

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی گیلسونایت و الیاف فورتا و تعیین منافع اقتصادی استفاده از آنها در روسازی‌های آسفالتی

محسن زاهدی*، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
فرشاد قطب، دانش آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه رازی، کرمانشاه
شهاب حسینی نسب، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

Email: zahedi@razi.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۷

چکیده

رشد وسایل نقلیه در سال‌های اخیر در کشورهای در حال توسعه منجر به افزایش هزینه‌های راه‌سازی و نگهداری آن شده است. لذا، اصلاح خصوصیات قیر امری ضروری می‌باشد. یکی از روش‌های اصلاح خصوصیات قیر و آسفالت، استفاده از انواع افزودنی‌ها می‌باشد. این امکان وجود دارد که مواد افزودنی، هزینه‌های مالی را افزایش دهند و بنابراین استفاده از آنها را غیرعملی کنند. اما مواد افزودنی خاصی وجود دارند که می‌توانند در مخلوط استفاده شوند و هزینه‌های اضافی ایجاد نکنند. در این مطالعه آزمایشگاهی، عملکرد افزودنی‌های گیلسونایت و الیاف فورتا در قیر و مخلوط آسفالتی ارزیابی شده است. آزمایش‌های قیر انجام شده در این تحقیق بر اساس افزودن گیلسونایت (صفر، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد وزن قیر) است. در حالی که آزمایش‌های مخلوط آسفالتی بر اساس افزودن الیاف فورتا (صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد وزن مخلوط) انجام شده است. همچنین، اثر مشترک هر دو ماده افزودنی به‌عنوان یک افزودنی کامپوزیت بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی نیز ارزیابی شد. نمونه‌ها از نظر استحکام مارشال و حساسیت رطوبتی مورد آزمایش قرار گرفتند. در حالی که آزمایش‌های خستگی و خزش دینامیک با استفاده از دستگاه UTM انجام شد. همچنین، جنبه‌های اقتصادی استفاده از این دو افزودنی نیز در تحقیق ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از گیلسونایت در قیر باعث افزایش استحکام مارشال، مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در مقایسه با الیاف فورتا در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. همچنین، بهترین درصد مشترک گیلسونایت و الیاف فورتا در نمونه‌های ساخته شده به ترتیب در ۱۵٪ و ۰/۹ درصد اتفاق افتاده است. نتایج آنالیز اقتصادی نشان داد که افزودن ۱۵٪ گیلسونایت به قیر از نظر اقتصادی کارآمد و در عمل قابل توجیه است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی داغ، گیلسونایت، الیاف فورتا، خستگی، شیارشدگی

۱. مقدمه

مخلوط‌های آسفالتی انجام نشده است. نمونه‌های آسفالت ساخته شده در این تحقیق عبارتند از: الف) نمونه‌های حاوی گیلسونایت به عنوان اصلاح کننده قیر، ب) نمونه‌های حاوی الیاف فورتا به عنوان اصلاح کننده مخلوط آسفالتی و ج) استفاده همزمان از گیلسونایت و الیاف فورتا به عنوان یک اصلاح کننده کامپوزیت در نمونه‌های ساخته شده برای ارزیابی اثر مشترک آنها. هدف و نوآوری این مطالعه، استفاده همزمان از گیلسونایت و الیاف فورتا به عنوان یک اصلاح کننده کامپوزیت در بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی است. علی‌رغم این واقعیت که مواد افزودنی بی-شماری مانند پلیمرها و پودر لاستیک می‌توانند عملکرد قیر را بهبود بخشند، هنگام انتخاب ماده افزودنی باید عوامل دیگری مانند جنبه‌های اقتصادی، تولید اصلاح کننده و سازگاری محیطی را نیز در نظر گرفت.

۲. پیشینه تحقیق

افزودنی‌ها برای افزایش طول عمر روسازی‌ها از طریق افزایش مقاومت قیر و مخلوط آسفالتی استفاده می‌شوند (بیلماز و چلوغلو، ۲۰۱۳). قیر به عنوان یکی از عوامل اصلی در عملکرد بهینه مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته می‌شود (جهانیان و همکاران، ۲۰۱۷). گیلسونایت یک رزین هیدروکربن طبیعی است که اولین بار در رود یونیتا واقع در شمال شرقی یوتا یافت شده است. این قیر طبیعی شبیه یک آسفالت نفت خام سخت شده است. گیلسونایت در حلال‌های آلیفاتیک و آروماتیک به خوبی قیر خالص از تقطیر نفت خام، حل می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، الیاف فورتا از الیاف شبکه‌ای از جنس پلی‌اولفین^۳ و الیاف تکرشته‌ای از جنس آرامید^۴ به طول ۱۹ میلی‌متر تشکیل شده است. شرکت فورتا در سال ۱۹۷۸ میلادی تأسیس شد و اولین تولیدکننده الیاف مصنوعی مسلح کننده می‌باشد. امروزه، فورتا در شهر

آسفالت به‌طور گسترده‌ای به عنوان روسازی جاده استفاده می‌شود (یه و همکاران، ۲۰۰۹). امروزه، با افزایش حجم ترافیک راه‌ها و افزایش فشارهای ناشی از چرخ‌های وسایل نقلیه، روسازی آسفالتی در معرض بارگذاری بیشتر و در نتیجه تنش‌های فشاری و کششی زیادی قرار می‌گیرد. لذا، با علم بر حجم زیاد و روزافزون وسایل نقلیه، طراحی و اجرای روسازی‌های مقاوم یک ضرورت است. لایه رویه که در تماس مستقیم با چرخ‌های وسایل نقلیه است، وظیفه تنزیل بار و انتقال آن را به لایه زیرین دارد. در نتیجه، واضح است که لایه‌های فوقانی می‌بایست از استحکام بیشتری برخوردار باشند. اگرچه میزان قیر در مخلوط آسفالتی ناچیز می‌باشد، اما یکی از مهمترین بخش‌های مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد. به همین علت، بهبود خصوصیات فنی و عملکردی قیر می‌تواند باعث بهبود کیفیت و عمر روسازی شود. همچنین، با توجه به افزایش روزافزون ترافیک، دو عامل ترک-خوردگی و شیارشدگی به معضلی اساسی تبدیل شده‌اند. از این رو، در این مقاله، تأثیر قیر طبیعی گیلسونایت^۱ بر مشخصات رئولوژی قیر و تأثیر الیاف فورتا^۲ بر مشخصات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی و همچنین اثر مشترک گیلسونایت و الیاف فورتا بر مشخصات فنی و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده است. به منظور افزایش استحکام مخلوط‌های آسفالتی در برابر بارهای وارد به آن تصمیم گرفته شد که از دو افزودنی گیلسونایت و الیاف فورتا استفاده شود. دلیل استفاده از گیلسونایت در وهله اول بالا بردن مقاومت قیر و در وهله دوم منابع فراوان قیر معدنی گیلسونایت در ایران می‌باشد که نسبت به دیگر افزودنی‌ها قیمت کمی نیز دارد. در حال حاضر، تحقیقات کمی در مورد گیلسونایت و الیاف فورتا به عنوان اصلاح کننده انجام شده است و هیچ تحقیقی در مورد اثر مشترک گیلسونایت و الیاف فورتا بر

³- Polyolefin

⁴- Aramid

¹- Gilsonite

²- Forta fiber

تگراس پرداخته شده است. در این پروژه، گیلسونایت به میزان ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی قیر برای اصلاح قیر افزوده شده که مشخص گردید گیلسونایت باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌های خشک و تر آسفالت می‌گردد. تحقیق انجام شده دیگری نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت باعث افزایش مقاومت مارشال و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند. همچنین، افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی منجر به افزایش طول عمر سرویس‌دهی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری شد (جهانیان و همکاران، ۲۰۱۷). صبحی و همکاران (۲۰۲۰) نتیجه گرفتند که ساسوبیت^۴ سختی مخلوط را افزایش می‌دهد و کارایی آن را بهبود می‌بخشد؛ اما تأثیر منفی آن بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های نیمه‌گرم است. علاوه بر این، افزودن گیلسونایت به ساسوبیت به عنوان یک اصلاح کننده کامپوزیت باعث افزایش خواص ترمودینامیک و دوام مخلوط‌های آسفالت شد. بیلماز و چلوغلو (۲۰۱۳) گزارش دادند که با افزودن ۱۰٪ گیلسونایت آمریکایی، ۹/۵ درصد گیلسونایت ایرانی و ۶۰٪ قیر دریاچه‌ای به قیر خالص PG58-34 می‌توان به سطح عملکردی مطلوب قیر PG70-34 رسید. همچنین، آزمایش‌های صورت گرفته روی مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که مخلوط‌های اصلاح شده با قیر دریاچه‌ای بالاترین سختی، پایداری، استحکام کششی و بیشترین مقاومت در برابر خستگی و تغییرشکل دائمی را دارد. از طرف دیگر، نتایج آزمایش حاکی از آن بود که مخلوط آماده شده با ۹/۵ درصد گیلسونایت ایران و ۳/۵ درصد پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن^۶ بالاترین مقاومت را در برابر خرابی رطوبتی دارد. جمشیدی و دیواندری (۱۳۹۸) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که استفاده از گیلسونایت مقدار مدول برجهدگی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را

گروو به عنوان یک شرکت پیشرو در تحقیق و توسعه الیاف مصنوعی شناخته می‌شود که در سرتاسر دنیا سابقه اجرایی موفق داشته است. در جدیدترین تحقیقی که گوپینات و کومار (۲۰۲۰) انجام داده‌اند به این نتیجه رسیدند که افزودن گیلسونایت به قیر، مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی را ۲/۴ برابر افزایش می‌دهد و عمق شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را حدود ۴ میلی‌متر کاهش می‌دهد. عامری و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی، به بررسی اثر اتیلن-وینیل-استات^۱ (EVA) و گیلسونایت بر عملکرد قیر پایه با استفاده از روش سوپرپیو پرداختند. آن‌ها در تحقیقشان، عملکرد نسبی اتیلن، وینیل، استات و گیلسونایت را جهت اصلاح قیر در سه حالت شیارشدگی، آسیب خستگی و ترک‌خوردگی در دمای کم مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش برش دینامیک^۲ برای شیارشدگی نشان داد که افزودنی EVA و گیلسونایت موجب افزایش پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin \gamma$) می‌شود که بیانگر بهبود مقاومت شیارشدگی نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های اصلاح نشده است. نتایج آزمایش خستگی نشان داد که افزودنی EVA، پارامتر خستگی ($G^* \cdot \sin \gamma$) را افزایش می‌دهد که بیانگر افزایش مقاومت ترک‌خوردگی خستگی نمونه‌ها اصلاح شده با EVA نسبت به نمونه‌های اصلاح نشده است. در حالی که نمونه‌های ساخته شده با افزودنی گیلسونایت موجب کاهش مقاومت ترک‌خوردگی خستگی می‌شود. نتایج آزمایش خمش تیرک^۳ نشان داد که افزودنی EVA باعث کاهش سختی خزشی^۴ از قیر اصلاح شده می‌شود. در حالی که افزودنی گیلسونایت موجب افزایش سختی خمشی از قیر اصلاح شده می‌شود. در پروژه تحقیقاتی انجام شده توسط وونگ و هو (۱۹۹۰) به بررسی تأثیر قیر اصلاح شده با گیلسونایت بر مخلوط آسفالتی استفاده شده در جاده ۱۲ هوستون،

4- S-value

5- Sasobit

6- SBS (Styrene-Butadiene-Styrene)

1- EVA (Ethylene-Vinyl-Acetate)

2- DSR (dynamic shear rheometer)

3- BBR (bending beam rheometer)

قیر و سنگدانه مؤثر باشد و عملاً خاصیت چسبندگی قیر را بهبود می‌بخشد. در پروژه تحقیقاتی انجام شده در دانشگاه ایالتی آریزونا آمریکا توسط کالوش و همکاران (۲۰۱۰) به تأثیر الیاف فورتا روی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شد. طبق نتایج به دست آمده، این الیاف موجب مقاومت بیشتر و عملکرد برتر مخلوط مسلح شده با الیاف فورتا نسبت به مخلوط معمولی در برابر خرابی شیارافتادگی می‌شود و باعث افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی و ترک‌های حرارتی می‌گردد. همچنین، الیاف فورتا می‌تواند عمر خستگی را نسبت به نمونه اصلاح نشده ۱/۵ تا ۲/۵ برابر افزایش دهد و مخلوط آسفالتی را در برابر وقوع و سرعت گسترش ترک‌ها مقاوم کند. کفاز زاده و همکاران (۱۳۹۷) نیز در پژوهشی به ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی گرم حاوی الیاف فورتا پرداختند که نتایج این گروه حاکی از آن است که رفتار و عملکرد خستگی مخلوط‌های مسلح شده با الیاف فورتا در مقایسه با مخلوط شاهد بهبود چشمگیری پیدا کرده است. مهم‌ترین اثر مثبتی که با افزودن الیاف فورتا در آسفالت به وجود می‌آید انعطاف پذیر شدن بیشتر و افزایش قابلیت جذب انرژی آن است. تحقیق انجام شده دیگری نشان داد که استحکام مارشال مخلوط‌های آسفالتی با ۰.۵٪ الیاف نیشکر^۳ در مقایسه با نمونه شاهد افزایش چشمگیری پیدا کرده است. علاوه بر این، الیاف نیشکر باعث افزایش ۲۹ درصدی مقاومت دینامیک و ۱۵ درصدی کرنش خمشی مخلوط‌های آسفالتی در مقایسه با نمونه شاهد شد (لی و همکاران، ۲۰۲۰). حسنی نسب و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی آسفالت خودترمیمی اصلاح شده با الیاف فورتا و نانوزایکوترم^۴ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقاومت خمشی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده توسط نانوزایکوترم ۳،۶٪ و توسط الیاف فورتا ۳۰٪ در مقایسه با نمونه شاهد افزایش یافته است. کالینسکی و همکاران (۲۰۱۸) در

افزایش می‌دهد. همچنین، نتایج آزمایش خزش دینامیک نیز نشان می‌دهد که مقدار تغییر شکل ماندگار نمونه‌های آسفالتی حاوی گیلسونایت در سیکل‌های مختلف بارگذاری کمترین مقدار را از خود نشان می‌دهد. حسامی و صبحی (۱۳۹۶) نیز به بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده توسط گیلسونایت پرداختند. نتایج آزمایشگاهی این گروه نشان می‌دهد که افزایش گیلسونایت موجب افزایش مقاومت و مدول سفی مخلوط‌های آسفالتی شده است.

تن زاده و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که الیاف هیبرید^۱، عملکرد مخلوط آسفالتی را در مقابل شیارشدگی، ترک‌های خستگی و ترک‌های حرارتی بهبود می‌بخشد و در کاهش ضخامت نهایی روسازی از طریق افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی کمک می‌کند. منصوریان و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم حاوی الیاف کف پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در دمای ثابت، افزودن الیاف کف^۲ باعث افزایش مقاومت در برابر شکست و مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم می‌شود. همچنین، مشاهده شد که مقدار بهینه استفاده از الیاف کف در حدود ۰.۳ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی نیمه گرم است. تاپکین (۲۰۰۸) از تحقیق خود نتیجه گرفت که افزودن الیاف پروپیلن به بتن آسفالتی در حالت خشک، باعث افزایش مقاومت مارشال، کاهش عدد روانی و افزایش عمر خستگی می‌شود. میرعبدالعظیمی و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی مهم، به ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داغ اصلاح شده با الیاف فورتا پرداختند. نتایج و تفسیر این گروه نقش حیاتی دما در عملکرد و تغییر شکل نمونه‌ها را نشان می‌دهد. آشکار است که با افزایش دما، تغییر شکل نیز افزایش می‌یابد. افزودن الیاف فورتا، تغییر شکل را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و همچنین می‌تواند در بهبود ارتباط بین

³- Bagasse fiber

⁴- Nano-zycotherm

¹- Hybrid fiber

²- Jute fiber

خستگی، شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است.

پژوهش خود نشان دادند که استفاده از الیاف پلی‌آرامید و پلی‌الفین در مخلوط‌های آسفالتی داغ می‌تواند عملکرد روسازی آسفالتی در برابر شیارشدگی، خستگی و انعکاس ترک را افزایش دهد.

۳-۱. مواد و مصالح

دانه‌بندی شماره ۴ (برای استفاده از لایه‌های توپکا و بیندر) در این مطالعه مطابق با آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران در محدوده مجاز مطابق جدول ۱ استفاده شده است (نشریه شماره ۲۳۴).

۳. روش تحقیق

این تحقیق آزمایشگاهی با هدف ارزیابی تأثیر گیلسونایت و الیاف فورتا به عنوان اصلاح کننده بر استجکام مارشال،

جدول ۱. دانه‌بندی مورد استفاده برای لایه رویه (نشریه شماره ۲۳۴)

اندازه الک	حدود مشخصات دانه‌بندی	میانگین	درصد وزنی رد شده
ستون شماره ۴ نشریه ۲۳۴	۲۳۴	حدود مشخصات	حاصل از اختلاط با نسبت‌های فوق
۳/۴ اینچ	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲ اینچ	۹۰ - ۱۰۰	۹۵	۹۸
شماره ۴	۷۴ - ۴۴	۵۹	۶۳
شماره ۸	۵۸ - ۲۸	۴۳	۴۸
شماره ۵۰	۲۱ - ۵	۱۳	۱۵
شماره ۲۰۰	۱۰ - ۲	۶	۸

جدول ۲. مقادیر مجاز سایش به روش لوس آنجلس

مقدار مجاز (%)	نوع لایه آسفالتی	حداکثر
۳۰	توپکا	
۴۰	بیندر	

در این پژوهش از قیر ۶۰/۷۰ استفاده شده است که مشخصات آن مطابق جدول ۳ می‌باشد.

سنگدانه انتخاب شده باید از مقاومت و سختی کافی برای جلوگیری از شکستگی ناشی از بارهای وارده برخوردار باشد. بر همین اساس، آزمایش سایش طبق استاندارد ASTM C131 (۲۰۰۶) روی سنگدانه‌ها انجام شد که نتایج مطابق با جدول ۲ است. طبق این آزمایش، میزان سایش مصالح مورد استفاده در این پژوهش ۱۷٪ به‌دست آمده است که در محدوده مجاز جدول ۲ قرار دارد.

جدول ۳. آزمایش‌های متداول قیر

نتایج	آزمایش‌های قیر خالص
۱/۰۱۱	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس
۶۹	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس (۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه) برحسب میلی‌متر
۴۹/۷	نقطه نرمی برحسب درجه سلسیوس
۳۱۱	درجه اشتعال برحسب درجه سلسیوس
۲۸۰	کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ درجه سلسیوس (سانتی استوکس)

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی گیلسونایت و الیاف فورتا و تعیین منافع اقتصادی استفاده از آنها در

روسازی‌های آسفالتی

در ایران، منابع متنوعی از گیلسونایت وجود دارد که تمرکز آن در غرب و جنوب غربی کشور می‌باشد (یعنی استان‌های کرمانشاه، ایلام، لرستان و خوزستان). گیلسونایت مورد استفاده در این تحقیق از یک معدن در استان ایلام می‌باشد که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن مطابق جداول ۴ و ۵ می‌باشد. همچنین، مشخصات فنی الیاف فورتا در جدول ۶ شرح داده شده است.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی گیلسونایت

آزمایش	شبکه خاکس	رطوبت	رنگ پودر	نقطه نرمی	وزن مخصوص	حلالیت در H ₂ S (%)	حلالیت در مواد فرار (%)	نتایج
۲۰۰	۵-۱۰	۱	مشکی	۲۰۰	۱/۰۵	۹۶	۹۲	۱

جدول ۵. مؤلفه‌های گیلسونایت

مؤلفه	C	H	S	CaO	TiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	SO ₃
در صد	۷۹/۰۸	۱۰/۳۱	۲/۶۳	۱/۲۳	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱	۰/۱۷۴	۰/۷۷۴	۰/۵۰	۰/۰۶۷	۰/۰۳۵	۰/۰۰۸	۰/۰۲۹	۹/۴۶۷

جدول ۶- خصوصیات فیزیکی الیاف فورتا

طول الیاف	وزن مخصوص	مقاومت کششی	دمای ذوب	رنگ
۱۹ میلی‌متر	۱/۴۴-۰/۹۱	۲۸۰۰ Mpa	۱۰۰/۴۲۷	زرد، مشکی، قهوه‌ای مایل به زرد

۲-۳. ساخت نمونه‌ها

در این مطالعه، از طرح اختلاط مارشال برای تعیین مقدار بهینه قیر مخلوط آسفالتی استفاده شده است. پس از تعیین مقدار مطلوب قیر، تصمیم به ساخت نمونه‌های اصلی گرفته شد. با توجه به تحقیقات و مطالعات انجام شده در مورد استفاده از گیلسونایت در قیر، تصمیم بر آن شد که از ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد وزن قیر، گیلسونایت استفاده شود (جهانیان و همکاران، ۲۰۱۷؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین، در این مطالعه از روش خشک برای ساخت مخلوط آسفالتی با الیاف فورتا (صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد وزن مخلوط) استفاده شد. در این فرآیند، ابتدا سنگدانه و قیر به‌طور جداگانه گرم شدند. سپس، سنگدانه را از آون خارج نموده و الیاف فورتا به مخلوط

داغ اضافه شد. بعد از مخلوط کردن الیاف فورتا و سنگدانه، به تدریج قیر به مخلوط اضافه شد.

۱-۲-۳. آماده‌سازی اختلاط قیر با گیلسونایت

براساس پیشنهاد مجمع جهانی راه، پودر گیلسونایت مورد استفاده برای اصلاح قیر باید به‌طور کامل از الک شماره ۵۰ عبور کند. برای این کار باید دمای مخلوط ۱۴۰ درجه سلسیوس باشد و به مدت ۱۵۰ دقیقه و با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه مخلوط شود. سپس، دمای مخلوط تا ۱۸۰ درجه سلسیوس بالا رود و به مدت ۳۰ دقیقه و با سرعت ۴۵۰۰ دور در دقیقه این فرآیند ادامه یابد تا مخلوطی همگن از گیلسونایت و قیر تهیه شود (باردسی و همکاران، ۱۹۹۹).

۲-۳. روش افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی

در حالی که هر دو روش فرآیند مرطوب و خشک برای افزودن الیاف به مخلوط آسفالت مورد استفاده قرار می گیرد، تصمیم بر آن شد که در این تحقیق از فرآیند خشک استفاده شود. در روش مرطوب، الیاف به قیر داغ اضافه می شود و مخلوط حاصل با سنگدانه مخلوط می شود. در روش فرآیند خشک، ابتدا سنگدانه ها و قیر بر اساس استاندارد ASTM-D1559 (۱۹۸۲) گرم می شوند. در مرحله بعد، الیاف به قیر داغ اضافه می شود و در آخر،

مخلوط حاصل به سنگدانه اضافه می شود. مقدار مطلوب قیر مورد استفاده در این مطالعه ۴/۵ درصد بود که معادل ۵۶/۵ گرم است. با توجه به تعداد زیاد نمونه ها و محدودیت منابع مالی تحقیق، تعیین قیر بهینه در درصدهای متفاوت افزودنی گیلسونایت امکان پذیر نبود. لذا، در این تحقیق از درصد قیر بهینه نمونه شاهد به عنوان یک فرض ساده کننده استفاده شده است. علاوه بر این، قطر نمونه های آماده شده ۱۰ سانتی متر و ضخامت نمونه ها بین ۶/۵-۶/۸ سانتی متر بود. در مجموع، ۲۸۸ نمونه در این تحقیق ساخته شده است (جدول ۷).

جدول ۷. نام، شماره و تعداد نمونه های ساخته شده در این مطالعه

شماره	تعداد نمونه ساخته شده	نام نمونه	توضیحات
۱- ۱۵	۱۵	0	نمونه شاهد
۱۶- ۲۴	۹	G3	۳٪ گیلسونایت
۲۵- ۳۳	۹	G6	۶٪ گیلسونایت
۳۴- ۴۸	۱۵	G9	۹٪ گیلسونایت
۴۹- ۶۳	۱۵	G12	۱۲٪ گیلسونایت
۶۴- ۷۸	۱۵	G15	۱۵٪ گیلسونایت
۷۹- ۸۷	۹	F0.3	۰/۳٪ الیاف فورتا
۸۸- ۱۰۲	۱۵	F0.6	۰/۶٪ الیاف فورتا
۱۰۳- ۱۱۷	۱۵	F0.9	۰/۹٪ الیاف فورتا
۱۱۸- ۱۲۶	۹	G3-F0.3	۰/۳٪ الیاف فورتا + ۳٪ گیلسونایت
۱۲۷- ۱۳۵	۹	G6-F0.3	۰/۳٪ الیاف فورتا + ۶٪ گیلسونایت
۱۳۶- ۱۴۴	۹	G9-F0.3	۰/۳٪ الیاف فورتا + ۹٪ گیلسونایت
۱۴۵- ۱۵۳	۹	G12-F0.3	۰/۳٪ الیاف فورتا + ۱۲٪ گیلسونایت
۱۵۴- ۱۶۲	۹	G15-F0.3	۰/۳٪ الیاف فورتا + ۱۵٪ گیلسونایت
۱۶۳- ۱۷۱	۹	G3-F0.6	۰/۶٪ الیاف فورتا + ۳٪ گیلسونایت
۱۷۲- ۱۸۰	۹	G6-F0.6	۰/۶٪ الیاف فورتا + ۶٪ گیلسونایت
۱۸۱- ۱۹۵	۱۵	G9-F0.6	۰/۶٪ الیاف فورتا + ۹٪ گیلسونایت
۱۹۶- ۲۱۰	۱۵	G12-F0.6	۰/۶٪ الیاف فورتا + ۱۲٪ گیلسونایت
۲۱۱- ۲۲۵	۱۵	G15-F0.6	۰/۶٪ الیاف فورتا + ۱۵٪ گیلسونایت
۲۲۶- ۲۳۴	۹	G3-F0.9	۰/۹٪ الیاف فورتا + ۳٪ گیلسونایت
۲۳۵- ۲۴۳	۹	G6-F0.9	۰/۹٪ الیاف فورتا + ۶٪ گیلسونایت
۲۴۴- ۲۵۸	۱۵	G9-F0.9	۰/۹٪ الیاف فورتا + ۹٪ گیلسونایت
۲۵۹- ۲۷۳	۱۵	G12-F0.9	۰/۹٪ الیاف فورتا + ۱۲٪ گیلسونایت
۲۷۴- ۲۸۸	۱۵	G15-F0.9	۰/۹٪ الیاف فورتا + ۱۵٪ گیلسونایت

۴. آزمایش‌ها

در این تحقیق، آزمایش‌های ویسکوزیته، نقطه نرمی، درجه نفوذ و نقطه اشتعال برای بررسی خصوصیات قیرها (اصلاح نشده و اصلاح شده با گیلسونایت) انجام شد. هدف اصلی این مطالعه، تعیین عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی پودر قیر طبیعی گیلسونایت و الیاف فورتا، به‌طور همزمان به عنوان یک افزودنی کامپوزیت، با استفاده از آزمایش‌هایی همچون استحکام مارشال، حساسیت رطوبتی، خزش دینامیک و خستگی بود. آزمایش‌های خزش دینامیک و خستگی با استفاده از دستگاه UTM انجام شد.

۴-۱. آزمایش حساسیت رطوبتی^۱

روند آزمایش طبق استاندارد ASTM-D4867/D4867M-04 (۲۰۱۴) با استفاده از دستگاه کششی غیرمستقیم انجام شد. برای هر مخلوط، شش نمونه استوانه‌ای تهیه شد. از سه نمونه برای آزمایش در شرایط خشک (غیراشباع) و از سه نمونه دیگر برای آزمایش در شرایط اشباع استفاده شد. نسبت مقاومت نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک (اشباع نشده) مقدار TSR را تولید می‌کند. برای اعمال شرایط رطوبتی، سه نمونه به مدت ۲۴ ساعت در آب در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند و سپس به مدت ۱ ساعت در آب ۲۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند و تحت آزمایش کشش غیرمستقیم ارزیابی می‌شوند. سه نمونه دیگر در حالت خشک، ابتدا به مدت ۱ ساعت در داخل آب ۲۵ درجه سلسیوس قرار داده شده تا دمای نمونه‌ها به این مقدار برسد. سپس، تحت آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم قرار می‌گیرند. در آخر، نسبت

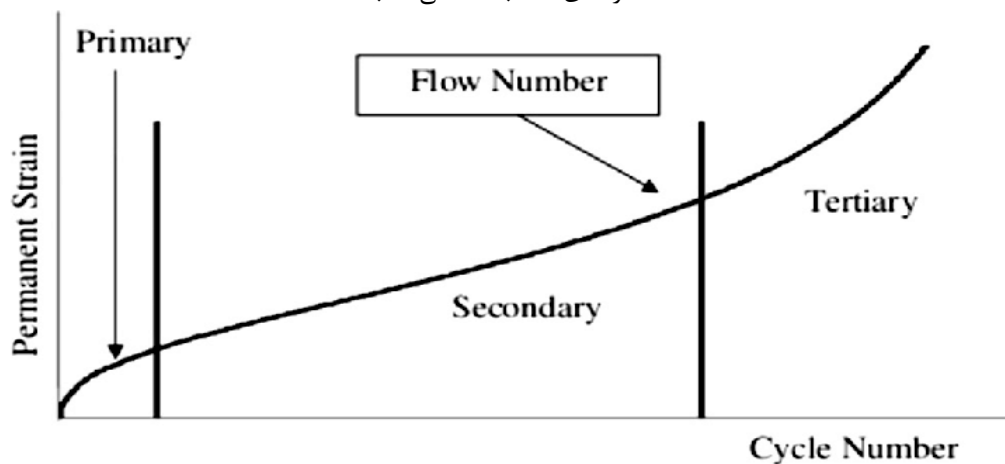
مقاومت نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک نباید از ۰/۸ کمتر باشد (جهانیان و همکاران، ۲۰۱۷).

۴-۲. آزمایش خزش دینامیک^۲

هدف از این آزمایش بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی است. در واقع، این آزمایش برای مقایسه بین انواع مختلف آسفالت اعمال می‌شود. یکی از روش‌های اندازه‌گیری تغییرشکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از چندین هزار بار تکرار و ثبت تغییرشکل دائمی تجمعی به عنوان تابعی از تعداد چرخه بار است. نتایج این آزمایش در منحنی کرنش دائمی تجمعی در برابر تعداد چرخه‌های بارگذاری ارائه می‌شود. شکل ۱، منحنی کرنش تجمعی در برابر چرخه بارگذاری را نشان می‌دهد. منحنی کرنش تجمعی به سه ناحیه اول تا سوم تقسیم می‌شود. تعداد چرخه‌ها در ابتدای منطقه سوم به عنوان تعداد جریان شناخته می‌شود. در منطقه اول، تغییرشکل‌های دائمی ناگهانی اتفاق می‌افتد. سپس، در منطقه دوم، افزایش شیب تغییرشکل دائمی کاهش می‌یابد تا به یک نرخ ثابت برسد. در منطقه سوم، شیب تغییرشکل دائمی دوباره افزایش می‌یابد و مقدار تغییرشکل دائمی به شدت جمع می‌شود (جهانیان و همکاران، ۲۰۱۷). در این مطالعه، آزمایش خزش دینامیک نمونه‌های آسفالتی در دمای ۵۵ درجه سلسیوس با تنش ثابت ۵۰۰ کیلوپاسکال براساس روش استاندارد BS DD 226 (۱۹۹۶) انجام شد. در این آزمایش و در هر سیکل بارگذاری، مدت اعمال بار و مدت زمان استراحت برابر یک ثانیه می‌باشد. همچنین، قبل از اعمال سیکل‌های آزمایش، تنش پیش‌بارگذاری به میزان ۵۰ کیلوپاسکال به مدت ۵ دقیقه اعمال شد.

²- Dynamic creep test

¹- Moisture sensitivity test



شکل ۱. شکل کرنش تجمعی در برابر تعداد چرخه بارگذاری (جهانیان و همکاران، ۲۰۱۷)

۲UTM در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و با تنش بارگذاری یک ثانیه، مدت زمان اعمال بار ۰/۲ ثانیه و مدت زمان استراحت در هر سیکل بارگذاری ۰/۸ ثانیه انجام شد. همچنین، این آزمایش بر اساس استاندارد BS EN 12697 (۲۰۱۲) صورت گرفته است.

۵. نتایج آزمایش‌ها

۵-۱. نتایج آزمایش‌های قیر

برای بررسی خصوصیات قیر اصلاح شده توسط گیلسونایت، آزمایش‌های ویسکوزیته، نقطه نرمی، درجه نفوذ و نقطه اشتعال روی نمونه‌ها انجام شد. حساسیت‌های حرارتی هر دو نمونه قیر اصلاح شده و اصلاح نشده نیز محاسبه و مقایسه شد. نتایج در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. نتایج آزمایش قیر

گیلسونایت (%)	درجه نفوذ (میلی‌متر)	نقطه نرمی (سلسیوس)	شاخص نفوذ	ویسکوزیته (سانتی‌استوکس)	درجه اشتعال (سلسیوس)
۰	۶۹	۴۹/۷	-۰/۵	۲۸۰	۳۱۱
۳	۶۸	۴۹/۸	-۰/۵	۲۰	۳۱۰
۶	۶۶	۵۰/۷	-۰/۳۵	۲۸۷	۳۱۰
۹	۶۱	۵۲/۶	-۰/۰۸	۴۳۰	۳۱۰
۱۲	۵۸	۵۳/۳	-۰/۰۴	۴۸۲	۳۱۱
۱۵	۵۴	۵۵/۳	۰/۲۳	۶۵۲	۳۱۰

2- Universal Testing Machine

1- Dynamic fatigue test

جدول ۸ نشان می‌دهد که افزودن گیلسونایت میزان آسفالتین موجود در قیر را افزایش می‌دهد که به نوبه خود باعث کاهش نقطه اشتعال آن می‌شود. با این حال، طبق نتایج، این تغییرات ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است.

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

$$A = \frac{\text{Log}800 - \text{Log}P}{T_{RB} - T_P} \quad (2)$$

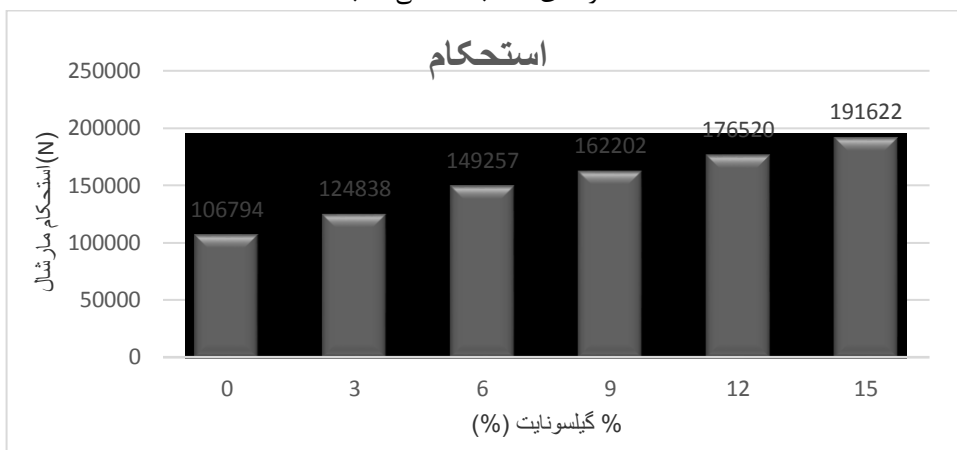
که PI شاخص نفوذ قیر، A پارامتر کمکی است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود، P مقدار درجه نفوذ، T_P دمای قیر هنگام انجام آزمایش درجه نفوذ که معمولاً ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود و T_{RB} نقطه نرمی قیر است.

۲-۵. نتایج آزمایش استحکام مارشال و روانی مخلوط آسفالتی

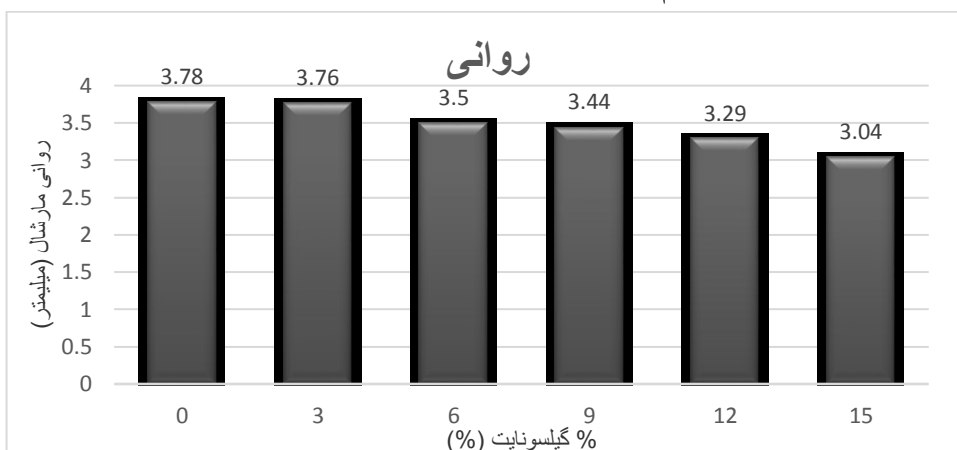
در این پژوهش، نمونه‌ها به سه روش ساخته شده‌اند که شامل مخلوط‌های آسفالتی حاوی گیلسونایت، مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف فورتا و اثر مشترک و همزمان گیلسونایت و الیاف فورتا به عنوان یک افزودنی کامپوزیت بر مشخصات فنی و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب تأثیر درصدهای مختلف گیلسونایت بر استحکام و روانی مخلوط آسفالتی نشان داده شده است.

گیلسونایت حاوی درصد زیادی آسفالتین می‌باشد و آسفالتین به عنوان استحکام‌دهنده قیر به‌طور مستقیم بر درجه نفوذ قیر تأثیر می‌گذارد. علت کاهش درجه نفوذ کاهش قیر در جدول ۸ را می‌توان همین عامل دانست. به‌طوری که با افزودن گیلسونایت به میزان ۱۵٪ وزنی قیر، درجه نفوذ ۲۱/۷ درصد نسبت به نمونه اصلاح نشده کاهش پیدا کرده است. کاهش درجه نفوذ موجب بهبود رفتار الاستیک و در نتیجه افزایش مقاومت آسفالت در برابر تغییرشکل‌های دائمی و شیارافتادگی می‌شود. همچنین، این روند حاکی بر سفت شدن قیر می‌باشد. طبق نتایج آزمایش ویسکوزیته در جدول ۸، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد گیلسونایت، ویسکوزیته قیر نیز افزایش پیدا کرده است (کوئینتانا و همکاران، ۲۰۱۶؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۱a). همچنین، در جدول ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد گیلسونایت، نقطه نرمی نیز افزایش پیدا کرده است. به‌طوری که با افزودن گیلسونایت به میزان ۱۵٪ وزنی قیر، نقطه نرمی ۱۱/۲ درصد نسبت به نمونه اصلاح نشده افزایش پیدا کرده است. افزایش نقطه نرمی، عملکرد رفتاری ویسکوز قیر با افزایش دما را به تأخیر می‌اندازد. این امر به همراه کاهش درجه نفوذ در واقع باعث افزایش شاخص نفوذ^۱ خواهد شد که نتایج آن طبق روابط ۱ و ۲ محاسبه شده و در جدول ۸ قرار داده شده است (باباگلی و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، افزایش شاخص نفوذ باعث بهبود حساسیت حرارتی قیر می‌شود. سرانجام، ستون آخر

¹- PI (Penetration Index)



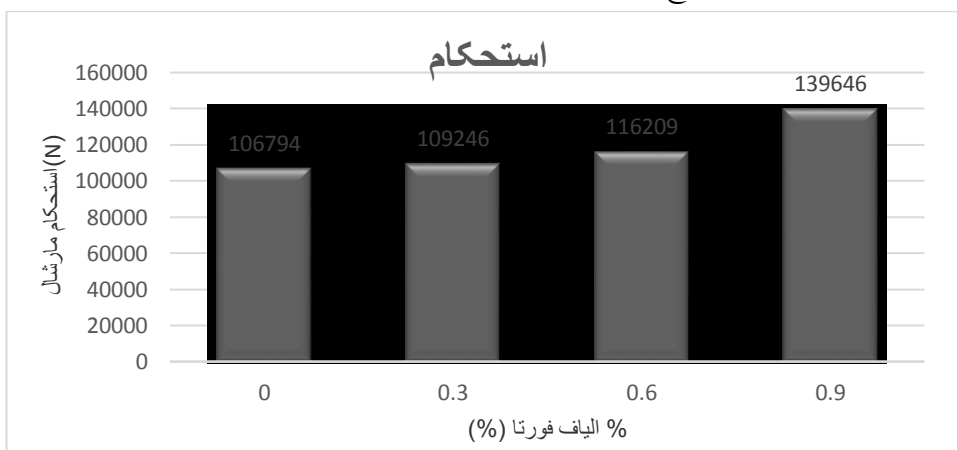
شکل ۲. استحکام مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف گیلسونایت



شکل ۳. روانی مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف گیلسونایت

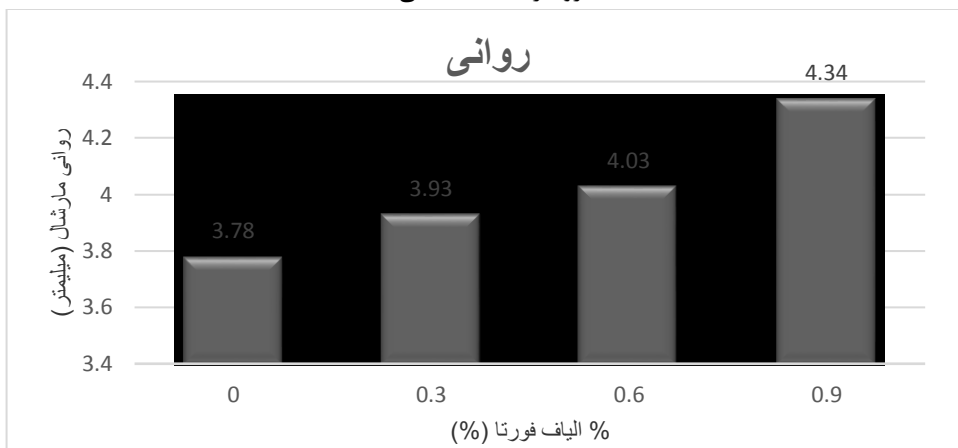
استفاده از گیلسونایت در بین نمونه‌های ساخته شده، ۱۵٪ وزنی قیر می‌باشد. به طوری که با افزودن این مقدار به قیر موجب افزایش ۷۹/۴ درصدی استحکام مارشال شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ تأثیر الیاف فورتا بر استحکام و روانی مخلوط‌های آسفالتی نمایش داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، با افزودن گیلسونایت به قیر، استحکام مارشال مخلوط‌های آسفالتی افزایش و روانی کاهش یافته است. این امر به علت افزایش ویسکوزیته و چسبندگی بهتر قیر اصلاح شده با سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی می‌باشد (نسرکانی و همکاران، ۲۰۱۷). طبق این نتایج، درصد بهینه



شکل ۴. استحکام مارشال مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف الیاف فورتا

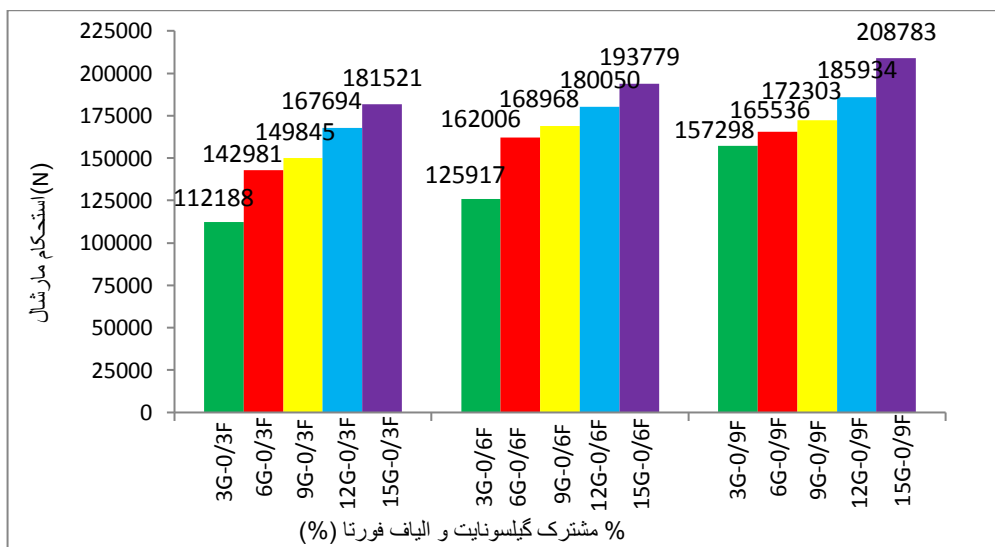
ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی گیلسونایت و الیاف فورتا و تعیین منافع اقتصادی استفاده از آنها در روسازی‌های آسفالتی



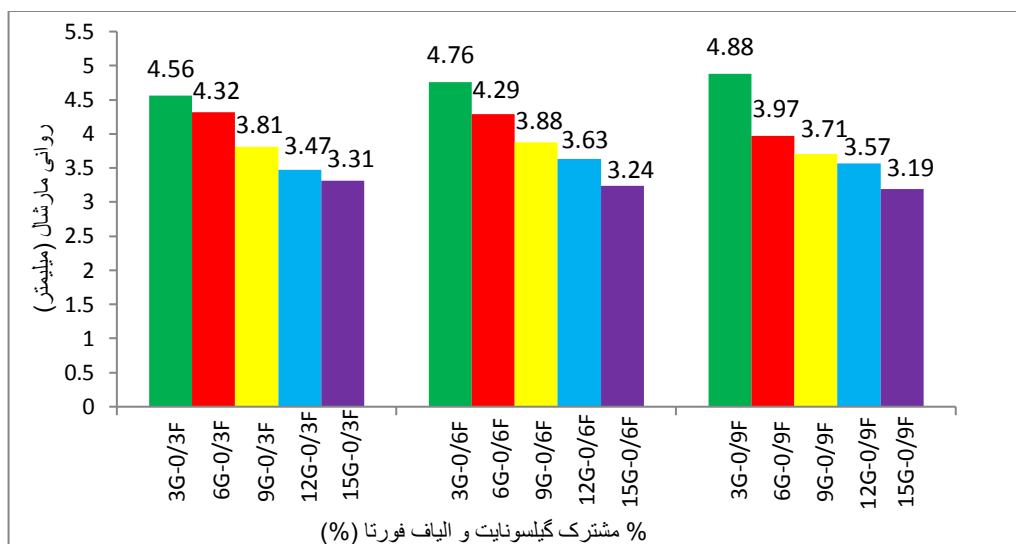
شکل ۵. روانی مخلوط‌های آسفالتی با درصدهای مختلف الیاف فورتا

از الیاف فورتا در بین نمونه‌های ساخته شده، ۰/۹ درصد می‌باشد. به طوری که با افزودن این میزان به مخلوط موجب افزایش ۳۰/۷ درصدی استحکام مارشال شده است. شکل‌های ۶ و ۷، تأثیر استفاده مشترک گیلسونایت و الیاف فورتا به عنوان یه افزودنی کامپوزیت بر استحکام و روانی مارشال را نشان می‌دهند.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزودن الیاف فورتا به مخلوط، استحکام مارشال و روانی مخلوط‌های آسفالتی افزایش یافته است. افزایش روانی نمونه‌های حاوی الیاف فورتا حاکی از تغییر شکل‌های قطری بیشتر مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده در لحظه گسیختگی و در نتیجه انعطاف پذیری بهتر آن است (جهرمی و خدایی، ۲۰۰۸؛ تاپکین، ۲۰۰۸). طبق این نتایج، میزان بهینه استفاده



شکل ۶. تأثیر مشترک درصدهای مختلف گیلسونایت و الیاف فورتا بر استحکام مارشال



شکل ۷. تأثیر مشترک درصدهای مختلف گیلسونایت و الیاف فورتا بر روانی مارشال

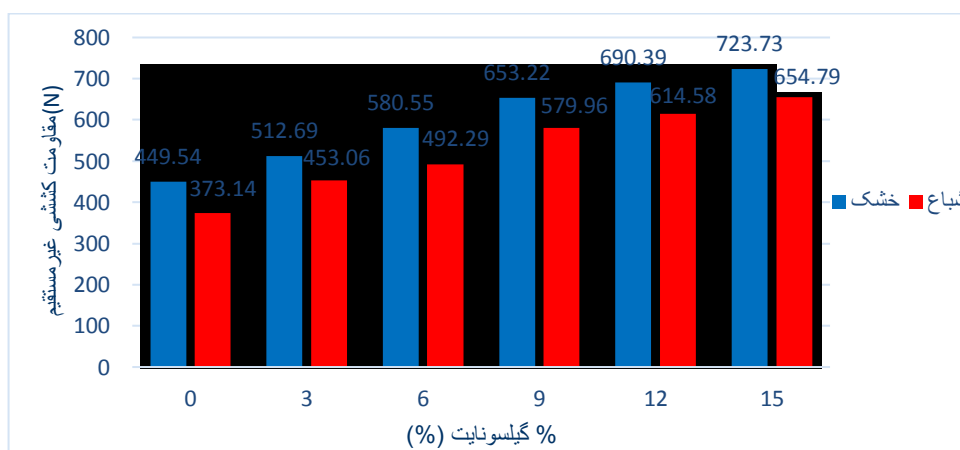
رطوبتی روی نمونه‌ها صورت گرفته است که در ادامه ارائه خواهد شد.

۳-۵. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم مخلوط

آسفالتی

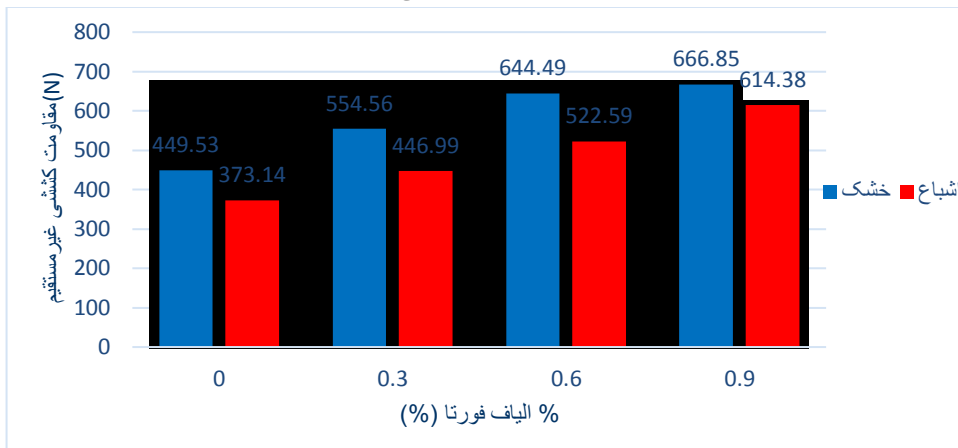
شکل ۸، نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گیلسونایت و شکل ۹ تغییرات حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف فورتا را نشان می‌دهند. همچنین، تأثیر مشترک این دو افزودنی بر حساسیت رطوبتی در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

به دلیل تأثیر بیشتر گیلسونایت بر خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی نسبت به الیاف فورتا، مشاهده می‌شود که در درصدهای مشترک این دو افزودنی، میزان روانی کاهش پیدا کرده است و بهترین درصد مشترک گیلسونایت و الیاف فورتا از میان نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق، به ترتیب ۱۵٪ و ۹٪ درصد بود، به طوری که باعث افزایش ۹۵ درصدی استحکام مارشال شده است. با توجه به آنکه استحکام مارشال معیار مناسبی برای تعیین خواص مقاومتی آسفالت نمی‌باشد، از این رو، آزمایش‌های خزش دینامیک، خستگی و حساسیت

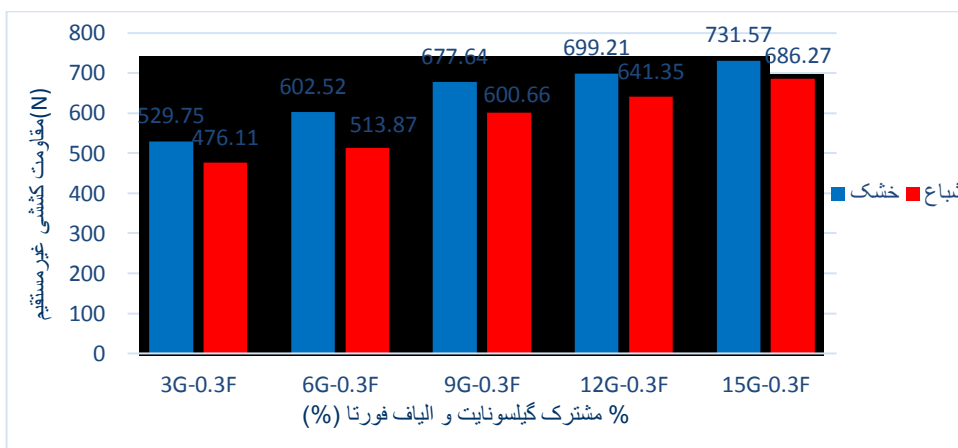


شکل ۸. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با درصدهای مختلف گیلسونایت

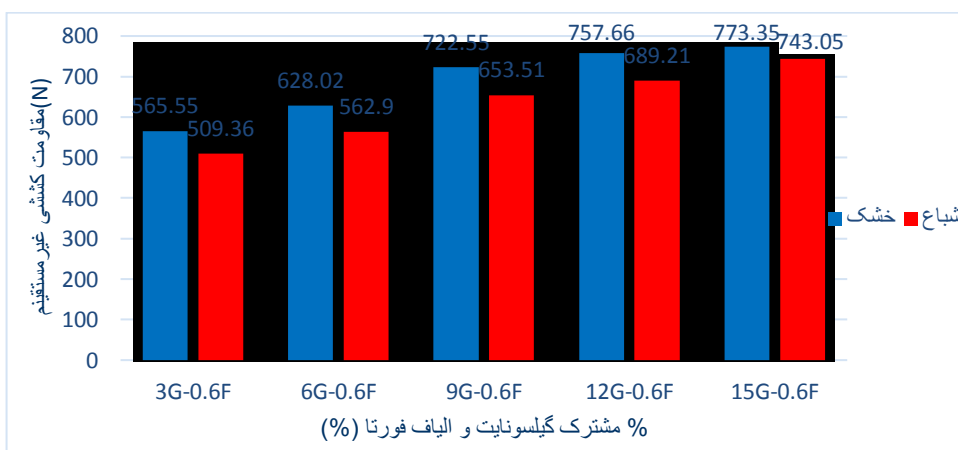
ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی گیلسونایت و الیاف فورتا و تعیین منافع اقتصادی استفاده از آنها در روسازی‌های آسفالتی



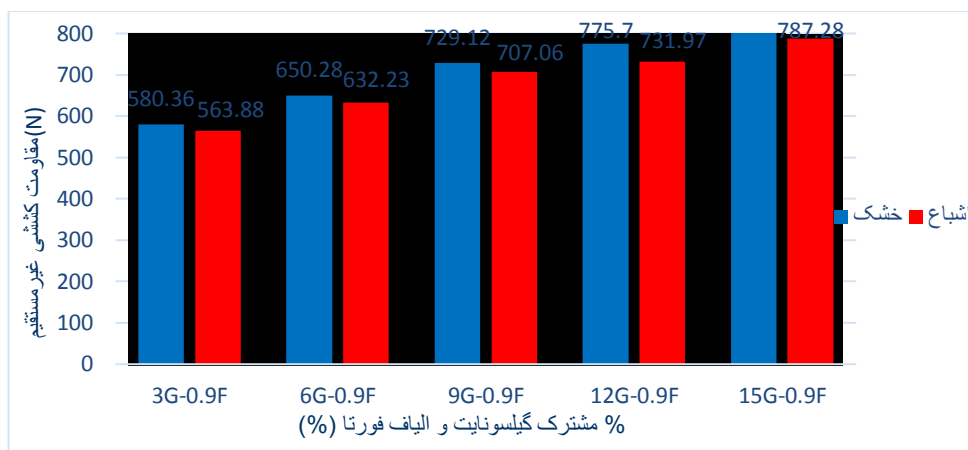
شکل ۹. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با درصدهای مختلف الیاف فورتا



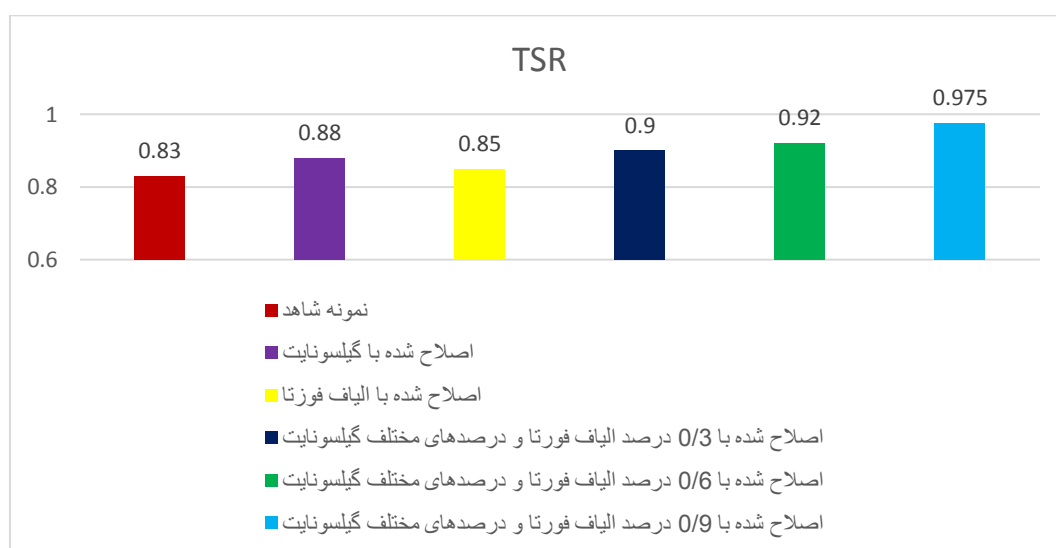
شکل ۱۰. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با ۰/۳ درصد الیاف و درصدهای مختلف گیلسونایت



شکل ۱۱. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با ۰/۶ درصد الیاف و درصدهای مختلف گیلسونایت



شکل ۱۲. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با ۰/۹ درصد الیاف و درصدهای مختلف گیلسونایت



شکل ۱۳. حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های مختلف آسفالتی

می‌توان به راحتی نتیجه گرفت که حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با افزایش گیلسونایت (افزایش مقدار TSR) کاهش می‌یابد.

مطابق شکل ۹، مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف فورتا با افزایش درصد این الیاف در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این امر به علت پخش سه‌بعدی الیاف داخل مخلوط آسفالتی و مقاومت کششی زیاد آن اتفاق می‌افتد (فضائی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کالینسکی و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، افزودن ۰/۹ درصد الیاف فورتا مقاومت کششی غیرمستقیم را در حالت خشک ۴۸/۳ درصد و در حالت اشباع ۶۴/۶ درصد نسبت به نمونه اصلاح نشده بهبود

شکل ۸ نشان می‌دهد که مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با افزایش درصد گیلسونایت افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اضافه کردن گیلسونایت باعث افزایش چسبندگی در مخلوط می‌شود و اجازه جابه‌جایی سریع قیر از روی سطوح سنگدانه به وسیله آب را نمی‌دهد و سبب می‌شود که مخلوط مقاومت بیشتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی داشته باشد (نسرکانی و همکاران، ۲۰۱۷؛ شارپ و همکاران، ۲۰۱۰). افزودن ۱۵٪ گیلسونایت به مخلوط آسفالتی، در مقایسه با نمونه شاهد، مقاومت کششی غیرمستقیم را در حالت خشک ۶۱٪ و در حالت اشباع ۷۵٪ افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده،

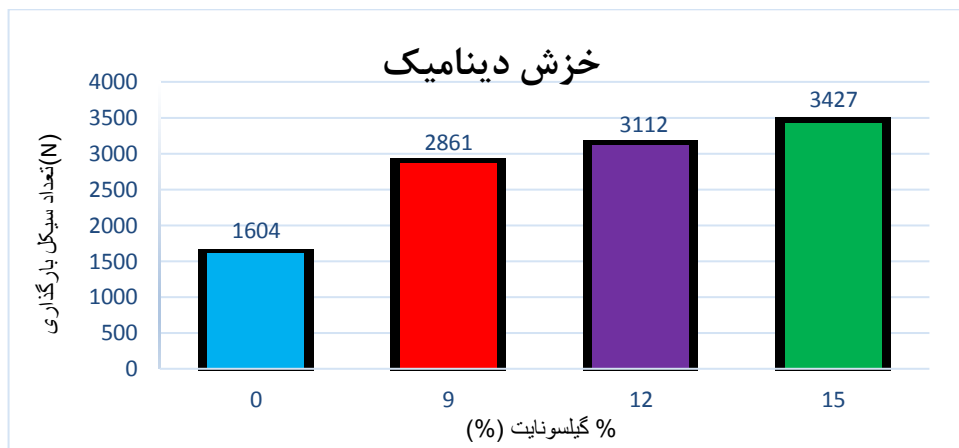
ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی گیلسونایت و الیاف فورتا و تعیین منافع اقتصادی استفاده از آنها در روسازی‌های آسفالتی

بهترین میزان مشترک گیلسونایت و الیاف فورتا در بهبود حساسیت رطوبتی نمونه‌ها در بین نمونه‌های ساخته شده، به ترتیب ۱۵٪ و ۹/۰ درصد است.

۴-۵. نتایج آزمایش خزش دینامیک

براساس نتایج آزمایش مارشال مشخص گردید که ۳٪ و ۶٪ گیلسونایت به همراه ۳/۰ درصد الیاف فورتا تأثیر معناداری بر استحکام مارشال و سایر ویژگی‌های فنی مخلوط‌های آسفالتی ندارد. لذا، در آزمایش‌های خزش دینامیک و خستگی از این درصدها استفاده نشده است. شکل ۱۴ عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی را با افزایش درصد گیلسونایت نشان می‌دهد.

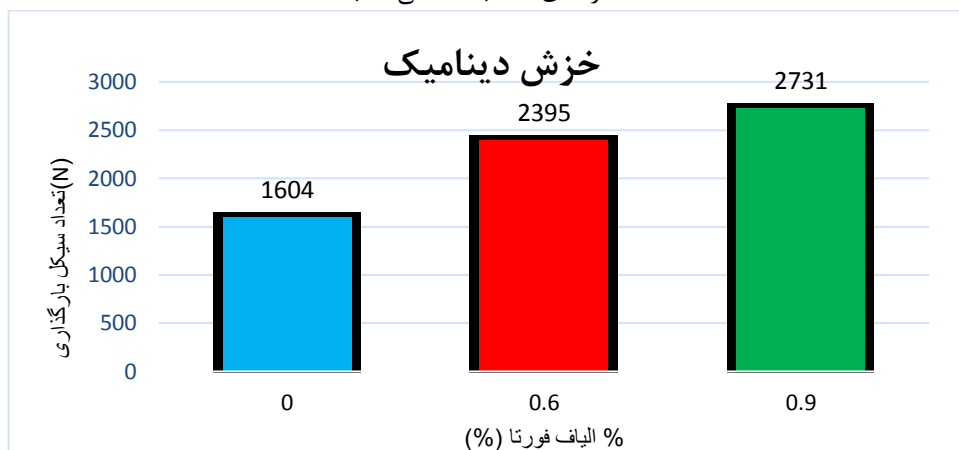
بخشیده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش الیاف فورتا موجب کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (افزایش مقدار TSR) (شکل ۱۳). اثر مشترک الیاف فورتا و گیلسونایت به عنوان یک اصلاح کننده کامپوزیت بر مقاومت کششی غیرمستقیم در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۱۳ حساسیت رطوبتی را در مخلوط‌های مختلف آسفالت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقدار گیلسونایت در نمونه‌ها باعث بهبود حساسیت رطوبتی در مخلوط آسفالتی می‌شود (ظاهرخانی و بیات، ۲۰۲۰). همچنین، اسفاده همزمان از این دو افزودنی به عنوان یک اصلاح کننده کامپوزیت به طور قابل توجهی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها را بهبود بخشیده است. همانطور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است،



کل ۱۴. خزش دینامیک مخلوط‌های آسفالتی با درصدهای مختلف گیلسونایت

این افزایش به دلیل سختی بیشتر قیر با افزایش درصد گیلسونایت است که باعث سخت شدن مخلوط و مقاومت بیشتر آن در برابر تغییرشکل‌های دائمی می‌شود (بیلماز و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳). شکل ۱۵ نیز تغییرات عدد روانی حاصل از آزمایش خزش دینامیک با افزایش درصد الیاف فورتا را نشان می‌دهد.

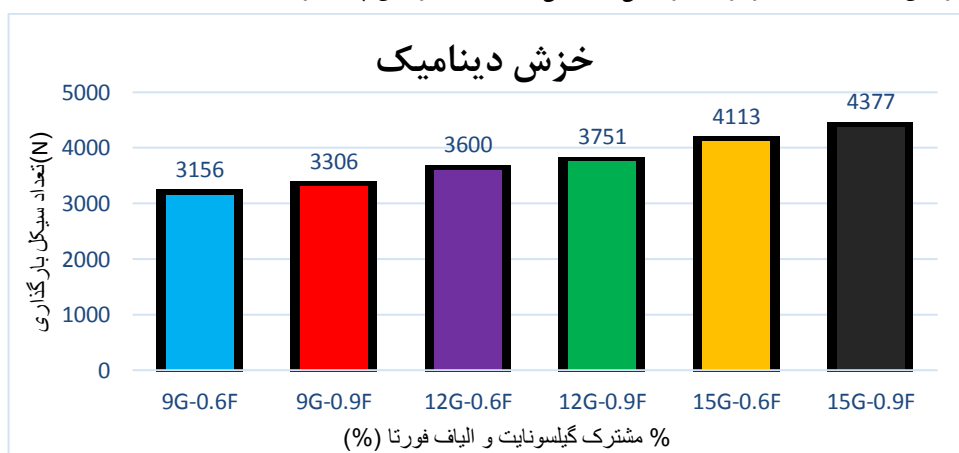
شکل ۱۴ نشان می‌دهد که مخلوط آسفالتی داغ اصلاح شده با گیلسونایت تعداد سیکل‌های بارگذاری بیشتری را در مقایسه با مخلوط آسفالتی داغ اصلاح نشده در یک سطح تنش یکسان تحمل می‌کند. به طوری که با افزودن ۱۵٪ گیلسونایت عدد روانی نمونه اصلاح شده نسبت به نمونه اصلاح نشده بیش از ۲/۱ برابر افزایش داشته است.



شکل ۱۵. خزش دینامیک مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف الیاف فورتا

بهبود مقاومت شیارشدگی است (زیاری و همکاران، ۲۰۱۶؛ رومن و گارسیا مورالس، ۲۰۱۷). شکل ۱۶ تأثیر مشترک گیلسونایت و الیاف فورتا به عنوان یک افزودنی کامپوزیت بر پدیده شیارشدگی را نمایش داده است. طبق این شکل، با افزایش ۱۵ درصدی گیلسونایت و ۰/۹ درصدی الیاف فورتا، مقاومت مخلوط آسفالتی داغ اصلاح شده در برابر تغییرشکل‌های دائمی در مقایسه با نمونه اصلاح نشده به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است.

در شکل ۱۵، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف فورتا، مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها افزایش یافته است و نمونه‌ها قادر به تحمل سیکل‌های بیشتری از بارگذاری شدند. همچنین، حساسیت مخلوط‌های آسفالتی به تغییرشکل دائمی با افزایش درصد الیاف کاهش پیدا کرده است. این بهبود مقاومت عمدتاً به علت افزایش سختی مخلوط به دلیل حل شدن پلی‌الین الیاف فورتا داخل قیر مخلوط است. همچنین، پخش سه‌بعدی مخلوط و افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل از علل



شکل ۱۶. خزش دینامیک مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف گیلسونایت و الیاف فورتا

بهبود عملکرد مخلوط‌های ساخته شده در آزمون کشش غیرمستقیم می‌شود. افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالت در برابر تنش‌های کششی ناشی از بار ترافیکی، در نهایت باعث افزایش عمر روسازی می‌شود. تغییر ۱۵ درصدی گیلسونایت باعث افزایش ۴/۷ برابری مقاومت خستگی

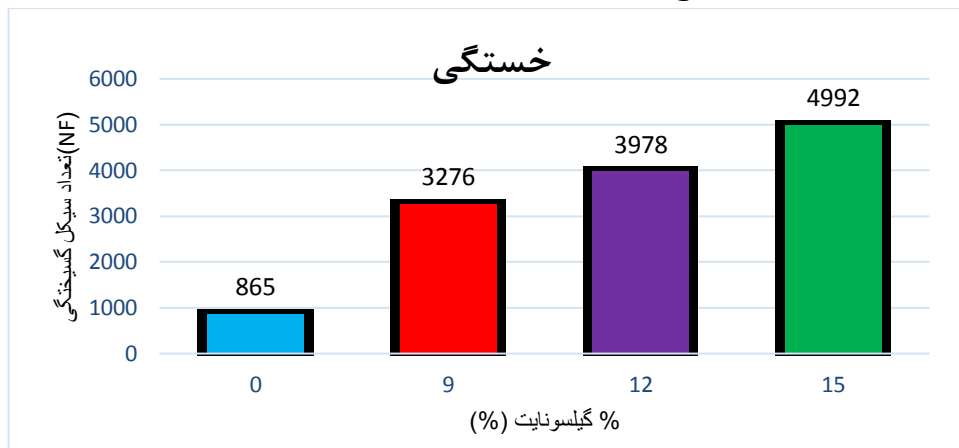
۵-۵. تحلیل نتایج آزمایش خستگی مخلوط آسفالتی

شکل ۱۷ روند تغییرات خستگی مخلوط‌های آسفالتی را با افزایش درصد گیلسونایت نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش درصد گیلسونایت باعث

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی گیلسونایت و الیاف فورتا و تعیین منافع اقتصادی استفاده از آنها در روسازی‌های آسفالتی

گیلسونایت به مخلوط آسفالتی، سختی مخلوط افزایش می‌یابد و طبق نتایج شکل ۱۷ با افزایش درصد گیلسونایت، مقاومت خستگی نیز افزایش می‌یابد (باباگلی و همکاران، ۲۰۱۵؛ جمشیدی و دیواندری، ۱۳۹۸).

نمونه‌های اصلاح شده نسبت به مخلوط اصلاح نشده شد (سو و ونگ، ۲۰۰۹؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۱ b؛ ییلماز و همکاران، ۲۰۱۳). همانطور که در نتایج آزمایش قیر نشان داده شد، افزودن گیلسونایت موجب سختی قیر می‌شود. بنابراین، با افزودن قیر اصلاح شده توسط

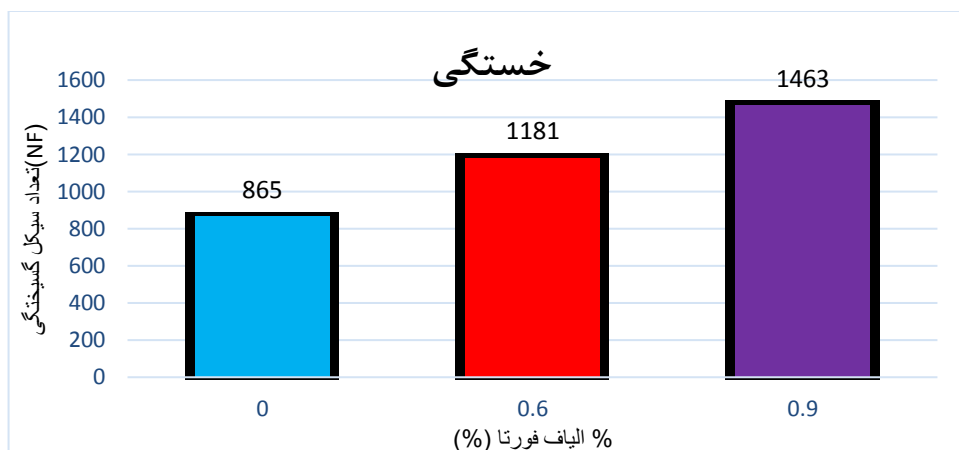


شکل ۱۷. خستگی مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف گیلسونایت

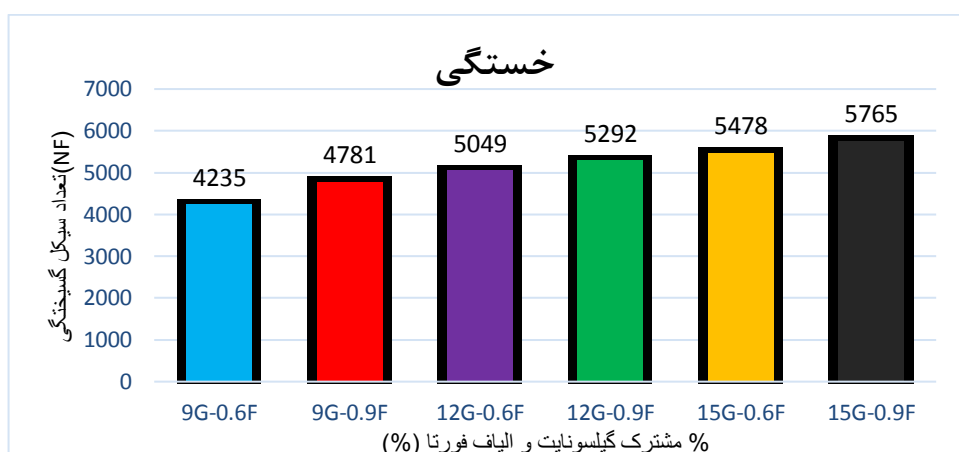
مقاومت نمونه‌ها در برابر ترک‌های خستگی شده‌اند. بهترین نتیجه در بین تمام نمونه‌های ساخته شده، با ۱۵٪ گیلسونایت و ۰/۹ درصد الیاف فورتا اتفاق افتاده است. به طوری که با افزودن این میزان، مقاومت خستگی ۶/۶ برابر نسبت به نمونه اصلاح نشده می‌شود. نتایج آزمایش‌های عملکردی مخلوط آسفالت نشان می‌دهد که ترکیب گیلسونایت و الیاف فورتا به عنوان یک اصلاح کننده کامپوزیت در مخلوط آسفالت که تا کنون مورد مطالعه قرار نگرفته است، تأثیر مثبتی بر عملکرد مخلوط آسفالتی دارد و استفاده همزمان از این دو ماده افزودنی به عنوان یک اصلاح کننده کامپوزیت، مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خستگی و شیارشدگی را به طور قابل توجهی افزایش داده است.

شکل ۱۸، تغییرات خستگی مخلوط‌های آسفالتی با افزایش درصد الیاف فورتا را نشان می‌دهد. طبق این شکل، با افزایش درصد الیاف فورتا، مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی افزایش می‌یابد. به طوری که با افزودن ۰/۹ درصد الیاف، مقدار مقاومت خستگی ۶۹/۱ درصد افزایش پیدا کرده است. افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تنش‌های کششی وارد شده بر آنها، در نهایت عمر روسازی را افزایش می‌دهد. الیاف فورتا با مسلح کردن مخلوط آسفالتی باعث استهلاک تنش‌ها در جهات مختلف شده و نسبت به لایه‌های آسفالتی معمولی، تمرکز تنش و خرابی خستگی کمتری تجربه می‌شود.

شکل ۱۹، تأثیر مشترک گیلسونایت و الیاف فورتا را نشان می‌دهد. الیاف فورتا از طریق افزایش شکل‌پذیری مخلوط آسفالتی داغ از یک سو و گیلسونایت با افزایش چسبندگی بیشتر از سوی دیگر باعث افزایش قابل توجه



شکل ۱۸. خستگی مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف الیاف فورتا



شکل ۱۹. خستگی مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف گیلسونایت و الیاف فورتا

گرچه استاندارد آشتو (AASHTO, 1993) ضریب a_1 را به 0.44 محدود می‌کند، با این حال، تیم و پریست (۲۰۰۶) برای مدول‌های برجهندگی زیاد مقدار 0.54 را برای a_1 در نظر گرفتند. با توجه به مقادیر زیاد استحکام مارشال در این تحقیق که موجب مدول‌های برجهندگی زیاد می‌شود، از روش تیم و پریست (۲۰۰۶) جهت تعیین ضریب لایه استفاده شد که در سایر مقالات نیز استفاده شده است (زارعی و همکاران، ۲۰۱۹؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۰؛ میربها و همکاران، ۲۰۱۷). بر همین اساس، جدول ۹ مقادیر این ضرایب را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد.

۵-۶. طراحی مخلوط آسفالت

برای طراحی مخلوط‌های آسفالتی از رابطه (۳) استفاده شده است (زارعی و همکاران، ۲۰۱۹؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۰). در این رابطه، مقدار SN_0 برای لایه‌های زیر قشر رویه آسفالتی $1/97$ فرض شده است و این فرض مطابق مطالعات قبل می‌باشد (زارعی و همکاران، ۲۰۱۹؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۰؛ میربها و همکاران، ۲۰۱۷). مقدار D_i از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$D_i = \frac{SN_0}{a_1} \quad (3)$$

که D_i ضخامت لایه، SN_0 عدد سازه‌ای و a_1 ضریب لایه است.

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی گیلسونایت و الیاف فورتا و تعیین منافع اقتصادی استفاده از آنها در
 روسازی‌های آسفالتی

جدول ۹. محاسبات ضخامت

گیلسونایت (%)	الیاف فورتا (%)	استحکام مارشال (Ib)	a ₁	D _i
۰	۰	۲۴۴۷	۰/۴۹	۴/۰۲۰
۳	۰	۲۸۶۱	۰/۵۲۶	۳/۷۴۵
۶	۰	۳۴۲۰	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۹	۰	۳۷۱۷	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۱۲	۰	۴۰۴۵	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۱۵	۰	۴۳۹۱	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۰	۰/۳	۲۵۰۳	۰/۵	۳/۹۴۰
۰	۰/۶	۲۶۶۳	۰/۵۱۷	۳/۸۱۰
۰	۰/۹	۳۲۰۰	۰/۵۳۲	۳/۷۰۳
۳	۰/۳	۲۵۷۱	۰/۵۰۶	۳/۸۹۳
۶	۰/۳	۳۲۷۶	۰/۵۳۶	۳/۶۷۵
۹	۰/۳	۳۴۳۴	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۱۲	۰/۳	۳۸۴۳	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۱۵	۰/۳	۴۱۶۰	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۳	۰/۶	۲۸۸۵	۰/۵۲۸	۳/۷۳۱
۶	۰/۶	۳۷۱۲	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۹	۰/۶	۳۸۷۲	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۱۲	۰/۶	۴۱۲۶	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۱۵	۰/۶	۴۴۴۱	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۳	۰/۹	۳۶۰۵	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۶	۰/۹	۳۷۹۳	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۹	۰/۹	۳۹۴۸	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۱۲	۰/۹	۴۲۶۱	۰/۵۴	۳/۶۴۸
۱۵	۰/۹	۴۷۸۴	۰/۵۴	۳/۶۴۸

۵-۷. آنالیز اقتصادی

مخصوص آسفالت تقریباً ۲/۳ تن بر متر مکعب در نظر گرفته شد و قیمت هر تن آسفالت، هزینه هر کیلو گیلسونایت و الیاف فورتا به ترتیب حدود ۶۰۰۰۰۰ تومان ، ۲۳۰۰۰ تومان و ۱۷۰۰۰۰ تومان در نظر گرفته شد. سود در هر کیلومتر: مقدار سود حاصل از افزودن این دو افزودنی از طریق معادله (۴) تعیین می‌شود:

در این بخش، هزینه‌ها و منفعت‌ها در نتیجه اضافه کردن افزودنی‌ها محاسبه شد (زارعی و همکاران، ۲۰۱۹؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۰؛ میربها و همکاران، ۲۰۱۷). به این ترتیب، ساخت یک مسیر ۶ خطه (۳ خط برای هر جهت) برای یک کیلومتر در نظر گرفته شد و هزینه‌های ساخت این فاصله محاسبه شد. لازم به ذکر است که وزن

$$Benefit = 1000 * 6 * 3.65 * \frac{D_i * 2.54}{100} \gamma * Asphalt(price) - 1000 * 6 * 3.65 * \frac{D_0 * 2.54}{100} * \gamma * Asphalt(price) \quad (4)$$

زاهدی، قطب، حسنی نسب

هزینه افزودنی‌ها در هر کیلومتر: هزینه یک کیلومتر شده است. جدول ۱۰ نشان می‌دهد که افزودنی آسفالت با توجه به روابط (۵) و (۶) تعیین می‌شود. در جدول ۱۰ نیز نتایج محاسبه سود و هزینه نمایش داده

$$Cost_{Gilsonite} = 1000 * 6 * 3.65 * \frac{D_i * 2.54}{100} * \gamma * 1000 * \frac{63}{1000} * Additive(\%) * Additive(price) \quad (5)$$

$$Cost_{FORTA} = 1000 * 6 * 3.65 * \frac{D_i * 2.54}{100} * \gamma * 1000 * Additive(\%) * Additive(price) \quad (6)$$

جدول ۱۰. نتایج محاسبات اقتصادی

هزینه / سود	هزینه - سود (تومان)	هزینه (تومان)	سود (تومان)	الیاف فورتا (%)	گیلسونایت (%)
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰/۱۳	۱۹۰۰۸۱۵۹۵/۹۳	۲۰۸۲۹۳۵۳/۴۶	۲۱۰۹۱۰۹۴۹/۳۸	۰	۳
۷/۰۳	۲۴۴۸۶۹۲۴۲/۹۷	۴۰۵۷۸۶۶۶/۳۷	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰	۶
۴/۶۹	۲۲۴۵۷۹۹۰۹/۷۸	۶۰۸۶۷۹۹۹/۵۵	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰	۹
۳/۵۲	۲۰۴۲۹۰۵۷۶/۶۰	۸۱۱۵۳۳۲/۷۳	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰	۱۲
۲/۸۱	۱۸۴۰۰۱۲۴۳/۴۲	۱۰۱۴۴۶۶۵/۹۲	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰	۱۵
۰/۰۲	-۲۵۰۹۴۱۱۳۳۷/۲۰	۲۵۷۰۸۲۲۳۴۱/۲۰	۶۱۴۱۱۱۰۴	۰/۳	۰
۰/۰۳	-۴۸۱۱۷۱۴۴۱۷/۰۴	۴۹۷۲۵۷۷۰۶۲/۲۸	۱۶۰۸۶۲۶۴۵/۲۵	۰/۶	۰
۰/۰۳	-۷۰۰۵۲۲۳۵۰۴/۸۳	۷۲۴۸۵۵۹۲۳۲/۷۱	۲۴۳۳۵۷۲۷/۸۸	۰/۹	۰
۰	-۹۹۹۲۷۶۹۶۱۲۶/۶۱	۱۰۰۰۳۴۹۷۰۸۲۹/۸۸	۹۷۲۷۴۷۰۳/۲۷	۰/۳	۳
۰	-۹۴۱۹۱۸۹۰۳۷۴/۴۴	۹۴۴۵۶۴۳۹۳۲/۰۶	۲۶۵۴۸۹۵۳/۶۱	۰/۳	۶
۰	-۹۳۴۹۱۶۰۳۴۲۳/۵۵	۹۳۷۷۰۵۱۳۳۲/۸۸	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۳	۹
۰	-۹۳۵۱۱۸۹۲۷۵۶/۷۳	۹۳۷۹۷۳۴۰۶۶۶/۰۷	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۳	۱۲
۰	-۹۳۵۳۲۱۸۲۰۸۹/۹۲	۹۳۸۱۷۶۲۹۹۹۹/۲۵	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۳	۱۵
۰	-۱۹۱۴۹۱۱۴۲۵۴۶/۵۷	۱۹۱۷۱۲۹۴۳۶۳۶/۲۱	۲۲۱۸۰۱۰۸۹/۶۴	۰/۶	۳
۰	-۱۸۷۱۸۷۴۹۷۴۲۳/۷۰	۱۸۷۴۷۲۹۴۵۳۳۳/۰۳	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۶	۶
۰	-۱۸۷۲۰۷۷۸۶۷۵۶/۸۸	۱۸۷۴۹۳۲۳۴۶۶۶/۲۲	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۶	۹
۰	-۱۸۷۲۲۸۰۷۶۰۹۰/۰۷	۱۸۷۵۱۳۵۲۳۹۹۹/۴۰	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۶	۱۲
۰	-۱۸۷۲۴۸۳۶۵۴۲۳/۲۵	۱۸۷۵۳۳۸۱۳۳۳۲/۵۸	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۶	۱۵
۰	-۲۸۰۸۸۳۳۹۱۴۲۳/۸۵	۲۸۱۱۶۸۳۹۳۳۳/۱۸	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۹	۳
۰	-۲۸۰۹۰۳۶۸۰۷۵۷/۰۳	۲۸۱۱۸۹۱۲۸۶۶۶/۳۷	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۹	۶
۰	-۲۸۰۹۲۳۹۷۰۰۹۰/۲۲	۲۸۱۲۰۹۴۱۷۹۹۹/۵۵	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۹	۹
۰	-۲۸۰۹۴۴۲۵۹۴۲۳/۴۰	۲۸۱۲۲۹۷۰۷۳۳۲/۷۳	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۹	۱۲
۰	-۲۸۰۹۶۴۵۴۸۷۵۶/۵۸	۲۸۱۲۴۹۹۹۶۶۶۵/۹۲	۲۸۵۴۴۷۹۰۹/۳۳	۰/۹	۱۵

۶. نتیجه گیری

مطالعه آزمایشگاهی انجام شده، تأثیر قابل توجه استفاده همزمان از دو افزودنی گیلسونایت و الیاف فورتا به عنوان یک افزودنی کامپوزیت را برای افزایش خواص روسازی آسفالت نشان می‌دهد. این مطالعه شامل عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر خالص ۶۰-۷۰ و

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی گیلسونایت و الیاف فورتا و تعیین منافع اقتصادی استفاده از آنها در

روسازی‌های آسفالتی

- با توجه به نتایج آزمایش مارشال، افزودن گیلسونایت و الیاف فورتا باعث افزایش استحکام مارشال نمونه‌های اصلاح شده در مقایسه با نمونه شاهد می‌شود.

- نتایج آزمایش حساسیت رطوبت نشان می‌دهد که افزودن گیلسونایت و الیاف فورتا به مخلوط‌های آسفالتی منجر به کاهش حساسیت رطوبت می‌شود. به گونه‌ای که شاخص TSR مخلوط ساخته شده با قیر خالص ۶۰/۷۰ از ۸۳٪ به ۸۵٪ (با افزودن الیاف فورتا) و تا ۸۸٪ (با افزودن گیلسونایت) و در نهایت به ۹۷٪ (اصلاح شده توسط ۰/۹ الیاف فورتا و درصد‌های متفاوتی از گیلسونایت) افزایش می‌یابد.

- در آزمایش خزش دینامیک، مخلوط آسفالتی اصلاح شده توسط گیلسونایت شرایط بهتری نسبت به الیاف فورتا برای مقاومت در برابر شیارشدگی نشان داد. اما بهترین نتیجه از ترکیب دو افزودنی گیلسونایت و الیاف فورتا به ترتیب ۱۵٪ و ۰/۹ درصد به دست آمده است.

- نتایج آزمایش خستگی نشان می‌دهد که استفاده از گیلسونایت و الیاف فورتا عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشد و مقاومت آنها را در برابر فشارهای کششی ناشی از بار ترافیکی افزایش می‌دهد و در نهایت عمر مفید روسازی‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد.

- از نظر اقتصادی، استفاده از این افزودنی با توجه به بررسی‌های فنی و اقتصادی توجیه اقتصادی و عملی دارد.

- پیشنهاد می‌شود که در آینده، مدل‌سازی دومتغیره برای دو افزودنی گیلسونایت و الیاف فورتا در درصد‌های مختلف مطالعه شود.

مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گیلسونایت (صفر، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد از وزن کل قیر) و الیاف فورتا (صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد از وزن کل سنگدانه) می‌باشد. در این مطالعه، آزمایش‌های قیر معمول مانند درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته و درجه اشتعال روی هر دو قیر اصلاح شده با گیلسونایت و قیر خالص ۶۰/۷۰ انجام شد. علاوه بر این، مخلوط‌های آسفالتی نیز تحت آزمایش‌های استحکام مارشال و روانی، مقاومت کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبت قرار گرفتند. همچنین، نمونه‌ها تحت آزمایش خزش دینامیک و خستگی توسط دستگاه UTM مورد آزمایش قرار گرفتند تا پتانسیل شیارشدگی و مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی مشخص شود.

نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- نتایج آزمایش‌های رئولوژیک قیر نشان می‌دهد که افزودن گیلسونایت باعث کاهش درجه نفوذ قیر می‌شود. این باعث بهبود رفتار الاستیک قیر می‌گردد که به نوبه خود باعث افزایش مقاومت روسازی‌های آسفالت در برابر تغییرشکل دائمی می‌شود.

- افزایش درصد گیلسونایت در قیر باعث افزایش نقطه نرمی قیر خالص می‌شود. این افزایش، در کنار کاهش درجه نفوذ، باعث بهبود شاخص حساسیت حرارتی قیر خالص ۶۰/۷۰ می‌شود.

- افزودن گیلسونایت به قیر باعث سفت شدن قیر و در نتیجه کاهش ویسکوزیته آن می‌شود.

۷. مراجع

- جمشیدی، س. ا. و دیواندری، ح. ۱۳۹۸. "ارزیابی تأثیر گیلسونایت بر بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۱۱(۱): ۱۶۲-۱۴۵.
- حسامی، س. و صبحی، س. ۱۳۹۶. "مروری بر قیر طبیعی و تأثیر آن بر روی خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی". فصلنامه جاده، ۲۵(۹۲): ۱۹-۳۲.
- کفاش‌زاده، س.، خسروی بیژانم، ز. ایمانی، م. و معافی، ح. ۱۳۹۷. "ارزیابی عملکرد مقاومت الیاف فورتا در مخلوط آسفالت گرم در برابر رویه‌های بتنی". فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری، ۱۰: ۵۱-۶۴.
- Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S. S. and Yadollahi, G. 2011a. "Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction". *Constr. Build. Mater.*, 25(3): 1379-1387.
- Ameri, M., Mansourian, A. and Ziari, H. 2011b. "Experimental investigation of the effect of Gilsonite on performance of hot-mix asphalt". *Transport. Res.*, 1(1), 1.
- Ameri, M., Mansourian, A. and Sheikhmotevali, A. H. 2012. "Investigating effects of ethylene vinyl acetate and Gilsonite modifiers upon performance of base bitumen using Superpave tests methodology". *Constr. Build. Mater.*, 36: 1001-1007.
- Arabani, M., Mirabdolazimi, S. M. and Sasani, A. R. 2010. "The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 24(6): 1060-1068.
- AASHTO. 1993. *Guide for design of pavement structures*. Washington, DC: AASHTO.
- ASTM. 2006. "Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine". C131-06.
- ASTM .D1559. 1998. "Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus" (Withdrawn 1998).
- ASTM. D4867/D4867M-09. 2014. "Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures".
- Babagoli, R., Hasaninia, M. and Mohammad Namazi, N. 2015. "Laboratory evaluation of the effect of Gilsonite on the performance of stone matrix asphalt mixtures". *Road Mater. Pavement Design*, 16(4): 889-906.
- Bardesi, A., Brule, B., Corte, J. F., Diani, E., Gerritsen, A., Lefevre, G. and Watkins, S. 1999. "Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in pavement applications". *Technical Committee Flexible Roads (C8), World Road Association (PIARC)*.
- BS DD 226. 1996. "Method for determining resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subject to unconfined dynamic loading". *British Standard (BSI), London, UK*.
- BS EN 12697-24. 2012. "Bituminous mixtures- Test methods for hot mix asphalt". Part 24: Resistance to fatigue.
- Code, I. H. A. P. 2011. No. 234.
- Fazaeli, H., Samin, Y., Pirnoun, A. and Dabiri, A. S. 2016. "Laboratory and field evaluation of the warm fiber reinforced high performance asphalt mixtures (case study Karaj-Chaloos Road)". *Constr. Build. Mater.*, 122: 273-283.
- Gopinath, P. and Kumar, C. N. 2020. "Performance evaluation of HMA mixes produced with Gilsonite modified bitumen for heavily trafficked roads". *Materials Today: Proceedings*.
- HasaniNasab, S., Arast, M. and Zahedi, M. 2019. "Investigating the healing capability of asphalt modified with nano-zycotherm and Forta fibers". *Case Stud. Constr. Mater.* 11: e00235.
- Jahanian, H. R., Shafabakhsh, Gh. and Divandari, H. 2017. "Performance evaluation of hot mix asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite". *Constr. Build. Mater.*, 131: 156-164.
- Jahromi, S. G. and Khodaii, A. 2008. "Carbon fiber reinforced asphalt concrete". *Arab. J. Sci. Eng.*, 33(2): 355-364.
- Kaloush, K. E., Biligiri, K. P., Zeiada, W. A., Rodezno, M. C. and Reed, J. X. 2010. "Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization tests". *J. Test. Eval.*, 38(4): 400-411.
- Klinsky, L. M. G., Kaloush, K. E., Faria, V. C. and Bardini, V. S. S. 2018. "Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 176: 747-752.
- Li, K., Vasiliu, M., McAlpin, C. R., Yang, Y., Dixon, D. A., Voorhees, K. J., ... and Herring, A. M. 2015. "Further insights into the structure and chemistry of the Gilsonite asphaltene from a combined theoretical and experimental approach". *Fuel*, 157: 16-20.

- Li, Z., Zhang, X., Fa, C., Zhang, Y., Xiong, J. and Chen, H. 2020. "Investigation on characteristics and properties of bagasse fibers: Performances of asphalt mixtures with bagasse fibers". *Constr. Build. Mater.*, 248: 118648.
- Mansourian, A., Razmi, A. and Razavi, M. 2016. "Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers". *Constr. Build. Mater.*, 117: 37-46.
- Mirabdolazimi, S. M. and Shafabakhsh, G. 2017. "Rutting depth prediction of hot mix asphalts modified with forta fiber using artificial neural networks and genetic programming technique". *Constr. Build. Mater.*, 148: 666-674.
- Mirbaha, B., Abdi, A., Zarei, M. and Zarei, A. 2017. "Experimental determination of the optimum percentage of asphalt mixtures reinforced with nano-carbon black and polyester fiber industries". *Eng. Solid Mech.*, 5(4): 285-292.
- Nasrekani, A. A., Nakhaei, M., Naderi, K., Fini, E. and Aflaki, S. 2017. "Improving moisture sensitivity of asphalt concrete using natural bitumen (Gilsonite)". *In: Proc. Transportation Research Board 96th Annual Meeting*, pp. 17-05663.
- Quintana, H. A. R., Noguera, J. A. H. and Bonells, C. F. U. 2016. "Behavior of Gilsonite-modified hot mix asphalt by wet and dry processes". *J. Mater. Civ. Eng.*, 282: 04015114.
- Roman, C. and Garcia-Morales, M. 2017. "Linear rheology of bituminous mastics modified with various polyolefins: A comparative study with their source binders". *Mater. Struct.*, 50(1): 1-12.
- Sharp, B., Berg, K., Fazio, M. and Stewart, R. 2010. "Gilsonite as an anti-stripping agent in hot mix asphalt". *Eng.*, ID: 107045902.
- Sobhi, S., Yousefi, A. and Behnood, A. 2020. "The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 238: 117676.
- Suo, Z. and Wong, W. G. 2009. "Analysis of fatigue crack growth behavior in asphalt concrete material in wearing course". *Constr. Build. Mater.*, 23(1): 462-468.
- Taherkhani, H. and Bayat, R. 2020. "Investigating the properties of asphalt concrete containing recycled brick powder as filler". *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1806932>
- Tanzadeh, J., Vafaeian, M. and Yusefzadeh-Fard, M. 2017. "Laboratory study on the performance of hybrid macro soil fiber reinforced mixture". *Constr. Build. Mater.*, 134: 50-55.
- Tapkın, S. 2008. "The effect of polypropylene fibers on asphalt performance". *Build. Environ.*, 43(6): 1065-1071.
- Timm, D. H. and Priest, A. L. 2006. "Material properties of the 2003 NCAT test track structural study". NCAT Report 06-01, Auburn University.
- WWW.forta-fi.com
- Wong, C. and Ho, M. K. 1990. "The effect of Gilsonite-modified asphalt on hot mix asphaltic concrete mixes used in District 12, Houston, Texas". No. DHT-22.
- Ye, Q., Wu, S. and Li, N. 2009. "Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures". *Int. J. Fatigue*, 31(10): 1598-1602.
- Yilmaz, M. and Çeloğlu, M. E. 2013. "Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 44: 533-540.
- Yilmaz, M., Kök, B. V. and Kuloğlu, N. 2012. "Investigation of mechanical properties of short-and long-term aged asphalted modified asphalt mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(5): 563-572.
- Yilmaz, M., Kök, B. V. and Kuloğlu, N. 2013. "Investigating the resistance of asphaltite containing hot mix asphalts against fatigue and permanent deformation by cyclic tests". *Can. J. Civ. Eng.*, 40(1): 27-34.
- Zarei, A., Zarei, M. and Janmohammadi, O. 2019. "Evaluation of the effect of lignin and glass fiber on the technical properties of asphalt mixtures". *Arab. J. Sci. Eng.*, 44(5): 4085-4094.
- Zarei, M., Rahmani, Z., Zahedi, M. and Nasrollahi, M. 2020. "Technical, economic, and environmental investigation of the effects of rubber powder additive on asphalt mixtures". *J. Transport. Eng., Part B: Pavements*, 146(1): 04019039.
- Ziari, H., Akbari, T., Farahani, H. and Goli, A. 2016. "The effect of Lucobit polymer on bitumen performance". *Petrol. Sci. Tech.*, 34(6): 512-516.

Research paper