

تحلیلی بر تاثیرات نانومواد ضدعریان شدگی مایع بر خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی

محمودرضا کی‌منش، استادیار، دانشگاه پیام نور واحد تهران شمال، تهران، ایران
غلامرضا مهدی‌زاده*، دانشجوی دکتری، دانشگاه پیام نور واحد تهران شمال، تهران، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: smehdizadeh31@yahoo.com

دریافت: ۹۴/۰۵/۱۰ - پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۵

چکیده

در این تحقیق با مروری بر تحقیقات انجام شده در طول پنج سال گذشته، خصوصیات رفتاری قیر و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانومواد ضدعریان شدگی مایع بررسی و تحلیل شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاثیر نانومواد ضدعریان شدگی مایع بر مشخصه‌های فنی قیر و مخلوط‌های آسفالتی متغیر است و به عوامل مختلفی مانند جنس و ساختار شیمیایی قیر و سنگدانه‌های مصرفی، دمای تولید مخلوط آسفالتی، مقدار نانوماده مصرفی و نیز نوع و طریقه اختلاط نانوماده با قیر بستگی داشته و در شرایط مختلف، نتایج متفاوتی را رقم زده است که در نتیجه، علی‌رغم ویژگی‌های مثبت بیان شده برای این نانومواد افزودنی، استفاده از این نانومواد جهت پروژه‌های اجرایی نیازمند بررسی دقیق‌تری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نانومواد ضدعریان شدگی، قیر اصلاح شده، مخلوط آسفالتی اصلاح شده

۱- مقدمه

افزایش عمر سرویس دهی آنها مورد توجه بوده است. در این راستا، کاهش دوام روسازی‌های آسفالتی به دلیل قرارگیری در معرض آب و شرایط متغیر جوی که عموماً موجب کاهش چسبندگی بین اجزا مخلوط آسفالتی می‌شود به عنوان یکی از معضلات اصلی ناشی شده از وجود رطوبت در این نوع روسازی‌ها مطرح می‌باشد (فخری، ۱۳۸۸). در دو دهه گذشته، تکنولوژی آسفالت بطور مداوم به دنبال راه‌های جدیدی برای بهبود عملکرد آسفالت، افزایش بهره‌وری ساخت و ساز، حفظ منابع طبیعی، و پیشبرد حفاظت از محیط زیست و مسائل اقتصادی بوده است (Hesami et al., 2015)، و به این منظور، استفاده از فناوری نانو را به عنوان یکی از تکنولوژی‌های جدید، مدنظر قرار داده است.

سیستم حمل و نقل نقش مهمی در توسعه همه جانبه و پایدار کشورها دارا است و روسازی راه‌های آسفالتی که در ساخت آن مقدار قابل توجهی قیر و مصالح سنگی استفاده می‌شود، به عنوان یکی از عناصر اساسی سیستم حمل و نقل در نظر گرفته می‌شود (Vatsal et al., 2013; Ameri et al., 2015). از زمانی که برای اولین بار زیان رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی به عنوان یک نوع مشکل شناسایی شده، تلاش‌های قابل توجهی برای مشخص کردن مکانیسم‌های اساسی و توسعه آزمایش‌های مختلف جهت پیش‌بینی و جلوگیری از وقوع آن بکار گرفته شده است (Behbahani et al., 2015)، چرا که با توجه به نقش عمده راهها در اقتصاد ملی، همواره تامین دوام روسازی راهها به عنوان تاسیسات زیر بنایی کشور و

۲- فناوری نانو

فناوری نانو زمینه نسبتاً جدیدی در علم است که با مواد در مقیاس نانو سروکار دارد و به سرعت در حال تکامل است و عبارت از خلق مواد جدید، وسایل و سیستمها در سطح مولکولی و ایجاد تعاملی بین ساختار ماکروسکوپی و ذرات در مقیاس اتم و مولکول می‌باشد (فخری، ۱۳۹۲). در واقع، فناوری نانو، فهم و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در ابعاد کمتر از یک میکرومتر، معمولاً حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است که اثرات فیزیکی جدیدی، عمدتاً متاثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک از خود نشان می‌دهند (Rafiee and Javid, 2015); رفیعی و همکاران، (۱۳۹۴). مطالعه ویژگیهای مواد در مقیاس نانو و میکرو، بینشی بنیادین و اساسی را برای توسعه علم و تکنولوژی مهیا می‌سازد (فخری و همکاران، ۱۳۹۳). در سال‌های اخیر، این فناوری به دلیل ویژگیهای منحصر به فرد، توانسته در اکثر علوم راه یافته و تاثیرات شگرفی از خود برجای گذارد. در بسیاری از این موارد نانو مواد توانسته اند ویژگیهای مفید مواد را تقویت نموده و مواد بهتر و مقاوم تری بسازند (کریم نیا، ۱۳۹۱). از جمله مطالعاتی که تاکنون در زمینه استفاده از فناوری نانو در علم روسازی آسفالتی انجام گرفته است، بررسی آسیب رطوبتی آسفالت و به تبع آن، پدیده عریان شدگی مخلوط های آسفالتی می‌باشد.

۳- آسیب رطوبتی و پدیده عریان شدگی

آسیب ناشی از رطوبت در یک مخلوط آسفالت، به از بین رفتن چسبندگی در سطح تماس سنگدانه-قیر و یا از بین رفتن پیوستگی در قیر یا قیر-فیلر ماستیک، منتهی شده و با از دست رفتن استحکام، سختی و دوام آسفالت، منجر به مشکلات جدی همانند کاهش مقاومت، از هم پاشیدگی قیر-سنگدانه، چاله و ضعف سازه‌ای روسازی به دلیل تغییر

شکل‌های دائمی و ترک خوردگی می‌شود (Moghadas Nejad (et al.), 2012); که در نهایت می‌تواند آسفالت را در یک یا چند حالت از خرابی‌ها، از جمله شیارشدگی، خستگی، ترک خوردگی حرارتی، شن کش شدن، و غیره مزاحم کند. مقاومت مخلوط آسفالت در برابر زیان رطوبتی برای عملکرد دراز مدت آن بسیار حیاتی است (Sebaaly (et al.), 2015). مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با سنگدانه‌های آبدوست و یا اسیدی در برابر این نوع خرابی ضعیف تر بوده و در مناطق مرطوب، شدت این خرابی‌ها تشدید می‌شود (Hesami (et al.), 2013). از اواخر دهه ۷۰ میلادی، تحقیقات زیادی برای درک بهتر پدیده عریان شدگی در ترکیبات مخلوط آسفالت، انجام شده است. در این راستا، تغییرات زیادی در مواد و تکنولوژی‌ها در ۳۰ سال گذشته اعمال شده تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی نسبت به رطوبت بهبود یابد (Watson (et al.), 2013). در نتیجه، برای مقابله با خرابی رطوبتی از روش‌های مختلفی استفاده شده است که پرکاربردترین ترین این روش‌ها برای تهیه مخلوط آسفالتی مقاوم در برابر خرابی رطوبتی، استفاده از انواع مختلف فیلرهای فعال مانند سیمان پرتلند، آهک هیدراته و یا پودر سنگ آهکی و همچنین به کار بردن افزودنی‌های ضدعریان شدگی مایع می‌باشد (فخری و بوالحسنی، ۱۳۸۹).

امروزه و در کلیه نقاط دنیا بیشتر پیمانکاران و عوامل اجرایی به جهت سهولت استفاده از مواد ضدعریان شدگی مایع نسبت به فیلرهای فعال، تمایل به استفاده از این مواد را دارند. زیرا این مواد گرد و غبار ایجاد نمی‌کنند و استفاده از آن‌ها آسان می‌باشد (Trejo (et al.), 2011). در کشور ما ایران نیز استفاده از این مواد افزودنی مایع از دهه هشتاد شمسی رونق گرفته و از ابتدای دهه ۹۰ شمسی، نوع جدیدی از این مواد افزودنی مایع تحت عنوان نانومواد ضدعریان شدگی مورد توجه محققان و

و وبسایت). نانوماده زایکوترم نیز می تواند به میزان ۱ کیلوگرم در ۴۰۰ لیتر آب حل شده، به مقدار ۵ درصد نسبت به وزن مصالح سنگی بر روی مصالح سنگی اسپری شده و سپس اجازه داده شود که پیش از فرآیند اختلاط با قیر بر روی سنگدانه‌ها خشک شود (اکسیر شرق، وبسایت).

۴-۲- مکانیسم اثر نانومواد ضدعریان شدگی

گروه‌های سیلانول قرار گرفته بر روی سطوح سنگدانه‌های سیلیسی دارای خاصیت قطبی هستند. از سویی دیگر قیر از ۵ تا ۱۰ درصد آسفالتین (قسمت قطبی قیر) تشکیل شده که در ۹۰ تا ۹۵ درصد مالتین (قسمت غیر قطبی قیر) پخش شده است. به علت این تقسیم بندی در مواد تشکیل دهنده قیر و رفتار مشاهده شده از قیر، آن را یک ماده غیر قطبی می‌دانند. در نتیجه پیوند موثری بین سنگدانه‌ها و قیر به وجود نمی‌آید و اصطلاحاً این سنگدانه‌ها قیر دوست نیستند و چون آب، یک مایع قطبی می‌باشد، تمایل این نوع سنگدانه‌ها به پیوند با آب بیشتر از پیوند با قیر است و این سنگدانه‌ها دارای خاصیت آبدوستی هستند (حامدی، ۱۳۸۹). نانومواد ضدعریان شدگی، ترکیباتی ارگانوسیلان هستند که در صورت افزوده شدن به قیر و یا اسپری شدن بر روی سنگدانه‌ها، در قیر و یا بر روی مصالح سنگی، گروه‌های سیلانول (Si-OH) تشکیل می‌دهند. گروه‌های سیلانول فعال هستند و اگر نانوماده به قیر اضافه شده باشد، این گروه‌های سیلانول سریعاً به سطح مصالح سنگی آمده و با گروه‌های سیلانول سطح مصالح سنگی مثل شن و ماسه شکل (۱. الف) پیوندهای دائمی و مستحکم سیلوکسانی (Si-O-Si) تشکیل می‌دهند (شکل ۱. ب).

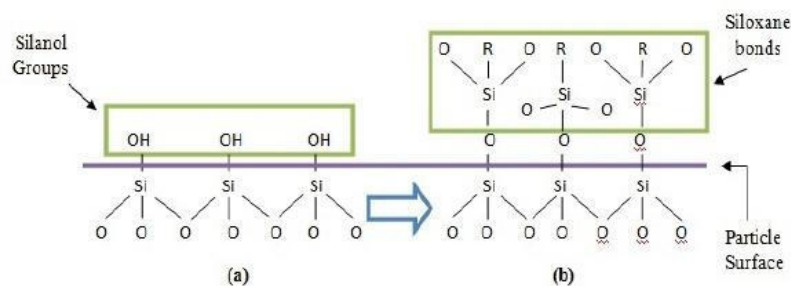
دست اندرکاران صنعت آسفالت قرار گرفته است که تا به امروز ادامه دارد.

۴- نانومواد ضدعریان شدگی

اولین نانوماده ضدعریان‌شدگی مورد استفاده در صنعت آسفالت کشور، زایکوسویل می‌باشد که یک ترکیب ارگانوسیلان است و زایکوترم نسل پیشرفته‌ای از این افزودنی‌های سیلان با مزایای متعدد می‌باشد. زایکوسویل و زایکوترم به صورت شیمیایی باعث ایجاد پیوند دائمی و مستحکم میان قیر و مصالح سنگی می‌شوند (اکسیر شرق، ۱۳۹۴ و وبسایت).

۴-۱- روش استفاده از نانومواد ضدعریان شدگی

زایکوسویل و زایکوترم به دو صورت می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. روش اول، افزودن این نانومواد ضدعریان شدگی در درصد بهینه مورد نظر، به قیر داغ می‌باشد. در این حالت، درصد پیشنهادی شرکت سازنده ۰/۰۵ تا ۰/۱ درصد قیر برای زایکوسویل و ۰/۱ درصد قیر برای نانوماده زایکوترم می‌باشد که این مقادیر ممکن است با توجه به نوع و ساختار سنگدانه‌های مورد استفاده در تهیه مخلوط آسفالتی برای حصول نتایج بهتر تغییر نماید (اکسیر شرق، ۱۳۹۴ و وبسایت). در روش دوم، با حل کردن نانوماده در آب و اسپری نمودن محلول حاصل شده، یک لایه آبریز را در روی سطح سنگدانه‌ها ایجاد می‌کنند. در این حالت، یک قسمت زایکوسویل را در ۸۰ تا ۱۰۰ قسمت آب حل کرده و مصالح سنگی به مدت حداقل ۵ تا ۱۰ ثانیه در محلول زایکوسویل فرو برده شده و سپس خارج می‌شوند. سپس مصالح را در معرض هوا قرار می‌دهند تا خشک شود (اکسیر شرق، ۱۳۹۴).

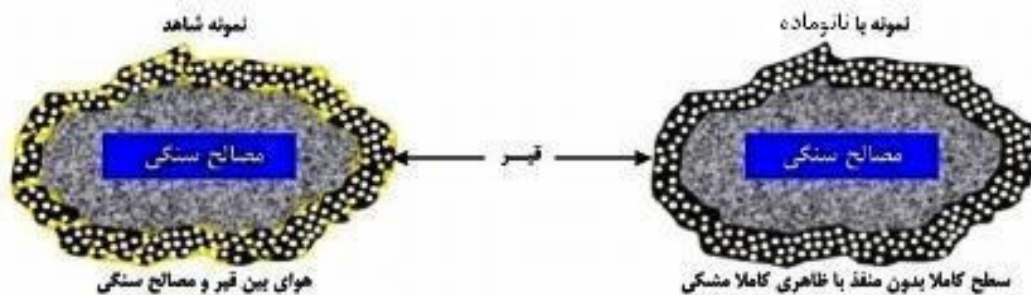


شکل ۱. الف. سطح سنگدانه ها قبل از پوشش با نانوماده، ب. سطح سنگدانه ها بعد از پوشش با نانوماده (خدایی و همکاران، ۲۰۱۳)

امر باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت می‌گردد.

قیر اصلاح شده با نانوماده به دلیل افزایش خاصیت ترکندگی، سریع‌تر به پوشش‌دهی کامل سنگدانه‌ها دست می‌یابد و باعث اشباع کامل منافذ ریز و حفره‌های سطح سنگدانه‌ها می‌شود و به دلیل از بین بردن لایه هوای موجود در سطح مصالح سنگی، باعث کاهش پتانسیل جریان شدگی و تاثیر اکسیداسیون در محل تلاقی بین قیر و مصالح سنگی می‌گردد که در شکل ۲ نشان داده شده است (حامدی، ۱۳۸۹؛ فخری و ونائی، ۱۳۹۲؛ اکسیر شرق، ۱۳۹۴).

اگر نانوماده بر روی سنگدانه‌ها اسپری شود، سطوح قطبی سنگدانه‌ها در اثر استفاده از این مواد، با تشکیل پیوندهای سیلوکسانی، به سطوح غیرقطبی تبدیل می‌شود. این سطوح غیر قطبی می‌تواند با قیر که آن هم دارای مولکول‌های عمدتاً غیر قطبی است، چسبندگی مناسبی فراهم کند. این موضوع سبب افزایش مقاومت در برابر خرابی رطوبتی در این مواد و افزایش طول عمر مخلوط آسفالتی می‌شود. پیوندهای سیلوکسانی آب‌گریزند و به دلیل نوع پیوند شیمیایی که با مصالح ایجاد می‌کنند با آب شسته نمی‌شوند و مصالح را قیردوست می‌کنند که همین



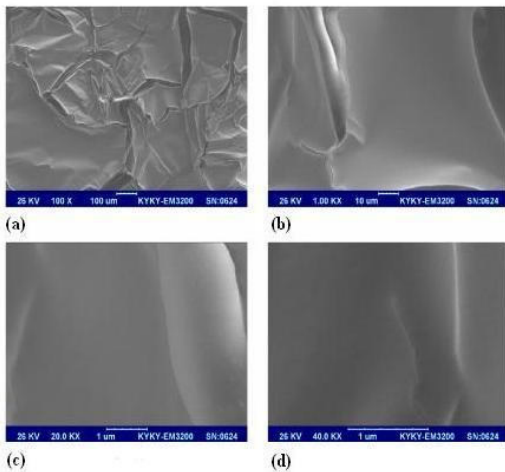
شکل ۲. اشباع کامل منافذ ریز و حفره‌های سطح سنگدانه‌ها توسط نانوماده (اکسیر شرق، ۱۳۹۴)

پخش سریع نانوماده است. به دلیل وجود نیروی جاذبه واندروالسی میان نانوساختارها، این مواد می‌توانند به سمت هم جذب شده، به هم بچسبند. در چنین شرایطی نسبت سطح به حجم در نانوساختارها کاهش می‌یابد که موجب

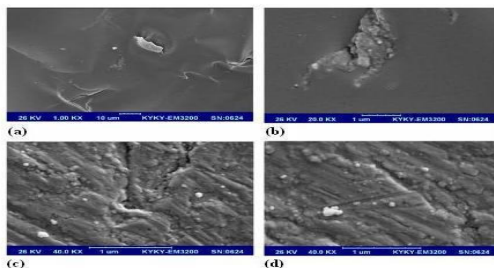
۳-۴- موارد لازم در استفاده از نانومواد ضدعریان شدگی

یکی از مشکلات در استفاده از نانومواد، تجمع نانوساختارها یا کلوخه شدن آنها است که ناشی از عدم

اندازه که ممکن است پخش و متفرق گردد. همانطور که در تصاویر SEM نشان داده شده، روش اختلاط با همزن دور بالا یک تکنیک موفق برای ترکیب نانوماده در قیر بوده و یک شبکه نانوماده- قیرچسبنده می‌سازد. همچنین، می‌توان از شکل ۴ مشاهده نمود که سطح مخصوص قیر اصلاح شده با مواد نانو، افزایش می‌یابد و این پدیده می‌تواند به چسبندگی بهتر بین قیر و سنگدانه‌ها منجر شود. در این شکل واضح است که برخی از ذرات نانوماده به طور کامل در حجم قیر چسبنده پخش شده اند و برخی به صورت گروه‌های بسیار کوچک توده شده اند (Behbahani et al., 2015).



شکل ۳. تصاویر SEM از قیر اصلاح نشده، (a) بزرگنمایی ۱۰۰، (b) بزرگنمایی ۱۰۰۰، (c) بزرگنمایی ۲۰۰۰۰، (d) بزرگنمایی ۴۰۰۰۰ (Behbahani et al., 2015)



شکل ۴. تصاویر SEM از قیر اصلاح شده با نانومواد، (a) بزرگنمایی ۱۰۰۰، (b) بزرگنمایی ۲۰۰۰۰، (c) بزرگنمایی ۴۰۰۰۰، (d) بزرگنمایی ۴۰۰۰۰ (نمای دیگر) (Behbahani et al., 2015)

تنزل برخی رفتارهای نانو ساختارها می‌شود. به عنوان مثال، مقدار فعالیت کاتالیستی نانوذرات در اثر کلوخه شدن به شدت کاهش می‌یابد.

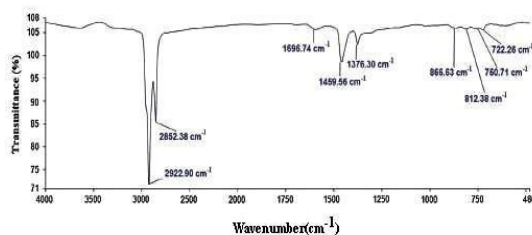
برای ایجاد پیوستگی و ترکیب مولکولی نانوماده با قیر، اختلاط صحیح نانوماده با قیر از اهمیت بسیاری برخوردار است (قرایلو و معین درباری، ۱۳۹۲). به این منظور، تولید کننده نانومواد ضدعریان شدگی، استفاده از همزن مکانیکی با دور بالا و افزودن نانومواد به صورت قطره قطره به قیر و همزدن مخلوط به دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه را پیشنهاد می‌کند. پس از تهیه مخلوط آسفالتی نیز، برای ایجاد پیوند دائمی قیر با مصالح سنگی، مخلوط آسفالتی تهیه شده با قیر اصلاحی باید در دمای تولید برای واکنش بهتر با مصالح سنگی بین ۲۰ دقیقه تا ۲ ساعت با توجه به نوع آسفالت تولیدی، قرار گیرد (اکسیر شرق، ۱۳۹۴).

۵- ساختار ظاهری قیر اصلاح شده با نانوماده ضدعریان شدگی

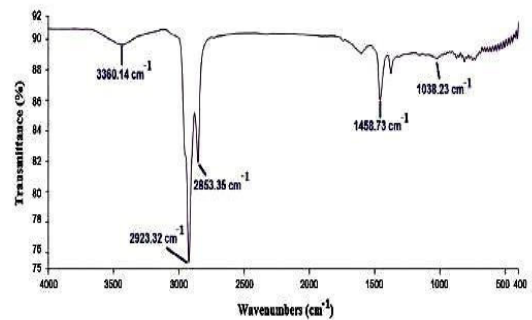
پس از عملیات اختلاط نانوماده ضدعریان شدگی با قیر، بعثت پیوندهای شیمیایی ایجاد شده، شکل و ساختار ظاهری قیر نیز تغییر می‌کند که بهترین راه برای نشان دادن تاثیرات عملیات اختلاط نانوماده اصلاح کننده با قیر، در شکل و ساختار ظاهری قیر اصلاح شده، استفاده از میکروسکوپ پوشش الکترونی SEM^۱ می‌باشد. میکروسکوپ SEM می‌تواند عکس‌هایی را در ابعاد نانو ارائه نماید. این عکس‌ها می‌تواند نشان دهنده کیفیت ظاهری عملیات اختلاط باشد. تصاویر SEM از قیر اصلاح نشده در شکل ۳ و از قیر اصلاح شده با نانوماده در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به آنچه که در شکل ۴- ب ارائه شده است، نانوماده با تشکیل یک شبکه اتصالی، تمایل شدیدی برای توده شدن نشان می‌دهد. به منظور استفاده از پتانسیل کامل نانو ماده به عنوان اصلاح کننده قیر، لازم است تا این توده های نانو ماده در قیر به هر

۶- تبدیل فوریه طیف سنجی مادون قرمز FTIR^۲

طیف سنجی مادون قرمز بر اساس جذب تابش و بررسی جهش‌های ارتعاشی مولکول‌ها و یون‌های چند اتمی صورت می‌گیرد. این روش به عنوان روشی پر قدرت و توسعه یافته برای تعیین ساختار و اندازه‌گیری گونه‌های شیمیایی به کار می‌رود. همچنین این روش عمدتاً برای شناسایی ترکیبات آلی به کار می‌رود، زیرا طیف‌های این ترکیبات معمولاً پیچیده هستند و تعداد زیادی پیک های ماکزیمم و مینیمم دارند که می‌توانند برای اهداف مقایسه‌ای به کار گرفته شوند. برای شناسایی کیفی یک نمونه مجهول، نوع گروه‌های عامل و پیوندهای موجود در مولکول‌های آن، طیف مادون قرمز نمونه را رسم نموده و با مراجعه به جداول مربوطه که موقعیت ارتعاش پیوندهای مختلف و یا طیف IR^۳ اجسام را نشان می‌دهند، طول موج یا عدد موج گروه‌ها و پیوندها را شناسایی می‌کنند (وبسایت شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو).



شکل ۵. نمودار تجزیه و تحلیل طیف سنجی مادون قرمز قیر پایه (Ameri et al., 2015)



شکل ۶. نمودار تجزیه و تحلیل طیف سنجی مادون قرمز قیر اصلاح شده با نانوماده (Ameri et al., 2015)

در تحقیقی، این تست برای تعیین ویژگی‌های عملکردی قیر پایه و قیر اصلاح شده با نانوماده در محدوده اعداد موج ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ CM^{-1} به کار گرفته شد. شکل‌های ۵ و ۶ منحنی تجزیه و تحلیل طیف سنجی مادون قرمز قیر پایه و قیر اصلاح شده با نانوماده را در ۲۵ درجه سانتیگراد نشان می‌دهند. از داده‌های طیف سنجی مادون قرمز، نقاط حداکثر در ناحیه امواج ۱۶۹۰ تا ۱۷۱۰ CM^{-1} مربوط به کشش کربونیل برای توصیف قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ناحیه امواج، ویژگی‌های گروه‌های عاملی مانند اسیدهای کربوکسیلیک، ۲-کینولون‌ها، انیدرید و کتون‌ها را پوشش می‌دهد، که برخی از آنها می‌توانند در رابطه با آسیب رطوبتی بسیار مهم باشند. اسیدهای کربوکسیلیک موجود در قیر، به شدت از سوی مصالح سیلیسی جذب می‌شوند و در اولین حضور رطوبت، تمایل دارند تا از این سنگدانه‌ها جدا شوند. موقعیت گراف‌ها در هر دو شکل تقریباً نزدیک به هم می‌باشد. تنها تفاوت در میدان ارتعاشی کشش Si-OH و Si-O در امواج ۱۰۳۸ و ۳۳۶۰ CM^{-1} به نظر می‌رسد (Ameri et al., 2013).

۷- اثر نانومواد ضدعریان شدگی بر خصوصیات رفتاری قیر

۷-۱- حساسیت حرارتی و شکل پذیری

در تحقیقاتی که در ارتباط با حساسیت حرارتی قیر اصلاح شده با نانومواد ضدعریان شدگی انجام شده، رفتارهای متفاوتی گزارش شده است. در تحقیقی که با استفاده از افزودن زایکوترم با سطح ۰/۱ درصد قیر، به قیر روسازی درجه ۳۰ VG^۴ انجام شده، افزودن زایکوترم، تغییر چشمگیری را در درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر حاصل شده در قیاس با قیر پایه ایجاد نکرده است (Research and Development Center, 2014). در پژوهش دیگری با استفاده از زایکوترم در دو سطح ۰/۱۲۵ و ۰/۱۵۰ درصد قیر و استفاده از قیر پایه CRMB 60^۵.

در بازه دمایی ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد اندازه گیری شده و مشخص شده که ویسکوزیته فیر VG 30 اصلاح شده با زایکوترم بسیار بیشتر از نمونه کنترل همان فیر در دماهای زیر ۱۲۰ درجه سانتیگراد است. ضمن اینکه در بازه دمای ۱۳۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد مقدار ویسکوزیته هر دو فیر پایه و اصلاح شده شبیه به هم می باشد (Pavement Engineering Area, 2015). با افزودن سطوح ۰/۵، ۲/۵ و ۴/۵ درصد زایکوسویل به فیر پایه ۷۰- و ۶۰ و بررسی ویسکوزیته چرخشی قیرهای اصلاحی و فیر پایه در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد مشخص شد که ویسکوزیته چرخشی با افزایش مقدار سطح مورد استفاده از زایکوسویل، افزایش می یابد، اما روند افزایشی ویسکوزیته چرخشی از سطح استفاده ۰/۵ درصد زایکوسویل به بعد کندتر می باشد (Behbahani (et al.), 2015). در تحقیق دیگری با استفاده از فیر پایه ۷۰- و ۶۰ و سطح ۰/۱ درصد زایکوترم مشخص شد که استفاده از این نانوماده تاثیر زیادی در ویسکوزیته فیر پایه نداشته است (Rafiee and Javid, 2015)؛ رفیعی و همکاران، ۱۳۹۴).

۷-۳- آزمایش های متد شارپ^۷ SHRP.

آزمایش رئومتر برش دینامیکی^۸ DSR جهت تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک فیر، اثرات دما و مدت زمان بارگذاری را بر خواص رئولوژیکی فیر، در دماهای متوسط و بالا ارزیابی می کند و نتایج آن، در تعیین ترک های خستگی و تغییر شکل های ثابت آسفالت کاربرد دارد. در تحقیقی که در آن هر دو نانوماده زایکوسویل و زایکوترم در سطوح ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد فیر مورد بررسی قرار گرفته، این آزمایش در تنش ثابت بر روی نمونه های فیر اصلاحی و فیر پایه انجام شده و نتایج نشان دادند که استفاده از سطح ۰/۱ درصد زایکوترم نسبت به سطوح استفاده بالاتر، بیشترین تاثیر را بر افزایش دمای گسیختگی فیر از خود نشان می دهد و استفاده از زایکوسویل تاثیر منفی بر این پارامترهای ویسکوالاستیک داشته است (فخری

درجه نفوذ و نقطه نرمی فیر اصلاحی نسبت به فیر پایه، با افزایش مقدار زایکوترم و در هر دو سطح استفاده شده، کاهش یافته اند (Rohit (et al.), 2015). در تحقیق دیگری با استفاده از زایکوسویل در سطوح ۰/۵، ۲/۵ و ۴/۵ درصد نسبت به درصد فیر و استفاده از فیر با درجه نفوذ ۷۰-، ۶۰، در اثر ترکیب نانوماده با فیر، درجه نفوذ کاهش یافته و نقطه نرمی افزایش یافته است و در نتیجه مقدار PI^1 نیز افزایش یافته است که این مهم بهبود حساسیت حرارتی فیر اصلاح شده را نشان می دهد که ناشی از جذب فاز مالتین فیر توسط نانوماده و در نتیجه افزایش فاز آسفالتین فیر می باشد که باعث افزایش سختی فیر می شود ضمن اینکه سختی بالای ذرات نانوماده در پی افزایش مقدار آن، بر افزایش سختی فیر مورد مطالعه در ۲۵ درجه سانتیگراد می افزاید (Behbahani (et al.), 2015).

۷-۲- ویسکوزیته

ترکیب نانومواد ضد عریان شدگی و قیرهای مختلف، نتایج متفاوتی را برای ویسکوزیته قیرهای اصلاحی نسبت به قیرهای پایه آن ها رقم زده است. در تحقیقی که در آن هر دو نانوماده زایکوسویل و زایکوترم در سطوح ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد فیر مورد بررسی قرار گرفته و از فیر با درجه نفوذ ۱۰۰- تا ۸۵ استفاده شده، ویسکوزیته چرخشی در بازه دمایی ۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده که ویسکوزیته چرخشی فیر با افزایش سطح استفاده از این نانومواد کاهش می یابد. کاهش ویسکوزیته چرخشی با افزایش دمای محیط آزمایش، کمتر شده و ویسکوزیته چرخشی فیر اصلاح شده در دماهای بالاتر به ویسکوزیته چرخشی فیر پایه نزدیک تر شده است. در این تحقیق، استفاده از نانوماده زایکوسویل نسبت به نانوماده زایکوترم، ویسکوزیته چرخشی فیر پایه را، بیشتر کاهش داده است (فخری و همکاران، ۱۳۹۳). در پژوهشی دیگر که با افزودن زایکوترم با سطح ۰/۱۵ درصد فیر به فیر روسازی درجه VG 30 انجام شده، ویسکوزیته چرخشی فیر اصلاحی و فیر پایه

رطوبتی را بر مبنای تئوری‌های مکانیکی توصیف نموده و آثار آن را در مقیاس ماکرو بررسی کرده‌اند. بطور کلی، آزمایش‌هایی که تاکنون، به این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند را می‌توان به دو دسته کلی آزمایش‌های کیفی و کمی تقسیم کرد. آزمایش‌های کیفی که بر روی مخلوط متراکم نشده آسفالت انجام می‌گیرند، بررسی نظری از مقدار عریان شدگی به عمل می‌آورند که مهم‌ترین آنها شامل آزمایش‌های آب جوشان و روش انرژی آزاد سطحی می‌باشد. آزمایش‌های کمی که بر روی مخلوط متراکم شده آسفالت انجام می‌گیرند، یک مقدار عددی برای پارامتری مشخص مانند مقاومت بدست می‌دهند که مهم‌ترین این آزمایش‌ها شامل آزمایش کشش غیرمستقیم، آزمایش نسبت مقاومت اشباع به خشک مارشال، آزمایش مدول برجهدگی، آزمایش خزش دینامیکی و آزمایش اثر چرخ هامبورگ یا ویل تراک هستند.

۸-۱- آزمایش‌های بر روی مخلوط‌های متراکم نشده آسفالت حاوی نانومواد

۸-۱-۱- آزمایش آب جوشان و پوشش دهی مصالح سنگی

در تحقیقی نتایج آزمایش آب جوشان نشان داد که سنگدانه‌های پوشیده شده با قیر پایه پس از ده دقیقه قرار گیری در آب جوش، نهایتاً حدود ۲۰ درصد از پوشش قیری خود را حفظ کردند، در صورتیکه سنگدانه‌های پوشیده شده با قیر اصلاحی حاوی زایکوترم حتی پس از یک ساعت ماندگاری در آب جوشان، حدود ۹۵ درصد پوشش قیری خود را دارا بودند (Research and Development Center, 2014). در تحقیقی در سه بازه دمایی ۹۵، ۱۱۵ و ۱۳۵ و در طول فرایند اختلاط، زمان پوشش یافتن سنگدانه‌ها توسط قیر پایه و قیر اصلاح شده با زایکوترم در درجه پوشش ۵۰، ۷۵، ۹۰ و ۱۰۰ درصد یادداشت شد و مشخص شد وقتی از زایکوترم استفاده شده است، سنگدانه‌ها زودتر پوشش پیدا می‌کنند و بطور میانگین، ۲۰ درصد زمان کمتری برای پوشش سنگدانه‌ها

و همکاران، ۱۳۹۳). این آزمایش در تحقیق دیگری که با استفاده از سطح ۰/۱ درصد زایکوترم و قیر پایه با درجه VG 30 در محدوده دمایی ۶۴ تا ۸۲ درجه سانتیگراد انجام پذیرفته، بی اثر بودن زایکوترم را با نتیجه‌ای برابر برای هر دو قیر اصلاح شده و اصلاح نشده نشان داده است (Research and Development Center, 2014).

آزمایش‌های لعاب نازک چرخشی قیر^۹ RTFOT و آزمایش محفظه تحت فشار^{۱۰} PAV با هدف شبیه سازی پیرشدگی قیر به کار می‌روند. علت پیرشدگی قیر تبخیر روغن‌های سبک آن و اکسیداسیون می‌باشد. آزمایش لعاب نازک چرخشی قیر، این پیر شدگی را مدل کرده و مقدار کاهش جرم را معلوم می‌نماید. برای هر نوع ماده چسبنده، افت وزن نباید از ۱٪ تجاوز کند.

در تحقیقی، هر دو آزمایش لعاب نازک چرخشی و محفظه تحت فشار بر روی قیر پایه با درجه VG-30 و اصلاح شده آن با سطح ۰/۱ درصد زایکوترم در محدوده دمای ۶۴ تا ۸۲ درجه سانتیگراد انجام پذیرفته است. نتایج این دو آزمایش، بی اثر بودن استفاده از زایکوترم را با ارائه نتایج یکسان برای هر دو قیر پایه و اصلاح شده نشان داده‌اند. البته در این تحقیق با انجام آزمایش لعاب نازک چرخشی قیر و انجام آزمایش شکل پذیری، مشخص شده که قیر اصلاحی علاوه بر مقاومت بیشتر در برابر اکسیداسیون هوا، نسبت به قیر پایه دارای حساسیت حرارتی کمتری می‌باشد (Research and Development Center, 2014).

۸- اثر نانومواد ضدعریان شدگی بر خصوصیات رفتاری آسفالت

محققین در تحقیقات خود عموماً به بررسی میکرومکانیسم‌ها و ماکرومکانیسم‌های عریان شدگی پرداخته‌اند و به این منظور برخی به بررسی چسبندگی و پیوستگی قیر و سنگدانه و نیز تخریب این پیوندها در مقیاس مولکولی پرداخته‌اند و برخی دیگر نیز وقوع گسیختگی چسبندگی و پیوستگی و بطور کلی خرابی

می‌شود. سنگدانه‌ها دارای اجزای انرژی آزاد سطحی اسیدی و بازی بزرگی هستند. در حالیکه این اجزا در قیرها بسیار ضعیف است. این موضوع باعث می‌شود که چسبندگی مناسبی بین قیر-سنگدانه به وجود نیاید یا به راحتی شکسته شود. این مورد درباره سنگدانه های اسیدی نمایش مشهودتری دارد. استفاده از نانومواد ضد عریان‌شدگی سبب شده است تا جز اسیدی انرژی آزاد سطحی قیر کاهش و جز بازی آن افزایش یابد. این مطلب سبب می‌شود تا چسبندگی بهتری بین قیر اصلاحی با مواد اسیدی که دارای جز اسیدی بزرگتر و جز بازی کوچکتر هستند، فراهم شود. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن نانومواد ضدعریان‌شدگی سبب شده است که انرژی آزاد سطحی کل قیر نیز افزایش یابد و استفاده از سطوح بالاتر نانومواد نیز به کلیه مراحل این روند کمک بیشتری می‌کند (مقدس نژاد و همکاران، ۱۳۹۳؛ Arabani (et al.), 2012؛ غلام نژاد و منصوریان، ۱۳۹۴).

۸-۱-۲-۲- در اسپری نمودن محلول نانوماده بر روی مصالح سنگی

نانومواد، انرژی آزاد سطحی مصالح را با افزایش فاز غیرقطبی مصالح که منجر به افزایش قابلیت خیس شدگی مصالح توسط قیر می‌شود، تغییر می‌دهد. نانومواد جزء اسیدی انرژی سطحی را کاهش و جزء بازی آن را افزایش می‌دهد. چون قیر خاصیت اسیدی دارد، این تغییرات در اجزای انرژی آزاد سطحی مصالح، شرایط مساعدی برای چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی خصوصاً سنگدانه های مستعد عریان شدگی بوجود می‌آورد. این افزایش جزء بازی و کاهش جزء اسیدی انرژی آزاد سطحی در سنگدانه‌هایی که خاصیت آبدوستی بیشتری دارند مشهودتر می‌باشد. با بررسی انرژی آزاد سطحی اسیدی - بازی (قطبی) مصالح سنگی مشاهده می‌شود که پوشش مصالح با نانومواد باعث می‌شود انرژی آزاد سطحی قطبی مصالح، کاهش یابد. کاهش قطبیت مصالح، منجر به کاهش پذیرش

مورد نیاز است که در نتیجه با ارزیابی شرایط اجرایی، زمانی که از زایکوترم استفاده می‌شود مدت زمان کمتری برای میکس نیاز بوده و زمان عملیات تولید آسفالت کاهش یافته و سرعت عملیات بالا می‌رود (Transfer Centre) (for the Road Sector, 2015). تولید کننده نانومواد ضدعریان شدگی مدت زمان کمتر برای مخلوط نمودن قیر اصلاحی با سنگدانه‌ها را در مقایسه با استفاده از قیر پایه توصیه نمی‌کند، چرا که این زمان کوتاه تر، مانع ایجاد ضخامت یکنواخت فیلم قیر و نیز پخش شدن قیر روی تمام بخش‌های مصالح سنگی مخصوصاً ریزدانه‌ها و فیلرها می‌شود (اکسیر شرق، ۱۳۹۴).

۸-۱-۲-۱- انرژی آزاد سطحی

۸-۱-۲-۱-۱- در اختلاط نانوماده با قیر

قیر مخلوطی همگن و تک فاز، متشکل از مولکول‌های متفاوتی است که این مولکول‌ها را می‌توان در دو گروه قطبی و غیرقطبی قرار داد. مولکول‌های غیرقطبی موجود در قیر به عنوان یک شبکه و یا حلالی برای مولکول‌های قطبی عمل می‌کنند که این موضوع سبب شکل‌گیری شبکه ضعیفی از ترکیبات قطبی - قطبی می‌شود که باعث خاصیت الاستیک قیر در دماهای پایین می‌باشد. مواد قطبی به صورت یکسان در کل فضای قیر پخش شده است که افزایش دما باعث می‌شود تا پیوند بین مولکول‌های قطبی شکسته شود و این ماده جامد به یک سیال با رفتار غیرنیوتونی تبدیل شود. قیرهایی که قسمت‌های قطبی در آنها زیاد است در برابر خرابی‌های خستگی در روسازی‌های نازک، ترک خوردگی‌های حرارتی و شکنندگی ضعیف است. قیر خوب ترکیب مناسبی از مواد قطبی و غیرقطبی است، چراکه اگر قیری دارای قسمت‌های غیرقطبی زیاد هم باشد، دارای وزن مولکولی پایین بوده و در معرض خستگی در روسازی‌های ضخیم، خرابی رطوبتی و شیارشدگی قرار دارد. بیشتر مولکول‌ها و یا گروه‌های مولکولی تشکیل دهنده قیر خاصیت اسیدی دارند و بر این اساس، قیر یک ماده اسیدی شناخته

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، متداولترین آزمایشی است که برای بررسی مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی و نیز برای بررسی تاثیر مواد ضد عریان شدگی به کار می‌رود. این آزمایش، اصلاح شده آزمایش لاتمن که در دانشگاه ایداهو در سال ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفته است، می‌باشد و شرح آن در استاندارد AASHTO T-283 آمده است. این روش شامل تهیه نمونه‌های آسفالتی و اندازه‌گیری تغییرات مقاومت کششی قطری آنها در اثر اشباع‌سازی و عمل‌آوری رطوبتی تسریع شده با یک چرخه ذوب و انجماد برای مخلوطهای آسفالتی متراکم می‌باشد. نتایج آزمایش را می‌توان برای پیش بینی حساسیت دراز مدت عریان شدگی مخلوطهای آسفالتی گرم و نیمه گرم و ارزیابی اثر مایعات افزودنی ضد عریان‌شدگی که به قیر خالص اضافه می‌شوند و یا جامدات پودری مانند آهک هیدراته یا سیمان پرتلند که به مصالح سنگی اضافه می‌شوند، به کار برد (AASHTO T-283-07).

استفاده از هر سطح نانومواد ضدعریان‌شدگی در تحقیقات مختلفی که از جنس سنگدانه‌های متفاوت و حتی از خرده شیشه و یا تراشه آسفالت در مخلوطهای آسفالتی استفاده نموده بودند، نشان از بهبود مقاومت کششی غیر مستقیم، در حالت‌های خشک و عمل‌آوری شده نسبت به نمونه‌های کنترل بوده است و نسبت کشش غیر مستقیم را به حد قابل قبولی افزایش داده است (Moghadas Nejad et al.), 2012; Behbahani (et al.), 2015; Pavement Engineering Area, 2015؛ بهبهانی و ایازی، ۱۳۹۳). همانگونه که بیان گردید، روش استاندارد این آزمایش دارای یک چرخه ذوب و انجماد برای مخلوطهای آسفالتی متراکم می‌باشد، اما در تحقیقاتی که تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب این آزمایش را بیشتر نموده بودند نیز، حتی پس از چرخه‌های چهارم و پنجم انجماد-ذوب، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده حاوی نانومواد نسبت به نمونه کنترل نتایج بهتری را نشان داده و نسبت کشش غیر مستقیم در حد قابل قبولی

رطوبت سطح مصالح می‌شود. زمانیکه انرژی آزاد سطحی قیر و مصالح سنگی مشخص شدند، انرژی آزاد چسبندگی با و بدون وجود آب، قابل محاسبه است. اگر انرژی آزاد چسبندگی منفی باشد، دو ماده تمایل دارند به شکلی به یکدیگر متصل شوند و در این مورد، کمترین حجم مقدار منفی چسبندگی، مقاومت بیشتر پیوند را نشان می‌دهد. اگر انرژی آزاد چسبندگی مثبت باشد، قیر و مصالح از یکدیگر خود به خود جدا می‌شوند. باید ذکر شود که پیوندهای قیر - مصالح، بسیار ضعیفتر از پیوندهای آب - مصالح هستند. انرژی آزاد چسبندگی در صورت وجود آب، از یک مقدار مثبت به یک مقدار منفی، در تمام موارد بررسی شده، تغییر می‌کند. این تغییر قابل انتظار بوده، زیرا انرژی آزاد سطحی آب، بسیار بالاتر از قیر است؛ بنابراین اگر یک سطح سه فاز، شامل مصالح، قیر و آب وجود داشته باشند، آب، انرژی سطحی سیستم را افزایش می‌دهد تا یک شرایط ثابت ترمودینامیکی انرژی ماکزیمم سطح، شکل گیرد. تفاوت بین انرژی آزاد چسبندگی مصالح - قیر در شرایط خشک و تر، با میزان انرژی آزاد شده در زمان وقوع عریان شدگی، برابر است. بنابراین، یک تفاوت بالاتر به تمایل بیشتر مخلوط آسفالت به عریان شدگی ارتباط دارد. با اصلاح سطح مصالح با نانومواد، این تفاوت کاهش می‌یابد، که باعث می‌شود ترکیب مقاومت بیشتری نسبت به عریان شدگی پیدا کند. همچنین تفاوت بین انرژی آزاد سطح قیر - مصالح و مصالح - آب، باعث عریان شدگی مصالح می‌شوند. با افزایش این تفاوت، روند عریان شدگی مصالح در صورت وجود آب، افزایش می‌یابند. این پارامتر در نمونه‌های تهیه شده با مصالح اصلاح نشده، بالاتر است، و استفاده از نانومواد، باعث کاهش این مقادیر می‌شود (Khodaii et al.), 2013).

۸-۲- آزمایش‌های بر روی مخلوطهای متراکم شده

آسفالت حاوی نانومواد

۸-۲-۱- خصوصیات مقاومتی مخلوط آسفالتی

۸-۲-۱-۱- مقاومت کششی غیر مستقیم

انرژی شکست نمونه مخلوط‌های اصلاح شده با زایکوسویل، بزرگتر از مقادیر مربوط به مخلوط کنترل و حتی مخلوط اصلاح شده با دوغاب آهک می‌باشد و با توجه به نتایج بدست آمده از چرخه های مختلف انجماد-ذوب، مخلوط اصلاح شده با زایکوسویل همیشه انرژی شکست بالاتری نسبت به مخلوط کنترل و مخلوط اصلاح شده با دوغاب آهک، دارا می‌باشد. همچنین استفاده از زایکوسویل یک چسبنده منسجم تر و با چسبندگی بهتر به سطح سنگدانه‌ها به وجود می‌آورد، که این مهم، از مقاومت بالا و همچنین از مقدار بالاتر تغییر مکان در حداکثر بار، برای نمونه حاوی زایکوسویل مشهود است. بنابراین، هنگامی که یک مخلوط با زایکوسویل اصلاح شده، انرژی بیشتری برای شکستن پیوند بین سنگدانه و چسبنده در هر دو شرایط خشک و مرطوب مورد نیاز است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر یک مخلوط آسفالت بار بیشتری تحمل کند و همچنین، تغییر شکل نیز در هنگام شکست آن بیشتر باشد، مقاومت بیشتری نسبت به آسیب رطوبتی خواهد داشت (Ameri et al., 2013).

۸-۲-۲- سختی و خصوصیات تغییر شکل مخلوط‌های آسفالتی

۸-۲-۲-۱- مدول دینامیکی و ایندکس P^{11} در تحقیقات مختلف، استفاده از سطوح مختلف نانومواد ضدعریان شدگی، مدول برجهندگی MR^{12} مخلوط‌های آسفالتی را در حالت‌های خشک و عمل آوری شده نسبت به نمونه‌های کنترل بهبود بخشیده است. در تحقیقی نمونه‌های حاوی زایکوسویل و سنگدانه های سیلیسی که در سیکل های بالاتر انجماد - ذوب عمل آوری شده بودند، در بارگذاری این آزمایش دوام نیاورده و خراب شدند (Ameri et al., 2013). در تحقیق دیگری، مدول برجهندگی مخلوط آسفالت نیمه گرم که با استفاده از سطح ۰/۱۵ درصد از زایکوترم در دمای ۱۳۵ و ۱۴۵ درجه سانتیگراد تهیه شده، نسبت به مخلوط آسفالت گرم فاقد نانوماده، که در دمای ۱۵۵ درجه سانتیگراد تولید

باقیمانده است (مقدس نژاد و همکاران، ۱۳۹۳؛ مهدی نظر و همکاران، ۱۳۹۳؛ Ameri et al., 2013).

۸-۲-۱-۲- نسبت مقاومت اشباع به خشک مارشال

نسبت متوسط مقاومت سه نمونه آزمایشگاهی مارشال که با استفاده از متد مارشال و استاندارد ASTM D1559 متراکم شده و ۲۴ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب 60 ± 1 درجه سانتیگراد قرار گرفته باشند به متوسط مقاومت سه نمونه دیگر که ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در داخل آب 60 ± 1 درجه سانتیگراد نگهداری شوند، به عنوان یکی از پارامترهای دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر آب تعیین گردیده است.

استفاده از نانومواد ضدعریان شدگی در تحقیقات مختلفی که از جنس سنگدانه‌های متفاوت درمخلوط‌های آسفالتی استفاده نموده بودند، مقاومت فشاری نمونه‌های مارشال، درحالت‌های خشک و اشباع را نسبت به نمونه های کنترل بهبود بخشیده و نسبت مقاومت نمونه‌های اشباع شده به خشک مارشال را به حد قابل قبولی افزایش داده است (آباد کیفیت پارس، ۱۳۹۰؛ Research and Development Center, 2014).

۸-۳-۱-۲- انرژی شکست

در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، با ثبت تغییرات نمونه مورد آزمایش نسبت به میزان بار وارد شده بر آن، تا لحظه شکست نهایی نمونه، می‌توانیم منحنی میزان بار- تغییرات نمونه را رسم نماییم. مساحت بدست آمده از سطح زیر منحنی تغییرات نمونه، مقدار کار مورد نیاز برای شکستن نمونه است که از تقسیم آن بر حاصلضرب ضخامت در قطر نمونه، انرژی شکست نمونه بدست می‌آید. در تحقیقی که اثرات مجزای دوغاب آهک و نانوماده زایکوسویل را در مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده با دو نوع سنگدانه آهکی و سیلیسی و قیر پایه ۷۰-۶۰ در چرخه های متعدد انجماد-ذوب ارزیابی نموده، نتایج نشان دادند که سطح زیر منحنی بار- تغییرات نمونه و مقادیر

شرایطی که تحت آن آزمایش انجام شده است، مانند دما و سرعتی که بار اعمال می‌شود، می‌باشد. در تحقیقی تغییرات مدول سختی در دماهای مختلف برای مخلوط های آسفالتی که شامل درصدهای مختلف زایکوسویل بودند انجام پذیرفت.

نتایج نشان دادند که تغییرات در درصد سطوح مختلف مورد استفاده زایکوسویل، تفاوت قابل توجهی در مدول سختی نمونه های آسفالتی ایجاد می‌کند. افزایش سفتی قیر به دلیل استفاده از زایکوسویل دلیل اصلی برای افزایش مدول سختی نمونه آسفالتی می‌باشد. افزایش دما نیز، منجر به کاهش مدول سختی نمونه های آسفالتی می‌شود. این روند کاهشی به علت افزایش حساسیت دمایی در مقدار قیر استفاده شده است. مقدار قیر مخلوط های آسفالتی به دلیل ویژگی های طبیعی آن، به تغییرات دما بسیار حساس است و با کاهش مقدار قیر، این حساسیت کاهش خواهد یافت. اما با کاهش مقدار قیر به کمتر از مقدار قیر بهینه، خواص دیگر مخلوط آسفالتی از جمله استحکام مارشال، وزن مخصوص، درصد فضای خالی و پوشش دهی قیر روی سنگدانه ها از درجه اعتبار ساقط می‌شود. بنابراین ما نمی‌توانیم مقدار قیر را بیش از یک مقدار مشخصی کاهش دهیم (Behbahani (et al.), 2015).

۸-۲-۲-۳- خزش دینامیکی

در تحقیقی مقدار تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالتی در دو سطح مختلف تنش (۲۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال) برای درصدهای مختلف نانوماده زایکوسویل بررسی شده است. که با افزودن نانوماده زایکوسویل، تغییر شکل دائمی نمونه‌های مخلوط آسفالتی کاهش یافته است. افزایش سفتی بیشتر قیر اصلاح شده و فضای خالی کمتر بین سنگدانه به دلیل زایکوسویل به کاهش تغییر شکل دائمی منجر شده است. در نتیجه، روسازی آسفالتی مقاومت بیشتری در برابر بار دارد و تغییر شکل دائمی کمتر در آسفالت رخ میدهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از درصد مقادیر بیشتر زایکوسویل تاثیر بهتری

شده، مقادیر بهتری در دمای آزمایش ۴۵ و ۳۵ درجه سانتیگراد دارد، ضمن اینکه از آزمایش همین نمونه های آسفالت نیمه گرم در دمای آزمایش ۲۵ درجه سانتیگراد نیز یک مقدار قابل قبول از مدول برجهندگی نسبت به نمونه آسفالت گرم نتیجه شده است (Pavement Engineering Area, 2015). استفاده از نانومواد ضدعریان‌شدگی نسبت مدول برجهندگی^{۱۳} MRR مخلوط‌ها را نسبت به مخلوط کنترل بهبود می‌بخشد (خدای-کوچکی-منصوریان-عربانی). هر دوی مواد زایکوسویل و زایکوترم اثرات آشکاری را بر روی MRR حتی برای مخلوط های سیلیسی در تمام سیکلهای انجماد- ذوب داشتند (Ameri (et al.), 2013). آسیب رسانی رطوبت به مخلوط‌های آسفالتی، با محاسبه درصد محدوده سطح مصالح که در آن آب جایگزین قیر می‌شود (ایندکس P)، بهتر فهمیده می‌شود. از ترکیب نتایج آزمایش مدول برجهندگی و روش انرژی آزاد سطح، ایندکس P (درصد محدوده سطح مصالح که به دلیل هر سیکل بارگیری، در معرض آب قرار می‌گیرند)، به دست می‌آید. استفاده از نانومواد ضدعریان شدگی، ایندکس P را در مخلوط های مورد آزمایش کاهش داده و میزان این کاهش در مخلوط های حاوی سنگدانه های آبدوست، نسبت به مخلوط های حاوی سنگدانه های قیر دوست موثرتر است (غلام نژاد و منصوریان، ۱۳۹۳؛ Arabani (et al.), 2012; Khodaii (et al.), 2013).

۸-۲-۲-۲-۸- مدول سختی

مدول سختی یک عامل مهم در پیش بینی مقاومت روسازی نسبت به بارگذاری دینامیکی می‌باشد. هر نوع مشاهده رفتار خستگی و انطباق خزش و یا هر شرایط دیگر ترک خوردگی، مانند ترک خوردگی انعکاسی، نیاز به پیروی از تعیین مدول سختی نمونه دارد، که از طریق آزمون^{۱۴} ITSM انجام می‌شود. پتانسیل تغییر شکل مواد تحت بارگذاری به وسیله مدول سختی ارزیابی می‌شود، که به طور مستقیم تحت تاثیر بعضی خواص کیفیتی مواد و

در نتیجه می‌توان اینگونه استنباط نمود که با استفاده از زایکوترم و کاهش دمای تولید مخلوط آسفالتی به اندازه ۲۰ درجه سانتیگراد، می‌توان نتایج یکسانی را در تست ویل تراک در هر دو مخلوط آسفالتی گرم و نیمه گرم شاهد بود (Pavement Engineering Area, 2015).

۸-۲-۳- خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی

رفتار خستگی ترکیبات آسفالت گرم، سالهای زیادی است که بررسی می‌شود. در تحقیقی با اسپری نمودن محلول زایکوسویل بر روی سنگدانه‌های آهکی و سیلیسی، تستهای خستگی در هر دو حالت کشش کنترل شده و تنش کنترل شده اجرا شده‌اند. در حالت کشش کنترل شده، کشش با کاهش تنش روی نمونه‌ها، حفظ شده است. در حالت تنش کنترل شده، تنش از ثابت به حالت افزایشی نگهداشته شده تا کشش در نمونه افزایش یابد. نتایج این تحقیق نشان دادند که استفاده از زایکوسویل در مخلوط آسفالتی، عمر خستگی آنها را به دو دلیل افزایش می‌دهد. ابتدا، سنگدانه‌های پوشیده شده با زایکوسویل ممکن است میزان فیلر را افزایش و فضای خالی در ترکیبات آسفالت را کاهش دهند و دوم، زایکوسویل سطح سنگدانه‌ها را تغییر می‌دهد و باعث فشردگی بهتر ترکیبات آسفالت می‌شود. اثر زایکوسویل در افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه‌های گرانیتی مشهودتر از مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه‌های آهکی می‌باشد (Moghadas Nejad (et al.), 2012).

۸-۲-۴- تاثیر بر پارامترهای طرح اختلاط آسفالت

استفاده از قیر پایه ۷۰-۶۰ و سطح ۰/۱ درصد نانوماده زایکوترم در طرح اختلاط به روش مارشال، تاثیر چندانی بر میزان قیر بهینه، وزن مخصوص و درصد فضای خالی نمونه‌های آسفالتی نسبت به نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با قیر پایه ندارد (زیاری و همکاران، ۱۳۹۴). این موضوع در استفاده از سطح ۰/۱ درصد زایکوسویل و قیر

برکشش نهایی نمونه‌های آسفالت دارد (Behbahani et al., 2015). در تحقیق دیگری خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم حاوی سطح ۰/۱۵ درصد زایکوترم که در دماهای ۱۲۵، ۱۳۵ و ۱۴۵ تولید شده بودند به همراه نمونه آسفالت گرم فاقد نانوماده که در دمای ۱۵۵ درجه سانتیگراد تولید شده بود، با سیکل بارگذاری افزایشی ۱۰۰ کیلوپاسکال تا ۳۶۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد که کمترین تغییر شکل مربوط به نمونه آسفالت نیمه گرم ۱۴۵ درجه و ۱۳۵ درجه سانتیگراد بودند و مقاومت بیشتری را در برابر تغییر شکل دائمی در قیاس با نمونه آسفالت گرم کنترل نشان دادند، ضمن اینکه نمونه آسفالت نیمه گرم تولید شده در دمای ۱۲۵ درجه حتی از نمونه آسفالت گرم شرایط تغییر شکل بدتری داشت (Pavement Engineering Area, 2015).

۸-۲-۴- شیارشدگی

با توجه به اینکه از مقادیر تغییر مکان تجمعی در آزمایش خزش، نمی‌توان عمق شیار را نتیجه گرفت، بنابراین برای اندازه‌گیری عمق شیار از آزمایش ویل تراک استفاده می‌کنند. در تحقیقی که با افزودن سطح ۰/۱ درصد زایکوترم به قیر با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ و تولید مخلوط آسفالتی نیمه گرم در ۱۳۵ درجه سانتیگراد انجام شده است، نتایج آزمایش ویل تراک نشان داد که مقاومت در برابر شیارشدگی این مخلوط آسفالتی زیاد نیست و استفاده از نانومواد ضد عریان شدگی تاثیر چندانی نداشته است (زیاری و همکاران، ۱۳۹۴). در تحقیق دیگری با افزودن سطح ۰/۱۵ درصد زایکوترم به قیر پایه با درجه VG 30 و تولید مخلوط آسفالت نیمه گرم در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد و نیز تولید مخلوط آسفالت گرم از قیر پایه، بدون افزودنی در دمای ۱۵۵ درجه سانتیگراد، هر دو مخلوط مورد آزمایش ویل تراک قرار گرفتند و نتایج بیانگر کاهش عمق شیار ایجاد شده به اندازه یک میلی‌متر در نمونه آسفالت نیمه گرم نسبت به نمونه آسفالت گرم می‌باشد.

سطح ۰/۱۲۵ درصد زایکوترم مناسب تر می باشد و استفاده از درصد بالاتر نانوماده، تاثیر زیادی در مشخصه‌ها ندارد و حتی درصد فضای خالی را افزایش می‌دهد و روانی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد (Rohit et al., 2015).

۹- نتیجه‌گیری

از بررسی‌های انجام شده در تحقیقات مختلف اینگونه استنباط می‌شود که استفاده از نانومواد ضدعریان شدگی، شاخصه‌های مقاومتی مربوط به عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی را، حتی اگر به میزان مصوب شده در آئین نامه‌ها نرساند، نسبت به مخلوط‌های کنترل تهیه شده با قیر پایه بهبود می‌بخشد و نیز تاثیر نانومواد ضدعریان شدگی بر مشخصه‌های فنی و فیزیکی قیر و سایر مشخصه‌های مخلوط‌های آسفالتی به عوامل و متغیرهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی بستگی دارد که به یکدیگر وابسته می‌باشند. طریقه افزودن و تجهیزات افزودن نانوماده به قیر یا مصالح سنگی، دمای قیر هنگام اختلاط با نانومواد، نوع و ساختار شیمیایی قیر مصرفی، دمای قیر اصلاحی در هنگام استفاده، نوع کانی‌ها و اندازه سنگدانه‌های مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی، دمای تهیه مخلوط آسفالتی از قیر اصلاحی، دمایی که در آن آزمایش‌ها انجام گرفته و میزان سطح مورد استفاده از نانومواد از جمله عواملی هستند که بر تاثیر نانومواد ضدعریان شدگی در قیر و مخلوط‌های آسفالتی و نتایج آزمایش‌های انجام شده در تحقیقات مختلف، اثر مستقیمی داشته‌اند. در کنار این عوامل، اجرایی بودن طریقه استفاده از نانومواد و نزدیک بودن شرایط آزمایش‌ها با شرایط اجرایی استفاده از نانومواد و نیز برآورد اقتصادی استفاده از این نانو مواد افزودنی نسبت به سایر افزودنی‌های ضدعریان شدگی را باید در نظر گرفت و اثرات استفاده از نانومواد ضدعریان شدگی را جهت پروژه‌های اجرایی، مورد بررسی دقیق تری قرار داد.

۷۰-۶۰ نیز صدق می‌کند (آبادکیفیت پارس، ۱۳۹۰). در تحقیقی با استفاده از قیر پایه درجه VG 30 و سطح ۰/۱ درصد زایکوترم، تنها مقاومت فشاری نمونه‌های مارشال در هر دو حالت خشک و اشباع شده و روانی نمونه‌ها افزایش داشته است (Research and Development Center, 2014). در این زمینه تحقیقات دیگری نیز انجام شده که در این تحقیقات از دماهای متفاوت جهت تولید و تراکم مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. با استفاده از قیر پایه ۷۰-۶۰ و سطح ۰/۱ درصد زایکوترم و تولید مخلوط آسفالتی به روش مارشال در دماهای ۱۳۰، ۱۴۵ و ۱۶۰ درجه سانتیگراد و متراکم نمودن این مخلوط‌ها، به ترتیب در دمای متناظر ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ درجه سانتیگراد، مشخص شد که نمونه‌های حاوی قیر اصلاح شده نسبت به نمونه‌های ساخته شده با قیر پایه در دمای مشابه، وضعیت بهتری داشتند و درصد فضای خالی نمونه‌ها کاهش و مقاومت فشاری و وزن مخصوص آن‌ها افزایش داشته است. اما روانی نمونه‌ها جواب مشخصی را نشان نداده است (Rafiee and Javid, 2015)؛ رفیعی و همکاران، ۱۳۹۴). در تحقیقی دو نوع دانه‌بندی ۱۹-۰ و ۱۶-۰ میلی‌متر و قیرهای پایه 25/55-55A و 50/70 جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی در ۱۳۵ درجه سانتیگراد استفاده شده و سپس با همین مصالح و افزودن سطح ۰/۱۵ درصد زایکوترم به قیرهای پایه، مخلوط آسفالتی‌هایی در ۹۵، ۱۱۵ و ۱۳۵ درجه سانتیگراد ساخته شده است. هیچکدام از پارامترهای مقاومت فشاری و درصد فضای خالی مخلوط‌های تهیه شده با قیر اصلاحی تفاوت چندانی را با مخلوط آسفالتی تهیه شده با قیر پایه نداشته‌اند و تنها در مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده با سنگدانه ۱۶-۰ میلی‌متر، با کاهش دمای تولید از ۱۳۵ درجه سانتیگراد، درصد فضای خالی نمونه‌های متراکم مخلوط آسفالتی افزایش یافته است (Transfer Centre for the Road Sector, 2015). تحقیق آزمایشگاهی دیگری با استفاده از قیر CRMB 60 و استفاده از زایکوترم در دو سطح ۰/۱۲۵ و ۰/۱۵۰ درصد انجام شد و نتایج نشان دادند که استفاده از

۱۰- پی نوشت ها

مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه های عمرانی، ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۳، گرگان، ایران.

- فخری، م.، و بوالحسنی، م.، (۱۳۸۹)، "بررسی تاثیر استفاده همزمان فیلر آهکی و آنتی استریپینگ مایع بر روی خرابی عریان شدگی بتن آسفالتی گرم"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ۱۳۸۹، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

- فخری، م.، توسطی خیری، پ.، (۱۳۸۸)، "ارائه یک مدل جهت بررسی تاثیر افزودنی های مختلف بر پدیده عریان شدگی مخلوط های آسفالتی گرم"، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت ۱۳۸۸، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

- فخری، م.، و ونائی، و.، (۱۳۹۲)، "ارزیابی رئولوژیکی تاثیر نانو ضدعریان کننده مایع بر خواص رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم"، دومین کنفرانس ملی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، ۸ الی ۹ اسفند ۱۳۹۲، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

- فخری، م.، ونائی، و.، راهی، م.، (۱۳۹۳)، "ارزیابی رئولوژیکی تاثیر نانو مصالح مایع بر خواص و عملکرد قیر"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۷ الی ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۳، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران.

- کریم نیا، ع.ر.، (۱۳۹۱)، "بررسی دستاوردهای نانوفناوری در حوزه روسازی راه"، کنفرانس ملی زیرساخت های حمل و نقل، ۲۴ و ۲۵ بهمن ۱۳۹۱، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

- مقدس نژاد، ف.، حامدی، غ.ج.، آذرهوش، ع.، (۱۳۹۳)، "تاثیر استفاده از افزودنی های ضد عریان شدگی بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت گرم"، ششمین همایش

1. Scanning Electron Microscopy (SEM)
2. Fourier Transformed Infrared Spectroscopy (FTIR)
3. Internal Reflection (IR)
4. Viscosity Grade (VG)
5. Crumb Rubber Modified Bitumen (CRMB)
6. Penetration Index (PI)
7. Strategic Highway Research Program (SHRP)
8. Dynamic Shear Rheometer (DSR)
9. Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT)
10. Pressure Aging Vessel (PAV)
11. P index (the percentage of the aggregate exposed to water)
12. Resilient Modulus (MR)
13. Resilient Modulus Ratio (MRR)
14. Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM)

۱۱- مراجع

۱۱-۱- مقالات کنفرانس ها

- بهبهانی، ح.، ایازی، م.ج.، (۱۳۹۳)، "بررسی آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی نیمه گرم حاوی خرده آسفالت"، ششمین همایش ملی قیر و آسفالت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۲۷ الی ۲۹ آبان ۱۳۹۳، تهران، ایران.

- رفیعی، م.ر.، جاوید، ن.، آزادی، الف.، (۱۳۹۴)، "مطالعه آزمایشگاهی تاثیر استفاده از نانومواد بر دمای اختلاط و تراکم رویه های آسفالتی گرم با منشا سنگی آهکی" دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۱۵ تا ۱۷ اردیبهشت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

- زیاری، ح.، منیری، ع.، و ایازی، م.ج.، (۱۳۹۴)، "بررسی شیارشدگی در مخلوط های آسفالتی نیمه گرم حاوی زایکوترم"، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۱۵ تا ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۴، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

- غلام زاده، ش.، و منصوریان، الف.، (۱۳۹۳) "بررسی تاثیر استفاده از افزودنی های ضدعریان شدگی در حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالت گرم"، اولین کنگره ملی

- Construction and Building Materials; 48: pp. 1009–1016.
- Amitkumar, A. Patel., Tushar, A. Kansagra. (2015), " Experimental Investigation on Warm Mix using Zycotherm as a Chemical Additive with PMB 40 in Mix Design", International Journal for Scientific Research & Development; Vol. 2, Issue 12.
 - Arabani, M., Roshani, H., Hamed, G.H. (2012), "Estimating Moisture Sensitivity of Warm Mix Asphalt Modified with Zycosoil as an Antistrip Agent Using SurfaceFree Energy Method", Journal of Materials in Civil Engineering; Vol. 24, No. 7.
 - Behbahani, H., Ziari, H., Kamboozia, N., Mansour Khaki, A., Mirabdolazimi, S.M. (2015) "Evaluation of performance and moisture sensitivity of asphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an anti stripping additive", Construction and Building Materials; 78: pp. 60–68.
 - Hesami, S., Ameri, M., Goli, H., Akbari, A. (2015) "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates", International Journal of Pavement Engineering, Volume 16, Issue 8: pp. 745-759.
 - Hesami, S., Roshani, H., Hamed, G.H., Azarhoosh, A. (2013), " Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt", Construction and Building Materials; 47.
 - Khodaii, A., Khailfeh, V., Dehand, M.H., Hamed, G.H. (2013), "Evaluating the effect of Zycosoil on moisture damage of hot mix asphalt using the surface energy method", Journal of Materials in Civil Engineering; Volume 26, Issue 2.
 - Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A.R., Hamed, G.H., Azarhoosh, M.J. (2012), " Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt", Construction and Building Materials.
- ملی قیر و آسفالت ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۲۷ الی ۲۹ آبان ۱۳۹۳، تهران، ایران.
- مهدی نظر، م.، و عربانی، م.، (۱۳۹۳) "ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر استفاده از اصلاح کننده قیر و سنگدانه‌ها بر حساسیت رطوبتی آسفالت"، شیشه‌ای هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۳، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.
 - مهدی نظر، م.، بخشی، ب.، شفیعی، م.ح.، مهربان، پ.، عربانی، م.، (۱۳۹۳) "بررسی رفتار رطوبتی مخلوط آسفالت شیشه‌ای تحت تاثیر افزودنی ضدعریان شدگی مایع"، ششمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۲۷ الی ۲۹ آبان ۱۳۹۳، تهران، ایران.
 - Watson, D., Moore, J., Taylor, A. (2013), "Effectiveness of Anti-Strip Agents in Asphalt Mixtures", TRB Annual Meeting and publication in the Transportation Research Record.
- ۱۱-۲- مقالات مجلات**
- قرایلو، د. معین درباری، م.، (۱۳۹۲) "بررسی عوامل موثر در پخش شدن نمونه‌ها برای تصویربرداری با TEM"، شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو، فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران، شماره ۱(۱): ص. ۳۰-۳۶.
 - Ameri, M., Hesami, S., Goli, H. (2013), "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag", Construction and Building Materials; 49: pp. 611–617.
 - Ameri, M., Kouchaki, S., Roshani, H. (2013) "Laboratory evaluation of the effect of nano-organosilane anti stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze-thaw cycles",

properties of asphalt when using Zycotherm", Technische Universität Braunschweig mbH, Germany, Report TSW/034-14.

۱۱-۴- تحقیقات و پایان نامه‌ها

- حامدی، غ.ج.، (۱۳۸۹)، "بررسی آزمایشگاهی تهیه مخلوطهای آسفالت گرم مقاوم در برابر خرابی رطوبتی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

- Trejo, D. (2011), "Comparison Of Pelletized Lime With Other Anti-Stripping Additives For Reducing The Moisture Sensitivity Of Hot Mixed Asphalt Concrete Mixtures", Research Project Work Plan, Oregon Department of Transportation Research Group.

۱۱-۵- دستورالعمل‌ها

- آباد کیفیت پارس. (۱۳۹۰)، "طرح اختلاط آسفالت توپکا"، کارخانه آسفالت شرکت ایران سایول، آبان ۱۳۹۰.

- آباد کیفیت پارس. (۱۳۹۰)، "طرح اختلاط آسفالت توپکا با استفاده از افزودنی نانو"، کارخانه آسفالت شرکت ایران سایول، آبان ۱۳۹۰.

- اکسیر شرق، نماینده انحصاری کمپانی زایدکس. (۱۳۹۴) "مجموعه اطلاعات کامل زایکوترم، افزودنی نانو تکنولوژی برای رویه‌های آسفالتی"، خردادماه ۱۳۹۴، مشهد، ایران.

- AASHTO. (2007) "Standard Method of Test for Resistance of Compacted HMA to Moisture-Inducted Damage". AASHTO Designation: T-283-07.

- Rafiee, M.R., Javid, Navid. (2015), "An Experimental Study on Effect of Nano-Materials on Mixing and Compaction Temperature of Limestone Nature HMA", Current World Environment Journal; Vol. 10, Special Issue 1.

- Rohit, R. Prajapati., Hardik, P. Chotalia., Shaleha, I. Vahora., Ankit, D. Patel., Mishra, C. B. (2015), "Gauging the properties of CRMB 60 in Mix Design with Zycotherm as warm mix additive", International Journal of Current Engineering and Technology; Available online 11 May 2015: Vol.5, No.3.

- Rohith, N. J., Ranjitha, A. (2013), "Study On Marshall Stability Properties Of Warm Mix Asphalt Using Zycotherm A Chemical Additive", International Journal of Engineering Research & Technology; Vol. 2, Issue 7.

- Sebaaly, P. E., Hajj, E. Y., Sathanathan, T., Shivakolunthar, S. (2015), "A comprehensive evaluation of moisture damage of asphalt concrete mixtures", International Journal of Pavement Engineering, Published online.

- Vatsal, V., Raja, Supriya., Vishwajeet, M., Abhishek, M. P. G., Mishra, C. B. (2015), "Warm Mix Asphalt Chemical Technology -a Review", Journal of International Academic Research for Multidisciplinary; Volume 3, Issue 7.

۱۱-۳- گزارش‌ها

- Pavement Engineering Area, (2015), "Evaluation of Zycotherm and Zydex Nanotechnologies", Central Road Research Institute, Final Report.

- Research and Development Center, (2014) "Evaluation of Zycotherm as Anti-Stripping Additive for Bitumen", Bitumen Department, Indian Oil Corporation Limited, Report No: TR-14-075.

- Transfer Centre for the Road Sector, (2015), "About the mixing and compression

– وبسایت شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو
www.nanolab.ir

۱۱-۶- وبسایت ها
– وبسایت شرکت اکسیر شرق مشهد
www.exirshargh.com