

بررسی تأثیر ایوانیک بر مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و عملکرد عریان شدگی مخلوط گرم آسفالتی

مقاله پژوهشی

آرمان جلیلی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری و حمل و نقل، واحد علوم و تحقیقات،

دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علیرضا سرکار*، استادیار، گروه راه و ترابری و حمل و نقل، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sarkar@srbiau.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۴/۱۸ - پذیرش: ۹۹/۰۲/۰۵

صفحه ۱۶۸-۱۵۱

چکیده

حساسیت رطوبتی یکی از رایج‌ترین خرابی‌های روسازی است، که در اثر از بین رفتن پیوستگی قیر و یا چسبندگی قیر- سنگدانه در اثر نفوذ رطوبت اتفاق می‌افتد. در این پژوهش، به بررسی تأثیر اصلاح قیر خالص ۷۰-۶۰ با مقادیر ۰.۱، ۰.۳ و ۰.۵ درصد وزنی قیر ایوانیک بر عملکرد عریان شدگی مخلوط گرم آسفالتی با مصالح سیلیسی پرداخته شده است. عملکرد عریان شدگی قیر و مخلوط‌های آسفالتی با اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه و آزمایشات مکانیکی از قبیل تست لاتمن اصلاح شده، مدول برجهندگی، انرژی شکست و آب جوشان مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با تست خزش دینامیکی بررسی شد. نتایج تست‌های مکانیکی نشان می‌دهد که شاخص‌های مکانیکی از قبیل نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و انرژی شکست در نمونه‌های اشباع به خشک برای مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده با ایوانیک افزایش می‌یابد، همچنین پوشش قیری سنگدانه در آزمایش آب جوشان در مخلوط‌های اصلاح شده با ایوانیک نیز افزایش یافته است. نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با ۰.۳ و ۰.۵ درصد ایوانیک، مقدار حداقل شاخص‌های حساسیت رطوبتی برای اطمینان از مقاومت در برابر عریان شدگی را برآورده می‌کنند. همچنین اصلاح قیر با ایوانیک باعث افزایش مقادیر مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی کل قیر، مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی قیر و همچنین انرژی آزاد چسبندگی قیر - سنگدانه می‌شود و انطباق خوبی بین نتایج تست‌های انرژی آزاد سطحی قیر و تست‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی وجود دارد. نتایج تست خزش دینامیکی نشان می‌دهد که استفاده از ایوانیک تا ۰.۳ درصد وزنی قیر تغییری در عدد روانی ایجاد نمی‌کند ولی درصد ایوانیک بیشتر عدد روانی را به میزان ناچیزی کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط گرم آسفالتی، انرژی آزاد سطحی، ایوانیک، حساسیت رطوبتی و شیارشدگی

۱- مقدمه

شدگی، یکی از انواع خرابی‌های رویه‌های آسفالتی است که می‌تواند مقدمه‌ای برای بروز خرابی‌های دیگر مانند ترک‌خوردگی، شیار شدگی مسیر چرخ‌ها، بیرون پریدگی، ایجاد چاله و ترک‌های پوست‌سوماری باشد (Little et al. 2006). مؤلفه‌های مختلفی از قبیل خصوصیات قیر، سنگدانه، نحوه تولید، شرایط محیطی و دیگر عوامل بر عریان

کاهش مقاومت و دوام مخلوط‌های آسفالتی در اثر رطوبت، خرابی رطوبتی (عریان شدگی) تعریف می‌شود. اصلی‌ترین علت آسیب رطوبتی تخریب چسبندگی بین قیر و سنگدانه در حضور آب است ولی علل دیگری از جمله تخریب پیوستگی بین قیر و یخ‌زدگی نیز از عوامل وقوع آسیب‌های رطوبتی است (Little and Jones IV 2003). عریان

آهکی عملکرد بهتری در مقابل آسیب رطوبتی از خود نشان می‌دهند (Hamedi and Moghadas Nejad 2015). میرزا بابایی در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر نوع دانه‌بندی بر عملکرد عریان شدگی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم ساخته‌شده با قیر اصلاح شده با ۰٫۱ درصد وزنی قیر زایکوترم پرداخت. در این پژوهش از دو نوع مصالح آهکی و سیلیسی با دانه‌بندی شماره ۴ و دانه‌بندی شماره ۵، منطبق بر آیین‌نامه روسازی مخلوط‌های آسفالتی استفاده‌شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، تأثیر این افزودنی بر بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده با مصالح سیلیسی بسیار قابل توجه است و تمام شاخص‌های حساسیت رطوبتی را افزایش می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تأثیر نوع دانه‌بندی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده با هر دو نوع مصالح سنگی آهکی و سیلیسی ناچیز است (Mirzababaei 2016). شفابخش و همکاران در سال ۲۰۱۵ از ماده ضد عریان شدگی زایکوترم برای افزایش مقاومت عریان شدگی قیرهای گوگردی استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اصلاح قیرگوگردی با زایکوترم به نحو قابل ملاحظه‌ای باعث بهبود مقدار انرژی آزاد سطحی کل قیر و مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی قیرگوگردی و همچنین بهبود شاخص‌های مکانیکی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود. بنابراین استفاده از زایکوترم باعث رفع مشکل عریان شدگی در مخلوط‌های ساخته‌شده با قیرهای گوگردی خواهد شد (Shafabakhsh et al. 2015). حامدی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر اصلاح قیر خالص ۷۰-۶۰ با ۲ و ۴ درصد وزنی قیر زایکوسویل، بر عملکرد عریان شدگی مخلوط آسفالتی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اصلاح قیر با زایکوسویل به نحو قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش انرژی پیوستگی قیر و افزایش چسبندگی قیر - سنگدانه و همچنین بهبود شاخص‌های مکانیکی عریان شدگی مخلوط آسفالتی می‌شود. میزان این افزایش در نمونه‌های حاوی ۴ درصد زایکوسویل محسوس‌تر است (Hamedi and Tahami 2017). مطالعات عامری و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز نشان می‌دهد اصلاح قیر با ۰٫۵ درصد وزنی قیر زایکوسویل، باعث افزایش شاخص‌های حساسیت رطوبتی در سیکل‌های متعدد ذوب و یخ خواهد شد (Ameri, Kouchaki et al. 2013). بهبهانی و

شدگی مخلوط آسفالتی تأثیرگذار است. اکثر آزمایش‌های موجود برای تعیین پتانسیل خرابی رطوبتی مخلوط آسفالتی، مبتنی بر انجام آزمایشات مکانیکی در شرایط خشک و مرطوب است. عدم اندازه‌گیری خصوصیات مؤثر مواد و نقش آن‌ها به منظور تعیین آنکه کدام جزء از ترکیب مخلوط آسفالتی (قیر، سنگدانه، فیلر) در خرابی رطوبتی مؤثر است و سایر کمبودهای روش‌های آزمایشگاهی باعث شده است، روش‌هایی مبتنی بر خصوصیات بنیادین مواد که در پیوستگی قیر و چسبندگی قیر - سنگدانه مؤثر هستند، برای تعیین مکانیسم خرابی رطوبتی و بررسی تأثیر افزودنی‌های عریان شدگی بر عملکرد مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گیرند (Hamedi and Tahami, 2017). روش‌های مختلفی برای کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی وجود دارند. اصلاح قیر با نانو مواد و مواد ضد عریان شدگی، اصلاح پوشش قیری سنگدانه با پلیمرهای مایع و نانو ذرات و استفاده از پودرهای جامد مانند سیمان و خاکستر بادی از جمله این روش‌ها هستند. در ادامه به بررسی مطالعات پیشین در زمینه اصلاح قیر با مواد ضد عریان شدگی، پرداخته می‌شود. عربانی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی تأثیر اصلاح قیر خالص ۷۰-۶۰ با دو نوع ماده ضد عریان شدگی و تفیکس AP و BE بر عملکرد عریان شدگی مخلوط آسفالتی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که و تفیکس AP باعث افزایش بیشتر مقدار انرژی آزاد چسبندگی قیر - سنگدانه می‌شود. همچنین میزان افزایش انرژی آزاد چسبندگی در مورد نمونه‌های گرانیته چشمگیرتر از نمونه‌های آهکی است (Arabani and Hamedi 2014). حامدی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی تأثیر اصلاح قیر با ۰٫۴ درصد وزنی قیر و تفیکس AP-17 بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده با ۸ نوع سنگدانه مختلف و دو نوع قیر ۶۰/۷۰ با درجه نفوذ ۶۴ و ۶۷ پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش درجه نفوذ قیر پایه، مقادیر مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی کل و مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی افزایش می‌یابند، این مطلب نشان‌دهنده آن است که با افزایش درجه نفوذ قیرها پوشش‌پذیری آن‌ها به دور سنگدانه افزایش می‌یابد، که می‌تواند منجر به افزایش مقاومت در برابر عریان شدگی این مخلوط‌ها گردد. همچنین مخلوط‌های ساخته‌شده با مصالح

سطحی جسم مایع در تماس با بخار مایع و Γ_{SL} انرژی آزاد سطحی فصل مشترک مایع-جامد است.

مطابق رابطه یانگ کشش سطحی از آزمایش زاویه تماس، هنگامی که قطره مایع، روی سطح جامد کاملاً صاف و صلب قرار می‌گیرد، به شرح زیر است (Hefer 2005).

(۲)

$$\Gamma_{SV} = \Gamma_{SL} + \Gamma_{LV} \cos \theta$$

فشار انتشار: انرژی فصل مشترک جامد-بخار (Γ_{SV})، با انرژی آزاد چسبندگی جسم جامد برابر نمی‌باشد، هنگامی که بخار توسط سطح جامد جذب می‌شود، انرژی آزاد آن کاهش می‌یابد. فشار به صورت زیر بیان می‌شود (Bhasin 2007).

(۳)

$$\pi_c = \Gamma_S - \Gamma_{SV}$$

که در آن: Γ_S انرژی آزاد سطحی جسم جامد در خلأ و π_c فشار انتشار بخار است.

رابطه یانگ - دوپری: با استفاده از ترکیب معادله دوپری و یانگ، رابطه بسیار مهمی به دست می‌آید که معمولاً برای تعیین انرژی آزاد سطحی جامدات به کار برده می‌شود و به رابطه یانگ - دوپری شناخته می‌شود.

(۴)

$$W_{SL} = \Gamma_{LV} (1 + \cos \theta) + \pi_c$$

۲-۲- نظریه انرژی آزاد سطحی

تئوری‌های مختلفی برای محاسبه انرژی آزاد سطحی مواد وجود دارد که متداول‌ترین این تئوری‌ها، نظریه اسپیدی-بازی است. بر اساس این نظریه، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده‌ای، بر اساس نوع نیروهای مولکول‌های سطحی به سه مؤلفه تقسیم می‌شوند (Van Oss et al. 1988)، که این مؤلفه‌ها عبارت‌اند از: ۱- مؤلفه غیر قطبی یا پراکنده، که به آن مؤلفه لیفشیتز-واندروالس (LW) نیز گفته می‌شود. ۲- مؤلفه اسید لوئیس و ۳- مؤلفه باز لوئیس

انرژی آزاد سطحی کل با ترکیب این مؤلفه‌ها مطابق معادله زیر است.

$$\Gamma^{Total} = \Gamma^{LW} + \Gamma^{AB} = \Gamma^{LW} + 2\sqrt{(\Gamma^+ \Gamma^-)} \quad (5)$$

که در آن: Γ^{Total} انرژی آزاد سطحی کل، Γ^{LW} مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی، Γ^{AB} (Γ^{\pm}) مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی، Γ^+ مؤلفه اسپیدی و Γ^- مؤلفه بازی است.

همکاران در سال ۲۰۱۵ از زایکوسویل برای بهبود ضعف عریان شدگی آسفالت شیشه‌ای به طور موفقیت‌آمیزی استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، بهترین عملکرد گلسفالت در برابر خرابی رطوبتی مربوط به نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با ۴٫۵ درصد نانو ماده زایکوسویل است (Behbahani et al. 2015). عامری و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر اصلاح قیر خالص ۷۰-۶۰ با ایوانیک بر عملکرد عریان شدگی مخلوط گرم آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اصلاح قیر با ۰٫۳ درصد ایوانیک منجر به افزایش تقریباً ۱۰ درصد شاخص نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم اشباع به خشک می‌شود (Behbahani et al. 2015). هدف برنامه‌ی آزمایشگاهی در این تحقیق، بررسی عملکرد عریان شدگی قیر و مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با ایوانیک در سه درصد ۰٫۱، ۰٫۳ و ۰٫۵ وزنی قیر با انجام آزمایشات انرژی آزاد سطحی قیر و آزمایشات مکانیکی مخلوط آسفالتی می‌باشد. همچنین عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با ایوانیک با تست خزش دینامیکی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- تئوری انرژی آزاد سطحی

۲-۱- کار چسبندگی

هنگامی که دو ماده در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و سطح مشترک جدیدی تشکیل می‌دهند، انرژی آزاد سطحی این مواد سبب چسبندگی فیزیکی آن‌ها به یکدیگر می‌شود. بنابراین کار موردنیاز برای جدا کردن این دو ماده، کار چسبندگی نامیده می‌شود. کار چسبندگی بین دو ماده (یک جامد و یک مایع) از معادله زیر به دست می‌آید (رابطه دوپری) (Bhasin 2007).

$$W_{SL} = \Gamma_{SV} + \Gamma_{LV} - \Gamma_{SL} \quad (1)$$

که در آن: W_{SL} کار چسبندگی بین دو ماده، Γ_{SV} انرژی آزاد سطحی جسم جامد در تماس با بخار مایع، Γ_{LV} انرژی آزاد

رابطه محاسبه کار چسبندگی بین دو ماده بر اساس نظریه اسید-باز به صورت زیر است:

$$W_{SL} = 2[\sqrt{(\Gamma_s^{LW} \Gamma_1^{LW})} + \sqrt{(\Gamma_s^+ \Gamma_1^-)} + \sqrt{(\Gamma_s^- \Gamma_1^+)}] \quad (6)$$

در نهایت با استفاده از رابطه یانگ - دوپری داریم:

$$\Gamma_{LV} (1 + \cos\theta) + \pi_e = 2[\sqrt{(\Gamma_s^{LW} \Gamma_1^{LW})} + \sqrt{(\Gamma_s^+ \Gamma_1^-)} + \sqrt{(\Gamma_s^- \Gamma_1^+)}]$$

برای سطوح جامد با انرژی سطحی خیلی کم، فشار انتشار تقریباً برابر صفر است. این فرض معمولاً برای همه مایعاتی مانند قیر که زاویه تماس محدود با سطح تمیز جامد تشکیل می‌دهند نیز صادق است (Bhasin 2007) و داریم:

$$\Gamma_{LV} (1 + \cos\theta) = 2[\sqrt{(\Gamma_s^{LW} \Gamma_1^{LW})} + \sqrt{(\Gamma_s^+ \Gamma_1^-)} + \sqrt{(\Gamma_s^- \Gamma_1^+)}] \quad (7)$$

سه مجهول می‌توان مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر را به دست آورد. در مورد مواد جامد از جمله سنگدانه‌ها، نمی‌توان فشار توزیعی را برابر با صفر در نظر گرفت زیرا مقدار انرژی آزاد سطحی آن‌ها بزرگ است، از طرفی مقدار زاویه تماس سطح جامد و بخار هوا (θ) صفر است (Bhasin 2007) و داریم:

$$2\Gamma_{LV} + \pi_e = 2[\sqrt{(\Gamma_s^{LW} \Gamma_1^{LW})} + \sqrt{(\Gamma_s^+ \Gamma_1^-)} + \sqrt{(\Gamma_s^- \Gamma_1^+)}] \quad (7)$$

این رابطه، اساس اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر با استفاده از روش‌های مبتنی بر زاویه تماس مانند روش قطره آویزان است. در این رابطه Γ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مایعات آزمایش (معلوم)، S مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر (مجهول) و θ زاویه تماسی که مایع آزمایش با سطح قیر تشکیل می‌دهد (معلوم) می‌باشد. با در اختیار داشتن زاویه تماس برای سه مایع پروب و تشکیل دستگاه سه معادله

۲-۳- اندرکنش قیر - سنگدانه

چسبندگی از دو مؤلفه اصلی تشکیل شده است که عبارت‌اند از: مؤلفه قطبی (اسیدی - بازی) و مؤلفه غیر قطبی. معادله زیر برای مشخص کردن انرژی آزاد چسبندگی بین قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بر طبق مفاهیم ترمودینامیک، پارامترهای متعددی از خصوصیات مصالح بر رخداد خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تأثیرگذار است. اصلی‌ترین این پارامترها عبارت‌اند از: انرژی آزاد چسبندگی قیر - سنگدانه و انرژی آزاد چسبندگی بین قیر - سنگدانه در حضور آب. انرژی آزاد

$$\Delta G^a = -W^a = \Delta G^{alw} + \Delta G^{aAB} = -2[\sqrt{(T_2^{Lw} T_1^{Lw})} + \sqrt{(T_2^+ T_1^-)} + \sqrt{(T_2^- T_1^+)}] \quad (8)$$

چسبندگی قیر - سنگدانه را محاسبه نمود (Al-Qadi et al. 2014). همچنین معادله زیر توسط ون اوس و همکاران (Van Oss et al. 1988) و گود و ون اوس (Good and van Oss 1992) برای محاسبه چسبندگی بین دو ماده ۱ و ۲ در حضور ماده ۳ ارائه شده است که اندیس‌های ۱ و ۲ و ۳ می‌توانند به ترتیب قیر، سنگدانه و آب باشند.

که در آن، ΔG^a انرژی آزاد چسبندگی، ΔG^{alw} مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد چسبندگی، ΔG^{aAB} مؤلفه قطبی انرژی آزاد چسبندگی، T_1^{Lw} ، T_1^- ، T_1^+ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و T_2^{Lw} ، T_2^- ، T_2^+ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه هستند. با اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه می‌توان با استفاده از معادله فوق انرژی آزاد

$$\Delta G_{132}^a = T_{12} - T_{13} - T_{23} = -[2T_3^{Lw} + 4\sqrt{(T_3^+ T_3^-)} - 2\sqrt{(T_1^{Lw} T_3^{Lw})} - 2\sqrt{(T_3^+ T_1^-)} - 2\sqrt{(T_1^+ T_3^-)} - 2\sqrt{(T_2^{Lw} T_3^{Lw})} - 2\sqrt{(T_3^+ T_2^-)} - 2\sqrt{(T_2^+ T_3^-)} + 2\sqrt{(T_1^{Lw} T_2^{Lw})} + 2\sqrt{(T_1^+ T_2^-)} + 2\sqrt{(T_2^+ T_2^-)}] \quad (9)$$

۳- روش تحقیق

ایوانیک در سه درصد ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵ و وزنی قیر با همزن مکانیکی تهیه شد. مخلوط‌های آسفالتی با قیر اصلاح شده با ایوانیک و بر اساس دانه‌بندی مشخص در درصد قیر بهینه به روش مارشال ساخته شدند. عملکرد عریان شدگی قیرهای

هدف برنامه‌ی آزمایشگاهی در این تحقیق، بررسی عملکرد عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با ماده ضد عریان شدگی ایوانیک است. بدین منظور قیر خالص ۷۰-۶۰ با نانو ماده ضد عریان شدگی

۳-۱- مواد و مصالح

۳-۱-۱- مصالح سنگی

در این تحقیق مصالح سنگی از معدن کارخانه آسفالت ماکادام شرق واقع در استان تهران، شهرستان پاکدشت تهیه شده است. درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده مصالح سنگی از تست XRF و همچنین مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ نشان داده شده است.

اصلاح شده با ایوانیک و مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با آن به ترتیب با اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر به روش زاویه تماس و انجام آزمایشات مکانیکی مخلوط آسفالتی شامل مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهنگی، انرژی شکست و تست آب جوشان مورد بررسی قرار گرفت. همچنین عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با ایوانیک با تست خزش دینامیکی بررسی شد.

جدول ۱. نتایج آزمایش XRF بر پودر سنگ عبوری از الک نمره ۲۰۰

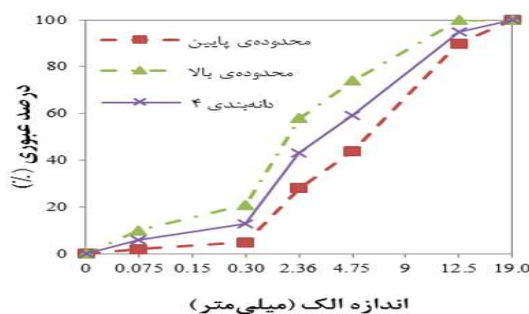
مصالح سنگی	درصد عنصر (%)									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	K ₂ O	MnO	
سنگدانه سیلیسی	52.66	2.42	8.56	14.66	2.05	1.75	0.296	2.13	0.124	

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

حد استاندارد	مقدار	استاندارد	تست
-	۲,۵۲	ASTM C127	وزن مخصوص درشت‌دانه
-	۲,۴۹	ASTM C128	وزن مخصوص ریزدانه
ماکزیمم ۴۵	۲۶	ASTM C131	حداکثر سایش لس‌آنجلس
ماکزیمم ۱۰	۶	ASTM D4791	ذرات سوزنی و پولکی
ماکزیمم ۲۰ - ۱۰	۷	ASTM C88	دوام در برابر سولفات سدیم

دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران می‌باشد. دانه‌بندی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، کانی SiO₂ اصلی‌ترین عنصر تشکیل‌دهنده مصالح مصرفی در این مطالعه است و بنابراین سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه سیلیسی است. دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش، حد وسط



شکل ۱. مشخصات دانه‌بندی پیوسته شماره ۴

۳-۱-۲- قیر مصرفی

۶۰-۷۰ برای شرایط اقلیمی گرم و معتدل ایران مناسب است. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۳ نشان داده شده است.

در این تحقیق از قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ برای ساخت قیرهای اصلاح شده با ایوانیک استفاده شده است. قیر

۳-۱-۳- ماده ضد عریان شدگی ایوانیک

H₂O تولید می‌نماید و بخش معدنی مواد ضد عریان شدگی به کمک این مولکول در سطح سنگدانه‌ها پیوند کووالانسی Si-O-Si تولید می‌کنند و در نهایت ماده ضد عریان شدگی به صورت شیمیایی سطح مصالح سنگی را از آب‌دوست به قیر دوست تغییر می‌دهند و باعث ایجاد پیوند دائمی و مستحکم میان قیر و سنگدانه می‌شوند (عامری و همکاران، ۱۳۹۶). مشخصات ماده ضد عریان شدگی ایوانیک در جدول ۴ نشان داده شده است.

ماده ضدعریان‌شدگی ایوانیک، محصول گروه صنعتی ایوانیک آلمان بوده و یک افزودنی مایع قیر با پایه پلی آمین است. در حالت عادی، پیوند برقرار شده، بین قیر و مصالح در مصالح آب‌دوست ضعیف بوده و از نوع برهمکنش قطبی-قطبی می‌باشد که تنها ۱۰ تا ۱۵ درصد قیر در پیوند، شرکت می‌کند. عملکرد اصلی مواد ضد عریان شدگی بر روی سطح سنگدانه‌ها می‌باشد. بدین ترتیب که در اثر حرارت، پیوند هیدروژنی موجود در سطح سنگدانه شکسته شده و مولکول

جدول ۳. مشخصات قیر خالص ۶۰-۷۰

روش آزمایش	قیر ۶۰/۷۰	واحد	خصوصیات
ASTM D-70	۱/۰۸	gr/cm ³	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-5	۶۴	0.1 mm	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-36	۴۹	°C	نقطه نرمی
ASTM D-113	>۱۰۰	cm	انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-92	۳۰۱	°C	نقطه اشتعال
ASTM D-2170	۳۷۵	mm ² /s	ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی ایوانیک مصرفی

شکل ظاهری	مایع شفاف
فعال	٪۱۰۰
ویسکوزیته	چسبناکی متوسط
ارزش اسید	۳۵
ارزش آمین	۱۵۰
میزان آب	٪۲

۳-۲- ساخت قیرهای اصلاح شده با ایوانیک

برای اختلاط قیر با ماده ضد عریان شدگی ایوانیک، ابتدا قیر تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد، سپس با استفاده از سرنگ، ایوانیک به آهستگی به قیر اضافه شد و عمل اختلاط با همزن مکانیکی که قادر به ایجاد گردابی با عمق ۲ تا ۳ سانتی‌متر است، به مدت ده دقیقه انجام شد. در این پژوهش قیرشاهد با مقادیر ۰،۱، ۰،۳، ۰،۵ و درصد وزنی ماده ضدعریان‌شدگی ایوانیک اصلاح شده است.

۳-۳- طرح اختلاط مخلوط آسفالتی

در این مطالعه از روش طرح اختلاط مارشال مطابق استاندارد ASTM D1559 برای تعیین درصد قیر بهینه استفاده شده است. بدین منظور ابتدا مصالح سنگی دانه‌بندی شده را به مدت حداقل ۲۴ ساعت در دمای حدود ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌دهیم و سپس با قیر در درصدهای ۰،۴/۵، ۰،۵/۵، ۰،۶/۵ و ۰،۶/۵ وزنی قیر مخلوط کرده و آن را در

قیر به ۲۵ درجه سانتی‌گراد، صفحه قیر را مابین صفحه نور و دوربین قرار می‌دهیم. میکرو سرنگ را با مایع آزمایش پر می‌کنیم و نوک آن را ۵ میلی‌متر بالای نمونه قرار می‌دهیم، سپس یک قطره از مایع آزمایش را رها می‌کنیم تا بر روی سطح قیر پخش شود و پس از گذشت چند ثانیه قطره شکل ثابتی پیدا کند، در این لحظه با استفاده از دوربین یک عکس از قطره روی سطح گرفته می‌شود. برای هر مایع آزمایش روی یک قیر، سه تکرار انجام می‌شود و میانگین زاویه تماس این سه نمونه به‌عنوان زاویه تماس مایع آزمایش با سطح قیر ثبت می‌گردد (زمانی‌فر، ۱۳۹۵). برای اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی در روش زاویه تماس معمولاً از یک مایع قطبی، غیر قطبی و یک مایع نیمه قطبی استفاده می‌شود. مشخصات مایع‌های پروب مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع پروب در آزمایش زاویه تماس

مایع پروب مؤلفه SFE	آب مقطر	دی‌یدید متان	اتیلن گلیکول
Γ^{total} : انرژی آزاد سطحی کل ماده (ergs/cm ²)	۷۲٫۸	۵۰٫۸	۴۸٫۲۹
Γ^{LW} : مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی (ergs/cm ²)	۲۱٫۸	۵۰٫۸	۲۹
Γ^{AB} (Γ^+): مؤلفه قطبی انرژی	۵۱	۰	۱۹٫۲۹
Γ^+ : مؤلفه اسیدی	۲۵٫۵	۰	۳
Γ^- : مؤلفه بازی	۲۵٫۵	۰	۳۱

دو گروه عمل‌آوری شده و عمل‌آوری نشده در دمای 25 ± 0.5 درجه اندازه‌گیری می‌شود. عمل‌آوری نمونه‌ها در سه مرحله ۱. اشباع کردن نمونه با پمپ خلأ تا رسیدن به درجه اشباع ۸۰-۷۰ درصد، ۲. قرار دادن نمونه‌ها در فریزر با دمای 18 ± 3 درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۱۶ ساعت و ۳. قرار دادن نمونه‌ها در آب ۶۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت به‌منظور شبیه‌سازی سیکل ذوب و یخ انجام می‌شود. مقاومت کششی نمونه (S) و ضریب مقاومت کششی (TSR) به ترتیب از معادله (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آید.

$$(10)$$

$$S = \frac{2000P}{\pi tD}$$

قالب مارشال ریخته و با ضربات چکش مارشال متراکم می‌کنیم. تعداد ضربات برای شبیه‌سازی ترافیک سنگین ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه می‌باشد. مطابق روش انجمن ملی روسازی آسفالتی، درصد قیر متناظر با درصد فضای خالی ۴ درصد به‌عنوان درصد قیر بهینه انتخاب می‌شود، مشروط بر آنکه سایر پارامترها مانند مقاومت مارشال، روانی مارشال، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پرشده با قیر در محدوده مجاز قرار داشته باشند.

۳-۴- اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی

در این تحقیق از روش زاویه تماس برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرها استفاده شده است. بدین منظور نمونه‌های قیر تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و مقداری از آن‌که سطحی به ابعاد ۵x۵ سانتی‌متر ایجاد می‌کند روی صفحه شیشه‌ای می‌ریزیم و پس از رسیدن دمای

۳-۵- آزمایشات ارزیابی عریان شدگی مخلوط آسفالتی

تست‌های متعددی برای شناسایی مقاومت مخلوط در برابر آسیب رطوبتی وجود دارد. در این مطالعه، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با آزمایشات زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۵-۱- آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO T283)

برای انجام این آزمایش شش نمونه مخلوط آسفالتی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع 2.5 ± 63.5 میلی‌متر با استفاده از دستگاه ژیراتوری در درصد فضای خالی 7 ± 0.5 درصد ساخته می‌شود. سپس مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در

انرژی شکست به‌عنوان کاری که برای ایجاد سطح واحدی از ترک در نمونه آسفالتی صورت می‌گیرد تعریف می‌شود و از رابطه زیر به دست می‌آید.

(۱۳)

$$FE = \int_0^{\delta_{max}} \frac{P(\delta)d(\delta)}{V}$$

که در آن، FE انرژی شکست (kJ/m^3)، P بار (N) و V حجم نمونه (mm^3) است (Bahadori et al. 2014).

۳-۵-۳- مدول برجهندگی

نسبت مدول برجهندگی تر به خشک به‌عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری پتانسیل حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. آزمایش مدول برجهندگی بر اساس استاندارد ASTM D4123 بر روی نمونه‌های آسفالتی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع 2.5 ± 0.5 میلی‌متر انجام می‌شود.

۳-۵-۲- نسبت انرژی شکست

نسبت انرژی شکست نمونه‌های عمل‌آوری شده به نمونه‌های عمل‌آوری نشده یکی دیگر از شاخص‌هایی است که برای ارزیابی عریان شدگی مخلوط آسفالتی بکار می‌رود و از رابطه زیر به دست می‌آید (Mirzababaei 2016).

(۱۲)

$$FER = \frac{FE_{Con}}{FE_{UnCon}} \cdot 100$$

جدول ۶. پارامترهای آزمایش مدول برجهندگی

شکل بارگذاری	نیم سینوسی (هاورساین)
زمان بارگذاری (میلی‌ثانیه)	۱۰۰
زمان استراحت (میلی‌ثانیه)	۹۰۰
بار اعمال‌شده (نیوتن)	۴۰۰
دمای انجام آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۲۵
ضریب پواسون	۰.۳۵

مدول برجهندگی از معادله زیر به دست می‌آید.

(۱۴)

$$M_R = \frac{P \times (v + 0.27)}{t \times \Delta H}$$

شدن، سنگدانه‌ها را بر روی یک کاغذ سفیدرنگ می‌ریزیم و با بررسی چشمی، میزان قیر باقیمانده بر روی سنگدانه‌ها را ارزیابی می‌کنیم. برای کمی‌سازی نتایج آزمایش آب جوشان از پردازش تصویر به کمک نرم‌افزار متلب استفاده شده است. بدین منظور تصاویر گرفته‌شده از نمونه‌های آزمایش با استفاده از دستور `rgb2gray` به تصاویر سیاه‌وسفید با محدوده پیکسل ۰ الی ۲۵۵ تبدیل می‌شوند که پیکسل‌های سیاه با ۰ و پیکسل‌های سفید با ۲۵۵ و سایر پیکسل‌ها در حد وسط قرار می‌گیرند. شماره دیجیتال ۱۲۸ به‌عنوان مرز سنگدانه‌های پوشش داده شده با قیر و سنگدانه‌های بدون پوشش قیر در نظر گرفته می‌شود. در پایان با دستور `im2bw` (ایجاد تصاویر باینری) در متلب پیکسل‌های ۰-۱۲۸ و ۱۲۸-۲۵۶ را تعیین می‌کنیم.

که در آن، M_R مدول برجهندگی (MPa)، P بار اعمالی (N)، ΔH میانگین تغییر شکل برگشت‌پذیر در هر چرخه (mm)، v ضریب پواسون و t میانگین ارتفاع نمونه (mm) می‌باشد.

۳-۵-۴- آب جوشان

این آزمایش روشی ساده، کم‌هزینه و سریع برای ارزیابی کیفی عریان شدگی مخلوط آسفالتی است که بر اساس استاندارد ASTM D3625 انجام می‌شود. برای انجام این آزمایش حدود ۸۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر را روی گرم‌کن برقی قرار می‌دهیم تا به جوش آید سپس حدود ۲۵۰ گرم مخلوط آسفالتی غیر متراکم را درون آب جوشان می‌ریزیم و پس از ۱۰ دقیقه ظرف را از روی حرارت برمی‌داریم و پس از سرد

۳-۶- آزمایش خزش دینامیکی

آزمایش به مدت حداقل ۶ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شده اند.

این آزمایش با دستگاه UTM منطبق بر استاندارد AS 2891-12 انجام شده است. بدین منظور ابتدا نمونه‌های

جدول ۷. پارامترهای آزمایش خزش دینامیکی

مستطیلی	شکل بارگذاری
۵۰۰	زمان بارگذاری (میلی ثانیه)
۱۵۰۰	زمان استراحت (میلی ثانیه)
۲۰	تنش تماسی (کیلو پاسکال)
۴۵۰	تنش انحرافی (کیلو پاسکال)
۵۰	دمای آزمایش (درجه سانتی گراد)

درصد قیر بهینه مقادیر وزن مخصوص واقعی و وزن مخصوص ماکزیمم که برای تنظیم فضای خالی آسفالت در دستگاه تراکم ژیراتوری مورد نیاز است به ترتیب برابر ۲,۲۱۵ و ۲,۳۰۷۵ می باشد.

نتایج این آزمایش به صورت منحنی کرنش دائمی تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری ارائه می شود. منحنی کرنش تجمعی به ۳ ناحیه تقسیم می شود: در ناحیه اول تغییر مکان‌های دائم به طور ناگهانی روی هم انباشته می شوند، در ناحیه دوم شیب تغییر مکان دائم کاهش می یابد تا به مقدار ثابتی می رسد و در ناحیه سوم شیب تغییر مکان دائم دوباره افزایش می یابد و مقدار تغییر مکان دائم به شدت روی هم انباشته می شود. تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عدد روانی شناخته می شود. در این مطالعه از پارامتر عدد روانی برای ارزیابی شیارشدگی مخلوط آسفالتی استفاده شده است (Mansourkhaki and Sarkar 2015, Sarkar 2017).

۴-۲- مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه

۴-۲-۱- مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر

نتایج زاویه تماس برای قیر پایه و قیر اصلاح شده با ایوانیک در جدول ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می شود، استفاده از افزودنی ضدعریان‌شدگی ایوانیک باعث کاهش زاویه تماس بین مایعات آزمایش و قیر شده است که بیانگر افزایش پوشش پذیری قیر توسط مایع آزمایش می باشد. اگر افزایش پوشش‌پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه نیز ایجاد شود، افزایش چسبندگی قیر - سنگدانه و در نتیجه افزایش مقاومت مخلوط در برابر عریان‌شدگی را در پی خواهد داشت. همچنین با افزایش درصد ایوانیک، زاویه تماس نیز به روند کاهشی خود را ادامه می دهد و بنابراین انتظار می رود که با افزایش درصد استفاده از ایوانیک پوشش پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه نیز افزایش یابد و در نتیجه عملکرد عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی بهبود یابد.

۴- نتایج و تفسیر داده‌ها

۴-۱- درصد قیر بهینه

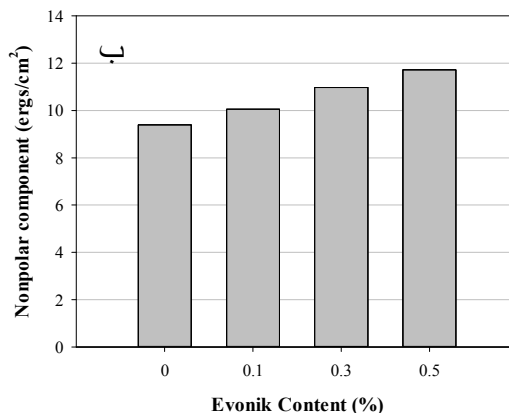
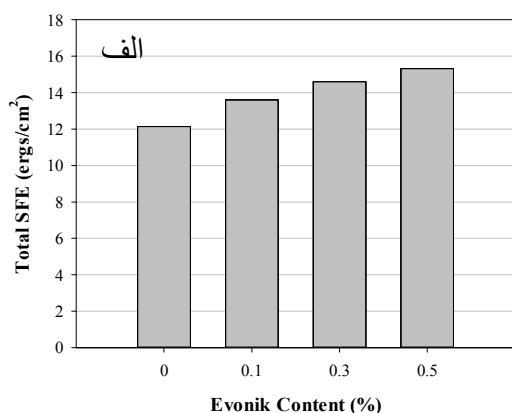
در این مطالعه، درصد قیر بهینه نمونه شاهد به روش مارشال ۵,۷ درصد می باشد. تحقیق عامری و همکاران نشان می دهد که اصلاح قیر با ایوانیک تغییری در درصد قیر بهینه ایجاد نمی کند (عامری و همکاران، ۱۳۹۶). بنابراین در این پژوهش از درصد قیر بهینه ثابت در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است و فقط تأثیر افزودن ایوانیک بر عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی به صورت تک متغیره ارزیابی شده است. در

جدول ۸. زاویه تماس بین مایعات آزمایش و قیرهای اصلاح شده با ماده ضد عریان‌شدگی ایوانیک

نوع قیر	آب مقطر	دی دید متان	اتیلن گلیکول
Base	۱۰۶,۲۹	۹۸,۰۴	۸۷,۷۱
Base + 0.1 E	۱۰۲,۱۵	۹۶,۳۲	۸۶,۱۴
Base + 0.3 E	۱۰۱,۳۲	۹۴,۰۶	۸۳,۱۹
Base + 0.5 E	۱۰۰,۶۹	۹۲,۲۶	۸۱,۷۲

خرابی را کم کند، همچنین با توجه به اینکه اتصال شکل گرفته بین قیر- سنگدانه عمدتاً به علت نیروهای پراکنده غیر قطبی است، می‌توان گفت افزایش مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی می‌تواند به بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه مخصوصاً در شرایط مرطوب کمک کند. بیشترین میزان افزایش انرژی آزاد سطحی کل قیر و مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد مربوط به قیر اصلاح شده با ۰,۵ درصد وزنی قیر ایوانیک است که به ترتیب ۲۶,۱۵ و ۲۴,۷۸ درصد نسبت به قیر شاهد افزایش یافته است.

انرژی آزاد سطحی کل قیر و انرژی آزاد غیر قطبی قیر دو مؤلفه تأثیرگذار بر انرژی آزاد پیوستگی قیر و عریان شدگی مخلوط آسفالتی هستند. مقادیر مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر در شکل ۲ نشان داده شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود، اصلاح قیر با ماده ضد عریان شدگی ایوانیک باعث بهبود قابل‌ملاحظه انرژی آزاد سطحی کل قیر و همچنین مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی می‌شود. افزایش انرژی آزاد سطحی کل قیر نشان می‌دهد برای غلبه بر پیوستگی قیر، انرژی بیشتری موردنیاز است که می‌تواند رخداد این نوع



شکل ۲. الف. انرژی آزاد سطحی کل قیرها و ب. مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی قیرها

داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از ماده ضد عریان شدگی ایوانیک باعث افزایش چسبندگی قیر- سنگدانه و در نتیجه افزایش مقاومت مخلوط در برابر آسیب رطوبتی می‌شود. بیشترین میزان افزایش چسبندگی قیر- سنگدانه، مربوط به قیر اصلاح شده با ۰,۵ درصد وزنی قیر ایوانیک است که مقدار آن ۹,۲ درصد نسبت به قیر شاهد افزایش یافته است.

۴-۲-۲- مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه

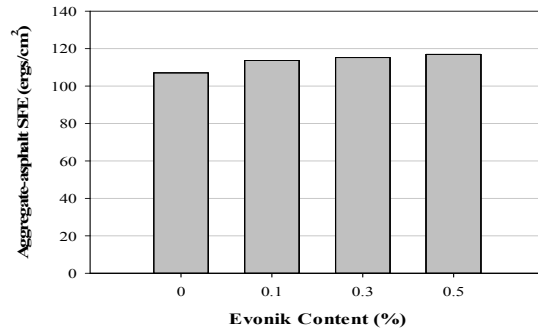
در این پژوهش از مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های سیلیسی شرکت ماکادام شرق که توسط حامدی و همکاران در دانشگاه A&M تگزاس به انجام رسیده است، استفاده شده است. مقادیر این مؤلفه‌ها در جدول ۹ نشان داده شده است (حامدی، ۱۳۹۴).

۴-۲-۳- انرژی آزاد چسبندگی قیر - سنگدانه

مقادیر انرژی آزاد چسبندگی قیر- سنگدانه در شکل ۳ نشان

جدول ۹. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه سیلیسی

مؤلفه انرژی آزاد سطحی	مقدار (ergs/cm ²)
Γ^{Total} : انرژی آزاد سطحی کل ماده	۳۳۱,۵۸
Γ^{LW} : مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی	۶۱,۳۰
Γ^{AB} : مؤلفه قطبی انرژی	۲۷۰,۲۸
Γ^+ : مؤلفه اسیدی	۴۷,۳۰
Γ^- : مؤلفه بازی	۳۸۶,۱۰



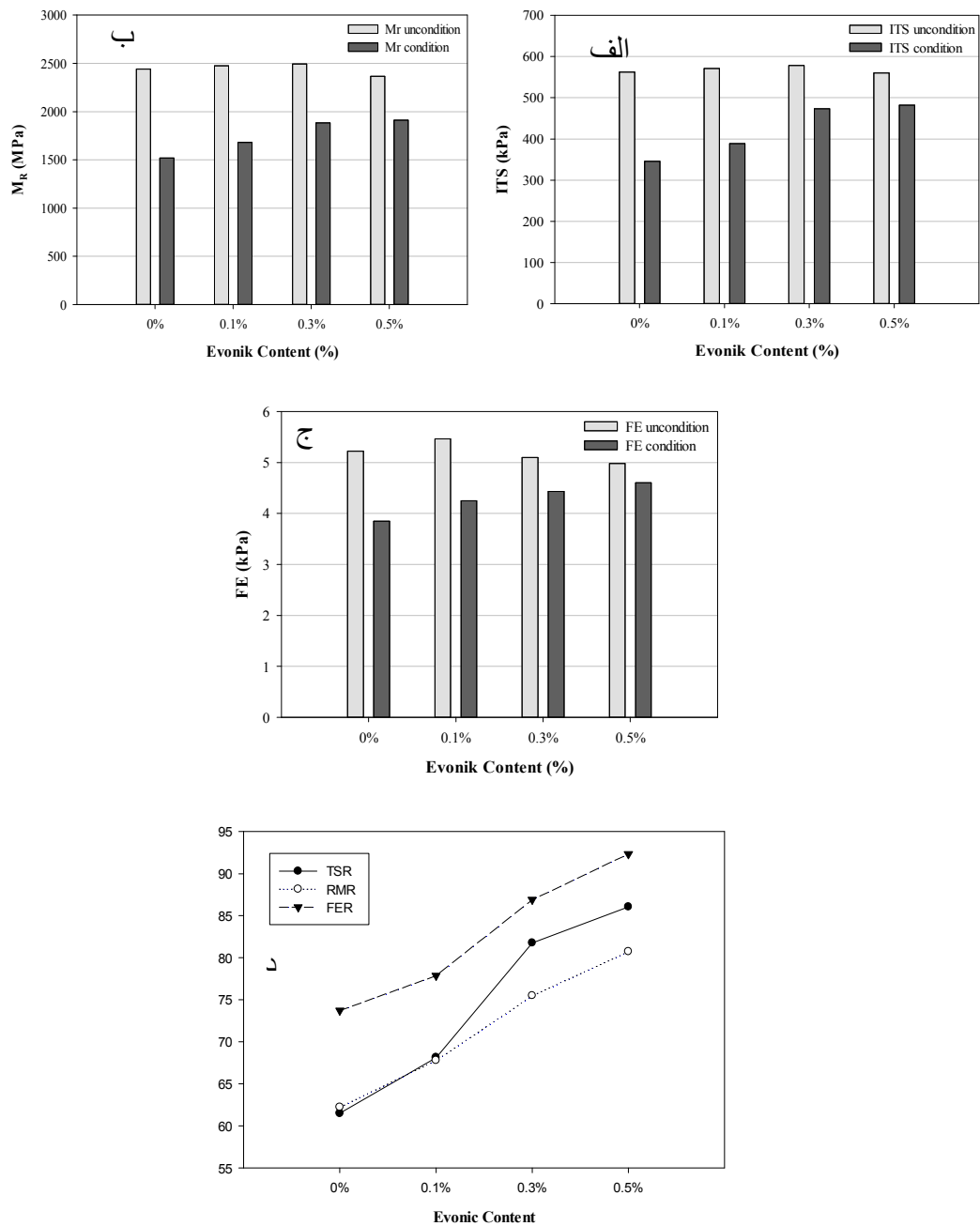
شکل ۳. انرژی آزاد سطحی قیر - سنگدانه

۴-۳- نتایج آزمایشات ارزیابی عریان شدگی مخلوط آسفالتی

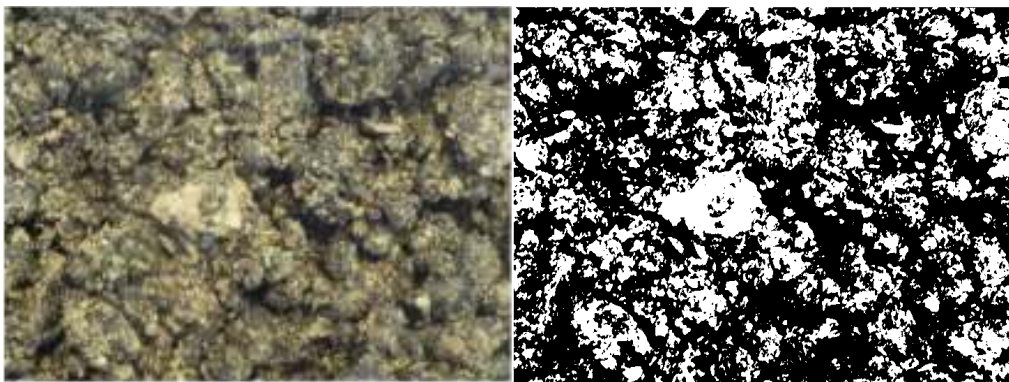
نتایج آزمایشات حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از قیر اصلاح شده با ایوانیک در ساخت مخلوط آسفالتی، تغییر محسوسی در مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و انرژی شکست نمونه‌های عمل‌آوری نشده (خشک) ایجاد نمی‌کند اما مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و انرژی شکست نمونه‌های عمل‌آوری شده (اشباع) را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. بیشترین میزان افزایش پارامترهای ذکر شده مربوط به نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با ۰٫۵ درصد ایوانیک است. به‌طوری‌که مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و انرژی شکست این نمونه‌ها در شرایط اشباع به ترتیب ۲۶٫۳۹٫۵ و ۲۰ درصد بیشتر از نمونه شاهد است.

مقدار حداقل شاخص RMR، TSR و FER برای اطمینان از مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آسیب‌های ناشی از رطوبت به ترتیب برابر ۷۵ و ۷۰ و ۸۰ درصد است (Sebaaly 2007, The Ministry of Road and Urban Development 2011). همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مخلوط شاهد با مصالح سیلیسی ضعیف‌ترین عملکرد را در برابر آسیب رطوبتی از خود نشان می‌دهد و مقدار حداقل شاخص‌های حساسیت رطوبتی، برای اطمینان از مقاومت در برابر عریان شدگی را برآورده نمی‌کند. در بررسی این پدیده می‌توان گفت که سنگدانه‌های سیلیسی به دلیل درصد بالای کانی SiO₂، دارای چسبندگی ضعیفی با قیر در حضور آب هستند که ناشی از تشکیل پیوند هیدروژنی است. ایوانیک با افزایش مؤلفه غیر قطبی قیر باعث تقویت برهمکنش غیر قطبی - غیر قطبی و تقویت چسبندگی قیر - سنگدانه در حضور آب می‌شود، به‌طوری‌که استفاده از قیرهای اصلاح شده با ایوانیک باعث افزایش

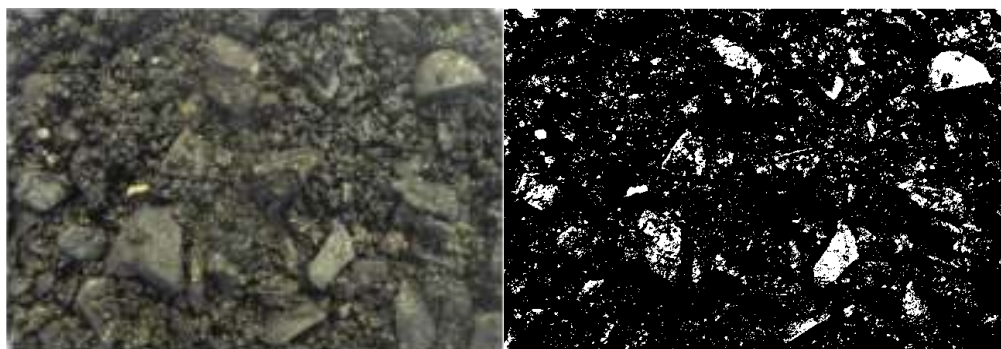
شاخص RMR، TSR و در نتیجه افزایش مقاومت مخلوط در برابر عریان شدگی می‌شود. از طرفی، با توجه به اینکه اصطکاک و چسبندگی نمونه‌ها دو عامل تأثیرگذار بر شکست نمونه‌ها در آزمایش کشش غیرمستقیم هستند. افزایش شاخص FER نمونه‌های اصلاح شده با ایوانیک بیانگر آن است که برای شکست پیوند بین قیر و سنگدانه انرژی بیشتری موردنیاز است. از آنجایی‌که اصطکاک بین سنگدانه‌ها بیشتر به عوامل فیزیکی سنگدانه مانند درصد شکستگی مربوط است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ایوانیک چسبندگی قیر - سنگدانه را بهبود بخشیده است و باعث افزایش مقاومت مخلوط در برابر عریان شدگی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مخلوط‌های ساخته شده با ۰٫۳ و ۰٫۵ درصد وزنی قیر ایوانیک، حداقل الزامات موردنیاز برای مقاومت در برابر عریان شدگی را دارا هستند. تصاویر دیجیتال و باینری مخلوط آسفالتی در آزمایش آب جوشان و همچنین نتایج پردازش تصاویر نمونه‌های غیرمترکم بعد از جوشاندن در آب به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از قیرهای اصلاح شده با ایوانیک در ساخت مخلوط آسفالتی، منجر به کاهش قابل‌توجه پیکسل‌های سفید رنگ می‌گردد که بیانگر افزایش پوشش قیری به دور سنگدانه می‌باشد. علت این موضوع را می‌توان افزایش چسبندگی قیر - سنگدانه به دلیل استفاده از قیرهای اصلاح شده با ایوانیک دانست. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با ۰٫۳ و ۰٫۵ درصد ایوانیک بهترین نتایج پوشش قیری به دور سنگدانه را دارا می‌باشند (به ترتیب ۸۸ و ۹۰ درصد) و میزان پیکسل‌های سفید در آن‌ها به ترتیب ۶۸٫۱۶ و ۷۱٫۲ درصد از نمونه شاهد کمتر می‌باشد.



شکل ۴. الف. مقاومت کششی غیرمستقیم، ب. مدول برجهنگی، ج. انرژی شکست و د. شاخص‌های حساسیت رطوبتی مخلوط‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده با ماده ضد جریان شدگی ایوانیک

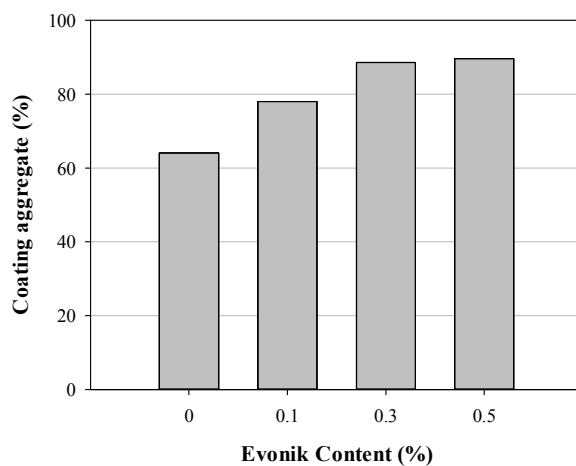


(الف). نمونه شاهد ساخته شده با قیر خالص



(ب). نمونه ساخته شده با قیر اصلاح شده با ۰,۵٪ ایوانیک

شکل ۵. تصاویر دیجیتال و باینری مخلوط آسفالتی بعد از جوشاندن در آب

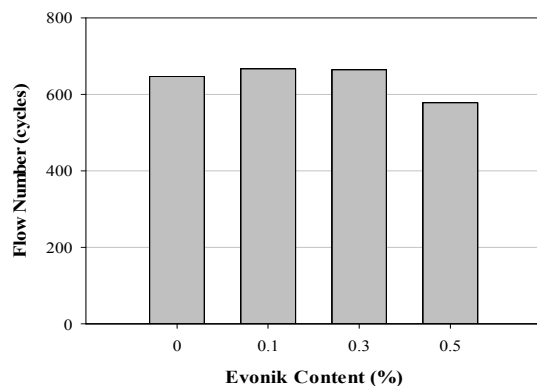


شکل ۶. درصد سنگدانه‌های پوشش داده شده در آزمایش آب جوشان بر اساس پردازش تصویر

۴-۴- نتایج آزمایشات خزش دینامیکی

در شاخص عدد روانی ایجاد نمی‌کند اما استفاده از قیر اصلاح شده با ۰,۵ درصد ایوانیک باعث کاهش ۱۰ درصد شاخص عدد روانی می‌شود.

نتایج شاخص عدد روانی نمونه شاهد و نمونه‌های اصلاح شده با ایوانیک در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از قیر اصلاح شده با ۰,۱ و ۰,۳ درصد ایوانیک در ساخت مخلوط آسفالتی، تغییر محسوسی



شکل ۷. نتایج عدد روانی نمونه‌های ساخته‌شده با قیر اصلاح شده با ایوانیک

۵- نتیجه‌گیری

-استفاده از قیر اصلاح شده با ۰,۵ درصد ایوانیک، مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و انرژی شکست نمونه‌های عمل‌آوری شده را به ترتیب ۳۹,۵، ۲۶ و ۲۰ درصد افزایش می‌دهد.

-مخلوط ساخته‌شده با مصالح سیلیسی و قیر ۷۰-۶۰، دارای ضعیف‌ترین عملکرد در برابر آسیب رطوبتی است. اصلاح قیر با ایوانیک باعث تقویت برهمکنش غیر قطبی - غیر قطبی و همچنین تقویت چسبندگی قیر - سنگدانه در حضور آب و در نتیجه افزایش شاخص‌های عریان شدگی مخلوط آسفالتی از قبیل RMR, TSR و FER می‌شود. مخلوط‌های ساخته‌شده با ۰,۳ و ۰,۵ درصد وزنی قیر ایوانیک، همه الزامات موردنیاز برای مقاومت در برابر عریان شدگی را دارا هستند.

-تصاویر آزمایش آب جوشان نشان می‌دهد، اصلاح قیر با ایوانیک باعث افزایش ۹۰ درصدی پوشش قیری سنگدانه در مخلوط‌های ساخته‌شده با قیرهای اصلاح شده با ۰,۵ درصد ایوانیک در مقایسه با مخلوط ساخته‌شده با قیر خالص ۷۰-۶۰ می‌شود.

-نتایج تست خزش دینامیکی نشان می‌دهد، عدد روانی مخلوط آسفالتی ساخته‌شده با قیرهای اصلاح شده با ۰/۵ درصد ایوانیک، در مقایسه با نمونه شاهد به میزان ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین در مناطق با آب‌وهوای گرم و ترافیک سنگین که مستعد خرابی شیارشدگی است، تنها مجاز به استفاده از ۰/۳ درصد وزنی قیر ایوانیک به‌منظور افزایش مقاومت عریان شدگی مخلوط گرم آسفالتی هستیم.

در این مطالعه، تأثیر مایع ضد عریان شدگی ایوانیک بر حساسیت رطوبتی مخلوط گرم آسفالتی ساخته‌شده با مصالح سیلیسی مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد عریان شدگی قیر و مخلوط‌های آسفالتی با اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر، سنگدانه و همچنین انجام آزمایشات مکانیکی مخلوط گرم آسفالتی، ارزیابی شد. همچنین تست خزش دینامیکی به‌منظور بررسی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی انجام شد. نتایج این تحقیق عبارت‌اند از:

-مایع ضدعریان شدگی ایوانیک، زاویه تماس بین مایعات آزمایش و قیر را کاهش می‌دهد که بیانگر افزایش پوشش پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه می‌باشد.

-اصلاح قیر با ایوانیک، انرژی آزاد سطحی کل قیر و همچنین مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی آن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، که بیانگر کاهش تمایل مخلوط آسفالتی به عریان شدگی است. بیشترین میزان افزایش این پارامترها مربوط به قیر اصلاح شده با ۰,۵ درصد وزنی قیر از مایع ضد عریان شدگی ایوانیک است، به‌طوری‌که مقادیر انرژی آزاد سطحی کل و مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد آن به ترتیب ۲۶,۱۵ و ۲۴,۷۸ درصد نسبت به قیر شاهد افزایش یافته است.

-اصلاح قیر با ایوانیک، باعث افزایش چسبندگی قیر - سنگدانه و در نتیجه افزایش مقاومت مخلوط در برابر عریان شدگی می‌شود. بیشترین مقدار چسبندگی قیر - سنگدانه، مربوط به قیر اصلاح شده با ۰,۵ درصد ایوانیک است که مقدار آن ۹,۲ درصد نسبت به قیر شاهد افزایش یافته است.

۶- مراجع

- M. Arabani and G. H. Hamed, (2014), "Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistripping additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt," *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 15, pp. 66-78.
- G. H. Hamed and F. Moghadas Nejad, (2015), "Using energy parameters based on the surface free energy concept to evaluate the moisture susceptibility of hot mix asphalt," *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 16, pp. 239-255.
- P. Mirzababaei, (2016), "Effect of zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations," *Construction and Building Materials*, Vol. 116, pp. 403-412.
- G. Shafabakhsh, M. Faramarzi, and M. Sadeghnejad, (2015), "Use of Surface Free Energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with antistripping agents," *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 456-464.
- G. H. Hamed and S. Tahami, (2017), "The effect of using anti-stripping additives on moisture damage of hot mix asphalt," *International Journal of Adhesion and Adhesives*.
- M. Ameri, S. Kouchaki, and H. Roshani, (2013), "Laboratory evaluation of the effect of nano-organosilane anti-stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze-thaw cycles," *Construction and Building Materials*, Vol. 48, pp. 1009-1016.
- H. Behbahani, H. Ziari, N. Kamboozia, A. M. Khaki, and S. Mirabdolazimi, (2015), "Evaluation of performance and moisture sensitivity of glassphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an
- ساعمری. م. وامق. م. امیری. ا. و چاوشیان. نایینی، ف. (۱۳۹۶)، "ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ایوانیک و زایکوترم"، نشریه مهندسی حمل و نقل.
- زمانی فر. ا.، (۱۳۹۵)، "مروری بر کاربرد انرژی آزاد سطحی در طراحی مخلوط‌های آسفالتی با دوام"، مرکز انتشارات شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، چاپ اول.
- حامدی. غ. ح.، (۱۳۹۴)، "ارائه مدل پیش‌بینی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مفاهیم تئوری ترمودینامیک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر تهران.
- A. Sarkar, (2017) "Combined effect of loading pattern, pulse duration, and stress level on the cyclic creep test of asphalt mixture," *J. Mater. Civ. Eng.* Vol. 29, pp.1-8.
- A. Mansourkhaki and A. Sarkar, (2015), "Plastic deformation of asphalt mixture under waveform loading," In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport*, Vol. 168, no. 3, pp. 200-211.
- D. Little and D. Jones IV, (2003), "Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-Topic 2: Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements," in *Transportation Research Board of the National Academies-A National Seminar*, pp. 37-74.
- D. N. Little, J. A. Epps, and P. E. Sebaaly, (2006), "Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt," ed: National Lime Association.
- F. Xiao, W. Zhao, T. Gandhi, and S. N. Amirkhanian, (2010), "Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, pp. 1047-1055.

Transportation 0197-9191. -R. J. Good and C. J. van Oss, "The modern theory of contact angles and the hydrogen bond components of surface energies," in *Modern approaches to wettability*, ed: Springer, pp. 1-27.

-A. Bahadori, A. Mansourkhaki, and M. Ameri, (2014), "A Phenomenological Fatigue Performance Model of Asphalt Mixtures Based on Fracture Energy Density," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 43, pp. 133-139.

-P. E. Sebaaly, (2007), "Comparison of lime and liquid additives on the moisture damage of hot mix asphalt mixtures," Arlington (Virginia, USA): National Lime Association.

-I. (2011), "The Ministry of Road and Urban Development, "Iran highway asphalt paving code, Publication Number 234.

anti-stripping additive," *Construction and Building Materials*, Vol. 78, pp. 60-68.

-A. Bhasin, (2007), "Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water," Texas A&M University.

-A. W. Hefer, (2005), "Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effect of water on the adhesive bond," Texas A&M University.

-C. J. Van Oss, M. K. Chaudhury, and R. J. Good, "Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems," *Chemical Reviews*, Vol. 88, pp. 927-941.

-I. L. Al-Qadi, I. M. Abauwad, H. Dhasmana, and A. R. Coenen, (2015), "Effects of various asphalt binder additives/modifiers on moisture-susceptible asphaltic mixtures," Illinois Center for

Evaluation of The Effect of Evonic on Bitumen Surface Free Energy Components and Stripping Performance of Hot Mix Asphalt

Arman Jalili, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Alireza Sarkar, Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: sarkar@srbiau.ac.ir

Received: March 2021-Accepted: July 2021

ABSTRACT

Moisture susceptibility is one of the most common pavement failures which cause by loss of bitumen bonding or bitumen-aggregate adhesion due to the moisture penetration. In this study, the effect of adding Evonic in the amount of 0.1, 0.3 and 0.5 percent of the weight of the binder content to PG 60-70 on stripping performance of hot mix asphalt with silica aggregates was investigated. The stripping performance of bitumen and asphalt mixtures was evaluated by measuring the bitumen and aggregate surface free energy components and also by conducting mechanical tests such as modified Lottman test, resilient modulus, fracture energy and boiling water. Moreover, rutting performance of asphalt mixtures was evaluated by dynamic creep test. According to the tests results, mechanical parameters such as indirect tensile strength ratio (TSR), resilient modulus and fracture energy for conditioned and un-conditioned asphalt mixture specimens made by modified bitumen were increased as well as coating of aggregate-bitumen mixture was increased in boiling water test. Furthermore, specimens made by 0.3 and 0.5 percent Evonic meet minimum moisture susceptibility which control the stripping resistance of the mixtures. Also, adding evocic to bitumen increases the total surface free energy of bitumen, non-polar component of bitumen free energy as well as energy of adhesion between the aggregate and bitumen. Dynamic creep test results show that adding Evonic up to 0.3 percent to bitumen does not change the liquid number, but the adding more percentage of Evonic reduces the liquid number which is negligible.

Keywords: Hot Mix Asphalt (HMA), Bitumen Surface Free Energy, Indirect Tensile Strength Ratio (TSR), Rutting, Evonic