

به‌کارگیری افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی برای افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) تولید شده با روش‌های مختلف

امیر کاوسی*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
عبدالله روشن، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۷

چکیده

افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی و گازهای گلخانه‌ای و همچنین زیاد بودن مصرف انرژی در ساخت روسازی به روش آسفالت داغ (HMA)، از مشکلات این نوع روسازی می‌باشد که به دنبال آن فناوری آسفالت گرم (WMA) جهت کاهش این مشکلات معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. این فناوری نو، علی‌رغم کاهش مشکلات زیست‌محیطی و کاهش سوخت مصرفی، دچار ضعف عمده خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالت گرم می‌باشد. در این پژوهش، مخلوط‌های آسفالت گرم به دو روش استفاده از افزودنی آلی (ساسویت) و استفاده از روش تولید کف قیر با دستگاه تزریق آب و هوا در قیر داغ (با استفاده از دستگاه Wirtgen, WLB-10) ساخته شدند. همچنین، از دو نوع افزودنی آهک هیدراته (۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزنی مصالح سنگی) و زایکوترم (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی قیر) جهت بررسی میزان کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم استفاده شد. جهت بررسی حساسیت رطوبتی از سه آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح‌شده، آب جوشان و مقاومت کنده‌شدگی (Pull Off) استفاده شد. نتایج حاکی از تأثیر مثبت افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوترم در بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم بود. به طور خلاصه، نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی ۲/۵ درصد آهک هیدراته (وزنی مصالح سنگی) و ۰/۳ درصد زایکوترم (وزنی قیر) بیشترین میزان کاهش حساسیت رطوبتی را داشتند. با توجه به نتایج، استفاده از ۲/۵ درصد آهک هیدراته و ۰/۳ درصد زایکوترم در مخلوط آسفالت گرم ساسوییتی، مقدار پوشش قیری به ترتیب ۱۵ و ۲۲ درصد، نسبت کشش غیرمستقیم ۲۱ و ۲۷ درصد و نسبت مقاومت کنده‌شدگی را ۲۷ و ۳۰ درصد افزایش داد. همچنین، در مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری، مقدار پوشش قیری به ترتیب ۲۰ و ۲۷ درصد، نسبت کشش غیرمستقیم ۲۶ و ۳۰ درصد و نسبت مقاومت کنده‌شدگی ۲۸ و ۳۱ درصد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: آسفالت داغ (HMA)، آسفالت گرم (WMA)، عریان‌شدگی، آهک هیدراته، زایکوترم.

۱. مقدمه

تولید و ساخت آسفالت باعث مصرف انرژی زیاد، هزینه بالای تولید و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای آلاینده می‌شود. انجمن آسفالت آلمان در سال ۱۹۹۷ به دنبال راهی برای کاهش آلاینده‌های ناشی از تولید و اجرای آسفالت بود تا با کاهش گازهای گلخانه‌ای در جهت پیمان Kyoto گام بردارد و این مقدمه ورود فناوری آسفالت گرم^۱ به صنعت روسازی‌های آسفالتی است (بولین ۱۹۹۸). دلایل زیادی برای استفاده از این فناوری وجود دارد. مهم‌ترین آن‌ها کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است و شاید مهم‌تر از آنها، بهبود کارایی^۲ آسفالت در دمای مشابه یا حتی کمتر نسبت به مخلوط آسفالت داغ (HMA)^۳ است (عامری و همکاران، ۲۰۱۳). مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) دارای حساسیت رطوبتی^۴ بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ می‌باشند. به این دلیل که فرآیند خشک شدن مصالح سنگی به دلیل دمای کم اختلاط به‌طور کامل انجام نمی‌شود و سنگ‌دانه‌ها حاوی درصد رطوبت بیشتری نسبت به مخلوط آسفالت داغ هستند.

از سوی دیگر، در مخلوط‌های آسفالتی گرم، به دلیل کاهش ویسکوزیته قیر، سنگ‌دانه‌ها با ضخامت کمتری پوشش داده می‌شوند و در نتیجه مستعد عریان‌شدگی می‌باشند (خدایی و همکاران، ۲۰۱۲). کاهش پتانسیل عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌تواند به کارایی هر چه بیشتر این مخلوط‌ها و کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری راه‌ها کمک کند. لذا، بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم و استفاده از افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی در ساخت این مخلوط‌ها می‌تواند از بروز خرابی‌های زودهنگام ناشی از رطوبت کاسته و از تعمیر و نگهداری‌های پرهزینه در جاده‌ها جلوگیری کند.

۲. پیشینه تحقیق

کف قیر در سال ۱۹۵۷ توسط کسانی (۱۹۵۷) به منظور تثبیت خاک بستر و لایه غیرچسبیده معرفی شد. وی با استفاده از تزریق بخار آب به کف قیر را تولید نمود. سپس، شرکت Mobil Oil Australia فناوری پیشنهاد شده توسط کسانی را اصلاح نمود و از آب سرد به‌جای بخار آب استفاده نمود (موتن، ۱۹۹۸). هم‌زمان، فناوری WMA در دهه ۱۹۹۰ میلادی با اقبال از سوی محققان و مهندسان صنعت روسازی در اروپا مواجه شد. روش‌های غالب برای تولید این نوع مخلوط، استفاده از افزودنی‌های مومی و فرآیندهای کف‌ساز بود (بانکویست، ۲۰۱۱). فناوری کف قیر یکی از روش‌های تولید مخلوط‌های WMA می‌باشد که آن را می‌توان به دو خانواده کلی استفاده از افزودنی‌های حاوی رطوبت و روش‌های بر پایه آب تقسیم نمود (حسن و همکاران، ۲۰۱۷؛ اندرسون و همکاران، ۲۰۰۸).

روش استفاده از افزودنی‌های حاوی رطوبت، افزودنی‌هایی را که حاوی درصد مشخصی رطوبت هستند به‌کار می‌برد که جداره آن‌ها در مجاورت حرارت ذوب شده و با آزادسازی رطوبت نهفته در خود منجر به تولید حباب و افزایش حجم قیر می‌شوند (حسن و همکاران، ۲۰۱۷). در روش دوم، آب به‌صورت مستقیم به قیر داغ افزوده می‌شود که منجر به افزایش حجم قیر در بازه بین ۵ الی ۱۵ برابر می‌شود. این روش، بر پایه افزایش حجم آب طی فرآیند تبخیر استوار می‌باشد. این افزایش حجم منجر به افزایش سطح مخصوص قیر شده که بر این اساس می‌توان پوشش‌دهی و کارایی بهتری در دماهای کم را از این مخلوط انتظار داشت (میسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ جیمز، ۱۹۶۵).

در این پژوهش، برای ساخت کف قیر از دستگاه قیر Wirtgen WLB-10 استفاده شد (شرکت گروه

3- Hot mix asphalt
4- Moisture susceptibility

1- Warm mix asphalt
2- Workability

ویسکوزیته قیر، دمای کار با آسفالت را ۱۸ الی ۵۴ درجه سلسیوس کاهش می‌دهد (دام و همکاران، ۲۰۰۲).

ماده ساسویت از نظر ساختاری، به زنجیره طویل هیدروکربن‌های آلیفاتیک کریستالی ریزا گفته می‌شود و به‌عنوان یک افزودنی جامد آلی محصول شرکت ساسول است که از گاز طبیعی طی فرآیند پلیمری شدن خاصی به نام فیشر- تراپچ ۲ به دست می‌آید. فیشر- تراپچ روشی برای ترکیب هیدروکربن‌ها و دیگر ترکیبات آلیفاتیک (چربی‌دار) از گازهای ترکیبی است که مخلوطی از هیدروژن و کربن مونواکسید در حضور کاتالیزور می‌باشد. طول زنجیره‌های شیمیایی این موم آلی بلندتر و متفاوت از موم‌های نفتی یا پارافینی (که به‌طور معمول در قیر ناخوشایند تلقی می‌شوند) است. طول زنجیر هیدروکربنی غالب در ساسویت، مترهای بین ۴۰ تا ۱۱۵ اتم کربن را دارا است. در حالی که این گستره برای موم‌های پارافینی در حدود ۲۰ تا ۵۰ اتم کربن است. زنجیره‌های بلندتر، به محلول ماندن موم کمک می‌کنند و باعث کاهش ویسکوزیته قیر در دمای اختلاط و تراکم می‌شود (چاودری و باتن، ۲۰۰۸).

افزودنی‌های آلی بر اساس فاز فیزیکی قیر دارای دو نوع عملکرد می‌باشند. اولین عملکرد آنها در حالتی است که دمای قیر بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس باشد و قیر در حالت مایع قرار دارد. در دمای بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس باعث کاهش ویسکوزیته قیر می‌شوند. عملکرد دوم این افزودنی‌ها در حالتی است که قیر در دمای میانی و دمای کم قرار دارد و حالت کلوئیدی یا جامد دارد، که ویسکوزیته قیر در این حالت افزایش می‌یابد. اگر چه مقادیر ویسکوزیته کمتر و بیشتر در دمای زیاد و متوسط، به‌ترتیب از لحاظ کاهش دمای ساخت و ساز و بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی، مطلوب‌تر است. این کار با هدف به حداقل رساندن خستگی و ترک‌خوردگی

(Wirtgen). مطالعات زیادی روی این دستگاه انجام شده که نشان از عملکرد بهتر این دستگاه نسبت به سایر دستگاه‌های تولید کف قیر می‌باشد. دستگاه‌های InstroTek Accufoamer، Wirtgen WLB 10 Pavement Technology Inc. (PTI) و Foamer واحدهای آزمایشگاهی موجود و رایج برای تولید کف قیر می‌باشند. نتایج تحقیق صورت گرفته توسط نیوکومب و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که دستگاه تولید کف قیر Wirtgen در مقایسه با سایر دستگاه‌های تولید کف قیر، حباب‌های پایدارتری تولید می‌کند. همچنین، آن‌ها گزارش نمودند که دستگاه کف قیر Wirtgen شبیه‌ترین کف قیر را به کارخانه تولید مخلوط WMA کف قیری به دست می‌دهد.

در پژوهشی، رفتار مخلوط‌های کف قیری در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، از دو فناوری Wirtgen و PTI استفاده شد. مهم‌ترین تفاوت این دو دستگاه به این شرح بود که تولید کف قیر Wirtgen در شرایط تحت فشار رخ می‌دهد. اما در دستگاه PTI این ترکیب به‌صورت ثقلی و تحت فشار کمتری انجام می‌شود. همچنین، نکته قابل ذکر این است که مشخصات مخلوط‌های تولیدشده با هر دوی این دستگاه‌ها مشابه می‌باشد. با این حال، به‌طور کامل مشخص نیست کدامیک رفتار تولید کف قیر در کارخانه را بهتر شبیه‌سازی می‌کند (هجدورن، ۲۰۱۴).

یکی دیگر از فناوری‌های آسفالت گرم، استفاده از افزودنی‌های آلی مانند ساسویت می‌باشد. این افزودنی حاوی آب نبوده و فقط ویسکوزیته قیر را پایین می‌آورد. ساسویت به عنوان یک اصلاح‌کننده برای روان کردن آسفالت در فرآیند تولید و مخلوط کردن آسفالت و هم در هنگام عملیات اجرای روسازی، به دلیل توانایی در کاهش ویسکوزیته قیر، معرفی می‌شود. کاهش

همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که مقاومت باقی‌مانده در مخلوط دارای ۱٪ آهک هیدراته بهبود یافته است. در مطالعه‌ای که توسط فی و همکاران (۲۰۱۰) انجام شد، بیش از ۱۰۰٪ افزایش مقاومت باقی‌مانده با افزودن ۲٪ آهک هیدراته مشاهده شد. به‌طور مشابه، با افزودن ۱/۵ درصد آهک هیدراته به‌صورت آهک خشک روی مصالح مرطوب یا دوغاب آهک، پیشرفت قابل توجهی در مقاومت باقی‌مانده مشاهده شد (مک‌کان و سبالی، ۲۰۰۶).

عبدی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی عریان‌شدگی مصالح سنگی در رویه‌های بتن آسفالتی با روش‌های آزمایشگاهی پرداختند. با توجه به نتایج آنالیز مصالح سنگی و اینکه علت عمده عریان‌شدگی ناشی از جنس مصالح بوده، از آهک هیدراته به عنوان ماده ضد‌عریان‌کننده استفاده شد. در این پژوهش، مشاهده شد که آهک علاوه بر تقلیل این معضل به صورت یک ماده چندمنظوره، ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی را نیز بهبود می‌بخشد. با افزایش مقدار آهک هیدراته، میزان ITS و TSR نمونه‌ها بدین صورت افزایش می‌یابد که در درصدهای کم، روند افزایش مقاومت مکانیکی بیشتر و در درصدهای بالاتر این روند کاهش می‌یابد؛ البته از یک محدوده مشخص به بعد، آهک هیدراته نمی‌تواند به عنوان ماده ضد‌عریان‌کننده عمل کند و روند افزایش مقاومت سیر نزولی می‌یابد.

آل تمیمی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر آهک هیدراته در افزایش مقاومت رطوبتی و همچنین رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. در این مطالعه، مشخص شد که آهک هیدراته علاوه بر افزایش مقاومت رطوبتی، باعث بهبود سایر خواص مکانیکی آسفالت نیز می‌شود. به علاوه، استفاده از آهک هیدراته تا درصد مشخصی باعث افزایش چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی

ناسازگار می‌باشد. همچنین، تأثیر افزودنی آلی به ترکیب شیمیایی و خواص رئولوژیک قیر بستگی دارد (ادواردز و ایساکسون، ۲۰۰۵).

در مطالعه‌ی آکیستی (۲۰۰۸)، به بررسی تأثیر ساسوبیت بر قیرهایی با پنج منبع مختلف و مخلوط آسفالتی با تحقیق در مورد مدول ترکیبی و مقدار زاویه فاز پرداخته شد. از نتایج به دست آمده از افزودن ساسوبیت می‌توان به کاهش مقاومت مخلوط در برابر ترک‌های خستگی، افزایش سفتی قیر و بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی اشاره کرد.

مطالعات زیادی روی میزان عملکرد افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی آهک هیدراته‌ای و زایکوترم ۲ در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. واتسون و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی آهک هیدراته، افزودنی‌های مایع و افزودنی‌های فناوری آسفالت گرم در مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. بر اساس این مطالعه، آهک هیدراته تنها افزودنی بود که حداقل مقدار مورد نیاز نسبت استحکام کششی ۳ (۸۰٪) را نتیجه داد. اسماعیل و احمد (۲۰۱۹) تأثیر آهک هیدراته را بر مخلوط‌های آسفالتی داغ ارزیابی کردند. در این مطالعه، از سه مقدار آهک هیدراته ۱، ۱/۵ و ۲ درصد استفاده شد. این مطالعه نشان داد که آهک هیدراته باعث کاهش روانی مارشال، کاهش فضای خالی، افزایش مقاومت رطوبتی، افزایش استحکام مارشال و وزن مخصوص می‌شود. نکته مورد توجه در این مطالعه، کاهش نسبت استحکام کششی و مقاومت مارشال در مقدار آهک هیدراته بیشتر از ۱/۵ درصد بود. در این مطالعه، مقدار آهک ۱/۵ درصد وزنی سنگ‌دانه‌ها را به‌عنوان درصد آهک هیدراته بهینه معرفی کردند.

مطالعات مختلفی وجود دارند که اثر آهک هیدراته را با استفاده از آزمون لاتمن ارزیابی کرده‌اند. کیم و

مخلوط‌های ساخته شده با گرانیته باعث افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط می‌شود. در حالی که در مخلوط‌های ساخته شده با سنگ‌آهک، افزودن آهک هیدراته تأثیری نداشت و حتی مقاومت رطوبتی کمتری نیز با آهک هیدراته حاصل شد.

عامری و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثر دو افزودنی ضد عریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوترم در مخلوط آسفالتی داغ پرداختند. در این مطالعه، مشخص شد که میزان درصد مطلوب آهک هیدراته و زایکوترم برای رسیدن به بیشترین مقدار نسبت استحکام کششی به ترتیب ۲٪ وزنی مصالح سنگی و ۰/۲ درصد وزنی قیر است. همچنین، زایکوترم بیشترین تأثیر را در افزایش نسبت استحکام کششی و آهک هیدراته نیز بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها داشتند.

در مطالعه خدایی و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر آهک هیدراته در افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم ساخته شده با ساسوبیت ۲ و ادورا ۳ بررسی شد. در این مطالعه، دو نوع دانه‌بندی پیوسته و باز استفاده شدند. بررسی‌ها نشان داد که در مخلوط‌های با دانه‌بندی باز و پیوسته، افزودن آهک هیدراته تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها نداشت. اما در حالت تر، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با افزایش آهک افزایش یافت و مقدار دو درصد آهک هیدراته به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. نسبت استحکام کششی نمونه‌های متراکم ساخته شده با افزودنی ساسوبیت از نمونه‌های حاوی ادورا بیشتر بود. در حالی که در مخلوط با دانه‌بندی باز برعکس بود.

در مطالعه‌ی مقدس نژاد و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر افزودنی زایکوترم (به میزان ۰/۵ و ۱ درصد وزنی قیر) در افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داغ با استفاده از نسبت استحکام کششی و انرژی آزاد سطحی

می‌شود، زیرا استفاده بیش از حد باعث کاهش چسبندگی ۱ می‌شود. در این مطالعه، مقدار بهینه درصد آهک هیدراته برای بهبود دوام و خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی ۲/۵ درصد وزنی سنگ‌دانه‌ها تعیین شد. در مطالعه زو و همکاران (۲۰۱۳) مشخص شد که تخلخل زیاد آهک هیدراته باعث افزایش سختی کلی مخلوط شده و باعث می‌شود در برابر شیارشدگی، خستگی و ترک‌خوردگی حرارتی قوی‌تر شود. این افزایش سختی مخلوط آسفالت همچنین باعث مقاومت بیشتر مخلوط در برابر رطوبت می‌شود.

حسن و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی گرم ساخته‌شده با افزودنی‌های ادورا، ساسوبیت و سی کابیس آرتی با سنگ‌دانه‌های مرطوب را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، آهک هیدراته به میزان ۱٪ وزن مخلوط به نمونه‌ها اضافه شد. نمونه‌ها قبل از افزودن آهک دارای مقدار نسبت استحکام کششی کمتر از ۸۰ درصد بودند. ولی با اضافه شدن آهک، نسبت استحکام کششی همه نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین، تأثیر آهک در افزایش TSR نمونه‌های ساخته شده با سی کابیس آرتی از بقیه بیشتر بود. همچنین، تأثیر دمای تولید را نیز در نظر گرفتند و مشخص شد که هر چه دمای تولید بیشتر باشد، مقدار استحکام کششی بیشتری به دست می‌آید.

زیدی و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر آهک هیدراته در افزایش مقاومت رطوبتی ماستیک‌های آسفالتی ساخته شده با دو نوع سنگ‌دانه گرانیته و سنگ آهک را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، مشخص شد که میزان تأثیر آهک هیدراته در افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی به کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌دانه‌ها بستگی دارد. در این مطالعه، با استفاده از آزمایش‌های مختلف، مشاهده گردید که آهک هیدراته در

عادی برای سنگ‌دانه‌های آهکی ۰/۵ درصد و برای سنگ‌دانه‌های سیلیسی ۰/۳ درصد وزنی قیر، و برای حالت رقیق‌شده با آب برای هر دو نوع سنگ‌دانه ۳ درصد وزنی سنگ‌دانه‌ها بود. همچنین، زایکوترم به‌مراتب تأثیر بیشتری روی افزایش نسبت استحکام کششی و مقاومت باقی‌مانده سنگ‌دانه‌های سیلیسی داشت زیرا زایکوترم خواص شیمیایی سطح سنگ‌دانه‌های سیلیسی را تغییر می‌دهد و سطح آن‌ها را آب‌گریز می‌کند.

میرزابابایی (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر زایکوترم به‌عنوان افزودنی ضد‌عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالت گرم ساخته شده با سنگ‌دانه‌های سیلیسی پرداخت. در این مطالعه، مشخص شد که نمونه‌های آسفالتی داغ و گرم ساخته شده با سنگ‌دانه‌های سیلیسی حداقل نسبت استحکام کششی مورد نیاز (۸۰٪) را کسب نکرده و استفاده از زایکوترم باعث بهبود نسبت استحکام کششی نمونه‌ها شده است.

زیاری و همکاران (۲۰۱۵)، تأثیر افزودنی زایکوترم در مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی خرده‌شیشه را بررسی کردند. در این مطالعه، مشخص شد که افزودنی زایکوترم باعث بهبود مقاومت رطوبتی، مدول برجهندگی و خزش نمونه‌های آسفالتی می‌شود. از طرف دیگر، افزودن زایکوترم، مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها را کم می‌کند. میزان بهینه زایکوترم برای رسیدن به مقاومت رطوبتی، مدول برجهندگی و خزش مناسب برای نمونه‌های آسفالتی ۰/۱۵ درصد وزنی قیر بود.

علیزاده و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه خود، تأثیر دو نوع افزودنی ضد‌عریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوسویل که هم‌خانواده زایکوترم می‌باشد را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، نمونه‌های آسفالتی گرم با دو نوع افزودنی ساسوبیت و ردیست ساخته شدند. آزمایش‌ها نشان دادند که نمونه‌های ساخته شده با ردیست مقاومت رطوبتی بیشتری نسبت به نمونه‌های

مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، مشاهده شد که استفاده از زایکوترم باعث افزایش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها و افزایش پیوستگی ۱ قیر می‌شود. بر اساس این مطالعه، استفاده از زایکوترم در مقدار کم، تأثیر بیشتری نسبت به افزودن این ماده در مقادیر زیاد داشته است. همچنین، این ماده باعث افزایش پیوستگی درون قیر نیز می‌شود.

میرزابابایی و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود به بررسی اثر دو افزودنی ضد‌عریان‌شدگی زایکوسویل ۲ و زایکوترم بر خصوصیات رئولوژیک قیر و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی و همچنین مقایسه این افزودنی‌ها با سیمان و آهک هیدراته در افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داغ پرداخته‌اند. بر اساس این مطالعه، زایکوسویل و زایکوترم به مقدار کمی نقطه نرمی را افزایش دادند. اما درجه نفوذ و ویسکوزیته قیر کاهش یافت. افزودنی‌های زایکوترم و زایکوسویل در مقایسه با سیمان و آهک هیدراته تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشتند. با توجه به این پژوهش، افزودن ۰/۵ درصد زایکوترم بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داغ داشت.

ابراهیم و مهان (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای، تأثیر زایکوترم را بر مخلوط‌های آسفالتی داغ مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، از دو نوع سنگ‌دانه سیلیسی و آهکی استفاده شد. همچنین، زایکوترم را یک‌بار به‌صورت عادی به قیر (با مقادیر ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی قیر) و یک‌بار هم به‌صورت رقیق‌شده به نسبت ۱ به ۴۰۰ با آب به سنگ‌دانه‌ها (با مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی سنگ‌دانه‌ها) به کار بردند. در این مطالعه، افزودن زایکوترم به هر دو صورت باعث افزایش نسبت استحکام کششی و مقاومت باقی‌مانده مارشال شد و تفاوت چندانی با هم نداشتند. میزان بهینه افزودن زایکوترم به‌صورت

مقایسه می‌شود. همچنین، چگونگی ارتباط بین نتایج آزمایش‌های رطوبتی با هم را مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل ۱، فلوجارت تولید نمونه‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های مربوطه ارائه شده است.

۴. مواد و مصالح و آزمایش‌ها

مواد و مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل قیر، سنگ‌دانه، کف قیر و افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی می‌باشد.

۴-۱. قیر و مصالح سنگی

قیر مورد استفاده در این پژوهش، قیر ۷۰-۶۰ شرکت نفت پاسارگاد می‌باشد که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است. مصالح مورد استفاده، مصالح رودخانه‌ای سیلیسی شکسته شده می‌باشد که از کارخانه ماکادام شرق تهیه شد. با وجود اینکه مخلوط‌های آسفالت گرم در مقابل رطوبت مقاومت کمی دارند، ولی در این تحقیق از سنگ‌دانه‌های سیلیسی که در برابر رطوبت مقاومت کمتری دارند استفاده شد. استفاده از سنگ‌دانه‌های سیلیسی به این دلیل می‌باشد که اولاً مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی سنگ‌دانه‌های سیلیسی بحرانی‌ترین حالت خود را در برابر رطوبت داشته باشند و ثانیاً تأثیر و میزان واکنش‌پذیری افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مختلف بر چسبندگی بین سنگ‌دانه‌های سیلیسی و قیر آسفالت گرم مشخص و سپس با هم مقایسه شوند (در مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی، ساسوبیت، ویسکوزیته قیر را پایین می‌آورد و قیر حاوی آب نیست و در مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری، کف قیر حاوی آب و هوا - می‌باشد). حدود دانه‌بندی شماره ۴ ارائه شده در نشریه ۲۳۴ ایران که حداکثر اندازه اسمی نمونه‌ها در آن ۱۹ میلی‌متر می‌باشد، به‌عنوان معیار دانه‌بندی استفاده شد. دانه‌بندی مورد استفاده (شکل ۲) برای ساخت مخلوط‌های آسفالت گرم و داغ یکسان بود.

ساخته شده با ساسوبیت دارند. افزودن افزودنی‌های آهک و زایکوسویل، مقدار استحکام کششی نمونه‌های آسفالتی گرم را افزایش داده، ولی با این حال، نمونه‌های ساخته شده با ساسوبیت نسبت استحکام کششی کمتری در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی داغ بدون افزودنی ضد عریان‌شدگی داشتند. در این پژوهش، میزان بهینه استفاده از آهک هیدراته ۲ درصد وزن سنگ‌دانه‌ها و زایکوسویل ۰/۱ درصد وزنی قیر تعیین شد.

عبدی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای، به بررسی چگونگی ارتباط نتایج بین آزمایش‌های رطوبتی پرداختند. در این مطالعه، ارتباط بین آزمایش آب جوشان (میزان پوشش قیری) و آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی بررسی شد. به دلیل اینکه نتایج هر دو نوع آزمایش تأثیر مثبت افزودنی ضد عریان‌شدگی را در کاهش عریان‌شدگی نشان می‌دهد، سعی شده که ارتباط بین نتایج این دو آزمایش و روند آنها در کاهش این معضل را مشخص، و وابستگی بین آنها را در قالب یک یا چند ضابطه و منحنی برآورد کرد. همچنین، پوشش قیری می‌تواند رفتار افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی را به خوبی شبیه‌سازی کند و ارتباط خوبی بین آنها برقرار بود.

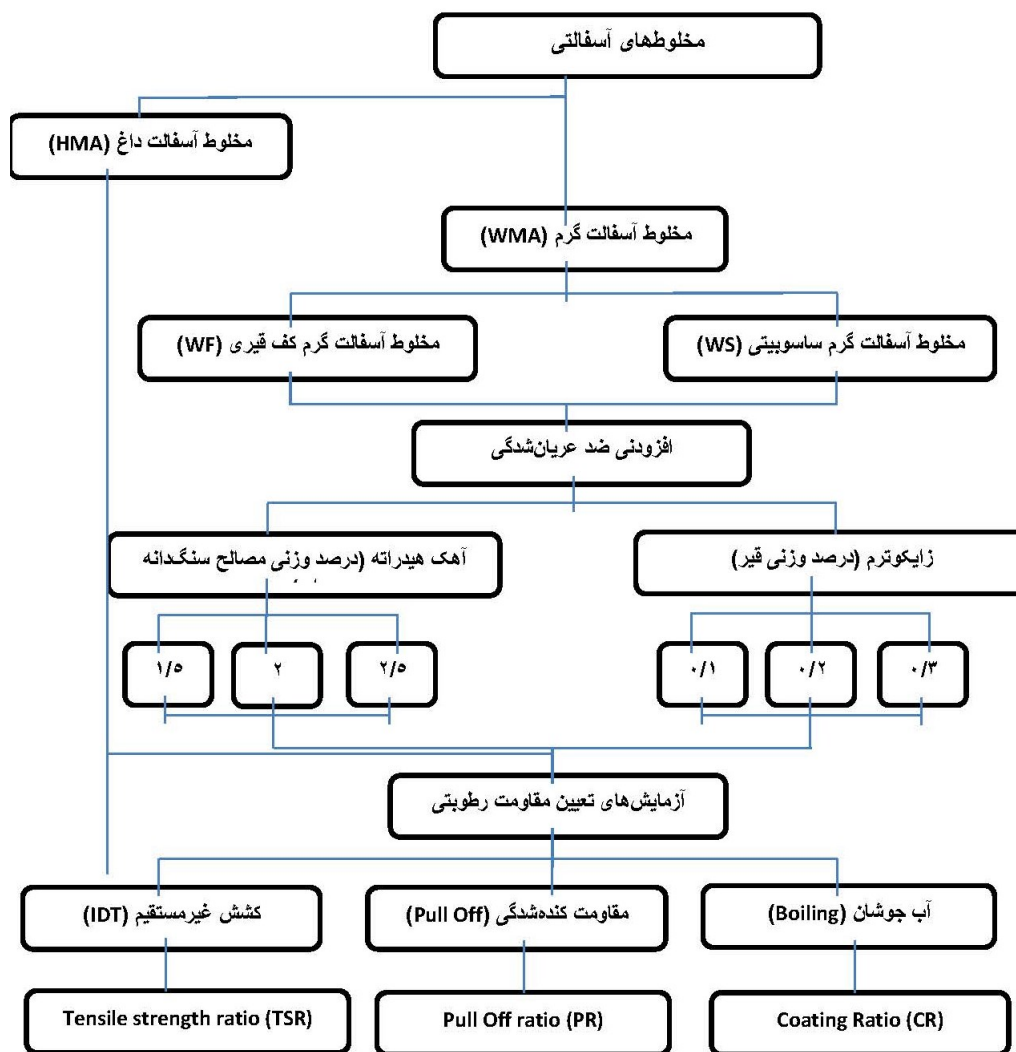
۳. هدف تحقیق

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مختلف (آهک هیدراته و زایکوترم در درصدهای مختلف) بر افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم ساخته شده با دو روش استفاده از افزودنی آلی ساسوبیت و استفاده از روش تولید کف قیر با دستگاه تزریق آب و هوا در قیر داغ (دستگاه Wirtgen, WLB-10) می‌باشد. مقدار بهینه هر افزودنی ضد عریان‌شدگی برای هر روش ساخت بر اساس نتایج آزمایش‌های رطوبتی تعیین و مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم ساخته شده با روش‌های مختلف و حاوی افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مختلف با هم

به کارگیری افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی برای افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) تولید شده با روش‌های مختلف

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر ۶۰/۷۰ استفاده شده در تحقیق

آزمایش قیر	استاندارد	حداقل	حداکثر	نتایج
درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)	ASTM D5	۶۰	۷۰	۶۱
خاصیت انگمی (سانتی‌متر)	ASTM D113	۱۰۰	-	+۱۰۰
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	ASTM D36	۴۹	۵۶	۴۹
درجه اشتعال (درجه سلسیوس)	ASTM D92	۲۳۲	-	۳۱۰
چگالی (gr/cm^3)	ASTM D70	۱/۰۱	۱/۰۶	۱/۰۲



شکل ۱. مراحل تحقیق برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌ها

دهنده، آزمایش XRF^۱ انجام شد، که نتایج در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

برای تعیین خصوصیات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها، آزمایش‌های وزن مخصوص، ارزش ماسه‌ای، درصد شکستگی و سایش لس‌آنجلس و برای تعیین اجزای مواد تشکیل

^۱- X-Ray Fluorescence

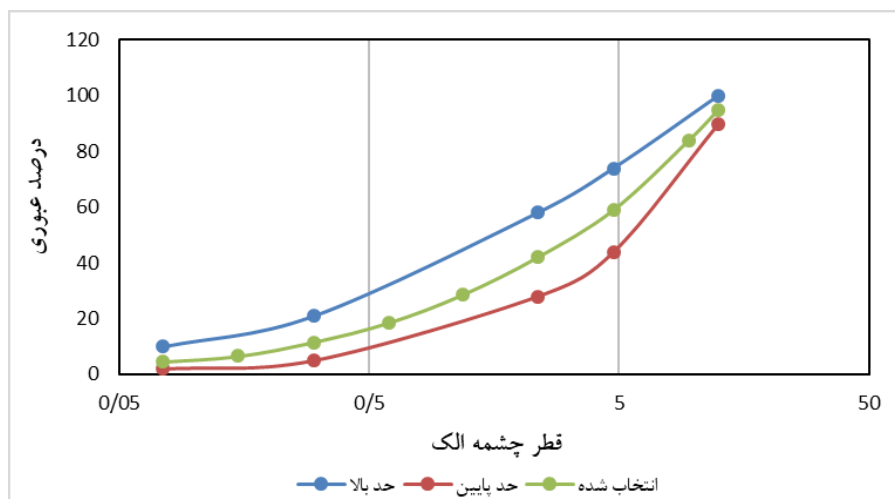
جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

مشخصه	نتایج			محدوده قابل قبول
	درشت‌دانه	ریزدانه	فیلمر	
وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۵۲۳	۲/۴۸۶	۲/۵۷۳	-
ارزش ماسه‌ای	-	۸۱	-	حداقل ۵۰
آزمایش سایش لس آنجلس (%)	۵۰۰	-	-	-
تعداد چرخش	۱۵/۳	-	-	حداکثر ۳۰
ضریب سایش	۱۰۰	-	-	حداقل ۱۰۰
شکستگی مصالح درشت‌دانه (%)	۹۳	-	-	حداقل ۹۰
یک وجه				
دو وجه				

جدول ۳. نتایج آزمایش XRF روی مصالح سنگی

درصد	محتویات
۱۰/۴۲	افت وزنی در دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس (L.O.I)
۱/۵۰۳	سدیم اکسید (Na ₂ O)
۱/۴۸۴	منزیم اکسید (MgO)
۷/۶۴۶	آلومینیوم اکسید (Al ₂ O ₃)
۵۹/۹۴۳	سیلیسیم دی‌اکسید (SiO ₂)
۲/۹۵۱	پتاسیم اکسید (K ₂ O)
۱۳/۳۶۸	کلسیم اکسید (CaO)
۱/۹۸۵	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)
۰/۷	دیگر محتویات

با توجه به نتایج آزمایش XRF مشخص می‌باشد که سنگ‌دانه‌ها عمدتاً از اجزای سیلیسی تشکیل شده‌اند و سیلیسی بودن مصالح سنگ‌دانه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی پیوسته مصالح سنگی

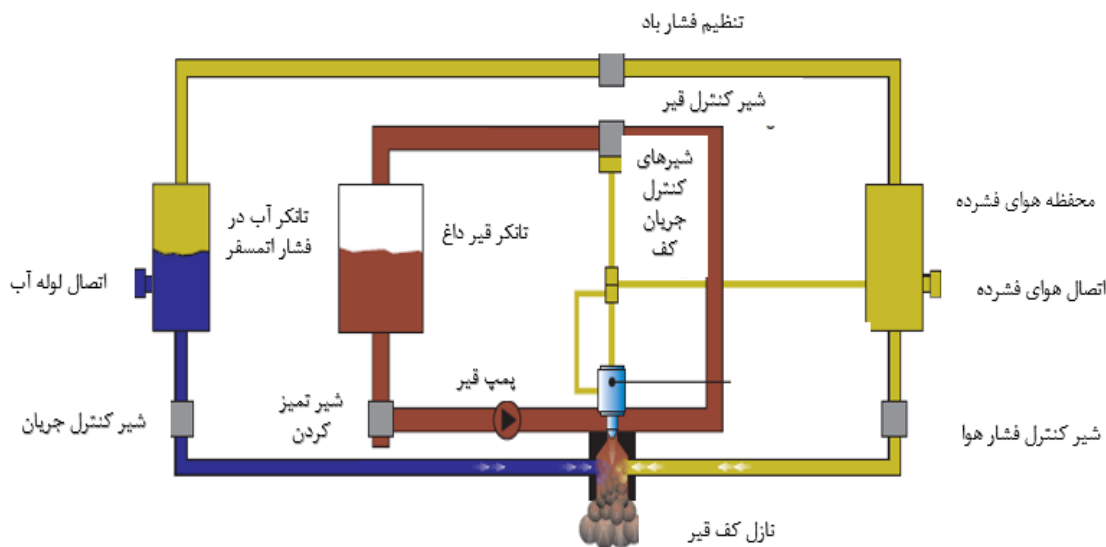
به‌کارگیری افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی برای افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) تولید شده با روش‌های مختلف

۴-۲. کف قیر (روش تزریق پر فشار آب و هوا

به قیر)

به‌منظور تولید کف قیر^۱ از دستگاه تولید کف قیر Wirtgen WLB-10 استفاده شد. پلان عملکردی و

جزئیات آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در این دستگاه، آب سرد و هوای تحت فشار به قیر داغ در بازه دمایی ۱۶۰-۱۸۰ درجه سلسیوس در محفظه تحت فشار تزریق می‌گردد. تحت اثر تبخیر ذرات آب، حجم قیر به شکل قابل توجهی افزایش یافته و کف قیر تولید می‌شود.



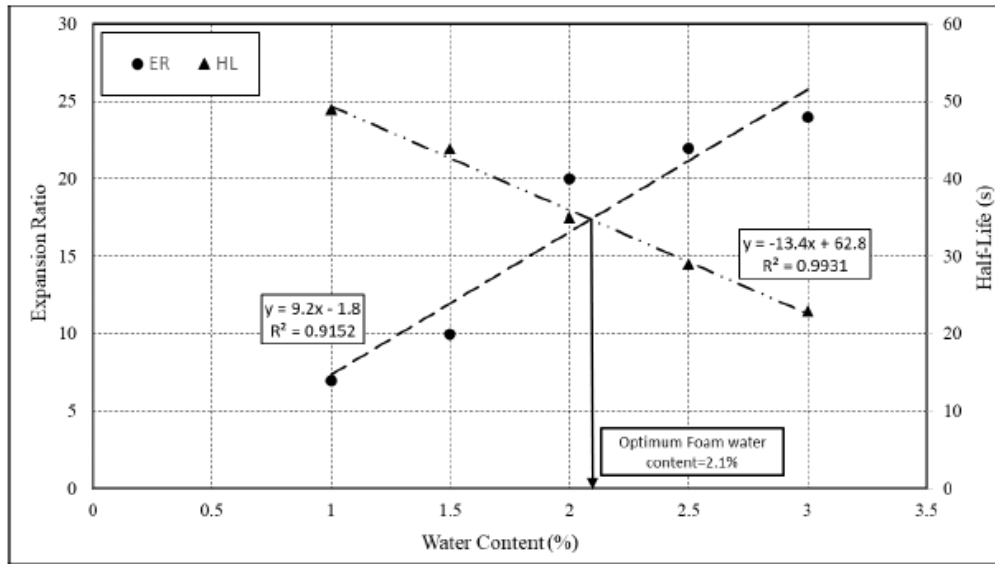
شکل ۳. پلان و جزئیات دستگاه تولید کف قیر (Wirtgen WLB-10)

حجم حداکثر آن می‌باشد. پارامترهای ER و HL در نموداری مطابق با شکل ۴ بر اساس درصد‌های مختلف آب ترسیم می‌شوند. از آنجایی که برای تولید کف قیر، آب بهینه متناسب با مشخصات قیر در بازه ۱-۳ درصد وزنی کف قیر متغیر می‌باشد، درصد‌های مختلف آب مورد ارزیابی قرار گرفتند و درصد آب بهینه برای تولید کف قیر ۱/۲ درصد وزن کف قیر تعیین شد.

به منظور تعیین طرح تولید کف قیر، درصد آب مورد نیاز باید تعیین شود. نسبت انبساط^۲ (ER) و نیم‌عمر^۳ (HL) دو پارامتر تجربی هستند که به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند (جنکینز و همکاران، ۲۰۰۲). ER نسبت افزایش حجم قیر می‌باشد که از تقسیم حداکثر حجم کف قیر تولید شده به حجم اولیه قیر تعیین می‌شود. به‌علاوه، نیم‌عمر بیانگر زمان لازم (برحسب ثانیه) برای افت ۵۰٪ از حجم حباب‌های کف قیر نسبت به

2- Half life (HL)

1- Foamed bitumen
1- Expansion ratio (ER)



شکل ۴. نسبت انبساط، نیم عمر طرح و درصد آب بهینه کف قیر

اختلاط قیر با مصالح سنگی مخلوط می شود (جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۳).

۴-۴. افزودنی های ضد عریان شدگی

در این پژوهش، از دو افزودنی ضد عریان شدگی آهک هیدراته و زایکوترم در درصدهای مختلف استفاده شد، که نتایج ارزیابی آنها به طور خلاصه به شرح زیر است.

۴-۴-۱. آهک هیدراته

آهک هیدراته ماده قلیایی غیرآلی است که به طور گسترده به عنوان افزودنی ضد عریان شدگی استفاده می شود. واکنش آن شامل واکنش بین کلسیم و سیلیکات های سنگدانه و سطح آلومیناتی است، و این واکنش باعث چسبندگی بهتر قیر به مصالح سنگدانه ای می شود. همچنین، آهک پوشش خوبی را روی سنگدانه ها از طریق واکنش پوزولانی بین کلسیم و سیلیس ایجاد می کند (استروپ گاردینر و نیوکومب، ۱۹۹۰). گستره میزان آهک هیدراته مورد نیاز برای بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی معمولاً ۱ تا ۲/۵ درصد وزن خشک مصالح سنگی می باشد.

۴-۳. ساسوبیت

ساسوبیت نوعی واکس فیشر- تراپچ است که جزء افزودنی های آلی آسفالت گرم می باشد. طول مولکولی هیدروکربن ساسوبیت در محدوده C40 تا C120 و با فرمول عمومی C_nH_{2n+2} می باشد. واکس ساسوبیت دارای نقطه ذوب ۹۸ درجه سلسیوس و محدوده ذوب ۷۰ تا ۱۱۴ درجه سلسیوس می باشد. واکس های فیشر- تراپچ^۱ در دمای بیش از ۱۱۵ درجه سلسیوس به طور کامل در قیر انحلال پذیر می باشند و یک محلول همگن با قیر تشکیل می دهند و در این حالت، افت مشخصی در کندروانی قیر ایجاد می نمایند. این امر سبب می شود که دمای اختلاط و تراکم آسفالت حدود ۱۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس کاهش یافته و منجر به کاهش قابل توجهی در خروج دود و گاز کربن مونواکسید در هنگام اجرا شود. ساسوبیت در دمای ۷۰ تا ۱۱۵ درجه سلسیوس به طور مناسب و یکنواخت به شکل ذرات ریز چسبنده با ملات آسفالت مخلوط شده و سبب افزایش سختی مخلوط می گردد. این ماده با قیر داغ و قبل از ورود به محل

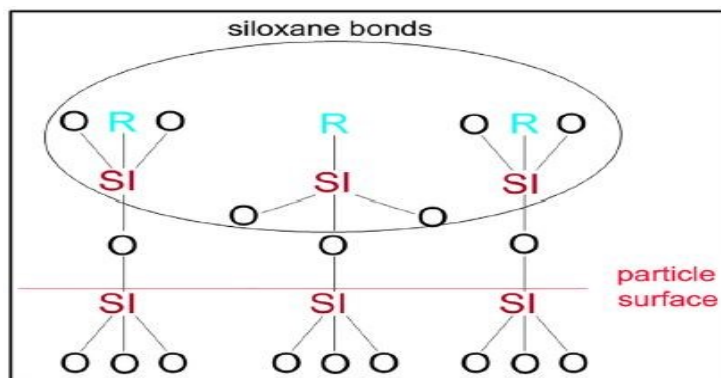
1- Fischer-Tropch wax

به‌کارگیری افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی برای افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) تولید شده با روش‌های مختلف

۴-۲-۴. زی‌کوترم

زی‌کوترم یک افزودنی بر پایه سیلان^۱ می‌باشد. سیلان، گروهی از سیلیکون‌های هیدروژن‌دار (هیدرید سیلیکون) است که دارای یک زنجیره آلی با تمایل به قیر و یک انتهای قطبی با تمایل به سطح غیرآلی (معدنی) می‌باشد. سیلان‌هایی که عملکرد آلی دارند در خلال فرایند هیدرولیز و در حضور آب، سیلانول^۲ تولید می‌کنند که این ماده سریع متراکم گشته و به فرم سیلوکسان^۳ حاوی اجزای آب‌گریز در می‌آید و به‌صورت محلول در قیر باقی

می‌ماند. در حالی که قسمت غیرآلی با هیدروکسیل سطح سیلیسی سنگ‌دانه‌ها پیوند هیدروژنی برقرار می‌کند. در اثر گرم شدن، این پیوندهای هیدروژنی در هم فشرده شده و یا می‌شکنند و تولید لایه‌ای از پیوند Si - O - Si روی سطح سنگ‌دانه‌ها می‌کنند. این پیوندها آب‌گریزند و به آسانی شسته نمی‌شوند. پیوند سیلوکسانی (Si - O - Si) تشکیل شده روی سطح مصالح پس از واکنش گروه‌های سیلانول فعال با سطح مصالح سنگی در شکل ۵ نشان داده شده است (سانج و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۵. پیوند سیلوکسانی (Si - O - Si) تشکیل شده روی سطح مصالح

۴-۵. تهیه و تولید نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های مارشال آسفالت گرم کف قیری به روش استفاده از تزریق آب برای تولید کف قیر (روش مکانیکی) و نمونه‌های مارشال آسفالت گرم ساسوبیتی با استفاده از ساسوبیت به میزان ۱/۵ درصد وزنی قیر ساخته شدند. درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالت داغ و آسفالت گرم ساسوبیتی ۵/۸ و برای مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری با روش مکانیکی ۵/۷ درصد تعیین شد. دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ (جهت کاربرد لایه آستر و رویه) بر اساس آیین‌نامه راه‌های ایران نشریه ۲۳۴ در محدوده‌ی رواداری‌های مجاز ارائه شده، استفاده شده است. حد بالا و پایین دانه‌بندی بر اساس دانه‌بندی

پیوسته شماره ۴ آیین‌نامه راه‌های ایران نشریه ۲۳۴ می‌باشد.

در مطالعات گذشته، از آهک هیدراته به میزان ۱ تا ۲/۵ درصد وزنی مصالح سنگ‌دانه‌ای برای بهبود عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده و نتایج قابل قبولی به دست آمده است. در این پژوهش، آهک هیدراته به میزان ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزنی سنگ‌دانه‌ها استفاده شد. همچنین، در مطالعات گذشته از زی‌کوترم به میزان ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی قیر برای بهبود عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگ‌دانه‌های سیلیسی استفاده شده است. با توجه به اینکه مخلوط‌های آسفالت گرم در مقایسه با مخلوط‌های آسفالت داغ نرم‌تر

3- Siloxane

1- Silane-based
2- Silanol

و وقتی همه مصالح سنگی پوشیده از قیر شدند در دمای اتاق قرار داده می‌شوند تا سرد شوند. سپس، مخلوط حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش قرار گرفته و بعد از این مرحله مخلوط را خشک کرده و با استفاده از روش پردازش تصویر، درصد سطوحی از مصالح سنگی که پوشش قیری روی آن‌ها باقیمانده است تخمین زده می‌شود. مبنای محک نمونه‌ها در عمل ۹۰٪ پوشش قیری باقی‌مانده روی مخلوط می‌باشد. نرم‌افزار پردازش تصویر 'Image J' برای این تحقیق استفاده شده که در آن نقاطی از سنگ‌دانه با داشتن پوشش قیری را به صورت پیکسل‌های سیاه و نقاط بدون پوشش را با پیکسل‌های قرمز و بر اساس شدت آن‌ها نشان می‌دهد (شکل ۶). سپس با توجه به این پیکسل‌ها می‌توان میزان پوشش باقی‌مانده روی سنگ‌دانه‌ها را با تقسیم مساحت قسمتی از سنگ‌دانه‌ها که دارای پوشش قیری هستند بر مساحت کل مخلوط اندازه‌گیری کرد. نسبت پوشش (CR) ^۲ به عنوان یک شاخص برای ارزیابی عریان‌شدگی در آزمون آب جوشان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CR = \frac{\text{CoatingAfterBoiling}}{\text{CoatingBeforeBoiling}} * 100 \quad (1)$$

هستند و پتاسیل یارشدگی بیشتری دارند، و همچنین، با توجه به اینکه زایکوترم هم باعث نرم شدن مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (میرزابابایی و همکاران، ۲۰۱۸)، از استفاده از زایکوترم در درصد‌های بالای ۰/۳ درصد خودداری کرده و در این پژوهش زایکوترم در مقادیر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی قیر استفاده شد.

همچنین، مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری با فضای خالی ۶ الی ۸ درصد متراکم شدند. دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی به ترتیب ۱۳۰ و ۱۲۰ درجه سلسیوس و دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری به ترتیب ۱۲۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس بود. برای ارزیابی عملکرد افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم، از آزمایش‌های کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح‌شده، مقاومت کنده‌شدگی (Pull Off) و آب جوشان استفاده شد.

۶-۴. آزمایش آب جوشان

برای مخلوط‌های متراکم نشده از آزمایش آب جوشان^۱ بر اساس استاندارد ASTM D3625 (۲۰۰۵) استفاده شد. در این آزمایش، مصالح سنگی و قیر با هم مخلوط شده



مراحل تعیین میزان عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی در آزمایش آب جوشان توسط نرم‌افزار پردازش تصویر Image j

شکل ۶. نحوه تعیین میزان عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی توسط نرم‌افزار پردازش تصویر Imagej

۴-۷. آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح

شده

ضخامت نمونه (m) و D قطر نمونه (m) می‌باشند.

۴-۸. آزمایش مقاومت کنده‌شدگی (Pull Off)

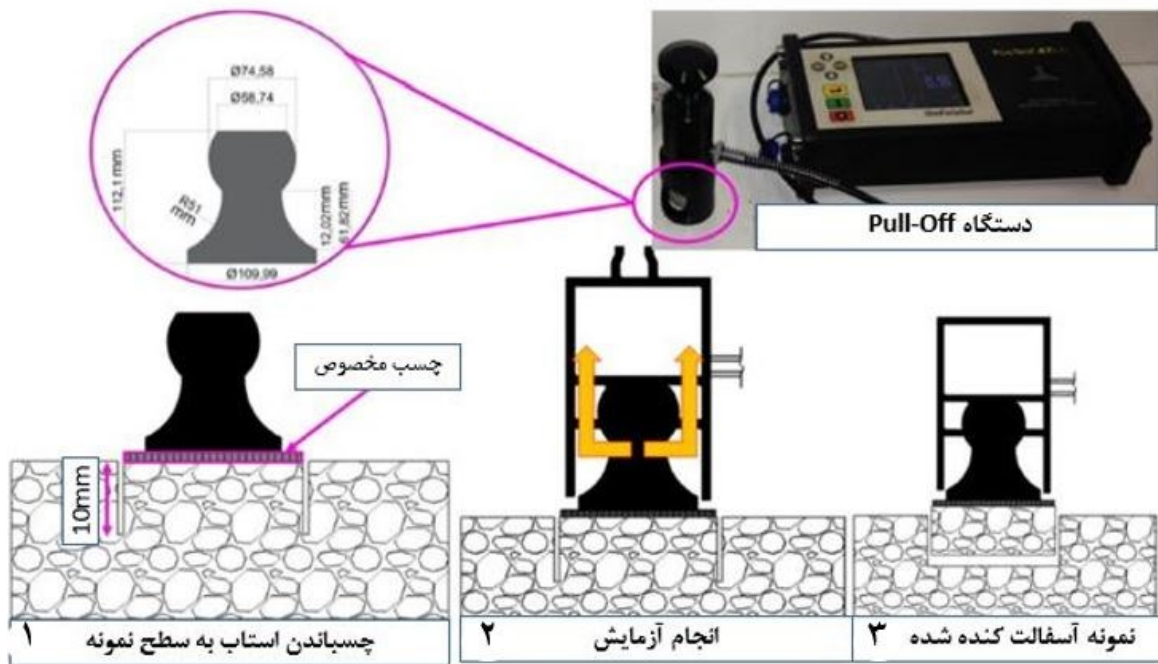
در این آزمایش، نمونه‌های برش داده شده با یک هسته جزئی عمود بر سطح نمونه‌ها به قطر ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر تحت کنده‌شدگی بر اساس استاندارد ASTM D4541 (۲۰۲۰) قرار گرفتند. انجام آزمون بدون ایجاد هسته ممکن است نتایج قابل قبولی ارائه ندهد و منجر به شکست بین سطح کشش نمونه و قیر شود (شیائو و همکاران، ۲۰۱۲). پس از ایجاد شیار دایره‌ای شکل روی نمونه‌های آسفالتی، استاب‌ها روی نمونه قرار می‌گیرند. برای این کار، ابتدا سطح نمونه و استاب را کاملاً تمیز کرده و با چسب، استاب‌ها را روی شیار ایجاد شده می‌چسبانند. برای حصول چسبندگی بهتر، روی استاب‌ها یک‌لایه سنگی قرار داده شده و به مدت ۲۴ ساعت نمونه را در همین شرایط قرار داده تا استاب کاملاً به سطح نمونه بچسبد. مقدار زمان لازم برای عمل‌آوری چسب‌ها برحسب نوع چسب متفاوت است. در این پژوهش، از چسب‌های دوقلوی شفاف استفاده شد و مدت‌زمان لازم عمل‌آوری کامل این چسب‌ها ۲۴ ساعت بود. بعد از عمل‌آوری چسب‌ها و چسبیدن استاب روی سطح، نمونه‌ها همانند آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده در دو گروه خشک و تر عمل‌آوری شده و سپس تحت آزمایش قرار گرفتند، و نسبت مقاومت کنده‌شدگی تر به خشک نمونه‌ها به عنوان نسبت کنده‌شدگی PR^2 گزارش گردید. در شکل ۷، نحوه انجام آزمایش نشان داده شده است.

در این آزمایش، نمونه‌های مارشال خشک و مرطوب (متراکم شده با ۷ درصد فضای خالی) به ترتیب قبل و پس از انجام سیکل ذوب و یخ بر اساس استاندارد AASHTO T 283 (۲۰۰۲) تحت بارگذاری مونوتونیک با سرعت بارگیری ۵۰ میلی‌متر در دقیقه قرار گرفتند. برای اعمال سیکل ذوب و یخ، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای مارشال توسط پمپ خلأ و به میزان ۵۵ تا ۸۰ درصد توسط آب اشباع شدند و سپس به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سلسیوس و سپس به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. پس از تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم^۱ نمونه‌ها در حالت‌های اشباع و خشک، از تقسیم مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت اشباع به حالت خشک، نسبت TSR به دست آمد که نشانگر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. هر چه این نسبت برحسب درصد به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد مناسب‌تر است و مخلوط حساسیت رطوبتی کمتری دارد. طبق آیین‌نامه‌ها، این نسبت نباید کمتر از ۸۰ درصد باشد. رابطه (۲) به‌منظور محاسبه شاخص نسبت کشش غیرمستقیم (TSR) مورد استفاده قرار گرفت که در آن، ITS با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$TSR = \frac{ITS_{Cond}}{ITS_{UNCond}} * 100 \quad (2)$$

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * t * D} \quad (3)$$

که در آن P حداکثر بار وارده به نمونه (kN)، t



شکل ۷. نحوه انجام آزمایش Pull-Off (کاوسی و متولی زاده، ۲۰۲۰)

۵. نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های انجام شده برحسب مورد به شرح زیر مورد بحث قرار گرفتند. مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری حاوی آهک هیدراته با نماد WFH و مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری حاوی زایکوترم با نماد WFZ معرفی شده‌اند. همچنین، مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی حاوی آهک هیدراته با نماد WSH و مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی حاوی زایکوترم با نماد WSZ معرفی شده‌اند.

۵-۱. نتایج آزمایش آب جوشان

تمامی نمونه‌های آسفالتی به‌طور کامل با قیر پوشش داده شده بودند و به همین دلیل میزان پوشش قیری نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۴ مشخص است که مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری نسبت به مخلوط آسفالت داغ از مقاومت کمتری برخوردار می‌باشند. همچنین، مخلوط‌های آسفالت گرم

کف قیری در مقایسه با مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی مقاومت کمتری در حفظ مقدار پوشش قیری اطراف سنگ‌دانه‌ها از خود نشان دادند. مقاومت کمتر نمونه‌های آسفالت گرم به نحوه ساخت این آسفالت برمی‌گردد که باعث می‌شود قیر و سنگ‌دانه در دمای کمتری با هم مخلوط شوند و این امر باعث کاهش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه می‌شود. همچنین، نمونه‌های کف قیری به دلیل وجود آب در هنگام ساخت نمونه و از بین نرفتن کامل این آب در مخلوط به دلیل اختلاط کم، دارای چسبندگی کمتری نسبت به مخلوط آسفالت داغ و مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی می‌باشند.

مقدار قابل قبول درصد پوشش قیری باقی‌مانده روی نمونه آسفالتی باید بیش از ۹۰ درصد باشد، که مشخص است هیچ‌کدام از نمونه‌های آسفالت داغ و آسفالت گرم بدون افزودنی به این حد نرسیده و مقاومت قابل قبولی نداشتند. دلیل این امر نیز ممکن است به سیلیسی بودن مصالح سنگی برگردد. این نوع مصالح آب‌دوست هستند و چسبندگی ضعیفی با قیر دارند. استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوترم در مخلوط

به‌کارگیری افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی برای افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) تولید شده با روش‌های مختلف

تر بود، که نشان از درصد بالای پوشش قیری باقی‌مانده در نمونه‌های آسفالتی حاوی زایکوترم داشت. با توجه به نتایج، استفاده از افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی در مخلوط آسفالت گرم کف قیری به میزان ۲/۵ درصد آهک هیدراته و ۰/۳ درصد زایکوترم، مقدار پوشش قیری را به‌ترتیب ۲۰ و ۲۷ درصد افزایش، و استفاده از افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی در مخلوط آسفالت گرم ساسوبیتی به میزان ۲/۵ درصد آهک هیدراته و ۰/۳ درصد زایکوترم، مقدار پوشش قیری را به‌ترتیب ۱۵ و ۲۲ درصد افزایش داد. تأثیر بهتر زایکوترم در نمونه‌های کف قیری به دلیل واکنش‌پذیری بیشتر زایکوترم در حضور آب می‌باشد که باعث شده درصد افزایش پوشش قیری مخلوط کف قیر حاوی زایکوترم بیشتر از مخلوط‌های دیگر باشد. در حالت کلی، مخلوط آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری حاوی ۰/۳ درصد زایکوترم بیشترین مقدار پوشش قیری باقی‌مانده را به‌ترتیب به میزان ۹۸ و ۹۷ درصد از خود نشان دادند و در کل، نمونه‌های ساسوبیتی مقاومت بیشتری را از خود نشان دادند.

های آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری باعث افزایش پوشش قیری نمونه‌ها بعد از آزمایش شده، و افزایش میزان درصد افزودنی‌ها باعث افزایش مقاومت در برابر عریان‌شدگی نمونه‌ها شده و نتیجه معکوس در پی نداشت. نکته قابل ذکر با توجه به مشاهدات بعد از آزمایش این بود که در مخلوط‌های حاوی آهک هیدراته ذرات ریزتر، بیشتر پوشش قیری خود را از دست داده بودند. دلیل این امر احتمالاً قرارگیری بیشتر آهک روی مصالح سنگی درشت‌تر در هنگام اختلاط می‌باشد. همچنین، مقداری از آهک هیدراته هنگام مخلوط شدن با سنگ‌دانه‌ها به‌صورت غبار از سطح سنگ‌دانه‌ها بلند شده، و این امر باعث کاهش مقدار آهک هیدراته در سطح سنگ‌دانه‌ها می‌شود. در حالی که زایکوترم به دلیل مخلوط شدن همگن با قیر، در همه سطح سنگ‌دانه‌های ریز و درشت قرار داشته و باعث چسبندگی بهتر قیر با سنگ‌دانه‌ها شده است. همچنین، سطح نمونه‌های حاوی زایکوترم نسبت به نمونه‌های حاوی آهک هیدراته بعد از آزمایش بسیار براق

جدول ۴. نتایج مربوط به تعیین درصد پوشش باقی‌مانده مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری حاوی آهک هیدراته و زایکوترم

نمونه	پوشش قیری باقی‌مانده (%)
HMA	۸۲/۳۱
WS	۷۶/۷۶
WS1.5H	۸۲/۶۳
WS2H	۸۶/۶۲
WS2.5H	۹۲
WS0.1Z	۸۵/۷۲
WS0.2Z	۹۳
WS0.3Z	۹۸
WF	۷۰
WF1.5H	۸۰/۵۵
WF2H	۸۵/۲۴
WF2.5H	۹۰
WF0.1Z	۸۴/۲۵
WF0.2Z	۹۱
WF0.3Z	۹۷

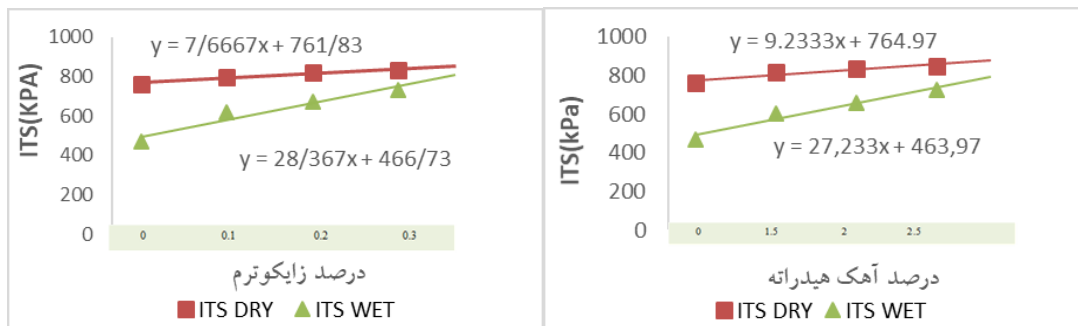
۵-۲. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن

اصلاح شده

ساخت مخلوط‌های آسفالت گرم در دمای کمتر از مخلوط‌های آسفالت داغ باعث می‌شود تا مخلوط‌های آسفالت گرم نسبت به مخلوط آسفالت داغ هم چسبندگی کمتری بین قیر و سنگ‌دانه داشته و هم به دلیل کمتر پیر شدن قیر، مخلوط نرم‌تری باشند. به همین دلیل، مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های آسفالت گرم نسبت به نمونه‌های آسفالت داغ کمتر می‌باشد. همچنین، مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری به دلیل اینکه در ضخامت کمتری از سنگ‌دانه‌ها با قیر پوشش داده می‌شوند و به دلیل وجود آب در ساخت کف قیر و از بین نرفتن کامل این آب در هنگام ساخت دارای چسبندگی ضعیفی بین قیر و سنگ‌دانه می‌باشند، دارای مقاومت کشش غیرمستقیم کمتری نسبت به مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی می‌باشند. کشش غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی تابعی از چسبندگی و سفتی مخلوط می‌باشد و هر مقدار این دو پارامتر بیشتر باشند، مقدار کشش غیرمستقیم نیز بیشتر می‌شود.

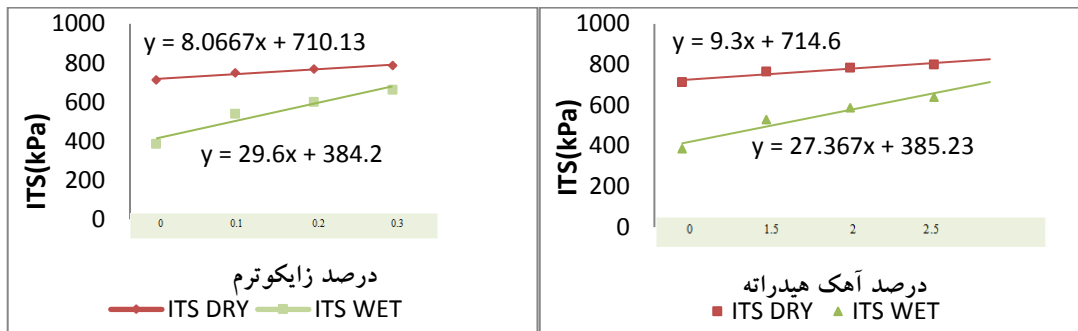
با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۸ و ۹، استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی آهک هیدراته و

زایکوترم در همه درصدهای استفاده شده باعث افزایش میزان کشش غیرمستقیم نمونه‌ها شدند. به طوری که نمونه‌های حاوی آهک هیدراته دارای مقاومت کشش غیرمستقیم خشک بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی زایکوترم بودند و شیب افزایش مقاومت کشش غیرمستقیم خشک نمونه‌های حاوی آهک هیدراته بیشتر بود. آهک هیدراته بعد از ساخت مخلوط علاوه بر افزایش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه، باعث سخت شدن آن می‌شود و همین موضوع باعث شده تا نمونه‌های حاوی آهک هیدراته مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم خشک بیشتری داشته باشند. در حالی که مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های تر حاوی زایکوترم نسبت به آهک هیدراته به دلیل عملکرد بهتر زایکوترم در ایجاد چسبندگی، بیشتر بود و مقاومت کشش غیرمستقیم تر نمونه‌های حاوی زایکوترم با شیب بیشتری افزایش یافت. همچنین، شیب افزایش مقاومت کشش غیرمستقیم خشک و تر نمونه‌های کف قیری حاوی افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بیشتر از شیب افزایش مقاومت نمونه‌های ساسوبیتی بود و افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در نمونه‌های کف قیری چسبندگی را بیشتر افزایش دادند. ولی در کل، نمونه‌های ساسوبیتی دارای مقاومت کشش غیرمستقیم بیشتری نسبت به نمونه‌های کف قیری بودند.



شکل ۸. مقاومت کشش غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی حاوی آهک هیدراته و زایکوترم

به‌کارگیری افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی برای افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) تولید شده با روش‌های مختلف



شکل ۹. مقاومت کشش غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالت گرم کف‌گیری حاوی آهک هیدراته و زایکوترم

در این پژوهش، استفاده از ۲/۵ درصد آهک هیدراته بهترین عملکرد را در بین درصد‌های مختلف آهک هیدراته داشته و به ترتیب باعث افزایش ۲۱ و ۲۶ درصدی TSR در نمونه‌های ساسوبیتی و کف‌گیری شد. زایکوترم با ایجاد پیوند سیلوکسانی (Si-O-Si) روی سطح مصالح یک شبکه به‌هم‌پیوسته ایجاد می‌کند. این پیوندها آب‌گریزند و به‌آسانی شسته نمی‌شوند. زایکوترم با از بین بردن لایه‌های موجود در سطح مصالح سنگی، پیوند مستحکم شیمیایی و برهمکنش غیرقطبی- غیرقطبی بین قیر و مصالح ایجاد کرده و مصالح را از حالت آب‌دوست به حالت آب‌گریز تغییر می‌دهد.

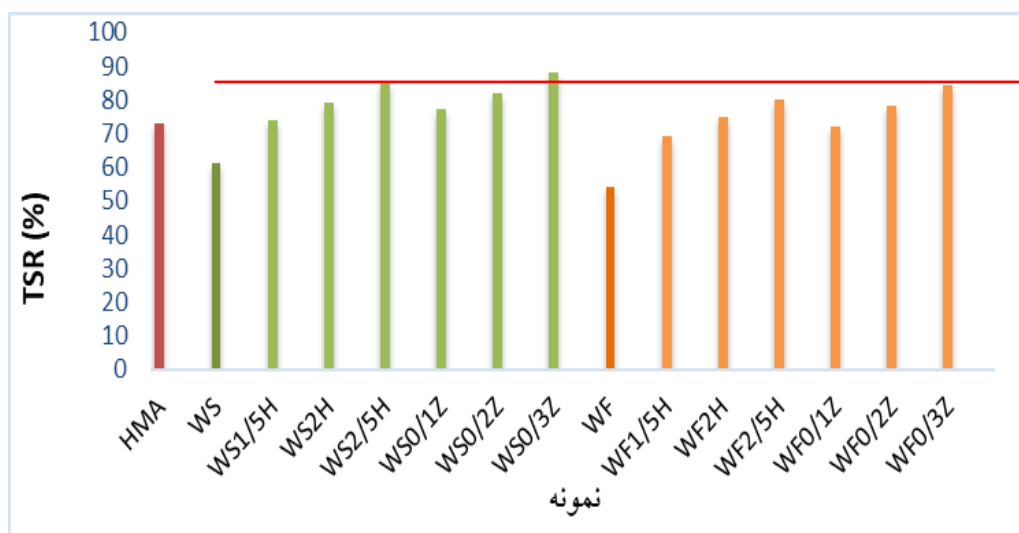
در این پژوهش، استفاده از ۰/۳ درصد زایکوترم بهترین عملکرد را در بین درصد‌های مختلف زایکوترم داشته و به ترتیب باعث افزایش ۲۷ و ۳۰ درصدی TSR در نمونه‌های ساسوبیتی و کف‌گیری شد. زایکوترم نسبت به آهک هیدراته عملکرد بهتری را نشان داده و مقاومت بهتری در برابر رطوبت داشت. زایکوترم به دلیل مخلوط شدن با قیر هم‌پیوستگی درون قیر را افزایش داد و هم باعث شد که قیر چسبندگی بیشتری با سنگ‌دانه داشته و یک شبکه به‌هم‌پیوسته آب‌گریز حاصل شده و اثر آب را در مخلوط کمتر کند. در حالی که آهک هیدراته به دلیل مخلوط شدن با مصالح امکان دارد در قسمت‌هایی از سطوح سنگ‌دانه‌ها به میزان کافی وجود نداشته باشد و چسبندگی کافی ایجاد نشده باشد. همچنین، تأثیر

با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که مخلوط‌های آسفالت گرم نسبت به مخلوط آسفالت داغ دارای مقدار TSR کمتری می‌باشند، که ضعف مخلوط‌های آسفالت گرم را در برابر رطوبت نشان می‌دهد. همچنین، با توجه به سیلیسی بودن سنگ‌دانه‌ها، هیچ‌کدام از سه مخلوط شاهد آسفالت گرم و داغ بدون افزودنی ضد‌عریان‌شدگی دارای TSR قابل قبولی نمی‌باشند. آب مورد استفاده در هنگام ساخت کف‌گیر به دلیل دمای کم مخلوط به‌طور کامل در مخلوط از بین نمی‌رود. هنگام سیکل ذوب و یخ، آب باقی‌مانده در مخلوط یخ‌زده و افزایش حجم پیدا می‌کند. همین امر باعث می‌شود که چسبندگی کمتری بین قیر و سنگ‌دانه در مخلوط‌های آسفالت گرم کف‌گیری نسبت به مخلوط‌های آسفالت داغ و مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی ایجاد شود. ساسوبیت، ویسکوزیته قیر را پایین می‌آورد و برخلاف کف‌گیر دارای آب نمی‌باشد. به همین دلیل، نمونه‌های ساسوبیتی دارای چسبندگی بیشتر و مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتری نسبت به نمونه‌های کف‌گیری می‌باشند.

افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوترم در همه درصد‌های استفاده شده باعث افزایش میزان TSR نمونه‌ها شدند. آهک، در عین ارتباط با سنگ‌دانه، با قیر نیز واکنش نشان می‌دهد و با مولکول‌های با قطبیت بالا واکنش داده و نمک‌هایی ایجاد می‌کند که نامحلول در آب بوده و آب را به خود جذب نمی‌کند.

قابل قبول استاندارد بودند. استفاده از درصد بیشتر افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی ممکن است باعث افزایش مقاومت رطوبتی نمونه‌های آسفالت گرم شود. ولی با توجه به مطالعات پیشین (میرزابایی و همکاران، ۲۰۱۸) استفاده بیشتر از زایکوترم باعث کاهش مقاومت مارشال می‌شود و مخلوط نرم‌تر می‌شود، و این امر ممکن است باعث افزایش پتانسیل شیارشدگی مخلوط شود. همچنین، آهک هیدراته هم مخلوط را سخت‌تر می‌کند و ممکن است استفاده از درصدهای بیشتر باعث شکنندگی مخلوط شود. با توجه به این موارد، برای استفاده بیشتر از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی باید بحث شیارشدگی و شکنندگی مخلوط‌ها نیز بررسی شود.

افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در افزایش TSR نمونه‌های کف قیری بیشتر از نمونه‌های ساسوییتی بود. مخلوط‌های کف قیری به دلیل وجود آب در هنگام ساخت و پوشش نازک قیری اطراف سنگ‌دانه‌های آن‌ها دارای چسبندگی کمتری نسبت به مخلوط‌های ساسوییتی بودند و افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در این مخلوط‌ها باعث ایجاد چسبندگی بیشتر بین قیر و سنگ‌دانه‌ها شدند. ولی در کل، نمونه‌های ساسوییتی TSR کمتری از خود نشان دادند. به‌طور کلی، استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالت گرم باعث بهبود مقاومت عریان‌شدگی نمونه‌ها شده و نمونه‌های WS0.3Z، WS2.5H، WF0.3Z و WS0.3Z به ترتیب بیشترین مقدار TSR را داشتند و بالاتر از حد

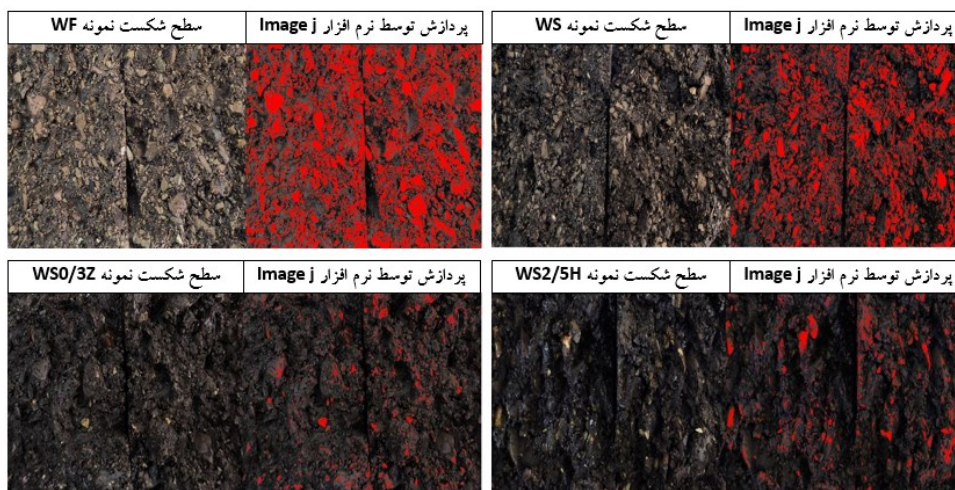


شکل ۱۰. نتایج TSR مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوییتی و کف قیری حاوی درصد‌های مختلف افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوترم

بعد از سیکل ذوب و یخ با نتایج آزمایش آب جوشان، از سطح نمونه‌های شکسته شده در هنگام آزمایش عکس گرفته شده، و سپس با نرم‌افزار Image J پردازش شدند. در شکل ۱۱، سطح شکست مخلوط آسفالت گرم ساسوییتی و کف قیری بعد از سیکل ذوب و یخ نشان داده شده است.

۵-۲-۱. بررسی سطح شکست مخلوط‌های آسفالت داغ و آسفالت گرم عمل‌آوری شده (تر) در آزمایش کشش غیرمستقیم

در این بخش، به بررسی سطح نمونه‌های شکسته شده تر در آزمایش کشش غیرمستقیم پرداخته می‌شود. برای مقایسه پوشش قیری باقی‌مانده در مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۱۱. سطح شکست مخلوط آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری بعد از سیکل ذوب و یخ

سیکل ذوب و یخ و جوشیدن، می‌تواند تأییدی برای نتایج آب جوشان باشد، که آزمایش آب جوشان را آزمایشی قابل قبول برای بررسی عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی باعث افزایش پوشش قیری در سطح شکست نمونه‌ها شده‌اند. مخلوط‌های آسفالت گرم به دلیل واکنش ضعیف قیر با سنگ‌دانه سیلیسی دارای مقدار پوشش قیری کمی بعد از سیکل ذوب و یخ می‌باشند. استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی باعث افزایش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها شده، و میزان پوشش قیری با افزایش میزان افزودنی زیادتر شده است.

استفاده از ۲/۵ درصد آهک هیدراته به ترتیب باعث افزایش ۱۹ و ۲۳ درصدی پوشش قیری در مخلوط آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری شده است. در حالی که استفاده از ۰/۳ درصد زایکوترم، به ترتیب ۲۵ و ۳۰ درصد میزان پوشش قیری را در مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری افزایش داده است. در شکل‌های قبلی نیز این افزایش پوشش قیری توسط ۲/۵ درصد آهک هیدراته و ۰/۳ درصد زایکوترم در مخلوط‌های ساسوبیتی آشکار است. روند تأثیر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در افزایش پوشش قیری به‌مانند روند تأثیر

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵، مشاهده می‌شود که مخلوط‌های آسفالت گرم در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ دارای پوشش قیری کمتری بعد از سیکل ذوب و یخ می‌باشند. همچنین، مخلوط آسفالت گرم کف قیری کمترین میزان پوشش قیری را دارا می‌باشد. همچنین، کمتر بودن پوشش قیری مخلوط‌های آسفالت گرم در مقایسه با آسفالت داغ، چسبندگی ضعیف در این مخلوط‌ها را به دلیل دمای کم اختلاط نشان می‌دهد. نتایج این بخش با نتایج نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) مخلوط‌ها ارتباط مستقیم دارد و در واقع در هر دو نتایج مشابهی رخ داده است. همچنین، در آزمایش آب جوشان، مخلوط آسفالت داغ از مخلوط‌های آسفالت گرم دارای پوشش قیری بیشتری بعد از جوشش بود، و مخلوط آسفالت گرم کف قیری هم کمترین میزان پوشش قیری را بعد از آزمایش آب جوشان داشت، که در اینجا نیز همان شرایط تکرار شده است.

در مقایسه با حالت آب جوشان، مشاهده می‌شود که مخلوط‌های آسفالتی تحت سیکل ذوب و یخ بیشتر پوشش قیری خود را از دست داده، که حاکی از مقاومت کمتر مخلوط‌ها در برابر سیکل ذوب و یخ نسبت به آب جوشان می‌باشد. رفتار مشابه مخلوط‌های آسفالتی بعد از

آن‌ها در افزایش مقدار TSR و همچنین آزمایش آب جوشان می‌باشد. با توجه به این تصاویر و نتایج مشاهده می‌شود که زایکوترم چسبندگی بیشتری نسبت به آهک دارد. سطح نمونه‌های حاوی زایکوترم در مقایسه با سطح نمونه‌های حاوی آهک هیدراته براق‌تر بودند، که نشان از پوشش قیری بیشتر روی سنگ‌دانه در این مخلوط‌ها دارد. نتایج پردازش تصویر نمونه‌های آسفالتی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج مربوط به تعیین درصد پوشش باقی‌مانده سطح شکست مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری حاوی آهک هیدراته و زایکوترم بعد از سیکل ذوب و یخ در آزمایش کشش غیرمستقیم

نمونه	پوشش قیری باقی‌مانده بعد از سیکل ذوب و یخ (%)
HMA	۷۷
WS	۷۰
WS1.5H	۷۸/۶
WS2H	۸۳
WS2.5H	۸۹/۲
WS0.1Z	۸۱/۴
WS0.2Z	۹۰/۲
WS0.3Z	۹۵/۷۵
WF	۶۳
WF1.5H	۷۲,۴
WF2H	۷۸
WF2.5H	۸۶
WF0.1Z	۷۷
WF0.2Z	۸۷
WF0.3Z	۹۳

ها در هر دو حالت خشک و تر شد. در این آزمایش، برخلاف آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح‌شده، مخلوط‌های حاوی زایکوترم نسبت به آهک هیدراته مقاومت کنده‌شدگی بالاتری را در هر دو حالت خشک و تر از خود نشان دادند. در حالی که در آزمایش کشش غیرمستقیم، نمونه‌های حاوی آهک هیدراته دارای مقاومت کشش غیرمستقیم خشک بیشتری بودند. دلیل مقاومت کنده‌شدگی بالاتر نمونه‌های حاوی زایکوترم به عملکرد زایکوترم برمی‌گردد.

زایکوترم به دلیل مخلوط شدن با قیر و ایجاد یک شبکه به‌هم‌پیوسته قوی در بین قیر و سنگ‌دانه‌ها، هم چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه و هم پیوستگی درون قیر

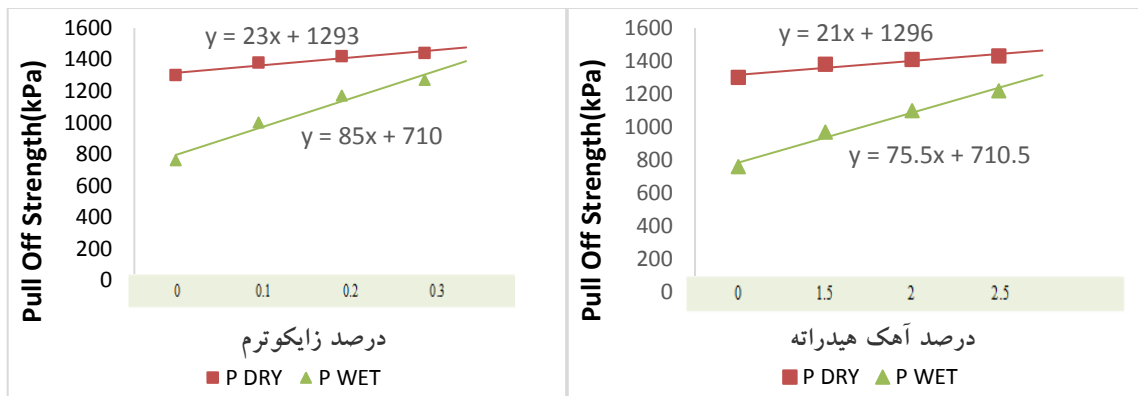
۳-۵. نتایج آزمایش کنده‌شدگی (Pull Off)

در این آزمایش، مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌های تر و خشک تعیین و مورد بررسی قرار گرفت. مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری نسبت به مخلوط آسفالت داغ از مقاومت کنده‌شدگی کمتری برخوردار بودند. در این آزمایش، شکست تابعی از پیوستگی درون قیر و چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه می‌باشد و هر مقدار این دو پارامتر بیشتر باشند مقدار مقاومت بالاتری به دست می‌آید. استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوترم در همه درصد‌های استفاده شده در این پژوهش باعث افزایش مقاومت کنده‌شدگی نمونه

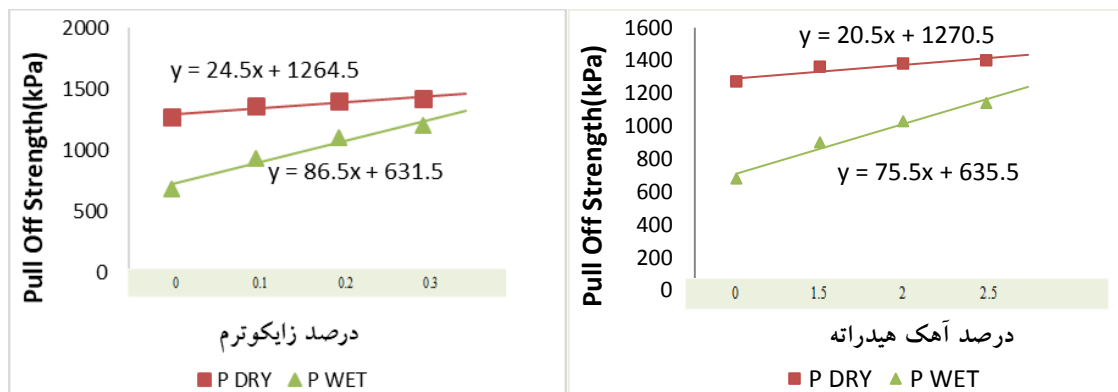
به‌کارگیری افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی برای افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) تولید شده با روش‌های مختلف

افزایش مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌ها در حالت تر نسبت به حالت خشک بیشتر می‌باشد که عملکرد خوب افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی را در برابر رطوبت نشان می‌دهد. در این آزمایش، مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی مقاومت کنده‌شدگی بیشتری را نسبت به مخلوط‌های آسفالت گرم کف‌قیری از خود نشان دادند.

را افزایش می‌دهد و به همین دلیل در کنده‌شدگی مقاومت بیشتری را نسبت به آهک از خود نشان داد. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشخص می‌باشد که شیب افزایش مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌های حاوی زایکوترم در هر دو حالت خشک و تر از نمونه‌های حاوی آهک هیدراته بیشتر می‌باشد. همچنین، شیب



شکل ۱۲. مقاومت کنده‌شدگی مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی حاوی آهک هیدراته و زایکوترم



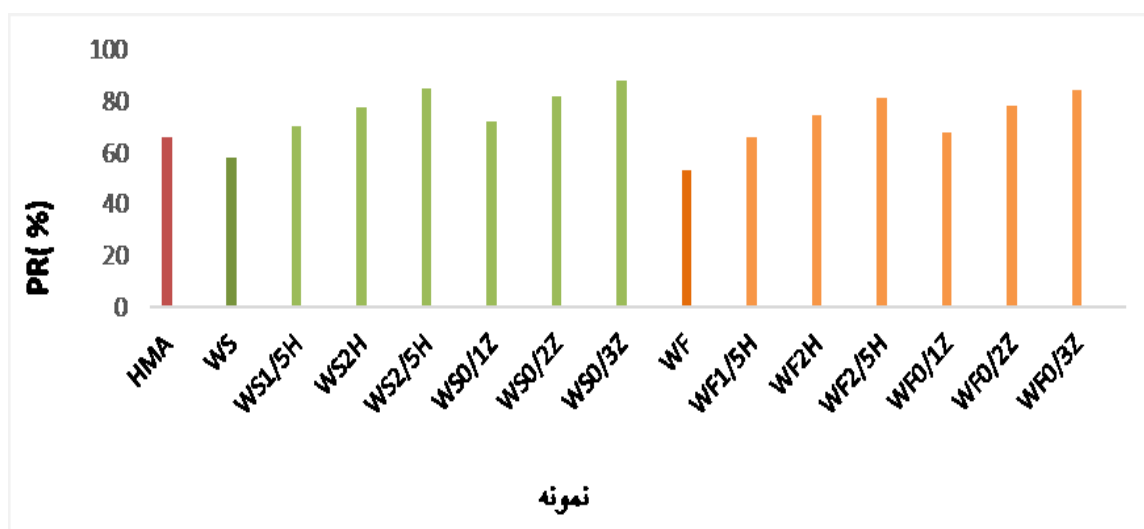
شکل ۱۳. مقاومت کنده‌شدگی مخلوط‌های آسفالت گرم کف‌قیری حاوی آهک هیدراته و زایکوترم

مخلوط‌های آسفالت گرم کف‌قیری حاوی ۲/۵ درصد آهک هیدراته و ۰/۳ درصد زایکوترم به حد قابل قبول بیش از ۸۰ درصد مقاومت در برابر عریان‌شدگی رسیده‌اند. با توجه به نمودار، افزودن ۲/۵ درصد آهک هیدراته و ۰/۳ درصد زایکوترم در مخلوط آسفالت گرم ساسوبیتی، مقدار پارامتر ضد‌عریان‌شدگی کنده‌شدگی را به ترتیب ۲۷ و ۳۰ درصد افزایش داده، و در مخلوط‌های آسفالت گرم کف‌قیری افزودن ۲/۵ درصد آهک هیدراته

همانند آزمایش TSR، برای این آزمایش نیز نسبت مقاومت کنده‌شدگی تر به خشک را می‌توان به‌عنوان یک پارامتر ضد‌عریان‌شدگی در نظر گرفت و نمونه‌های با نسبت مقاومت کنده‌شدگی تر به خشک (PR) بیشتر از ۸۰ درصد مقاومت کافی در برابر عریان‌شدگی را دارند. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۱۴، مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی حاوی ۲/۵ درصد آهک هیدراته و ۰/۲ و ۰/۳ درصد زایکوترم و همچنین

می‌باشد. از همین رو، افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بیشتر در این مخلوط‌ها باعث افزایش مقدار پارامتر ضد عریان‌شدگی شدند، هرچند که در نهایت مخلوط‌های ساسوبیتی مقاومت بالاتری در برابر عریان‌شدگی ثبت کردند. همچنین، درصد افزایش مقاومت در برابر عریان‌شدگی در مخلوط‌های حاوی زیاکوترم بیشتر بود، که حاکی از چسبندگی بیشتر قیر با سنگ‌دانه است.

و ۰/۳ درصد زیاکوترم، مقدار پارامتر ضد عریان‌شدگی کنده‌شدگی را به ترتیب ۲۸ و ۳۱ درصد افزایش داد. به‌طور کلی، استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در این پژوهش باعث بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری در برابر رطوبت شد. در مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری، مقدار چسبندگی قیر با سنگ‌دانه‌ها به نسبت مخلوط‌های ساسوبیتی کمتر



شکل ۱۴. نسبت مقاومت کنده‌شدگی مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری (WMA) و آسفالت داغ (HMA)

مقایسه نتایج بین سه آزمایش فوق در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ حاکی از آن است که ارتباط مستقیمی بین میزان پوشش قیری باقی‌مانده در آزمایش آب جوشان و مقاومت کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح‌شده (ITS) و مقاومت کنده‌شدگی (Pull Off) وجود دارد. با افزایش پوشش قیری، مقاومت کنده‌شدگی و مقاومت غیرمستقیم نمونه های خشک و تر افزایش پیدا کرده است. با توجه به شیب خط برازش داده شده برای هر حالت، مشاهده می‌شود که با افزایش پوشش قیری، میزان افزایش مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌ها بیشتر از افزایش مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌ها می‌باشد.

در آزمایش آب جوشان، میزان مقاومت نمونه در از دست ندادن پوشش قیری تابعی از چسبندگی می‌باشد و میزان چسبندگی قیر به سنگ‌دانه‌ها و همچنین پیوستگی

۴-۵. بررسی ارتباط بین نتایج آزمایش‌های

تعیین رطوبتی

برای بررسی روند نتایج آزمایش‌ها و ارتباط این آزمایش‌ها با هم، می‌توان آن‌ها را با هم مقایسه کرد. در واقع، برای مقایسه نتیجه دو آزمایش با یکدیگر از نمودار دوبعدی استفاده می‌شود، به‌طوری که نتیجه یکی از آزمایش‌ها به‌صورت متغیر مستقل و نتیجه آزمایش دیگر به‌صورت متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود و ارتباط بین تغییرات این نتایج تعیین می‌گردد.

۴-۵-۱. چگونگی ارتباط بین مقدار پوشش قیری با

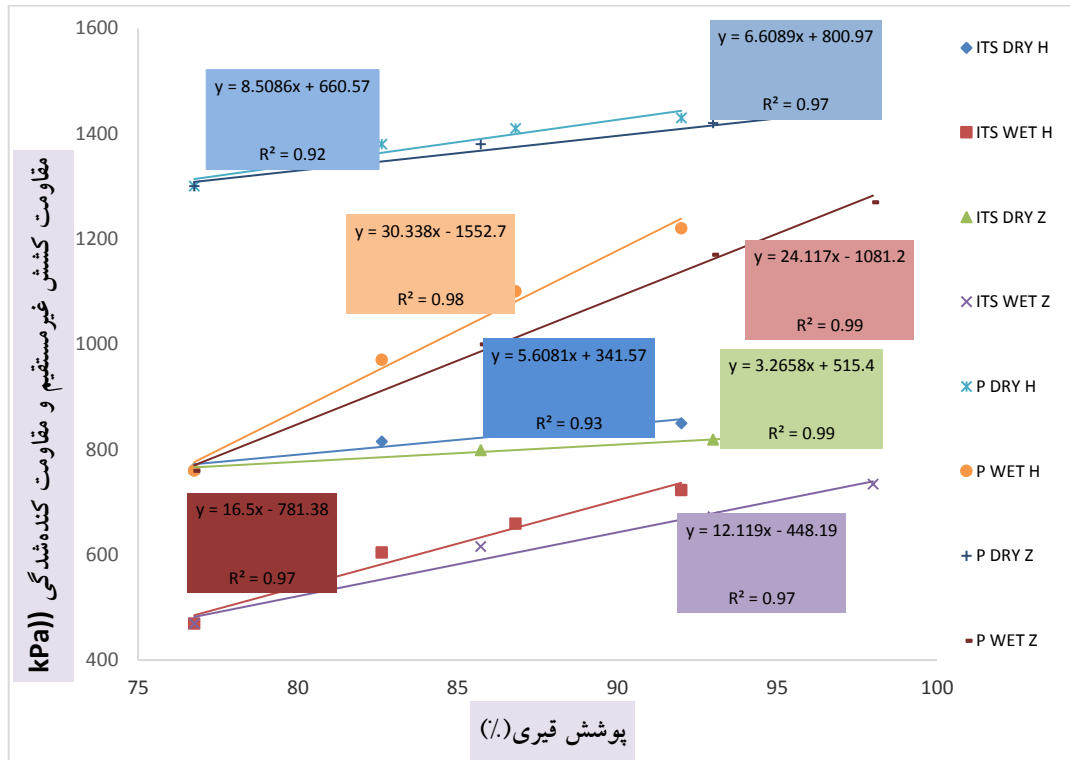
مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت کنده‌شدگی

خشک می‌باشد و تأثیر خوب افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی آهک هیدراته نیز شیب افزایش مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه‌های حاوی زایکوترم از خود نشان دادند. در حالی که نمونه‌های زایکوترمی بهترین عملکرد را در کاهش حساسیت رطوبتی داشتند. دلیل این امر به مقاومت بیشتر نمونه‌های حاوی آهک هیدراته در میزان پوشش قیری کمتر نسبت به نمونه‌های زایکوترم برمی‌گردد. نمونه‌های حاوی آهک هیدراته تقریباً در پوشش قیری به میزان ۹۰ درصد به بیشترین مقاومت خود رسیده‌اند. در حالی که نمونه‌های زایکوترمی در پوشش قیری نزدیک ۱۰۰ درصد به بیشترین مقاومت خود رسیدند.

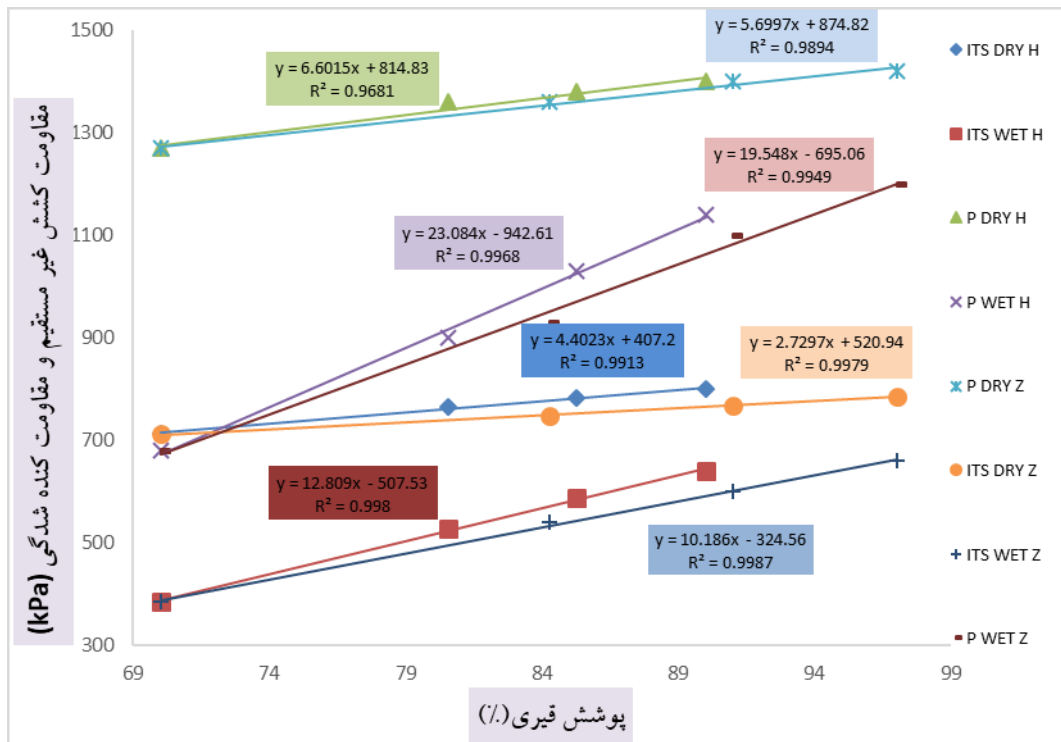
ارتباط بین نتایج آزمایش‌ها برای هر دو نوع مخلوط آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری رفتار مشابهی دارد. ولی شیب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌های ساسوبیتی بیشتر از نمونه‌های کف قیری می‌باشد. دلیل این امر، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت کنده‌شدگی بیشتر نمونه‌های ساسوبیتی در مقدار پوشش قیری یکسانی نسبت به نمونه‌های کف قیری می‌باشد، که چسبندگی و مقاومت کمتر نمونه‌های کف قیری را نشان می‌دهد. با توجه به مقدار R^2 نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که ارتباط قوی بین نتایج آزمایش‌ها برقرار بوده و نتایج آزمایش آب جوشان می‌تواند رفتار دو آزمایش دیگر را پیش‌بینی کند. همچنین، با توجه به مقدار P Value همه حالت‌ها، که کمتر از ۰/۰۵ بود، می‌توان به‌درستی این ارتباط اعتماد کرد.

درون خود قیر تعیین می‌کند که چه مقدار پوشش قیری باقی می‌ماند. با توجه به این‌که آزمایش کنده‌شدگی برخلاف آزمایش کشش غیرمستقیم بیشتر تابعی از چسبندگی قیر و سنگ‌دانه‌ها و همچنین، پیوستگی درون قیر می‌باشد، به ازای افزایش پوشش قیری، افزایش مقاومت بیشتری را ثبت کرده است. این امر نشان می‌دهد که آزمایش آب جوشان و آزمایش کنده‌شدگی بیشتر تابعی از چسبندگی قیر و آسفالت و پیوستگی درون قیر می‌باشند و افزودنی ضد‌عریان‌شدگی که بیشتر باعث افزایش چسبندگی قیر و آسفالت و پیوستگی درون قیر شود، بیشترین تأثیر را در نتایج این دو آزمایش دارد. در حالی که در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، علاوه بر چسبندگی، سختی و اصطکاک درون مخلوط نیز مؤثر می‌باشند.

با مقایسه ارتباط بین نتایج نمونه‌های خشک و تر هر دو آزمایش کشش غیرمستقیم و آزمایش کنده‌شدگی با آزمایش آب جوشان، مشاهده می‌شود که درصد افزایش مقاومت نمونه‌های تر به ازای افزایش پوشش قیری، چند برابر نمونه‌های خشک می‌باشد. دلیل این امر به نوع عملکرد افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی برمی‌گردد. در واقع، عملکرد اصلی افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی در هنگام مواجهه با رطوبت می‌باشد و در این حالت افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی تأثیر خود را بیشتر نشان می‌دهند و باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها در هنگام سیکل ذوب و یخ می‌شوند. به همین دلیل، شیب افزایش مقاومت نمونه‌های تر بیشتر از شیب افزایش مقاومت نمونه‌های



شکل ۱۵. ارتباط بین مقاومت کششی غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده و مقاومت کنده‌شدگی با مقدار پوشش قیری مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوییتی (WS)



شکل ۱۶. ارتباط بین مقاومت کششی غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده و مقاومت کنده‌شدگی با مقدار پوشش قیری مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری (WF)

به‌کارگیری افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی برای افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) تولید شده با روش‌های مختلف

۵-۴-۲. چگونگی ارتباط بین مقدار پوشش قیری با

نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مقاومت

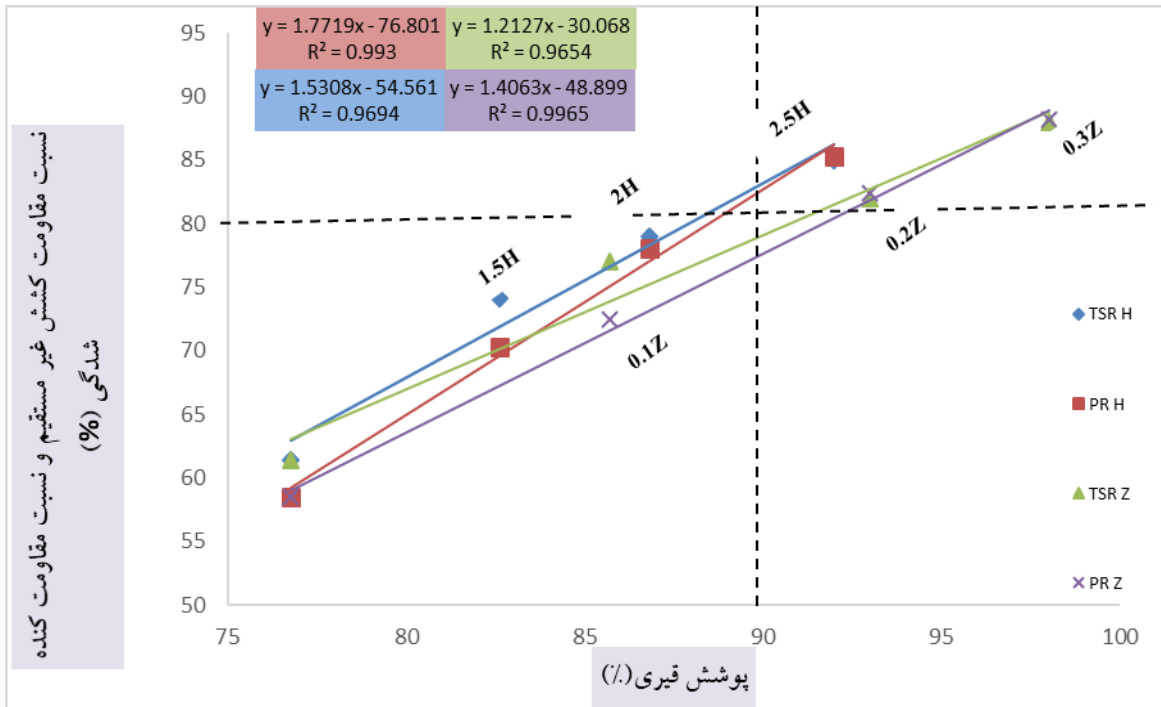
کنده‌شدگی

با افزایش پوشش قیری، نسبت مقاومت نمونه‌ها در هر دو آزمایش کشش غیرمستقیم و مقاومت کنده‌شدگی افزایش پیدا کرده است. افزایش پوشش قیری نمونه‌ها در آزمایش آب جوشان در نتیجه افزایش مقدار افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی بود و زایکوترم بیشترین میزان پوشش قیری را نتیجه داد. نسبت مقاومت کنده‌شدگی و میزان پوشش قیری بیشتر در واقع حاصل عملکرد افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی است و لذا شاید بتوان نتیجه گرفت که پوشش قیری می‌تواند نشانگر میزان تأثیر افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی باشد.

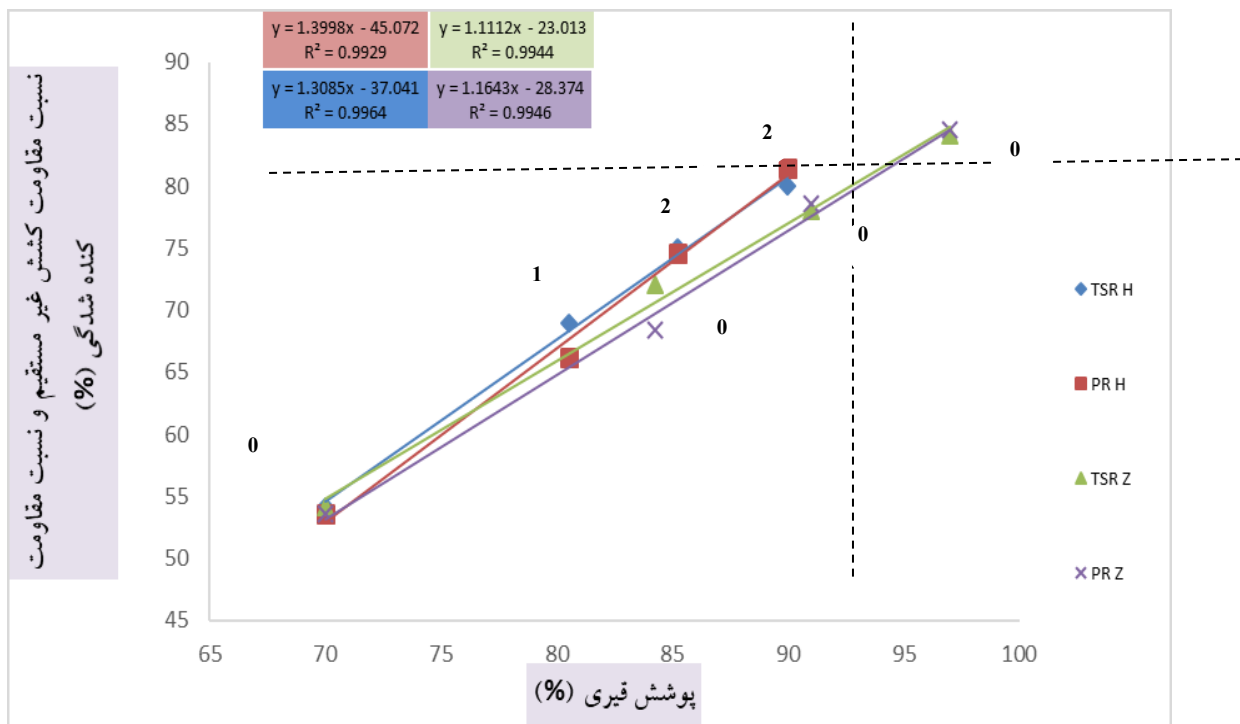
با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸، مشاهده می‌گردد که در مخلوط‌های کف قیری با کمترین مقدار پوشش قیری، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها (TSR) بیشتر از نسبت مقاومت کنده‌شدگی آنها (PR) می‌باشد. دلیل این امر وابستگی مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌ها به پوشش قیری می‌باشد و هرچه ضخامت پوشش قیری و چسبندگی و پیوستگی قیر بیشتر باشد مقاومت کنده‌شدگی بیشتر و در نتیجه نسبت مقاومت کنده‌شدگی هم بالاتر می‌باشد. در حالی که، علاوه بر پوشش قیری، اصطکاک سنگ‌دانه‌ها به یکدیگر در درون مخلوط و سختی آن نیز بر مقاومت کششی غیرمستقیم تأثیر می‌گذارند. همچنین، با افزایش پوشش قیری، شیب افزایش نسبت مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌ها بیشتر از شیب افزایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم آنها می‌باشد. در درصد

پوشش قیری بیشتر، تقریباً نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌ها برابر بوده و با افزایش ضخامت پوشش قیری، حساسیت رطوبتی نمونه‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند.

مقدار پوشش قیری بیش از ۹۰ درصد و نسبت مقاومت کنده‌شدگی و نسبت کشش غیرمستقیم بیش از ۸۰ درصد نیز به مفهوم آن است که از لحاظ مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی، نمونه‌ها مورد قبول می‌باشند. لذا مخلوط‌هایی که TSR بیشتر از این محدوده دارند را می‌توان در برابر حساسیت رطوبتی مقاوم دانست. با توجه به این موضوع و همچنین خط رسم شده در نمودارها در نقطه با پوشش قیری ۹۰ درصد می‌توان مشاهده کرد که در مخلوط‌های ساسوییتی (WS) نمونه‌های حاوی ۰/۳ و ۰/۲ درصد زایکوترم و ۲/۵ درصد آهک هیدراته در محدوده قابل قبول می‌باشند. همچنین، در مخلوط‌های کف قیری (WF) نمونه‌های حاوی ۰/۳ درصد زایکوترم مناسب می‌باشند و نمونه‌های حاوی ۲/۵ درصد آهک هیدراته روی مرز قرار گرفته‌اند. لذا با ضریب اطمینان کمتری نسبت به دو نمونه دیگر می‌توان آنها را نیز قابل قبول دانست. با توجه به این موارد و مقادیر زیاد R^2 خط برازش داده شده روی نتایج می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نسبت مقاومت کنده‌شدگی وابستگی بیشتری به درصد پوشش قیری نمونه‌ها داشته و پوشش بیشتر و قوی‌تری که موجب افزایش نسبت مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌ها می‌شود، بهتر می‌تواند رفتار آن را پیش‌بینی کند. همچنین، با توجه به اینکه مقدار P Value همه حالت‌ها کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد می‌توان به درستی نتایج اعتماد کرد.



شکل ۱۷. ارتباط بین نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مقاومت کنده‌شدگی با مقدار پوشش قیری مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری (WF)



شکل ۱۸. ارتباط بین نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مقاومت کنده‌شدگی با مقدار پوشش قیری مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری (WF)

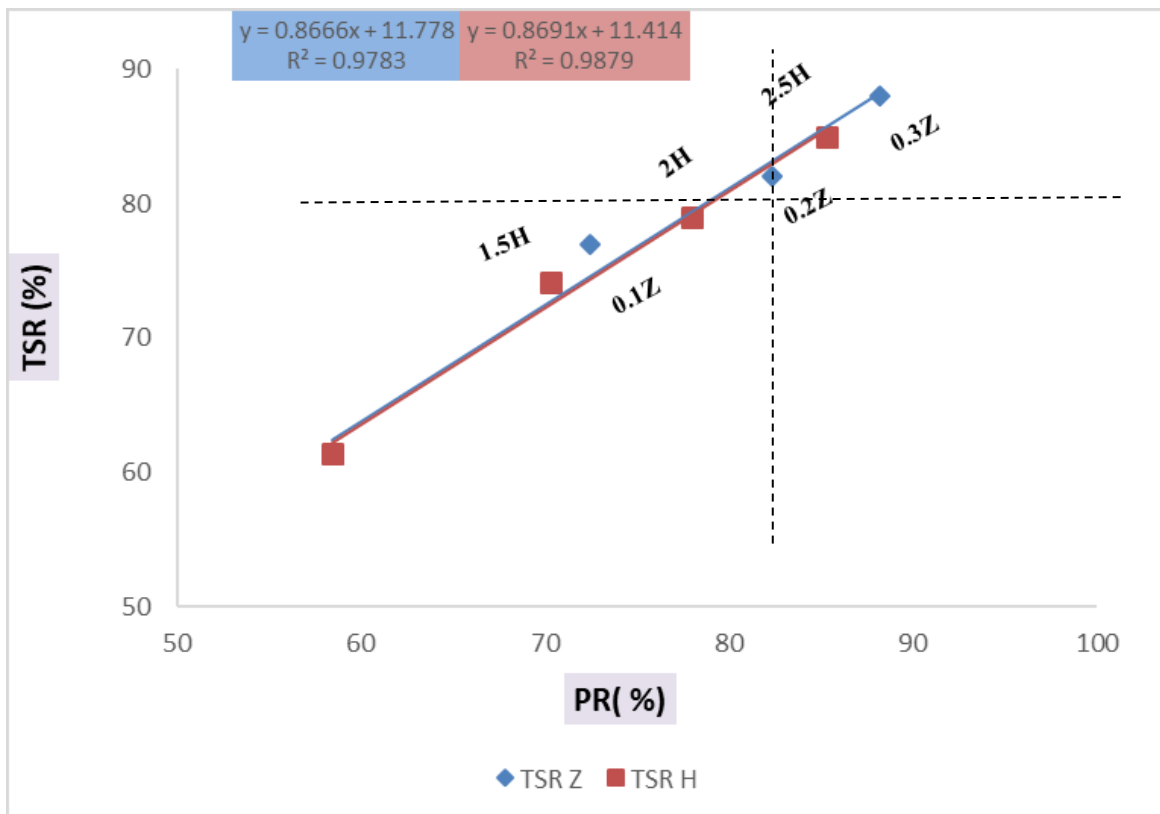
به‌کارگیری افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی برای افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) تولید شده با روش‌های مختلف

۳-۴-۵. چگونگی ارتباط بین نسبت مقاومت

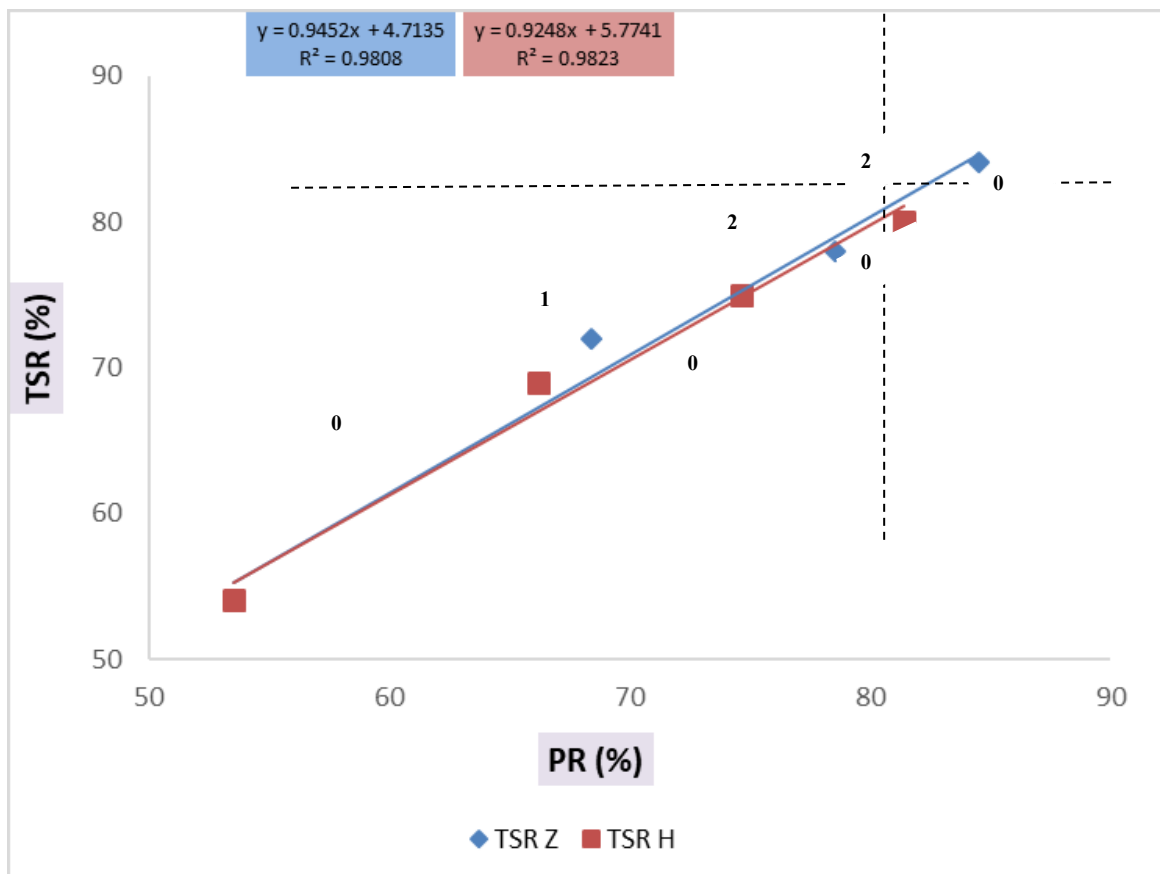
کنده‌شدگی با نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم

نسبت مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌ها (PR) همانند نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نشان‌دهنده میزان حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی می‌باشد. هرچه مقدار PR بیشتر باشد نشان‌دهنده حساسیت کمتر مخلوط‌های آسفالتی به رطوبت می‌باشد. به عبارت دیگر، مخلوط با PR بالای ۸۰ درصد دارای حساسیت رطوبتی کم و قابل قبول است. افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی باعث افزایش نسبت مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌ها شده‌اند. در واقع، PR می‌تواند رفتار افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی را در تغییرات مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها پیش‌بینی کند. با توجه به شکل‌های ۱۹ و ۲۰ و این‌که

مقادیر PR و TSR بیش از ۸۰ درصد محدوده قابل قبول از نظر حساسیت رطوبتی می‌باشند، مشاهده می‌شود که در مخلوط‌های ساسوبیتی نمونه‌های حاوی ۰/۳ و ۰/۲ درصد زایکوترم و ۲/۵ درصد آهک هیدراته در محدوده قابل قبول می‌باشند. همچنین، در مخلوط‌های کف‌گیری (WF) نمونه‌های حاوی ۲/۵ درصد آهک و ۰/۳ درصد زایکوترم در محدوده قابل قبول قرار دارند و مابقی نقاط دارای حساسیت رطوبتی زیاد می‌باشند. با توجه به اینکه مقدار R^2 خط‌های برازش داده شده نزدیک ۱۰۰ درصد می‌باشد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که PR در محدوده تعیین شده می‌تواند تغییرات نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها را به‌خوبی پیش‌بینی کند. به‌علاوه، P Value همه حالت‌ها کمتر از ۰/۰۵ بود که نشان از قابل اعتماد بودن نتایج دارد.



شکل ۱۹. ارتباط بین نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم لاتمن اصلاح‌شده با نسبت مقاومت کنده‌شدگی مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی (WS)



شکل ۲۰. ارتباط بین نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده با نسبت مقاومت کنده‌شدگی مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری (WF)

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیرات آسیب رطوبتی بر مخلوط‌های آسفالت گرم بررسی شد. برای این منظور، دو نوع مخلوط آسفالت گرم با ساسوبیت و دستگاه کف قیر (روش مکانیکی) ساخته شد. سپس، برای بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم از دو افزودنی ضد عریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوترم با درصدهای مختلف، استفاده شد. در این پژوهش، از آهک هیدراته به میزان ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزنی مخلوط و زایکوترم به میزان ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی قیر استفاده شد. سپس، برای بررسی میزان تأثیر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم، آزمایش‌های رطوبتی انجام شد. از سه آزمایش آب جوشان، نسبت کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده

(TSR) و مقاومت کشش مستقیم (Pull Off) استفاده شد. نتایج مربوط به هر آزمایش برای هر دو نوع آسفالت گرم ساخته شده با افزودنی‌های مختلف تجزیه و تحلیل گردید که به شرح زیر می‌باشد:

- مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با سنگ‌دانه‌های سیلیسی به دلیل واکنش ضعیف قیر و سنگ‌دانه‌ها و چسبندگی ضعیف بین قیر و سنگ‌دانه، حساسیت رطوبتی بالایی داشتند که لزوم استفاده از مواد افزودنی ضد عریان‌شدگی در آن‌ها را مورد تأیید قرار می‌داد.
- مخلوط‌های آسفالت گرم به دلیل دمای کمتر قیر و سنگ‌دانه‌ها در مقایسه با مخلوط‌های آسفالت داغ، حساسیت رطوبتی بیشتری داشتند. همچنین، مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری نسبت به

- مخلوط‌های آسفالت گرم ساسوبیتی حساسیت رطوبتی بیشتری داشتند.
- افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوترم باعث افزایش مقاومت رطوبتی نمونه‌ها شدند. با افزایش مقدار درصد افزودنی‌ها، حساسیت رطوبتی نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کرد.
 - - با توجه به نتایج، افزودن ۲/۵ درصد آهک هیدراته و ۰/۳ درصد زایکوترم در مخلوط آسفالت گرم ساسوبیتی، مقدار پوشش قیری را به ترتیب ۱۵ و ۲۲ درصد، نسبت کشش غیرمستقیم را ۲۱ و ۲۷ درصد و نسبت مقاومت کنده‌شدگی را ۲۷ و ۳۰ درصد افزایش داده، و در مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری مقدار پوشش قیری را به ترتیب ۲۰ و ۲۷ درصد، نسبت کشش غیرمستقیم را ۲۶ و ۳۰ درصد و نسبت مقاومت کنده‌شدگی را ۲۸ و ۳۱ درصد افزایش دادند. همچنین، مخلوط‌های ساسوبیتی (WS) نمونه‌های حاوی ۰/۳ و ۰/۲ درصد زایکوترم و ۲/۵ درصد آهک هیدراته در محدوده قابل قبول می‌باشند. همچنین، در مخلوط‌های کف قیری (WF) نمونه‌های حاوی ۰/۳ درصد زایکوترم مناسب می‌باشند و نمونه‌های حاوی ۲/۵ درصد آهک هیدراته روی مرز قرار گرفته‌اند.
 - با توجه به اینکه زایکوترم نسبت به آهک هیدراته باعث می‌شود مخلوط آسفالتی نرم‌تر شود، لذا، استفاده از زایکوترم برای مناطق گرم و مستعد شیارشدگی چندان مناسب نمی‌باشد. همچنین، آهک هیدراته باعث می‌شود مخلوط آسفالتی سخت‌تر شود
- و امکان شکنندگی بیشتر آن را در مناطق با آب و هوای سرد بالا می‌برد.
- با توجه به ارتباط نتایج آزمایش‌ها با هم مشخص شد که با افزایش پوشش قیری، مقاومت کنده‌شدگی و مقاومت غیرمستقیم نمونه‌های خشک و تر افزایش پیدا کرده است. همچنین، با افزایش پوشش قیری، میزان افزایش مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌ها بیشتر از افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها می‌باشد و پوشش قیری می‌تواند رفتار افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی را شبیه‌سازی کند.
 - با توجه به ارتباط بین نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که هر دو نوع مخلوط آسفالت گرم ساسوبیتی و کف قیری رفتار مشابهی دارند. ولی با افزایش میزان پوشش قیری نمونه‌ها، شیب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌های ساسوبیتی بیشتر از نمونه‌های کف قیری می‌باشد. مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت کنده‌شدگی نمونه‌های ساسوبیتی در مقدار پوشش قیری یکسانی نسبت به نمونه‌های کف قیری بیشتر می‌باشد، که چسبندگی و مقاومت کمتر نمونه‌های کف قیری را نشان داد.
 - افزودنی ضد عریان‌شدگی زایکوترم نسبت به آهک هیدراته عملکرد بهتری را در کاهش حساسیت رطوبتی نمونه‌ها از خود نشان داد و زایکوترم به میزان ۰/۳ درصد وزنی قیر بهترین عملکرد را در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نتیجه داد.

۷. مراجع

- علیزاده، ع.، عمرانی، ح. و منجم، س. ۱۳۹۲. "بررسی تأثیر مواد ضد عریان‌شدگی بر روی مخلوط‌های آسفالتی گرم WMA". هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.
- AASHTO, T283. 2002. "Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abdi, A., Kavusi, A., Adresi, M. and Mirbaha, B. 2017. "Evaluation of stripping in asphalt concrete pavement by experimental methods". Modares Civ. Eng. J., 17(1): 135-144.

- Damm, K., Abraham, J., Butz, T., Hildebrand, G. and Riebesehl, G. 2002. "Asphalt flow improvers as intelligent fillers for hot asphalts-a new chapter in asphalt technology". *J. Appl. Asphalt Binder Technol.*, 2(1): 36-69.
- Akisetty, Ch. 2008. "Evaluation of warm asphalt additives on performance properties of CRM binders and mixtures". PhD Dissertation, Clemson University.
- Al-Tameemi, A. F., Wang, Y., Albayati, A. and Haynes, J. 2019. "Moisture susceptibility and fatigue performance of hydrated lime-modified asphalt concrete: Experiment and design application case study". *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(4): 04019019.
- Ameri, M., Hesami, S. and Goli, H. 2013. "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag". *Constr. Build. Mater.*, 49: 611-617.
- Ameri, M., Vamegh, M., Chavoshian Naeni, S. F. and Molayem, M. 2018. "Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik, Zycotherm and hydrated lime". *Constr. Build. Mater.*, 165: 958-965.
- Anderson, R., Baumgardner, G., May, R. and Reinke, G. 2008. "Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies". Interim Report.
- ASTM D3625-96. 2005. "Standard practice for effect of water on bituminous-coated aggregate using boiling water". American Society for Testing and Materials, Book of Standards.
- Bolin, B. 1998. "The Kyoto negotiations on climate change: A science perspective". *Sci.*, 279(5349): 330-331.
- Bonaquist, R. F. 2011. "Mix design practices for warm-mix asphalt". Transport. Res. Board, NCHRP, Report No. 691.
- Chowdhury, A. and Button, J. W. 2008. "A review of warm mix asphalt. Texas Transportation Institute.
- Csanyi, L. H. 1957. "Foamed asphalt in bituminous paving mixtures". Highway Research Board Bulletin, 160.
- Edwards, Y. and Isacson, U. 2005. "Wax in bitumen: Part II- characterization and effects". *Road Mater. Pavement Design*, 6(4): 439-468.
- Fee, D., Maldonado, R., Reinke, G. and Romagosa, H. 2010. "Polyphosphoric acid modification of asphalt". *Transport. Res. Record*, 2179(1): 49-57.
- Hasan, M. R. M., You, Z., Porter, D. and Goh, S. W. 2015. "Laboratory moisture susceptibility evaluation of WMA under possible field conditions". *Constr. Build. Mater.*, 101: 57-64.
- Hasan, M. R. M., You, Z. and Yang, X. 2017. "A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques". *Constr. Build. Mater.*, 152: 115-133.
- https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o17626v77_W_brochure_FoamedBitumen_0219_V1_EN.pdf
- Hagedorn, R. M. 2014. "Temperature sensitivity of foamed warm mix asphalt". Civil Engineering Undergraduate Honors Theses, University of Arkansas, Fayetteville.
- Ibrahim, I. and Mehan, H. N. A. 2015. "The effect of nano-materials on hot mixture asphalt-concrete". *Open J. Civ. Eng.*, 5(04): 419.
- Ismael, M. Q. and Ahmed, A. H. 2019. "Effect of hydrated lime on moisture susceptibility of asphalt mixtures". *J. Eng.*, 25(3): 89-101.
- James, R. 1965. "Metering of steam-water two-phase flow by sharp-edged orifices". *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 180(1): 549-572.
- Jamshidi, A., Hamzah, M. O. and You, Z. 2013. "Performance of warm mix asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art". *Constr. Build. Mater.*, 38: 530-553.
- Jenkins, K. J., Molenaar, A. A. A., De Groot, J. L. A. and Van de Ven, M. F. C. 2002. "Foamed asphalt produced using warmed aggregates". Asphalt Paving Technology 2002 Conference,
- Kavussi, A. and Motevalizadeh, S. M. 2021. "Fracture and mechanical properties of water-based foam warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement". *Constr. Build. Mater.*, 269, 121332.
- Khodaii, A., Tehrani, H. K. and Haghshenas, H. F. 2012. "Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 36: 165-170.
- Kim, Y. R., Lutif, J. S., Bhasin, A. and Little, D. N. 2008. "Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing". *J. Mater. Civ. Eng.*, 20(10): 659-667.
- Magdaleno-López, C. and de Jesús Pérez-Bueno, J. 2020. "Quantitative evaluation for the ASTM D4541-17/D7234 and ASTM D3359 adhesion norms with digital optical microscopy for surface modifications with flame and APPJ". *Int. J. Adhesion Adhesives*, 98: 102551.

- Masson, J. F., Pelletier, L. and Collins, P. 2001. "Rapid FTIR method for quantification of styrene-butadiene type copolymers in bitumen". *J. Appl. Polymer Sci.*, 79(6): 1034-1041.
- McCann, M. and Sebaaly, P. E. 2006. "Evaluating the performance of lime in hot mix asphalt mixtures". *Airfield and Highway Pavements Specialty Conference 2006*.
- Mirzababaei, P. 2016. "Effect of Zycotherm on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations". *Constr. Build. Mater.*, 116: 403-412.
- Mirzababaei, P., Moghadas Nejad, F. and Naderi, K. 2018. "Effect of liquid silane-based anti-stripping additives on rheological properties of asphalt binder and hot mix asphalt moisture sensitivity". *Road Mater. Pavement Design*, 212: 570-585.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A. R., Hamedi, Gh. H. and Azarhoosh, M. J. 2012. "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 31: 384-388.
- Muthen, K. M. 1998. "Foamed asphalt mixes-mix design procedure". *Transport. Res. Record*, 898: 290-296.
- Newcomb, D. E., Arambula, E., Yin, F., Zhang, J., Bhasin, A., Li, W. and Arega, Z. 2015. "Properties of foamed asphalt for warm mix asphalt applications". *NCHRP 807*.
- Sanij, H. K., Meybodi, P. A., Hormozaky, M. A., Hosseini, S. H. and Olazar, M. 2019. "Evaluation of performance and moisture sensitivity of glass-containing warm mix asphalt modified with ZycothermTM as an anti-stripping additive". *Constr. Build. Mater.*, 197: 185-194.
- Stroup-Gardiner, M. and Newcomb, D. 1990. "Comparison of dolomitic and normally hydrated lime as antistripping additives". *Transport. Res. Record*, 1269: 56-68.
- Watson, D., Moore, J. R., Taylor, A. J. and Wu, P. 2013. "Effectiveness of antistrip agents in asphalt mixtures". *Transport. Res. Record*, 2370(1): 128-136.
- Xiao, Y., Van de Ven, M. F. C., Wu, S. P. and Woldekidan, M. F. 2012. "Advanced pull test to determine adhesion properties of thin surfaces for pavement". *ISAP 2012: International Symposium on Heavy Duty Asphalt Pavements and Bridge Deck Pavements*, Nanjing, China, 23-25 May.
- Zaidi, S. B. A., Airey, G. D., Grenfell, J., Alfaqawi, R. M., Ahmed, I., Ahmad, N. and Haynes, M. 2021. "Moisture susceptibility of hydrated lime modified mastics using adhesion test methods and surface free energy techniques". *Int. J. Pavement Eng.*, 22(7): 829-841.
- Ziari, H., Mirzababaei, P., Babagoli, R. and Moniri, A. 2015. "Effect of aggregate type on functional properties of warm mixed asphalt modified with Zycotherm". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 1(3): 63-76.
- Zou, J., Isola, M., Roque, R., Chun, S., Koh, C., and Lopp, G. 2013. "Effect of hydrated lime on fracture performance of asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.*, 44: 302-308.