر شکل‌های ماندگار برای نمونه‌های ساده و اصلاح شده با میکروسیلیس در تنش‌های مختلف ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال در دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل‌ها ملاحظه می‌گردد، با افزودن پودر میکروسیلیس از میزان تغییر شکل‌های پایدار در نمونه‌های آسفالتی کاسته می‌شود. افزایش مدول سختی، خود عاملی جهت کاهش این تغییر شکل‌ها است. عواملی همچون افزایش چسبندگی و افزایش کندروانی قیر باعث می‌گردد که به تدریج از میزان این تغییر شکل‌ها کاسته شود.



شکل ۷: تغییر شکل ماندگار نمونه‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده با میکروسیلیس (۷٪) در دمای ۵۰ °C



شکل ۸: تغییر شکل ماندگار نمونه‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده با میکروسیلیس (۷٪) در دمای ۶۰ °C

همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تنش، مقادیر تغییر شکل ماندگار در یک دمای مشخص برای نمونه‌های اصلاح شده با نرخ و شیب کمتری در مقایسه با نمونه‌های ساده افزایش پیدا می‌کند. این بدین معنی است که حساسیت نمونه‌های حاوی میکروسیلیس در برابر تنش نسبت به نمونه‌های ساده کمتر می‌باشد که این موضوع منجر به بالارفتن مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک (شیارشده‌گی) نمونه‌های اصلاح شده است. با افزایش دما، تغییر شکل ماندگار تمامی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این رفتار ناشی از حساسیت حرارتی بالای قیر در مخلوط آسفالتی می‌باشد.

## ۹- نتیجه گیری

- ۱- نتایج خواص فیزیکی و مکانیکی انجام شده بر روی قیرهای پایه و اصلاح شده با میکروسیلیس نشان داد که در قیر-های پایه، فقدان بازیابی پلاستیک، نقطه نرمی پایین‌تر، به محدود بودن دمای سرویس آن‌ها منجر می‌شود. در حالیکه قیرهای اصلاح شده دارای نقطه نرمی بالاتر، درجه نفوذ کمتر و بازیابی الاستیک بسیار مطلوبی بودند. بنابراین محدوده دمایی سرویس‌دهی در حضور میکروسیلیس، وسیع‌تر می‌شود.
- ۲- نتایج آزمایشات رئولوژیکی صورت گرفته نشان دادند که قیرهای پایه، رفتاری کاملاً ویسکوز را در دماهای بالا نشان می‌دهند و از الاستیسیته مناسبی نیز بهره‌مند نیستند. در حالیکه در قیرهای اصلاح شده با درصد مناسب میکروسیلیس رفتار الاستیک، غالب می‌باشد و دمای بالای رده عملکردی برای این قیرها بالاتر از قیرهای پایه می‌باشد.
- ۳- نتایج کشش‌پذیری نشان داد که قیرهای اصلاح شده با میکروسیلیس در دماهای پایین سرویس‌دهی از الاستیسیته بهتری نسبت به قیر پایه بهره‌مند نیستند و به سبب سفت شدن و ترد شدن قیر اصلاح شده، خاصیت انگی آنها که نشانه‌ای از خاصیت چسبندگی قیر می‌باشد کاهش یافته است.
- ۴- با افزایش درصد میکروسیلیس، مدول سختی قیر افزایش می‌یابد. علت این امر، بهبود یافتن ساختمان قیر به سبب تأثیر مناسب سیلیس بر روی اجزاء قیر می‌باشد. بنابراین میکروسیلیس تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خصوصیات سختی قیر دارد.
- ۵- حساسیت حرارتی قیر اصلاح شده با میکروسیلیس با افزایش درصد میکروسیلیس به علت افزایش اندیس نفوذ کاهش می‌یابد. قیرهای با حساسیت حرارتی کمتر، دارای مقاومت بیشتری در مقابل پدیده شیارشدگی و ترک‌های در دمای پایین می‌باشند.
- ۶- قیرهای اصلاح شده با میکروسیلیس، دارای کندروانی بیشتری بوده و چسبندگی بهتری با سنگدانه‌ها ایجاد می‌کنند. اگرچه قیرهای نرم، دارای انعطاف‌پذیری بیشتری هستند و در مقابل ترک‌خوردگی در دماهای پایین مقاومت بیشتری دارند اما چنین قیرهایی در دماهای بالا عملکرد مطلوبی نخواهند داشت. استقامت مارشال مخلوط‌های حاوی میکرو-سیلیس در مقایسه با نمونه‌های ساده بیشتر است.
- ۷- با افزایش تنش در آزمایش RLA در یک دمای مشخص میزان تغییر شکل نهایی با شیب کمتری در مقایسه با نمونه‌های ساده افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که حساسیت نمونه‌های اصلاح شده در مقابل تنش، نسبت به نمونه‌های معمولی کمتر است و این موضوع بیانگر بالاتر بودن این نمونه‌ها در برابر پدیده شیارشدگی می‌باشد.

## مراجع

- [1] Ghafarpoor, S. Andalibizade, B., & Vossough, S.H. (2010). "Engineering Properties of Nanoclay Modified Asphalt Concrete Mixtures". The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 35, Number 1B.
- [2] Goh, S.W., Akin M., You Z., Shi X. (2011). "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro or nano modified asphalt mixture", Construction and Building Materials ,pp 195–200.
- [3] Ghile D B., "Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures", (2006). MSc Dissertation, Delft University of Technology.
- [4] Sureshkumar M. S., Filippi S., Polacco G., Kazatchkov I., Stastna J., Zanzotto L. (2010). "Internal structure and linear viscoelastic properties of EVA/asphaltnanocomposites". European Polymer Journal vol46, pp 621–633.

- [5] Khodadadi, A, Kokabi, M. (2007). "Effect of Nanoclay on Long-Term Behavior of asphalt concrete pavement". 2st Congress of Nanomaterials. University of Kashan. Iran.
- [6] Brown, E.R. and Cross, S.A. (1992). "A national study of rutting in hot mix asphalt(HMA) pavements", National Center for Asphalt Technology, USA.
- [7] میرعبدالعظیمی، س.م.، عربانی، م.، (۱۳۹۰). "ارزیابی آزمایشگاهی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان، ۶ تا ۷ اردیبهشت.
- [8] Saeed Ghaffarpour Jahromi, Ali Khodaii. (2009). "Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder". Construction and Building Materials, vol 23, pp 2894–2904.
- [9] Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M. (2009). "Evaluation of Creep Compliance of Rubberized Asphalt in Compare with Conventional Hot Mix Asphalt". Advanced Testing and characterization of bitumen materials, Taylor and Francis Group.
- [10] Arabani, M., Haghi, A.K, Mirabdolazimi, S.M and Haghgoo, M. (2007). "Dynamic effects of waste tire thread mesh reinforcement on the asphaltic pavement characters". Advanced characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, Taylor & francis Group, Athens, Greece.
- [۱۱] کاووسی، ا. بختیاری، ج. (۱۳۹۴). "بررسی همزمان اثر پارامترهای دما و نوع ماده‌ی افزودنی بر خرابی‌های وابسته به رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی داغ"، مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، سال ۱، شماره ۱.
- [12] Kaloush, K. E. (2001). "Sample Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures". Ph.D. Dissertation, Arizona State University.
- [13] Sousa, J.B., Craus, J., Monismith, C. L. (1991). "Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete ". Strategic Highway Research Program (SHARP), National Research Council, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- [۱۴] مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، "مشخصات فنی عمومی راه (نشریه ۱۰۱)", تجدید نظر اول، چاپ اول، ۱۳۸۲.
- [15] Philadelphia. PA. (2004). "Annual Book of ASTM Standards, Road and Paving Materials", vol. 04.03.
- [16] Khodadadi, A, Kokabi, M. (2007). "Effect of Nanoclay on Long-Term Behavior of asphalt concrete pavement". 2st Congress of Nanomaterials. University of Kashan. Iran.
- [17] ASTM D 1559. ( 2002). "Standard Test Method for Marshal Ttest". Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- [۱۸] عربانی، م. (۱۳۸۹). "آزمایش‌های قیر و آسفالت". چاپ دوم، انتشارات دانشگاه گیلان.
- [۱۹] نیازی، ی. (۱۳۹۰). "مهندسی روسازی". چاپ اول، انتشارات نما.