ارزیابی مقاومت رطوبتی و شیارشدگی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم اصلاح شده با افزودنی معدنی

مقاله علمی - پژوهشی

سعید صبحی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران
سعید حسامی*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s.hesami@nit.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵
صفحه ۲۸۰-۲۶۳

چکیده

اهمیت حفظ محیط‌زیست در راستای احداث روسازی موجب شده که در سال‌های اخیر تکنولوژی آسفالت نیمه گرم به عنوان یک روش نو همواره در جهت کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و همچنین کاهش هزینه تولید آسفالت به عنوان یک تکنولوژی دوستدار طبیعت شناخته شده و مورد استفاده قرار گیرد. این تکنولوژی در مقابل مزیت کاهش دمای تولید و تراکم و سایر مزایا، دارای نقطه ضعف خرابی رطوبتی و عریان شدگی است. استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی یکی از روش‌های بهبود مقاومت رطوبتی این نوع مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. این پژوهش با هدف استفاده از درصدهای مختلف گیلسونایت به عنوان اصلاح کننده در مخلوط آسفالتی نیمه گرم (WMA) و بررسی تأثیر آن بر روی خصوصیات عملکردی بخصوص حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه گرم انجام شده است. به‌منظور بررسی تأثیر گیلسونایت در کاهش حساسیت رطوبتی از آزمایش اصلاح شده لاتمن استفاده شد و همچنین آزمایش مدول برجهندگی و آزمایش خزش دینامیکی جهت بررسی خصوصیات عملکردی مورد استفاده قرارگرفته‌اند که نتایج نشان داد گیلسونایت به علت ترکیبات معدنی در خود، افزایش چسبندگی پیوند قیر و سنگدانه را به دنبال دارد و دارای خصوصیات یک ماده ضدعریان شدگی بوده و پتانسیل افزایش عمر آسفالت نیمه گرم در برابر خرابی رطوبتی مناطق مرطوب را دارا می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش خزش دینامیکی حاکی از آن بود که گیلسونایت مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی را به میزان قابل توجهی افزایش داده و افزودنی مناسبی برای جلوگیری از شیارشدگی مخلوط آسفالتی در مناطق گرمسیر (جنوب کشور) می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: گیلسونایت، ساسوبیت، حساسیت رطوبتی، شیارشدگی

۱- مقدمه

امروزه مسائل زیست‌محیطی مربوط به کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مدیریت زباله‌ها به‌طور فزاینده‌ای در سراسر جهان مورد توجه قرار می‌گیرد (Nassar 2016). مخلوط‌های آسفالتی گرم در دمایی بین ۱۴۰ الی ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شوند و میزان سوخت مصرفی در چنین شرایطی به علت حرارت دادن سنگدانه ها نسبتاً زیاد بوده و در نتیجه، هزینه مصرف انرژی و میزان تولید گازهای گلخانه‌ای بالا می‌باشد. بر اساس مطالعات حدود ۶/۷ تا ۷/۹ لیتر سوخت برای تولید ۱ تن مخلوط آسفالتی گرم مصرف می‌شود و این تنها ۱۵ درصد هزینه کل تولید این نوع مخلوط

آسفالتی را شامل می‌شود. (Chehovits and Galehouse 2010, Sullivan and Moss 2014). مسائل مربوط به سلامت و ایمنی مهندسین راه‌سازی به علت استفاده از درجه حرارت بالا و همچنین قرار گرفتن در معرض دود و گرد و غبار در طول فرآیند تولید، ابعاد دیگری از معایب استفاده از این نوع مخلوط آسفالتی می‌باشد (Hurley and Prowell 2005). از این رو، تکنولوژی آسفالت نیمه گرم، با رویکرد کاهش مصرف انرژی و حفظ بهتر محیط‌زیست به عنوان تکنولوژی دوستدار محیط‌زیست معرفی شده است. در بیشتر کشورها هزینه‌های انرژی بسیار بالا می‌باشد بنابراین کاهش انرژی و سوخت مصرفی ناشی از دمای پایین تولید موجب کاهش هزینه‌های تولید می‌گردد. این کاهش هزینه در مقایسه با هزینه ناشی از افزودنی‌های مورد استفاده در تکنولوژی آسفالت نیمه گرم رقم قابل ملاحظه‌ای داشته و می‌تواند هزینه مازاد استفاده از افزودنی‌ها را جبران کند. در واقع از مهم‌ترین مزایای استفاده از مخلوط آسفالتی نیمه گرم صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌باشد. در صورت استفاده از تکنولوژی نیمه گرم در تولید آسفالت، می‌توان ۳۵-۲۰ درصد صرفه‌جویی در انرژی داشت(Mansourian and Jarahi 2010). امروزه گرایش صنعت روسازی به استفاده این تکنولوژی بیشتر شده و به دنبال آن، طیف وسیعی از روش‌های تولید آسفالت نیمه گرم در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این فناوری عموماً با سه روش، افزودنی‌های شیمیایی (اووترم و ردیست)، افزودنی‌های آلی (ساسوبیت و واکس مونتان) و افزودنی‌های کف قیری تولید و مورد بهره برداری قرار می‌گیرند که ساز و کار هر کدام از این روش‌های در تولید مخلوط آسفالتی نیمه گرم متفاوت می‌باشد(Kakar, Hamzah, and Valentin 2015). در میان افزودنی‌های نیمه گرم استفاده از ساسوبیت بیشتر متداول بوده که با کاهش ویسکوزیته قیر کاهش دمای تراکم و ساخت روسازی را به دنبال دارد. حساسیت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت از دغدغه‌های اصلی این تکنولوژی است. این پدیده در اثر از بین رفتن پیوند قیر و مصالح سنگی و یا خرابی در ساختار قیر پدید می‌آید. با نفوذ رطوبت به درون لایه روسازی پیوند قیر و سنگدانه از بین رفته و طی بارگذاری‌ها پی‌درپی، ساختار آسفالت دچار گسیختگی شده و به‌صورت خرابی‌هایی نظیر شیارشدگی و شن زدگی بروز می‌کند (Khodaii, Haghshenas, and Tehrani 2012).

علت اصلی این پدیده کاهش دمای اختلاط و تراکم می‌باشد به‌طوری‌که کاهش دما موجب می‌شود آب موجود در سنگدانه به‌خوبی تبخیر نشده و رطوبت باقی مانده مانع اندود کافی مصالح با قیر می‌شود. البته شیارشدگی زودهنگام در این مخلوط آسفالتی می‌تواند به علت کاهش پیرشدگی در دمای پایین تولید مخلوط آسفالتی باشد(Goh, You, and Van Dam 2007). تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با تأثیر ساسوبیت بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی انجام شده است که نشان می‌دهد این ماده افزودنی متناسب با نوع سنگدانه و مقدار مصرف افزودنی عملکرد متفاوتی از خود نشان می‌دهد (Sobhi et al. 2018). محققان برای بررسی بهتر تأثیر ساسوبیت بر مقاومت رطوبتی از انرژی آزاد سطحی استفاده نمودند و نتایج نشان داد که اضافه کردن این افزودنی موجب افزایش اجزای اسیدی در قیر و کاهش انرژی آزاد سطحی اجزای قیر و سنگدانه شده و در نتیجه کاهش چسبندگی پیوند بین قیر و سنگدانه را به دنبال دارد(Hesami et al. 2013, Arabani, Roshani, and Hamedi 2012). نتایج تحقیقات بنرت و همکاران نشان داد که در اثر کاهش دمای اختلاط توسط افزودنی نیمه گرم حساسیت رطوبتی افزایش یافته و همچنین مقدار مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی کاهش می‌یابد (Bennert, Maher, and Sauber 2011). ژائو و همکاران در تحقیقی تأثیر انواع افزودنی نیمه گرم در دماهای مختلف اختلاط را بر روی شیارشدگی مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد افزودنی‌های آلی به علت افزایش سختی قیر موجب کاهش شیارشدگی شده ولی افزودنی‌های نیمه گرم شیمیایی تأثیر مثبتی بر روی شیارشدگی ندارد (Zhao et al. 2012). گیلسونایت (قیر طبیعی) به‌عنوان یک ماده معدنی به علت وجود آسفالتن قابل ملاحظه و همچنین اجزای مختلف شیمیایی اثر قابل‌توجهی بر روی خصوصیات رطوبتی مخلوط آسفالتی دارد. این ماده با ارزش عمدتاً به‌عنوان سفت کننده قیر شناخته شده و باعث افزایش مقاومت روسازی در برابر بارهای ترافیکی شدید می‌شود که کاربرد بسیار مناسبی برای مناطق گرمسیر (جنوب کشور) دارد. از طرفی سفتی بیش از اندازه قیر توسط گیلسونایت، پتانسیل ترک خوردگی ناشی از خستگی و ترک خوردگی حرارتی را در مناطقی که این دو نوع خرابی رایج است افزایش داده که نیازمند مطالعات بیشتری در این رابطه می‌باشد و در حیطه مطالعه این پژوهش نبوده است.

مطابق مطالب بیان شده بحث حساسیت رطوبتی یکی از نگرانی‌ها و چالش‌های اصلی این تکنولوژی است. استفاده از مواد ضد عریان شدگی یکی از راه‌حل‌های این مشکل در روسازی‌های نیمه گرم می‌باشد که قیمت بالای این مواد افزودنی و همچنین مشکلات زیست‌محیطی مشکلات دیگری برای استفاده از تکنولوژی آسفالت نیمه گرم است. گیلسونایت به‌عنوان یک افزودنی معدنی برگرفته از طبیعت بوده و برخلاف بیشتر افزودنی‌ها آثار زیست‌محیطی نداشته و دارای معادن فراوانی در کشور است. گیلسونایت در مقایسه با سایر افزودنی‌ها قیمت پایین‌تری دارد که استفاده از آن در پروژه‌های راه‌سازی موجب صرفه‌جویی و کاهش چشمگیر هزینه‌ها در احداث روسازی می‌شود. ولی متأسفانه این ماده در ساخت روسازی کشور به‌صورت میدانی کمتر استفاده شده و خصوصیات ضد عریان شدگی این ماده با ارزش در صنعت راه‌سازی کمتر مورد توجه و بررسی قرارگرفته است که هدف این پژوهش بررسی تأثیر این ماده ارزشمند در افزایش مقاومت رطوبتی و خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی نیمه گرم می‌باشد.

۲-مصالح مصرفی

۲-۱-مصالح سنگی و قیر مصرفی

در این پژوهش از مصالح سنگی موجود در معادن و کارخانه آسفالت حوالی شهر هشتچین که از نوع سنگدانه های سیلیسی می‌باشد استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی از دانه بندی شماره ٤ آیین نامه روسازی ایران (حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها در این دانه‌بندی ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد) که برای ساخت لایه‌های آستر و رویه پیشنهاد شده، طبق جدول ۱ استفاده شده است. خواص سنگدانه نیز در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. دانه بندی مصالح سنگی

اندازه الک	۱۹ میلی‌متر	۱۲/۵ میلی‌متر	شماره ٤	شماره ۸	شماره ۵۰	شماره ۲۰۰
محدوده درصد عبوری مجاز	۱۰۰	۹۰–۱۰۰	٤٤–۷٤	۲۸–۵۸	۵–۲۱	۲–۱۰
درصد وزنی عبوری از الک	۱۰۰	۹۵	۵۹	٤۳/۵	۱۱/۵	٦

جدول ۲. خواص مصالح سنگی استفاده شده

شرح	سایش به روش لس آنجلس (درصد)	درصد شکستگی	افت ناشی از سولفات سدیم (درصد)	ارزش ماسه ای (درصد)	وزن مخصوص واقعی (gr/cm^3)
استاندارد آزمایش	ASTM C131	ASTM D 5821	ASTM C88	ASTM D2419	ASTM C127
نتایج آزمایش	۲۵	۹۰	۸	۷۵	۲/۵۸

قیر خالص ۷۰–٦۰ به عنوان قیر مصرفی با مشخصات جدول ۳ برای تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی نیمه گرم مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های آسفالتی نیمه گرم اصلاح شده با گیلسونایت، ابتدا قیر خالص با مقدار ۰٪، ۵٪، ۹٪ پودر گیلسونایت ترکیب شده و بعد قیر اصلاح‌شده با ۳ درصد افزودنی نیمه گرم ساسوبیت ترکیب می‌شود.

جدول ۳. مشخصات قیر ۶۰/۷۰

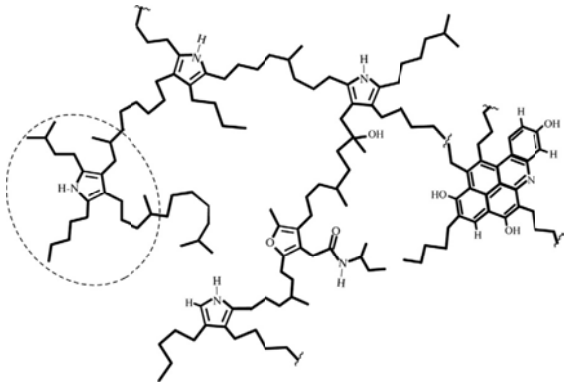
نوع آزمایش	روش استاندارد	نتیجه آزمایش
درجه نفوذ در دمای ۲۵ سانتیگراد	ASTM D5	٦۲
نقطه نرمی	ASTM D36	۵۰/۸
شکل‌پذیری در دمای ۲۵ سانتیگراد	ASTM D113	۱۳۰<
درجه اشتعال	ASTM D92	۲۹۹
چگالی	ASTM D70	۱/۰۱۷
افت حرارتی	ASTM D6	۰/۰۰۲

۲-۲- افزودنی نیمه گرم

در این پژوهش به‌منظور ساخت مخلوط آسفالتی نیمه گرم از افزودنی آلی ساسوبیت استفاده شده است. ساسوبیت به‌عنوان افزودنی نیمه گرم دارای زنجیره طولانی هیدروکربن آلفاتیک (۴۰-۱۱۵ اتم کربن) می‌باشد که از تبدیل ذغال سنگ به گاز طی فرآیند عمل آوری کک از طریق دمیدن بخار به روش فیسچر- تراپسچ حاصل می‌گردد (Button, Estakhri, and Wimsatt 2007). دمای نقطه ذوب ساسوبیت در حدود ۷۰-۱۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و در دمای بالاتر از نقطه ذوب با کاهش ویسکوزیته، دمای تراکم و اختلاط را حدود ٥٤ -۱۸ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد. همچنین در دماهای زیر نقطه ذوب ساسوبیت، این ماده ساختار شبکه بلوری در قیر پدید آورده و موجب پایداری بیشتر و افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود (Edwards and Isacsson 2005). بر اساس گزارش‌های آزمایشگاهی محققان قبلی در این تحقیق مقدار ۳ درصد این افزودنی مورد استفاده قرار گرفت (Li, Zhou, and You 2016).

۲-۳- گیلسونایت

گیلسونایت به عنوان یک ماده معدنی برگرفته از طبیعت شناخته شده و امروز به‌طور گسترده به عنوان اصلاح کننده قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده به‌صورت جامد و مایع در محیط دیده می‌شود که گیلسونایت جامد با بیشترین درصد آسفالتن شناخته می‌شود (Corp. 2014). گیلسونایت ماده‌ای جامد شبیه قیر پالایشگاهی می‌باشد که به اسم های مختلف قیر طبیعی، آسفالتن ، قیر سنگی شناخته می‌شود (Huang, Li, and Shu 2006) این ماده معدنی مطابق شکل ۱ ساختار شیمیایی پیچیده‌ای از ترکیبات آلی دارد و دارای سطحی درخشان و شبیه مواد معدنی شیشه‌ای بوده و در طبقه‌بندی اصلاح‌کننده‌ها متعلق به دسته هیدروکربن‌ها قرار می‌گیرد. در این پژوهش گیلسونایت از معادن گیلان غرب تهیه شده و مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ٤ ارایه شده است.



شکل۱. ساختار شیمیایی گیلسونایت (Helms et al. 2012)

جدول ٤. مشخصات فیزیکی و شیمیایی گیلسونایت

نوع آزمایش	روش استاندارد	نتیجه آزمایش
خاکستر، درصد وزنی	ASTM D3174	٦-۱۰
رطوبت، درصد وزنی	ASTM D3173	<۳
کربن ثابت، درصد وزنی	ASTM D3172	۲۷-۳۵
حلالیت در CS_2، درصد وزنی	ASTM D4	۸۲
وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	ASTM D3279	۱/۱۱

۳- ساخت نمونه‌های آسفالتی

مطابق مطالب بیان شده در این تحقیق دانه بندی مصالح بر اساس حد وسط منحنی دانه‌بندی شماره ٤ آیین نامه روسازی ایران انتخاب شد و بر اساس آیین نامه نشریه ۱۰۱ ویسکوزیته قیر اصلاح شده در زمان اختلاط و تراکم در محدوده مجاز آیین نامه قرار گرفت و درصد قیر بهینه بر اساس طرح اختلاط مارشال مقدار ۵/۸ درصد بدست آمد. بعد از تعیین قیر بهینه به‌منظور یکنواختی و دقت ساخت نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌های عملکردی از دستگاه متراکم‌کننده ژیراتوری استفاده شد. در این روش، تراکم از طریق اعمال نیروی استاتیکی و نیروهای برشی به‌طور هم‌زمان با چرخش قالب در حول محور طولی حاصل می‌شود. نمونه‌های مخلوط آسفالتی

توسط دستگاه تحت تنش ثابت ۶۰۰ کیلو پاسکال قرار می‌گیرند و چکش بارگذاری با زاویه ۱/۲۵ و سرعت دوران ۳۰ دور بر دقیقه نمونه را به حالت ورز دادن متراکم می‌کند. در حین تراکم مقادیر خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی مانند وزن مخصوص واقعی، ارتفاع نمونه، درصد فضای خالی مشخص می‌گردد. با توجه به اینکه برای آزمایش‌های این پژوهش درصد فضای خالی یکی از پارامترهای اصلی می‌باشد، شرط اتمام تراکم رسیدن به وزن مخصوص مدنظر قرار داده شد.

٤- روش آزمایش

بعد از تعیین قیر بهینه و ساخت نمونه‌ها به‌منظور بررسی تأثیر افزودن گیلسونایت بر روی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی شامل مقاومت رطوبتی از آزمایش مربوط به حساسیت رطوبتی (لاتمن اصلاح شده) همچنین مقاومت در برابر شیارشدگی از آزمایش خزش دینامیکی در این پژوهش استفاده شده است. همچنین جهت بررسی و شناسایی گروه‌های عاملی در قیر و تغییرات ترکیبات شیمیایی به وجود آمده در قیر اصلاح شده بر اثر افزودن ساسوبیت و گیلسونایت، آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز انجام شده است.

٤-١- آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR)

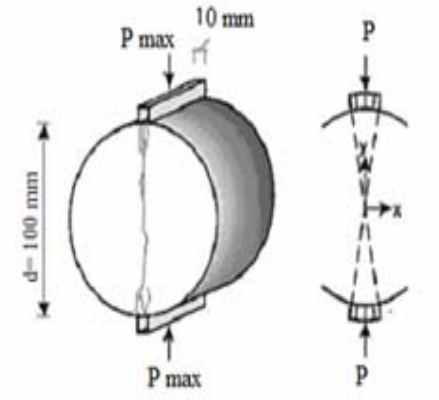
دستگاه سری فوریه مادون قرمز یک ابزار قوی جهت شناسایی عامل‌های شیمیایی موجود در قیر و تعیین ساختار اجزا آن‌ها می‌باشد. طیف مادون قرمز معمولاً از نمونه‌هایی به شکل فیلم که ضخامتی بسیار نازک دارند بدست می آیند. برای نمونه‌هایی که لایه فیلم ضخیم دارند و یا به‌صورت گرانول می‌باشند، می‌توان به دو روش نمونه را به ضخامت مورد نیاز آزمایش رساند که در روش اول نمونه‌ها تا دمای نرم شدگی حرارت داده شده و پرس می‌شوند تا به ضخامت مورد نیاز جهت انجام آزمایش برسند و در روش دوم نمونه‌ها در حلال مناسب حل شده و با قرار دادن بر روی قرص پتاسیم برومایدو تبخیر حلال، فیلم نازک نمونه به دست می‌آید. در این مطالعه آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز توسط دستگاه AVATAR FTIRبه‌منظور شناسایی گروه‌های عاملی (آلفاتیک، کربونیل، سولفوکسید و ...) موجود در قیر پایه و اصلاح شده و همچنین تغییرات ترکیبات شیمیایی قیرهای اصلاح شده در طول موج ٤٠٠cm^{-1} تا ٤٠٠٠ cm^{-1} انجام می‌شود.

٤- ٢- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

یکی از ویژگی‌های مهم مخلوط آسفالتی مقاومت در برابر بارهای کششی و در نتیجه ترک خوردگی می‌باشد. اگرچه ترک خوردگی در روسازی آسفالتی به مرور زمان اتفاق می‌افتد، می‌تواند موجب تنش‌های کششی شود. مقاومت کششی مخلوط آسفالتی از طریق آزمایش کشش غیر مستقیم طبق استاندارد ASTM D6931 بدست می‌آید. در این آزمایش نمونه استوانه‌ای مطابق شکل ۲ به‌صورت قطری تحت بار فشاری وارد بر سطح جانبی قرار می‌گیرد که موجب تشکیل تنش کششی نسبتاً یکنواختی در امتداد قطر نمونه و شکسته شدن آن در این امتداد می‌شود (Tangella et al. 1990). تنش کششی ایجاد شده در مرکز نمونه مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$S_t = \frac{2000P}{\pi tD} \qquad (۲)$$

در این رابطه St برابر حداکثر مقاومت کششی نمونه برحسب کیلو پاسکال ،P برابر بیشترین بار که نمونه تحمل می‌کند برحسب کیلو نیوتن، t برابر ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر و D برابر با قطر نمونه برحسب میلی‌متر است.



شکل۲. شکل شماتیک بارگذاری آزمایش کشش غیر مستقیم

از آزمایش کشش غیر مستقیم نیز جهت اندازه‌گیری مقاومت مخلوط آسفالتی دربرابر عریان شدگی طبق شرایط لاتمن اصلاح‌شده مطابق استاندارد AASHTO T283 انجام می‌شود. برای انجام این آزمایش لازم است که نمونه‌ها دارای فضای خالی ٦ تا ٨ درصد به جهت نفوذ آب داخل مخلوط آسفالتی داشته باشند. در این آزمایش نمونه‌های آسفالتی ساخته شده به دو گروه خشک و تحت شرایط اشباع تقسیم می‌شوند.

قبل از آزمایش نمونه‌ها باید به درصد اشباع ۷۰ تا ۸۰ درصد برسند. برای اعمال سیکل ذوب و یخ نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت درون فریزر با دمای $-18^{\circ}C$ قرار می‌گیرند و سپس به مدت ۲۴ ساعت درون حمام آب با دمای ۶۰ سانتی گراد قرار داده می‌شود. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها در آب ۲۵ سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار می‌گیرند و پس از ۲ ساعت، به‌طور قائم بین دو فک دستگاه آزمایش کشش غیرمستقیم با نرخ ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار می‌گیرد و بیشترین باری که نمونه تحمل می‌کند ثبت می‌شود. بعد از مشخص شدن بار ماکزیمم با استفاده از رابطه (۲) مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی که شاخصی از حساسیت رطوبتی می‌باشد طبق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} * 100 \qquad (۳)$$

در این رابطه TSR نسبت مقاومت کششی برحسب درصد، S_1 مقاومت کششی نمونه عمل‌آوری شده برحسب کیلو پاسکال و S_2 مقاومت کششی نمونه خشک برحسب کیلو پاسکال است.

۴-۳- آزمایش مدول برجهندگی

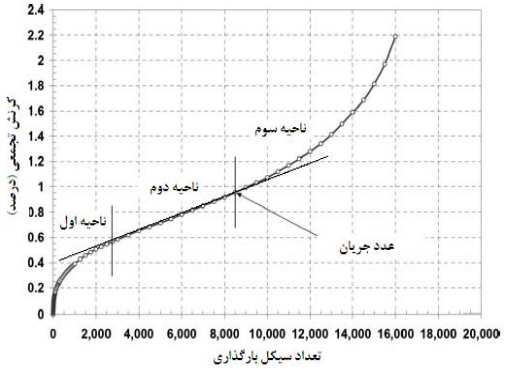
مدول برجهندگی یکی از خواص مهم مواد بوده و معیاری برای پیش‌بینی عکس‌العمل مواد در برابر بارگذاری متحرک و تکراری می‌باشد. این معیار توسط آزمایش بارگذاری تکراری تعیین شده و به‌عنوان داده ورودی طرح روسازی در ارزیابی کیفیت نسبی مخلوط آسفالتی و همچنین تحلیل روسازی به کار می‌رود (Shalaby, Liske, and Kavussi 2004). این آزمایش طبق استاندارد ASTM D4123 با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم به دست می‌آید. در این تحقیق برای تعیین مدول برجهندگی از دستگاه یو تی ام (UTM) مطابق استاندارد یاد شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با بارگذاری نیم سینوسی استفاده شده است. مقدار مدول برجهندگی با اعمال بار به اندازه P با فرکانس یک هرتز و دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه به نمونه‌ها وارد می‌شود و مقدار آن از رابطه (٤) به دست می‌آید:

$$M_R = \frac{P(\nu+0.2734)}{tH} \qquad (٤)$$

در این رابطه نیز M_R برابر است با مدول برجهندگی برحسب مگا پاسکال، P برابر با حداکثر بار دینامیکی برحسب نیوتن، ν برابر یا ضریب پواسون (۰/۳۵)، t برابر با میانگین ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر و H برابر با میانگین تغییر شکل افقی برگشت‌پذیر برحسب میلی‌متر است.

٤-٤- آزمایش خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی به‌منظور مطالعه و مقایسه عملکرد انواع مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی انجام می‌شود. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش کرنش تجمعی نهایی و عدد جریان (FN) می‌باشد. در این پژوهش برای انجام آزمایش از دستگاه UTM طبق استاندارد NCHRP 9-19 محدود نشده استفاده شده است. برای انجام این آزمایش برای هر مخلوط ۲ نمونه در محفظه UTM در دمای ٥٤/٤ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در این تحقیق مقدار تنش اعمالی به‌صورت بارگذاری نیم سینوسی به مقدار ٤١٤ KPa (٦٠psi) با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و دوره بارگذاری ۰/۹ ثانیه انتخاب شده است. در آزمایش خزش دینامیکی مقدار کرنش تجمعی برحسب تعداد سیکل بارگذاری مطابق شکل۳ از سه ناحیه تشکیل می‌شود. در ناحیه اول کرنش تجمعی به‌صورت سریع بر روی هم انباشته و افزایش می‌یابد، ولی در ناحیه دوم مقدار افزایش کرنش (شیب نمودار) در حال کاهش هست تا که به یک مقدار ثابت برسد و همچنین در ناحیه سوم شیب کرنش مجدداً افزایش پیداکرده و مقدار تغییر شکل در این ناحیه نیز به‌شدت بر روی هم انباشته می‌شوند و تغییر شکل دائم در روسازی اتفاق می‌افتد. (Witczak 2007).



شکل۳. نواحی مختلف نمودار کرنش تجمعی

۵- نتایج

۵-۱- آزمایش طیف سری فوریه (FTIR)

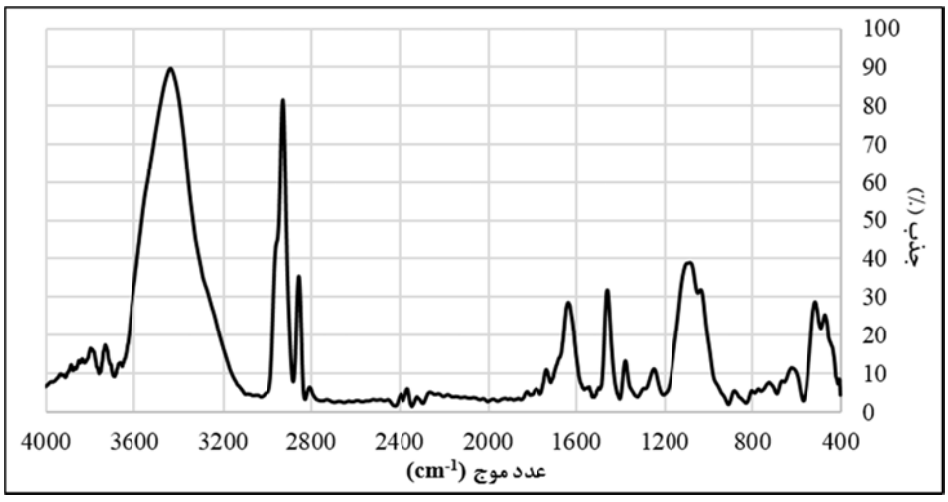
نتایج آزمایش FTIR بر روی نمونه شاهد و قیرهای اصلاح شده با ۵ و ۹ درصد گیلسونایت در شکل‌های ٤ الی ٦ آورده

شده است. تمامی طول موج‌های موجود در نمونه‌ها به‌طور خلاصه در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. مطابق شکل‌های ٤ و ۵ و ٦ طیف نمونه کنترلی WMA و نمونه‌های نیمه گرم اصلاح شده با گیلسونایت مشابه یکدیگر بوده در پیک‌های مشترک دارای قله‌هایی با شدت جذب متفاوت می‌باشند. پیک طول موج ۱۰۳۰ و پیک‌های موجود در محدوده موج ۱٦۹۰ تا ۱۷۱۰ به ترتیب مربوط به ترکیبات سولفوکسید (پیوند S=O) و گروه کربونیل (پیوند C=O) می‌باشد که در بحث مقاومت رطوبتی نقش مهمی دارند. در شکل‌های ۵ و ٦ پیک‌های طول موج ۸۷۵، ۸٦۳ و ۷۲۱ نشانگر وجود کانی‌های کربنات در گیلسونایت می‌باشد (Ji et al. 2009) و این ترکیبات معمولاً چسبندگی خوبی با قیر دارند و ممکن است موجب بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه شوند (Bagampadde 2004).

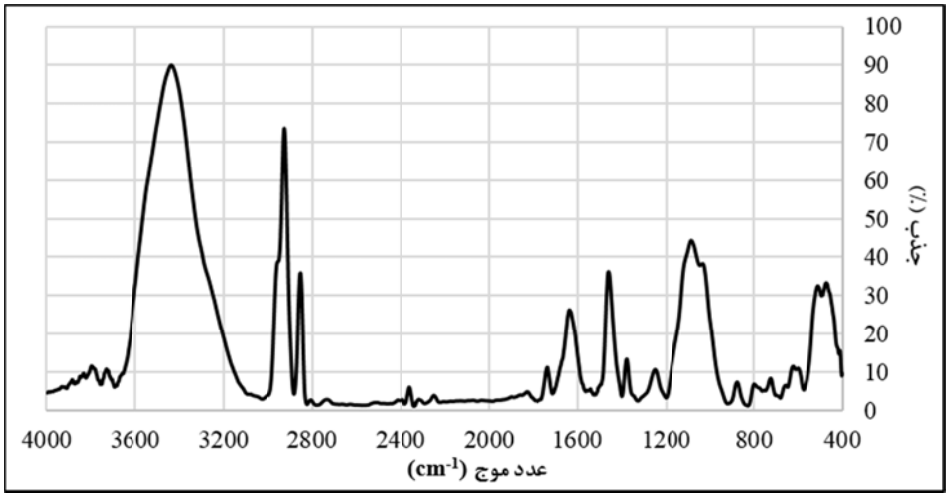
مطابق شکل‌های ۵ و ٦ افزایش درصد گیلسونایت موجب کاهش جذب در محدوده پیک ۳٦۰۰-۳۱۰۰ می‌شود که مرتبط با گروه آمید (N-H) و ترکیبات الکل (هیدروکسیل O-H) از گروه عاملی کربوسیلیک اسید می‌باشد. گروه‌های عاملی که با پیوند هیدروژنی همراه هستند با آب بسیار واکنش پذیرند، بنابراین چنین گروه‌های عاملی ممکن است مسئول حساسیت رطوبتی در یک مخلوط آسفالتی باشند. نمونه کنترلی WMA مقدار جذب بسیار بالایی در این محدوده دارد که گیلسونایت در این میان موجب کاهش واکنش پذیری قیر حاوی ساسوبیت با آب شده و مقدار جذب در این محدوده را کاهش می‌دهد که می‌تواند مرتبط با افزایش مقاومت رطوبتی قیر اصلاح شده گیلسونایتی حاوی ساسوبیت باشد.

جدول ۵. گروه عاملی موجود در نمونه‌های قیر

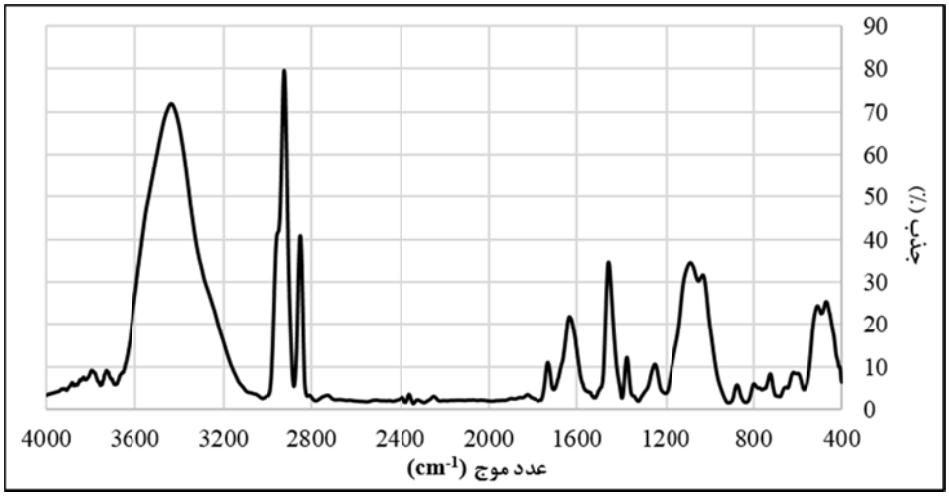
محدوده پیک‌ها	نوع پیوند	توضیحات
۱۰۳۰	S=O	ارتعاش کششی مربوط به ترکیبات سولفوکسید
۱۰۷۲	C-O	ارتعاش کششی مربوط به گروه استر
۱٤۵۸	CH_2 و CH_3	مربوط به گروه آلفاتیک
۱٦۸۰-۱٦۰۰	C=C	نشان دهنده وجود آسفالتن و اجزای آروماتیکی
۱٦۹۰-۱٦٤۰	C=O	ارتعاش کششی مربوط به گروه آلدهید
۱۷۲۰-۱۷۰۰	C=O	ارتعاش کششی مربوط به گروه کربونیل
۲۹۱۵-۲۸۵۰	C-H	ارتعاش کششی مربوط به گروه آلفاتیک
۳٦۰۰-۳۱۰۰	N-H و O-H	ارتعاش کششی مربوط به گروه آمید و ترکیبات الکل



شکل ٤. طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه کنترلی



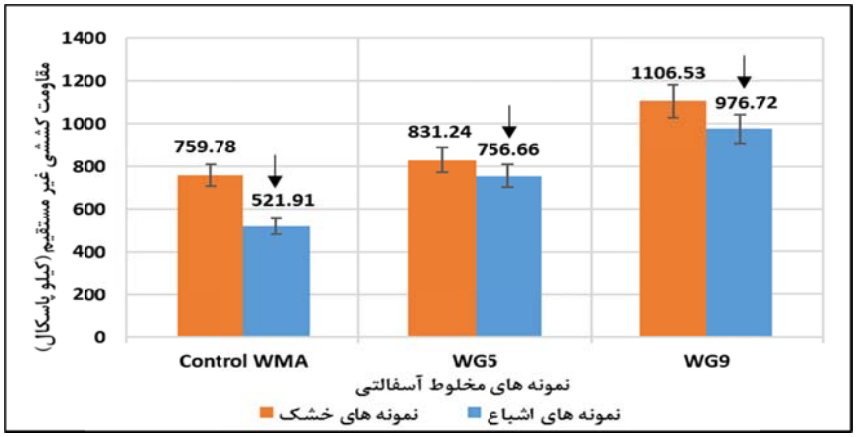
شکل ۵. طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه اصلاح شده با ۵ درصد گیلسونایت حاوی ساسوبیت



شکل ٦. طیف‌سنجی مادون قرمز نمونه اصلاح شده با ۹ درصد گیلسونایت حاوی ساسوبیت

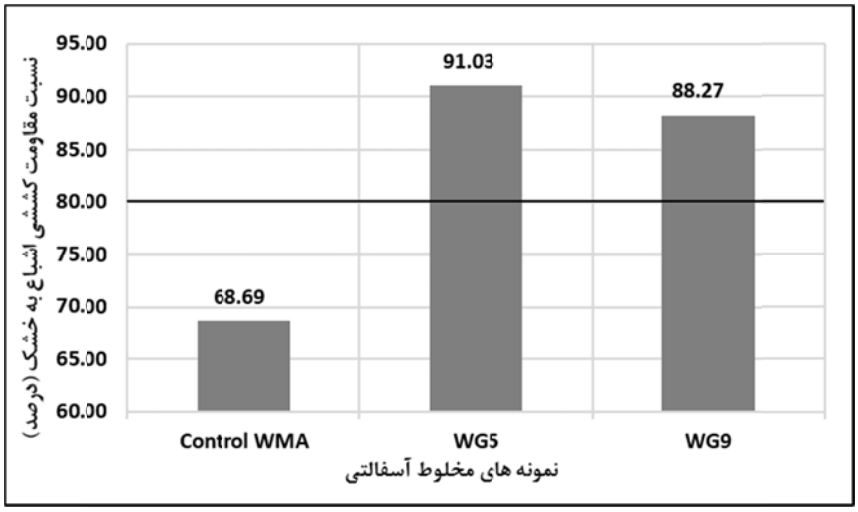
۵-۲- کشش غیر مستقیم (ITS)

مطابق شکل ۷ اگر نمونه‌های خشک را در نظر بگیریم مشاهده می‌شود که با افزودن گیلسونایت مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که افزودن ۵ و ۹ درصد گیلسونایت به ترتیب موجب افزایش ۱۰ و ٤٦ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد شده است و علت این امر می‌تواند به دلیل وجود درصد بالای آسفالتن و ترکیبات نیتروژن در قیر اصلاح‌شده با گیلسونایت باشد که موجب چسبندگی بیشتر قیر و سنگدانه‌ها شده است. با عمل آوری نمونه‌ها مقدار مقاومت کششی نمونه‌های حاوی گیلسونایت به نسبت نمونه شاهد تغییرات کمتری را تجربه می‌کنند، به طوری که مقدار مقاومت کششی نمونه حاوی ۵ و ۹ درصد گیلسونایت به ترتیب از مقدار ۸۳۱,۲٤ به مقدار ۷۵٦/٦٦ (به اندازه ۹ درصد) و از ۱۱۰٦/۵۳ به مقدار ۹۷٦/۷۲ (به اندازه حدود ۱۲ درصد) کاهش می‌یابند و در این میان افت مقاومت نمونه شاهد از مقدار ۷۵۹/۷۸ با ۳۲ درصد کاهش به مقدار ۵۲۱/۹۱ می‌رسد.



شکل ۷. نتایج مربوط به مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه آسفالتی

مطابق شکل ۸ مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم حاوی ۵ و ۹ درصد گیلسونایت نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد حساسیت رطوبتی کمتری داشته و مقدار ضریب TSR قابل قبولی دارند که نسبت به حد آیین‌نامه بیشتر می‌باشد. با افزایش درصد گیلسونایت پارامتر TSR افزایش می‌یابد و ۵ درصد گیلسونایت موجب بیشترین کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط می‌شود.



شکل ۸ . نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اشباع به خشک

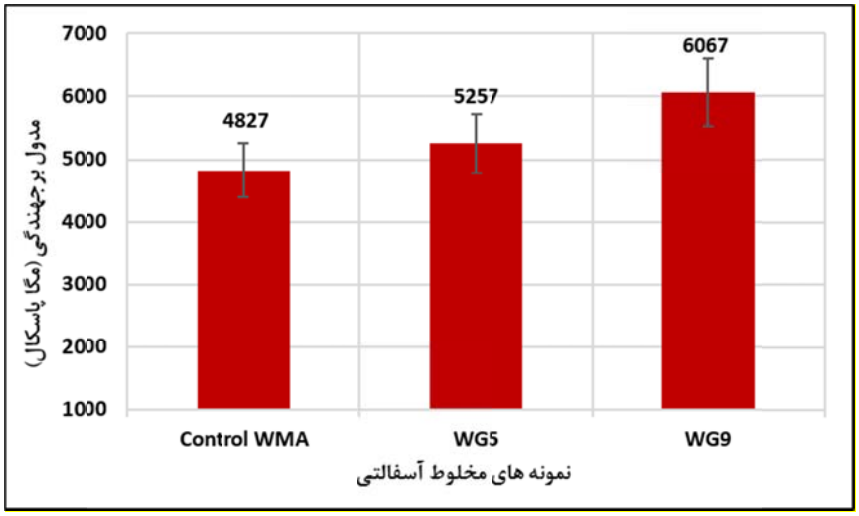
طبق نتایج آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز ترکیبات کانی‌های کلسیت و دولومیت در گیلسونایت دیده می‌شود که خود ممکن است عامل مؤثری در افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه ممکن باشند و موجب استحکام پیوند قیر و سنگدانه سیلیسی شده و کاهش پتانسیل عریان شدگی را به دنبال آورد (Ji et al. 2009). مطابق شکل ۸ افزایش قابل توجه پارامتر حساسیت رطوبتی نشانگر خاصیت ضد عریان شدگی گیلسونایت در مخلوط نیمه گرم ساخته شده با مصالح سیلیسی می‌باشد و پیشنهاد می‌شود از آن در کنار مواد افزودنی نیمه گرم استفاده شود.

۵-۳- مدول برجهندگی

مدول برجهندگی یکی از مهم‌ترین پارامترها در تحلیل عکس‌العمل روسازی نسبت به بار ترافیکی و تعیین ضخامت روسازی می‌باشد. در واقع در تعیین ضخامت لایه هرچه مدول برجهندگی بیشتر باشد مقدار ضخامت لایه آسفالتی کاهش می‌یابد ولی باید به این نکته توجه کرد که افزایش بیش از حد مدول برجهندگی با کاهش برگشت پذیری تغییر شکل‌های

ایجاد شده می‌تواند پتانسیل ترک خوردگی را افزایش دهد.

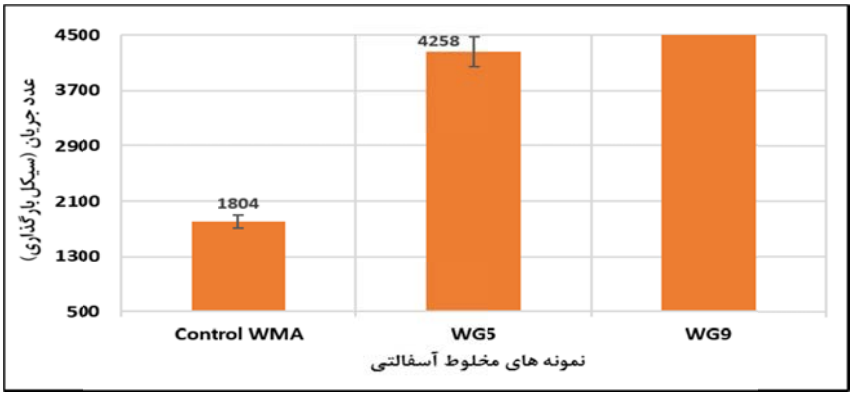
طبق شکل ۹ مشاهده می‌شود که گیلسونایت بر روی مقدار مدول برجهندگی تأثیر مثبت داشته و مقدار مدول برجهندگی را افزایش می‌دهد. افزودن ۵ درصد گیلسونایت تأثیر ناچیزی در حدود ۹ درصد مقدار مدول را افزایش می‌دهد ولی این مقدار با افزایش درصد گیلسونایت افزایش می‌یابد و در نمونه حاوی ۹ درصد گیلسونایت مقدار مدول برجهندگی نسبت به نمونه شاهد از مقدار ۴۸۲۷ به اندازه ۲۶ درصد افزایش یافته و به مقدار ۶۰۶۷ مگا پاسکال می رسد. با استفاده از درصدهای بالای گیلسونایت می‌توان از این ماده در ساخت روسازی‌های با مدول بالا بهره جست که یکی از کاربردهای اصلی این ماده در مخلوط آسفالتی می‌باشد (Sobhi and Hesami 2018, Wang et al. 2018).



شکل ۹. نتایج مربوط به مدول برجهندگی

۵-۴- خزش دینامیکی

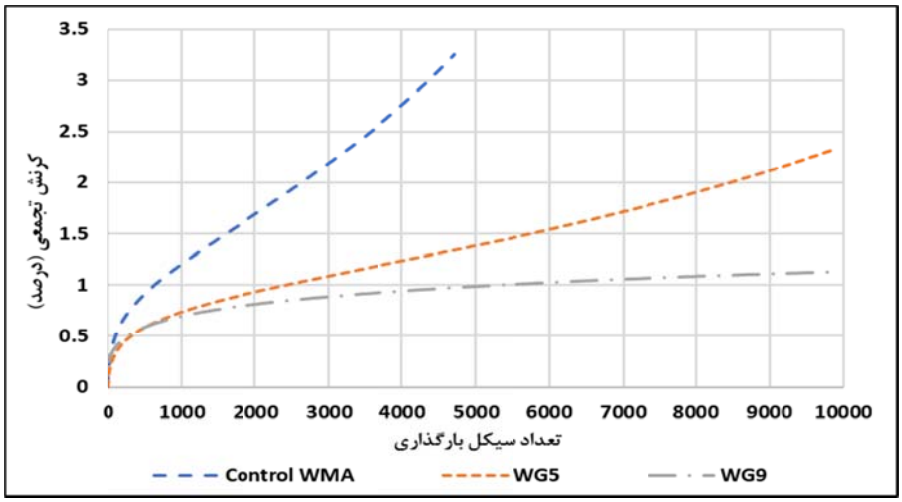
بر اساس تأثیر مثبت گیلسونایت در افزایش ویسکوزیته و سفتی قیر اصلاحی مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که افزودن گیلسونایت مقدار عدد جریان را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد به‌طوری‌که با افزودن ۵ درصد گیلسونایت مقدار عدد جریان مخلوط آسفالتی شاهد از مقدار ۱۸۰۴ به اندازه ۱/۳۶ برابر و به مقدار ۴۲۵۸ افزایش می‌یابد. نمونه حاوی ۹ درصد گیلسونایت به علت افزایش بیش از حد ویسکوزیته موجب سفتی مخلوط آسفالتی شده و در طول دوره بارگذاری زیر دستگاه گسیخته نمی‌شود.



شکل ۱۰. عدد جریان نمونه‌های مخلوط آسفالتی

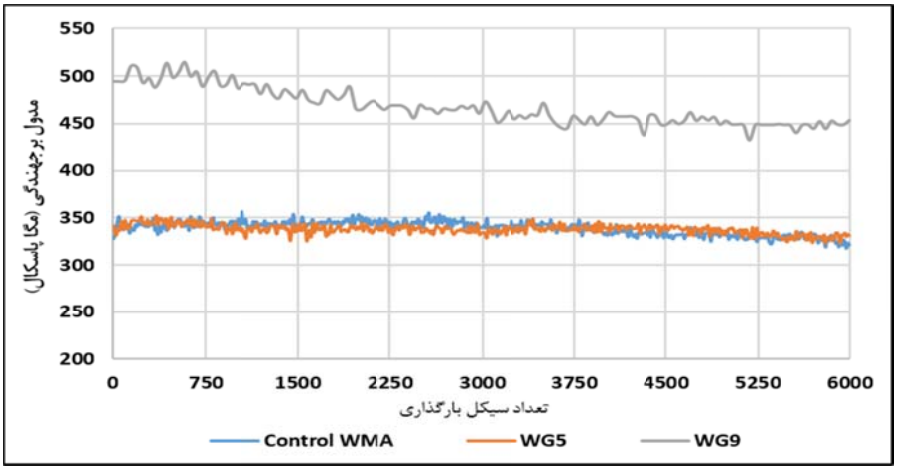
تغییرات کرنش تجمعی برحسب سیکل بارگذاری و درصد گیلسونایت در شکل ۱۱ نشان داده شده است و مطابق شکل با افزودن گیلسونایت تعداد سیکل بارگذاری برای گسیخته شدن نمونه آسفالتی نیمه گرم به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد

با توجه به نمودار خزش مشاهده می‌شود که هرچه شیب نمودار کرنش تجمعی نمونه بیشتر می‌شود نمونه آسفالتی زودتر گسیخته شده و عدد جریان کمتری دارد (مطابق با شکل ۱۰ و ۱۱).



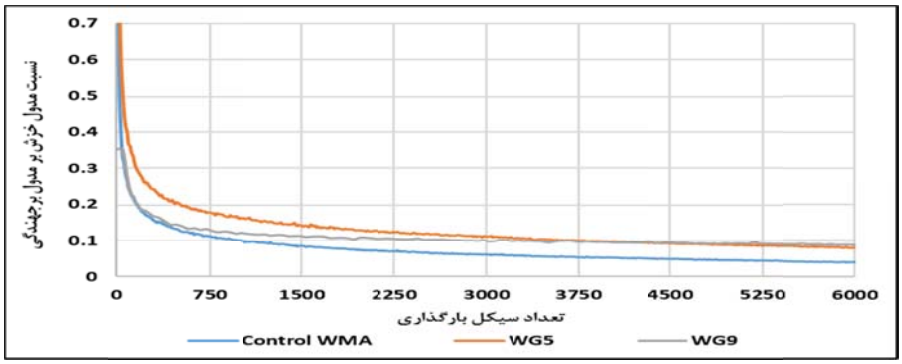
شکل ۱۱. نمودار خزش مخلوط‌های آسفالتی تحت تنش ٤١٤ KPa و دمای ٥٤/٤ درجه سانتی‌گراد

در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت افزودن گیلسونایت مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی را به‌طور قابل قبولی افزایش می‌دهد و استفاده از این افزودنی در ساخت روسازی نیمه گرم در مناطق گرمسیر که عمده خرابی آن‌ها شیارشدگی می‌باشد توصیه می‌شود. مدول برجهندگی و خزش برجهندگی از خروجی‌های مهم دیگر آزمایش خزش دینامیکی می‌باشد (Khodaii and Mehrara 2009). در آزمایش خزش دینامیکی، مدول برجهندگی در واقع از تقسیم تنش عمودی وارده بر کرنش برجهندگی در هر سیکل بارگذاری بدست می‌آید و این پارامتر معیاری از تراکم و سفتی مخلوط آسفالتی می‌باشد(Taherkhani and Noorian 2018). شکل ۱۲ تغییرات مدول برجهندگی در سیکل‌های مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود که تغییرات مدول برجهندگی نمونه‌ها مشابه یکدیگر نیستند و مقدار آن‌ها در هر سیکل متفاوت است. در میان نمونه‌ها، نمونه حاوی ۹ درصد گیلسونایت بیشترین مدول برجهندگی (سفتی بیشتر) را داشته و مدول برجهندگی نمونه‌های شاهد و نمونه حاوی ۵ درصد گیلسونایت به‌طور جزئی با یکدیگر متفاوت می‌باشند.



شکل ۱۲. مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی خروجی تست خزش

خزش برجهندگی از تقسیم تنش عمودی بر کرنش تجمعی در هر سیکل بدست می‌آید که بر اساس نتایج محققان نسبت خزش برجهندگی بر مدول برجهندگی مطابق شکل ۱۳ می‌تواند به عنوان شاخص آسیب پذیری مخلوط نسبت به تغییر شکل در نظر گرفته شود(Gokhale et al. 2005, Khodaii and Mehrara 2009). برای مقایسه نمونه‌ها از شیب نمودار هر نمونه کمک گرفته می‌شود به‌طوری که هرچه شیب کاهشی نمونه بیشتر باشد آن نمونه در برابر تغییر شکل آسیب پذیر می‌باشد. شکل ۱۳ نسبت خزش برجهندگی بر مدول برجهندگی را در طی ۶۰۰۰ سیکل بارگذاری نشان می‌دهد. مطابق شکل مشاهده می‌شود که نمونه حاوی ۹ درصد گیلسونایت دارای شیبی به صورت خط راست بوده و شیب آن نسبت به بقیه نمونه‌ها نرخ کاهشی کمتری دارد و این نشان دهنده مقاومت بالای آن در برابر شیارشدگی می‌باشد. در بین دو نمونه دیگر، نمونه شاهد نرخ کاهش شیب بیشتری نسبت به نمونه حاوی ۵ درصد گیلسونایت دارد و در برابر شیارشدگی آسیب پذیرتر می‌باشد.



شکل ۱۳. نسبت شیب خزش برجهندگی بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی

برای بررسی بهتر نتایج بدست آمده از آزمایش خزش می‌توان از جدول ۷ استفاده نمود که خلاصه نتایج پارامترهای مختلف آزمایش خزش را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۷ مشاهده می‌شود که با افزودن گیلسونایت به نمونه‌ها عدد جریان نمونه‌ها افزایش یافته و متعاقباً میزان کرنش تجمعی در عدد جریان سیر نزولی دارد. در تحلیل مدول برجهندگی در عدد جریان نیز مشاهده می‌شود با افزودن گیلسونایت این پارامتر افزایش یافته و کمترین مقدار مدول برجهندگی در عدد جریان مربوط به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین مقدار خزش برجهندگی در عدد جریان با مقدار گیلسونایت رابطه مستقیم دارد و با افزودن گیلسونایت مقدار این پارامتر افزایش می‌یابد به طوری که با افزودن ۵ درصد گیلسونایت مقدار آن از ۲۵/٤ به مقدار ۳۲ مگاپاسکال می رسد.

جدول ۷. نتایج پارامترهای مختلف آزمایش خزش دینامیکی

نمونه‌های مخلوط آسفالتی	نتایج پارامترهای مختلف آزمایش خزش دینامیکی			
	کرنش تجمعی در عدد جریان	مدول برجهندگی در عدد جریان	خزش برجهندگی در عدد جریان	عدد جریان
Control WMA	۱/۵۹۷	۳۲٦	۲۵/٤	۱۸۰٤
WG5	۱/۱۸٤	۳٤۰/۷	۳۲	٤۲۵۸
WG9	–	-	-	-

٦-تحلیل فنی و اقتصادی

راه‌ها و زیرساخت‌های حمل و نقلی جزو سرمایه‌های ملی کشور محسوب شده و مبحث هزینه احداث آن‌ها با در نظر گرفتن طرح توجیهی‌شان جزو پارامترهای مهم در انتخاب نوع روسازی به حساب می‌آیند. امروزه در کنار هزینه احداث روسازی، بحث کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و مصارف انرژی نیز از مهم‌ترین پارامترهای احداث یک روسازی به حساب می‌آید. از ده‌های گذشته تکنولوژی آسفالتی نیمه گرم به عنوان یک تکنولوژی دوستدار طبیعت معرفی شده و امروزه نیز تأثیر این نوع آسفالت در بازه زمانی بلند مدت در حال بررسی می‌باشد. مطابق مطالب بیان شده در قسمت‌های قبلی، نگرانی اصلی این تکنولوژی خرابی رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌باشد، لذا لازم است در طرح اختلاط مخلوط آسفالتی نیمه گرم از مواد افزودنی ضدعریان شدگی جهت کنترل و کاهش این خرابی استفاده شود. بالا بودن قیمت افزودنی‌های ضدعریان شدگی مشکل دیگری برای این نوع تکنولوژی می‌باشد که در این تحقیق از افزودنی گیلسونایت به عنوان مواد ضدعریان شدگی استفاده شده و در ادامه از نظر اقتصادی این طرح اختلاط مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به‌منظور بررسی اقتصادی طرح اختلاط مخلوط آسفالتی مورد مطالعه در این پژوهش، هزینه احداث یک کیلومتر روسازی، هزینه تعمیر و نگهداری در طول عمر مفید روسازی (روکش)، هزینه کاهش سوخت مصرفی و هزینه کاهش ضخامت روسازی در نظر گرفته شده است و سایر پارامترهای تأثیرگذار مانند هزینه اصلاح مخلوط آسفالتی، هزینه حمل مصالح و قیر لحاظ نشده است که مستلزم اطلاعات جامع و کار پژوهشی مفصل‌تری می‌باشد. در ادامه بحث خواهیم داشت.

الف) هزینه کل احداث (A) :

بر اساس نتایج کلیه آزمایش‌ها مقدار ۵ درصد گیلسونایت مقدار مناسب برای طرح اختلاط می‌باشد که علاوه بر افزایش مقدار مقاومت رطوبتی مقدار مقاومت در برابر شیارشدگی را نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، بنابراین به عنوان مقدار بهینه در این طرح اختلاط انتخاب می‌شود. مطابق طرح اختلاط مارشال قیر بهینه مخلوط آسفالتی معمولی برابر ۵/۸ درصد و قیر بهینه مخلوط آسفالتی نیمه گرم اصلاح شده با ۵ درصد گیلسونایت برابر ۵/٦٨ درصد می‌باشد که در یک تن مخلوط آسفالتی معمولی، مقدار ٦١/۵ کیلوگرم قیر معمولی و در مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی ۵ درصد گیلسونایت مقدار ۵۵/۲۹ کیلوگرم قیر معمولی، ۳/۰۰۵ کیلوگرم قیر گیلسونایت و مقدار ۱/۸۰۳ کیلوگرم ساسوبیت لازم می‌باشد. اگر بجای گیلسونایت ماده‌ای مشابه عملکرد آن (افزایش مقاومت رطوبتی و شیارشدگی) مانند SBS با همان درصد بهینه ۵ درصد در نظر گرفته شود و طبق قیمت روز برحسب تن، قیمت هر تن قیر مقدار ۳/۳ میلیون تومان، SBS مقدار ٤۵ میلیون تومان ، ساسوبیت ۵۰ میلیون تومان و گیلسونایت مقدار ۱/۵ میلیون تومان باشد، مطابق جدول ۸ خواهیم داشت :

جدول ۸ هزینه احداث روسازی برحسب نوع مخلوط آسفالتی

هزینه (میلیون تومان) / نوع مخلوط	هزینه SBS برای یک کیلومتر	هزینه ساسوبیت برای یک کیلومتر	هزینه گیلسونایت برای یک کیلومتر	هزینه قیر برای یک کیلومتر	هزینه کل (A_i)
معمولی	–	–	–	*۳۶۰۰*۰/۰۶۱۵*۳/۳	۷۳۰/٦۲
نیمه گرم (گیلسونایت)	–	۵۰*۰/۰۰۱۸.*۳٦۰۰	۱/۵*۰/۰۰۳*۳٦۰۰	۳/۳*/۰۵۵۲۹**۳٦۰۰	۹۹۷/٦۳
نیمه گرم (SBS)	٤۵*۰/۰۰۳*۳٦۰۰	۵۰*۰/۰۰۱۸.*۳٦۰۰	–	۳/۳*/۰۵۵۲۹**۳٦۰۰	۱۱۵۹/۹

مقدار آسفالت مورد نیاز برحسب تن برای یک کیلومتر روسازی با ضخامت ۱۵ سانتی‌متری*

با توجه به جدول مشاهده می‌شود که قیمت مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی گیلسونایت و SBS به ترتیب به اندازه حدود ۲٦۷ میلیون و ٤۲۹ میلیون تومان بیشتر از قیمت تمام شده مخلوط آسفالتی معمولی می‌باشد و همچنین قیمت مخلوط نیمه گرم حاوی گیلسونایت به مقدار ۱٦۲ میلیون کمتر از مخلوط اصلاح شده با SBS است.

ب) هزینه سوخت مصرفی (B) :

-با توجه به نتایج آزمایش‌های این تحقیق استفاده از ۳ درصد ساسوبیت مقدار دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گیلسونایت را به اندازه حدود ۱۰ درجه کاهش می‌دهد، بنابراین با فرض کاهش ۱۰ درجه‌ای حرارت مقدار سوخت مصرفی حدود ۲/۵ لیتر گازوئیل در یک تن آسفالت و قیمت

فرضی هر لیتر هزار تومان در یک کیلومتر راه حدود ۱۰ میلیون تومان کاهش هزینه خواهیم داشت.

ج) هزینه تعمیر و نگهداری (C) :

-اگر چرخه عمر مفید یک روسازی معمولی را ۳ سال فرض کنیم و با اصلاح روسازی با افزودنی‌ها دوره عمر حداقل ۲ برابر افزایش پیدا کند، بعد از ۳ سال نیازمند روکش بوده و هزینه روکش هر سال با فرض حدود ۳۸۰ میلیون خواهد بود، با این حال با اصلاح روسازی با مواد افزودنی تا عمر مفید روسازی اصلاح شده نزدیک با در نظر گرفتن فرآیند تعمیر و نگهداری (در صورت مورد نیاز) در طی ٦ سال نزدیک به ۷۰۰ میلیون تومان صرفه‌جویی در هزینه تعمیر و نگهداری خواهیم داشت.

د) کاهش هزینه ضخامت روسازی (D) :

-مدول برجهندگی یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین ضخامت روسازی می‌باشد و در واقع در تعیین ضخامت لایه هرچه مدول برجهندگی بیشتر باشد مقدار ضخامت لایه آسفالتی کاهش می‌یابد. مطابق نتایج آزمایش مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی ۵ درصد گیلسونایت مدول را افزایش می‌دهد. با فرض کاهش ۱ سانتی‌متری ضخامت روسازی مقدار ۲٤۰ تن آسفالت مصرفی کاهش پیدا کرده و در نتیجه حدود مقدار ٤٤ میلیون تومان کاهش هزینه خواهیم داشت.

- هزینه کل روسازی آسفالت معمولی با در نظر گرفتن هزینه تعمیر و نگهداری در طول ٦ سال:

$X_1 = A_1 + 3C = ۷۳۰ + ۳x۳۸۰ =$

یک میلیارد و هشتصد و هفتاد میلیون تومان

- هزینه کل روسازی آسفالت نیمه گرم اصلاح شده با گیلسونایت با در نظر گرفتن هزینه فرآیند تعمیر و نگهداری در طول ٦ سال (فرض اینکه در ٦ سال یکبار روکش نیاز باشد):

$X_2 = A_2 - B + C - D = ۹۹۷/٤٤ - ۳۸۰ + ۱۰ - ۱۰ =$

حدود یک میلیارد و سی صد و بیست و سه میلیون تومان

- هزینه کل روسازی آسفالت نیمه گرم اصلاح شده با SBS با در نظر گرفتن هزینه فرآیند تعمیر و نگهداری در طول ٦ سال (فرض اینکه در ٦ سال یکبار روکش نیاز باشد):

- طبق مطالعات پژوهشگران با افزودن ۵ درصد SBS مقدار مدول برجهندگی را افزایش می‌دهد و با فرض بر اینکه استفاده از SBS مقدار ضخامت را نیز به میزان یک سانتی‌متر کاهش می‌دهد.

- با توجه به مطالعات پژوهشگران با افزودن ۵ درصد SBS و ۳ درصد ساسوبیت دمای مخلوط آسفالتی در حیطه مخلوط آسفالتی معمولی قرار می‌گیرد، پس کاهش دما نخواهیم داشت.

$X_3 = A_3 + C - D = ۱۱۵۹/٤٤ - ۳۸۰ + ٤٤ =$

حدود یک میلیارد و چهارصد و نود و پنج میلیون تومان

بنابراین با توجه به در نظر گرفتن تمامی هزینه‌ها مشاهده می‌شود که استفاده از آسفالت نیمه گرم اصلاح شده با گیلسونایت نسبت به بقیه موارد مقرون به‌صرفه بوده و کمترین آسیب زیست‌محیطی را به دنبال خواهد داشت.

۷- نتیجه‌گیری

تکنولوژی آسفالت نیمه گرم به عنوان تکنولوژی دوستدار حفظ محیط‌زیست و مزایای مختلف عملکردی دارای مشکل ضعف مقاومت رطوبتی می‌باشد که کاربرد این تکنولوژی را محدودتر نموده است در این پژوهش با بهره‌گیری از گیلسونایت در تکنولوژی آسفالت نیمه گرم، خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تأثیر قابل توجه گیلسونایت در بهبود خرابی رطوبتی تکنولوژی آسفالت نیمه گرم را نشان داد که یکی از چالش‌های اصلی صنعت روسازی می‌باشد. عمده نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد :

-آزمایش طیف‌سنج مادون قرمز آزمون مناسبی جهت شناسایی گروه‌های عاملی موجود در قیر پایه و اصلاح شده و تغییرات به وجود آمده در ترکیبات شیمیایی قیرهای اصلاح شده می‌باشد و نتایج نشان داد که طیف نمونه کنترلی و نمونه‌های نیمه گرم اصلاح شده با گیلسونایت مشابه یکدیگر بوده در پیک‌های مشترک دارای قله‌هایی با شدت جذب متفاوت می‌باشند.

-افزودن گیلسونایت به قیرهای اصلاح شده با ساسوبیت موجب تغییرات فیزیکی در قیر شده و هیچ‌گونه عکس‌العمل شیمیایی بین قیر اصلاحی نیمه گرم و گیلسونایت رخ نمی‌دهد.

- گیلسونایت با افزایش مقاومت کششی نمونه‌های آسفالتی می‌تواند موجب افزایش مقاومت روسازی در برابر تنش‌های

کششی ناشی از بار ترافیکی و در نتیجه افزایش طول عمر روسازی آسفالتی شود.

– افزودن گیلسونایت به مخلوط نیمه گرم موجب کاهش افت مقاومت رطوبتی شده به‌طوری که با افزودن ۵ درصد گیلسونایت مقدار پارامتر حساسیت رطوبتی به میزان ۳۲ درصد افزایش می‌یابد و این مطلب نشان دهنده عملکرد خوب گیلسونایت به‌عنوان ماده ضد عریان شدگی در مخلوط آسفالتی نیمه گرم ساخته شده با مصالح سیلیسی می‌باشد.

– گیلسونایت بر روی مقدار مدول برجهندگی تأثیر مثبت گذاشته و مقدار مدول برجهندگی را افزایش می‌دهد و می‌توان از آن در ساخت روسازی‌های با مدول بالا بهره جست که علاوه بر کاهش ضخامت روسازی و مصالح مصرفی، موجب افزایش عمر و بهبود مقاومت روسازی در برابر بار ترافیکی سنگین می‌تواند شود.

– افزودن گیلسونایت مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی را به‌طور قابل قبولی افزایش می‌دهد بنابراین استفاده از این افزودنی در ساخت روسازی نیمه گرم در مناطق گرمسیر که عمده خرابی آن‌ها شیارشدگی می‌باشد توصیه می‌شود.

با توجه به نتایج بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ترکیب گیلسونایت و ساسوبیت در آسفالت نیمه گرم علاوه بر افزایش کارایی در هنگام ساخت روسازی موجب کاهش خرابی رطوبتی و افزایش عمر روسازی می‌شود و دارای صرفه اقتصادی در استفاده از روسازی‌های اصلاح شده با مواد افزودنی می‌باشد ولی متأسفانه به علت عدم به‌کارگیری فرایند فرآوری و تکنولوژی روز در کشور، این ماده معدنی با وجود منابع و معادن زیاد در کشور کمتر مورد توجه محققین و مهندسان راه‌سازی قرارگرفته و در حال حاضر تنها به‌عنوان عایق پوشش سقف ساختمان استفاده می‌شود و عمدتاً به‌صورت پودر و یا کلوخه با قیمت ناچیزی از کشور خارج می‌شود.

۸- مراجع

-Arabani, M, H Roshani, and Gh H Hamedi. (2012), "Estimating moisture sensitivity of warm mix asphalt modified with zycosoil as an antistrip agent using surface free energy method", J. Mater. Civ. Eng. 24 (7), pp.889-897.

-Bagampadde, U., (2004), "On investigation of stripping in bituminous mixtures", Licentiate thesis, submitted to the Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

-Bennert, Thomas, Ali Maher, and Robert Sauber., (2011), "Influence of production temperature and aggregate moisture content on the initial performance of warm-mix asphalt." Transportation Research Record 2208 (1), pp.97-107.

-Button, Joe W, Cindy Estakhri, and Andrew Wimsatt., (2007), "A synthesis of warm mix asphalt".

-Chehovits, Jim, and Larry Galehouse, (2010), "Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete pavements", Proceedings on the 1st International Conference of Pavement Preservation.

-Corp., Ziegler Chemical & Mineral., (2014), "Chemical properties of gilsonite".

-Edwards, Ylva, and Ulf Isacsson, (2005), "Wax in bitumen: Part II—characterization and effects", Road materials and pavement design 6 (4), pp.439-468.

-Goh, Shu Wei, Zhanping You, and Thomas J Van Dam., (2007), "Laboratory evaluation and pavement design for warm mix asphalt." Proceedings of the 2007 Mid-Continent transportation research symposium.

-Gokhale, Salil, Bouzid Choubane, Tom Byron, and Mang Tia., (2005), "Rut initiation mechanisms in asphalt mixtures as generated under accelerated pavement testing", Transportation Research Record, pp.145-930.

-Helms, John R., Xueqian Kong, Elodie Salmon, Patrick G. Hatcher, Klaus Schmidt-Rohr, and Jingdong Mao., (2012), "Structural characterization of gilsonite bitumen by advanced nuclear magnetic resonance spectroscopy and ultrahigh resolution mass spectrometry revealing pyrrolic and aromatic rings substituted with aliphatic chains", Organic geochemistry 44, pp.21-36.

-Hesami, Saeid, Hossein Roshani, Gholam Hossein Hamedi, and Alireza Azarhoosh, (2013), "Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm

-Shalaby, Ahmed, Tara Liske, and Amir Kavussi, (2004), "Comparing back-calculated and laboratory resilient moduli of bituminous paving mixtures", Canadian Journal of Civil Engineering 31 (6), pp.988-996.

-Sobhi, Saeid, and Saeid Hesami., (2018), "Application of natural bitumen (gilsonite) in road and airport pavement (in Persian)", The 9th Bitumen and Asphalt Conference and Exhibition, Road, Housing and Development Research Center, Iran.

-Sobhi, Saeid, afshar yusefi, saeid hesami, and Mahmood Ameri, (2018), "An investigation of factors affecting the moisture sensitivity of warm mix asphalt (WMA) (in Persian)", Amirkabir Journal of Civil Engineering. Doi: 10.22060/ceej.2018.14707.5726.

-Sullivan, EJ, and A Moss., (2014), "Paving Cost Comparisons: Warm-Mix Asphalt Versus Concrete", USA: Portland Cement Association.

-Taherkhani, Hasan, and Farid Noorian, (2018), "Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP)", Road Materials and Pavement Design, pp.1-20.

-Tangella, SCS Rao, J Craus, J.A. Deacon, and CL, Monismith, (1990), "Summary report on fatigue response of asphalt mixtures".

-Wang, Xiushan, Yang-Jie Qiu, Sheng-Ya Xue, Yu Yang, and Yingjie Zheng., (2018), "Study on durability of high-modulus asphalt mixture based on TLA and fibre composite modification technology", International Journal of Pavement Engineering 19 (10), pp.930-936.

-Witczak, Matthew W., (2007), "Specification criteria for simple performance tests for rutting", Vol. 1: Transportation Research Board.

-Zhao, Wenbin, Feipeng Xiao, Serji N., Amirkhanian, and Bradley J. Putman, (2012), "Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures", Construction and Building Materials 31, pp.265-272.

mix asphalt", Construction and Building Materials 47, pp.935-941.

-Huang, Baoshan, Guoqiang Li, and Xiang Shu., (2006), "Investigation into three-layered HMA mixtures", Composites Part B: Engineering 37 (7-8), pp.679-690.

-Hurley, Graham C, and Brian D Prowell, (2005), "Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt", NCAT report 5 (6), pp.1-27.

-Ji, Junfeng, Yun Ge, William Balsam, John E Damuth, and Jun Chen, (2009), "Rapid identification of dolomite using a Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR): A fast method for identifying Heinrich events in IODP Site U1308", Marine Geology 258 (1-4), pp.60-68.

-Kakar, Muhammad Rafiq, Meor Othman Hamzah, and Jan Valentin, (2015), "A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations", Journal of Cleaner Production 99, pp.39-58.

-Khodaii, A., HF Haghshenas, and H. Kazemi Tehrani, (2012), "Effect of grading and lime content on HMA stripping using statistical methodology", Construction and Building Materials 34, pp.131-135.

-Khodaii, A., and Mehrara, A., (2009), "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test", Construction and Building Materials 23 (7), pp.2586-2592.

-Li, Xuelian, Zhigang Zhou, and Zhanping You, (2016), "Compaction temperatures of Sasobit produced warm mix asphalt mixtures modified with SBS", Construction and Building Materials 123, pp.357-364.

-Mansourian, Ahmad, and Armin Jarahi, (2010), "Warm mix asphalt (WMA) experience of several European Countries (in Persian)", First Edition ed. Transportation Research Institute: Ministry of Roads and Urban Development.

-Nassar, Ahmed Izat Mohammed, (2016), "Enhancing the performance of cold bitumen emulsion mixture using supplementary cementitious materials", University of Nottingham.

Evaluation of Moisture and Rutting Resistance of Modified Warm Mix Asphalt (WMA) with a Mineral Additive

Saeid Sobhi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
Saeid Hesami, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

E-mail: s.hesami@nit.ac.ir

Received: February 2023- Accepted: April 2023

ABSTRACT
The importance of environmental protection in the construction of pavement has led to that in recent years the warm mix asphalt technology as a new method has always been to reduce environmental damage and reduce the cost of manufacturing and it recognizes as an environment-friendly technology, and this be used. This technology has the advantage of reducing the temperature of mixing and compaction and other benefits, has a weak point of moisture susceptibility and rutting. The use of anti-stripping additives is one of the ways to improve the moisture resistance of these types of asphalt mixtures. This research was conducted with the aim of using different percentages of Gilsonite as a modifier in warm mix asphalt (WMA) and also to investigate its effect on functional properties especially the moisture sensitivity of warm mix asphalt. In order to investigate the effect of Gilsonite on reducing moisture sensitivity, the Lottman modified test were used and also, the resilient modulus and dynamic creep testing were used to investigate the performance properties, which the results showed that Gilsonite due to its inorganic compounds increased bond adhesion of bitumen and aggregate. Also, it has the characteristics of an anti-stripping material and could be causing to increase the life of the warm mix asphalt against moisture damage in wet areas. Furthermore, the results of the dynamic creep test indicated that Gilsonite significantly increased the asphalt mixture resistance against the rutting and it was an appropriate additive to prevent the rutting of asphalt mixture in the tropical region (south of the country).

Keywords: Gilsonite, Sasobit, Moisture Sensitivity, Rutting