

بررسی تاثیر اصلاح قیر با پلیمر SBR بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت گرم

غلامحسین حامدی

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۹ خرداد ۱۳۹۶
بازنگری: ۱ تیر ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۸ مرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۸ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

مخلوطهای آسفالتی
خرابی رطوبتی
بارگذاری تکراری
انرژی آزاد سطحی
پلیمر

چکیده: یکی از خرابی‌های متداول در مخلوط‌های آسفالتی ناشی از تاثیر تخریبی رطوبت بر پیوستگی قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه می‌باشد که خرابی رطوبتی نام دارد. روش‌های مختلفی برای بهبود چسبندگی و کاهش حساسیت رطوبتی وجود دارد که یکی از متداول‌ترین آنها اصلاح قیر با مواد مناسب می‌باشد. در این پژوهش، به بررسی تاثیر استفاده از مواد پلیمری به عنوان اصلاح‌کننده قیر در کاهش خرابی رطوبتی مخلوط آسفالت گرم پرداخته می‌شود. آزمایش بارگذاری تکراری در شرایط خشک و مرطوب به همراه پارامترهای ترمودینامیک بر اساس اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیرها و سنگدانه‌ها بر اساس روش‌های صفحه ویلهلمی و روش جذب همگانی برای بررسی تاثیر مواد پلیمری استفاده شده‌اند. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از پلیمر Styrene-Butadiene Rubber (SBR) باعث شده است تا نسبت مدول مرطوب به خشک مخلوط‌های آسفالتی که مقاومت آنها را در برابر خرابی رطوبتی نشان می‌دهد، در همه نمونه‌ها به ویژه در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیته بهبود یابد. همچنین، پلیمر SBR باعث افزایش در انرژی آزاد پیوستگی و کاهش در انرژی آزاد شده سیستم در رخداد عریان‌شدگی شده است که بیانگر کاهش تمایل سیستم برای عریان‌شدگی است. شاخص حساسیت رطوبتی، که درصد سطح سنگدانه‌های در معرض رطوبت است، بر اساس اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه و مدول مخلوط آسفالتی در سیکل‌های بارگذاری به دست آمده است. نتایج این شاخص نیز نتایج مشابهی با نسبت مدول خشک به مرطوب را نشان می‌دهد. نتایج این شاخص نشان می‌دهد که SBR باعث کاهش قابل توجه در درصد عریان‌شدگی در نمونه‌های مخلوط آسفالتی کنترل شده است.

۱- مقدمه

خرابی رطوبتی، جابجایی قیر از روی سطح سنگدانه یا شکست در غشای قیر است. این نوع خرابی هنگامی رخ می‌دهد که تمایل بیشتری در سنگدانه‌ها برای جذب آب نسبت به تمایل آنها برای پوشیده شدن توسط قیر وجود داشته باشد [۱]. رطوبت علاوه بر آنکه باعث ایجاد خرابی رطوبتی می‌شود، باعث شکل‌گیری سایر خرابی‌ها مانند خستگی، شیارشدگی، قیرزدگی^۱، چاله^۲ و کناررفتگی^۳ نیز می‌شود [۲]. اکثر آزمایش‌های موجود برای تعیین پتانسیل خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی از مقایسه عملکرد مکانیکی مخلوط‌ها در شرایط خشک و مرطوب برای تعیین حساسیت آنها و تاثیر افزودنی‌های عریان‌شدگی استفاده می‌کنند [۳]. علیرغم گستردگی این آزمایش‌ها مانند روش لاتمن اصلاح‌شده (AASHTO T283)، می‌توان گفت این روش‌ها بر روی خصوصیات بنیادین مواد که در رخداد خرابی رطوبتی موثر هستند، تمرکز نمی‌کنند و نمی‌توانند دلیل ضعف یا قوت عملکرد مخلوط آسفالتی را بیان کرده و یک راهکار اصلاحی مناسب برای بهبود عملکرد مخلوط

آسفالتی در برابر رطوبت را پیشنهاد کنند. [۴]. بر این اساس پژوهش‌هایی در دو دهه اخیر به منظور استفاده از روش‌هایی برای تعیین حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی شکل گرفته است که بر اساس خصوصیات بنیادین مواد که در پیوستگی قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه موثر هستند، شکل گرفته است.

۱-۱- مطالعات پیشین

الفینگستون^۴ [۵] از انستیتوی حمل‌ونقل تگزاس اولین فردی بود که نشان داد اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی می‌تواند به عنوان ابزار خوبی برای پیش‌بینی ترک‌خوردگی خستگی و خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد. چنگ^۵ [۶] در مطالعه خود به بررسی مفاهیم انرژی آزاد سطحی، اندازه‌گیری و کاربرد آن در مخلوط‌های آسفالتی پرداخت. نتایج پژوهش وی نشان داد که تغییرات ترمودینامیکی در انرژی آزاد سطحی چسبندگی و پیوستگی به ترتیب با جداسازی در سطح تماس قیر-سنگدانه و رخداد ترک در ماستیک ارتباط مستقیم دارد. بی‌حسین^۶ [۷] در پژوهش خود ابتدا به توسعه روش‌های اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hamed@guilan.ac.ir

پلیمری پرداخته شود. در این پژوهش سعی شده است تا ابتدا اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای کنترل و اصلاح شده و سنگدانه‌ها به دست آید. سپس، با استفاده از مفاهیم ترمودینامیک به بررسی نقش استفاده از پلیمر SBR بر روی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شود. به منظور معتبرسازی نتایج به دست آمده از مفاهیم ترمودینامیک، بارگذاری تکراری در شرایط خشک و مرطوب بر روی نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی در شرایط خشک و مرطوب انجام شده است و نسبت مدول در شرایط مرطوب به خشک به عنوان شاخص حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مختلف در نظر گرفته شده است. درصد عریان‌شدگی قیر از روی سطح سنگدانه‌ها و مکانیزم خرابی رطوبتی در سیکل‌های بارگذاری نیز به دست آمده است. مهم‌ترین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از:

- بررسی تاثیر استفاده از پلیمر SBR بر روی اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای کنترل،
- بررسی تاثیر استفاده از پلیمر SBR بر روی پارامترهای ترمودینامیک شامل انرژی آزاد پیوستگی قیر، انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه، انرژی آزاد شده سیستم در رخداد عریان‌شدگی
- بررسی تاثیر استفاده از پلیمر SBR بر نسبت مدول در شرایط مرطوب به خشک در نمونه‌های کنترل و اصلاح شده،
- مقایسه نتایج به دست آمده از پارامترهای ترمودینامیک و نسبت مدول در شرایط خشک به مرطوب، و
- ترکیب نتایج پارامترهای ترمودینامیک و بارگذاری تکراری به منظور تعیین روند رخداد عریان‌شدگی در نمونه‌های کنترل و اصلاح شده.

۲- تئوری انرژی آزاد سطحی

چندین تئوری، انرژی آزاد سطحی مواد را بر اساس ساختار مولکولی‌شان تشریح می‌کنند. از مهمترین تئوری‌هایی که به صورت گسترده برای تشریح مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد مختلف به کار رفته است، می‌توان به تئوری اسیدی-بازی اشاره کرد [۱۴]. بر طبق این تئوری، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده‌ای براساس نوع نیروهای مولکول‌های سطح به سه مولفه تقسیم می‌شود. این مولفه‌ها عبارتند از:

الف- مولفه غیرقطبی یا مولفه لیفشیتز-ون در والز (LW)، ب- مولفه اسیدی لوئیس و ج- مولفه بازی لوئیس.

انرژی آزاد سطحی کل با ترکیب این مولفه‌ها به طریق زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma = \Gamma^{LW} + \Gamma^{AB} \quad (1)$$

که در آن Γ انرژی آزاد سطحی کل ماده، Γ^{LW} مولفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی و Γ^{AB} مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی است. مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی طبق رابطه زیر از پارامتر اسید لوئیس (Γ^+) و باز لوئیس (Γ^-) تشکیل شده است.

سنگدانه پرداخت. در ادامه، به بررسی ارتباط بین پارامترهای ترمودینامیک، که از اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها و قیرها به دست آمده بودند، و پتانسیل حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخت. هوسون^۱ [۸] نیز در ادامه مطالعات پیشین به بررسی استفاده از روش انرژی آزاد سطحی بر شناسایی پتانسیل مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت پرداخت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که اصلاحات ایجاد شده بر روی قیر می‌تواند تاثیرات منفی یا مثبت قابل توجهی بر روی مولفه‌های انرژی آزاد سطحی آنها و انرژی چسبندگی داشته باشد. در مطالعه‌ای توسط مقدس‌نژاد و حامدی [۹] با استفاده از نتایج آزمایش‌های حساسیت رطوبتی ترکیبات مختلف مخلوط‌های آسفالتی، به بررسی ارتباط بین پارامترهای ترمودینامیک و پتانسیل خرابی رطوبتی پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پارامترهای ترمودینامیک به شکل معناداری با رخداد و شدت خرابی رطوبتی ارتباط دارند [۱۰]. در پژوهش دیگری با استفاده از تحلیل‌های آماری به بررسی تاثیر پارامترهای ترمودینامیک و طرح اختلاط بر رخداد خرابی رطوبتی پرداخته شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که پارامترهای ترمودینامیک شامل انرژی آزاد پیوستگی قیر، پوشش‌پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه، انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه و انرژی جدانشدگی سیستم در رخداد عریان‌شدگی به نحو مناسبی می‌توانند حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مختلف را پیش‌بینی کنند [۱۱].

مهم‌ترین روش برای بهبود مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت تغییر در مصالح، طرح اختلاط یا استفاده از افزودنی‌های عریان‌شدگی می‌باشد. تغییر در مصالح باعث افزایش فاصله حمل و به تبع آن افزایش هزینه‌های اقتصادی پروژه می‌شود. تغییر در طرح اختلاط نیز تا حد کمی می‌تواند بر روی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت تاثیر بگذارد. بر این اساس معمولاً استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بهینه‌ترین روش برای بهبود مقاومت آسفالتی در برابر رطوبت می‌باشد. این افزودنی‌ها در دو دسته کلی افزودنی‌های اضافه‌شونده به قیر و سنگدانه دسته‌بندی می‌شوند. با توجه به راحتی استفاده از افزودنی‌های اضافه‌شونده به قیر، عمده پروژه‌های اجرایی در زمینه کاربرد مواد ضد عریان‌شدگی به این دسته از افزودنی‌ها توجه داشته‌اند. اگرچه پژوهش‌های محدودی نیز در زمینه اصلاح سنگدانه‌ها به منظور بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت انجام شده است اما اکثر این پژوهش‌ها محدود به مطالعات آزمایشگاهی بوده‌اند [۱۲، ۱۳]. آهک هیدراته و افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مایع از متداول‌ترین مواد ضد عریان‌شدگی مورد استفاده در مطالعات آزمایشگاهی و پروژه‌های اجرایی می‌باشند.

۱-۲ بیان مسئله و اهداف پژوهش

با توجه به مشکلات فنی و اجرایی استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی موجود، در این پژوهش سعی شده است تا به بررسی استفاده از اصلاح‌کننده

$$\Delta G_{abw}^a = \Gamma_{ab} - \Gamma_{aw} - \Gamma_{bw} = \Delta G_{abw}^{aLW} + \Delta G_{abw}^{aAB} = 2 \left[-\sqrt{\Gamma_b^{LW} \Gamma_w^{LW}} + \sqrt{\Gamma_a^{LW} \Gamma_w^{LW}} - \sqrt{\Gamma_b^{LW} \Gamma_a^{LW}} - \Gamma_w^{LW} + \sqrt{\Gamma_w^+} (\sqrt{\Gamma_b^-} + \sqrt{\Gamma_a^-} - \sqrt{\Gamma_w^-}) + \sqrt{\Gamma_w^-} (\sqrt{\Gamma_b^+} + \sqrt{\Gamma_a^+} - \sqrt{\Gamma_w^+}) - \sqrt{\Gamma_b^+ \Gamma_a^+} - \sqrt{\Gamma_b^- \Gamma_a^-} \right] \quad (5)$$

۳- طراحی برنامه آزمایشگاهی

مراحل مختلف آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از:

۱. اصلاح قیر کنترل با دو درصد مختلف پلیمر SBR.
 ۲. طرح اختلاط به روش AASHTO T245.
 ۳. انجام آزمایش بارگذاری تکراری بر روی نمونه‌های ساخته شده با قیرهای کنترل و اصلاح شده.
 ۴. تعیین اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای کنترل و اصلاح شده با استفاده از روش صفحه ویلهلمی^۱ و دستگاه جذب همگانی^۲.
 ۵. محاسبه پارامترهای ترمودینامیک بر اساس اجزای انرژی آزاد سطحی قیرها، سنگدانه‌ها و آب برای ترکیبات مختلف مخلوط‌های آسفالتی، و
 ۶. محاسبه درصد عریان‌شدگی سطح سنگدانه‌های مخلوط‌های آسفالتی در سیکل‌های مختلف بارگذاری با استفاده از ترکیب نتایج آزمایش بارگذاری تکراری و پارامترهای ترمودینامیک.
- همچنین، قابل ذکر است که در این پژوهش برای انجام هر آزمایش سه تکرار در نظر گرفته شده است تا دقت نتایج افزایش یابد.

۳-۱- مصالح

۳-۱-۱- سنگدانه

در این پژوهش از دو نوع سنگدانه گرانیته و سنگ‌آهک استفاده شده است که به ترتیب خصوصیات اسیدی و بازی دارند. در واقع، دلیل اصلی استفاده از این دو نوع سنگدانه ساختار مختلف کانی‌های تشکیل‌دهنده این دو نوع سنگدانه بوده است که باعث حساسیت مختلف آنها در برابر خرابی رطوبتی می‌شود. ساختار کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگدانه‌ها با استفاده از آزمایش X-ray fluorescence استفاده شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ساختار کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Mineral structure of aggregates used in this research

SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	نوع سنگدانه
۱۳/۵۸	۷۲/۴۷	۲/۲۴	۳/۸۷	۴/۸۴	سنگ‌آهک
۵۲/۱۹	۳۱/۷۵	۲/۹۲	۷/۰۸	۱/۷۴	گرانیته

1 Wilhelmy plate

2 Universal Sorption Device (USD)

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

از دید ترمودینامیکی انرژی آزاد پیوستگی ΔG_i^c ، مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک ترک با سطح واحد در داخل یک ماده تعریف می‌شود. بر اساس تعریف انرژی آزاد سطحی، ساده است تا کار کل پیوستگی را برای مواد گوناگون به شرح زیر نشان داد:

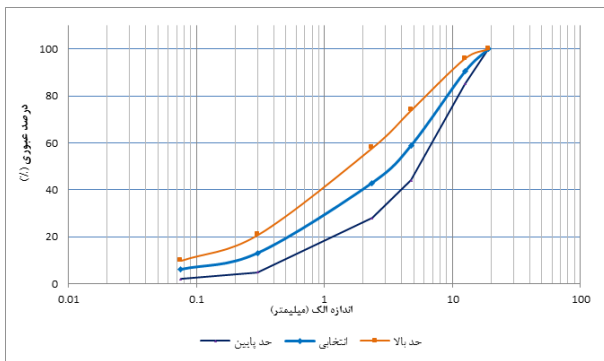
$$W^{AC} = 2\Gamma \quad (3)$$

که در آن Γ_A انرژی آزاد سطحی کل ماده مورد نظر است. کار پیوستگی یک قیر یک پارامتر مهم است که در بعضی از معادلات پایه مکانیک شکست برای تعیین انرژی مورد نیاز برای رشد ترک‌های خیلی ریز در داخل فاز قیری یا فاز ماستیک مخلوط قیری به کار می‌رود.

انرژی آزاد چسبندگی (ΔG_a) همان طور که قبلاً تعریف شد دو مولفه اصلی دارد. مولفه قطبی یا اسیدی-بازی و مولفه غیر قطبی یا لیفشیتز-ون در والز. رابطه زیر برای مشخص کردن انرژی آزاد چسبندگی بین قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\Delta G_{ij}^a = \Gamma_{ij} - \Gamma_i - \Gamma_j = \Delta G_{ij}^{aLW} + \Delta G_{ij}^{aAB} = -2 \left[\sqrt{\Gamma_i^{LW} \Gamma_j^{LW}} + \sqrt{\Gamma_i^+ \Gamma_j^-} + \sqrt{\Gamma_i^- \Gamma_j^+} \right] \quad (4)$$

که در آن ΔG_i^a انرژی آزاد چسبندگی، ΔG_i^{aLW} مولفه غیرقطبی انرژی آزاد چسبندگی، ΔG_i^{aAB} مولفه قطبی انرژی آزاد چسبندگی، Γ_i^{LW} و Γ_i^+ و Γ_i^- مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و Γ_s^{SLW} و Γ_s^+ و Γ_s^- مولفه‌ها انرژی آزاد سطحی سنگدانه هستند. برای یک مخلوط قیر و سنگدانه رابطه ۴ هنگامی به کار می‌رود که مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه مورد نظر اندازه‌گیری شده باشند. رابطه زیر برای محاسبه چسبندگی قیر و سنگدانه در حضور آب مورد استفاده قرار می‌گیرد که اندیس های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نشان دهنده قیر، سنگدانه و آب می‌باشد. اگر مقادیر انرژی آزاد چسبندگی منفی باشد این بدان معنی است که دو ماده تمایل به چسبندگی با یکدیگر دارند و هر چه مقدار منفی بیشتر شود این تمایل افزایش می‌یابد.



شکل ۱: دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 1. Gradation of aggregates used in this research

دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش، دانه بندی میانی استاندارد ASTM برای تولید مخلوط‌های آسفالتی متراکم (دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴) است که اندازه اسمی سنگدانه‌های این دانه‌بندی ۱۹ میلی‌متر است [۱۵]. دانه‌بندی این سنگدانه‌ها در شکل ۱ نشان شده است. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۱-۲- قیر

قیر پایه مورد استفاده در این پژوهش با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ است که از پالایشگاه اصفهان تهیه شده است. خصوصیات این قیر در جدول ۳ ارائه شده است. این قیر با استفاده از ماده پلیمر SBR در دو درصد مختلف اصلاح شده است که در قسمت بعد در مورد مواد ضد عریان‌شدگی مورد استفاده در این پژوهش و خصوصیات آنها توضیح داده خواهد شد.

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Physical properties of aggregates used in this research

محدوده مجاز	استاندارد	سنگ‌آهک	گرانیت	آزمایش
---	ASTM C 127	۲/۶۳	۲/۶۱	وزن ویژه حجمی (درشت‌دانه)
---	ASTM C 127	۲/۶۵	۲/۶۳	وزن ویژه اشباع با سطح خشک (درشت‌دانه)
---	ASTM C 127	۲/۶۸	۲/۶۷	وزن ویژه ظاهری (درشت‌دانه)
---	ASTM C 128	۲/۶۲	۲/۶۰	وزن ویژه اشباع با سطح خشک (ریزدانه)
---	ASTM C 128	۲/۶۵	۲/۶۲	وزن ویژه ظاهری (ریزدانه)
---	ASTM C 128	۲/۶۸	۲/۶۵	وزن ویژه اشباع با سطح خشک (ریزدانه)
---	ASTM D854	۲/۶۵	۲/۶۵	وزن ویژه فیلر
حداکثر ۴۵ درصد	ASTM C 131	۳۲	۲۲	سایش لس آنجلس
حداکثر ۱۰ درصد	ASTM D 4791	۹	۶	ذرات سوزنی و پولکی (%)
حداکثر ۱۰-۲۰	ASTM C 88	۷	۹	دوام در برابر سولفات سدیم
حداقل ۴۰	ASTM C 1252	۵۶/۲	۵۹/۲	گوشه‌داری ذرات ریزدانه

جدول ۳: خصوصیات قیرهای پایه مورد استفاده در این پژوهش

Table 3. Properties of the base bitumen used in this research

نتیجه	استاندارد	آزمایش
۶۹	ASTM D5-73	درجه نفوذ (۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه، ۲۵ درجه)، ۰/۱ میلیمتر
۲۵	ASTM D5-73	درجه نفوذ (۲۰۰ گرم، ۶۰ ثانیه، ۴ درجه)، ۰/۱ میلیمتر
۰/۳۶	ASTM D5-73	نسبت نفوذ
۱۰۵	ASTM D113-79	چکش خواری
۵۱	ASTM D36-76	نقطه نرمی
۲۶۲	ASTM D92-78	نقطه اشتعال
۰/۷۵	ASTM D1754-78	افت وزنی گرمایی

۳-۱-۳- پلیمر SBR

SBR خانواده‌ای از لاستیک‌های مصنوعی را شامل می‌شود که از استایرن^۱ و بوتادین^۲ تشکیل شده‌اند. این مواد مقاومت مناسبی در مقابل ساییدگی و پیرشدگی را دارا می‌باشند. پلیمر SBR به عنوان یک پلیمر متداول با کارایی‌های زیاد و بالا تعریف می‌شود و در دنیا پر مصرف‌ترین لاستیک به حساب می‌آید که به علت دارا بودن مواد اولیه تولید ارزان و فراوان دارای قیمت مناسبی است و به همین دلیل، بالاترین حجم تولید را نیز در صنعت لاستیک به خود اختصاص داده است. در سال ۲۰۱۲، بیش از ۵/۴ میلیون تن از ماده SBR در دنیا تولید شده است [۱۶]. خصوصیات مکانیکی پلیمر SBR مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۴ ارائه شده است.

۳-۲- آزمایش‌ها

۳-۲-۱- اصلاح قیر

در این پژوهش برای اصلاح قیر از ماده پلیمری SBR به عنوان ماده ضد عریان‌شدگی اصلاح‌کننده قیر استفاده شده است. این ماده در دو درصد جرم قیر، ۲ و ۴ درصد، مورد استفاده قرار گرفته است. برای تولید قیرهای اصلاح‌شده، ابتدا قیر پایه تا دمای ۱۶۰ °C گرم شده و سپس ماده افزودنی در درصد مورد نظر به آن اضافه می‌شود. عمل اختلاط در میکسر با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۱۵ دقیقه انجام می‌شود. قیر پایه نیز در دما و زمان مشابه در میکسر قرار داده شده است تا تاثیر پیرشدگی مشابه با قیرهای اصلاح‌شده را تجربه کنند.

۳-۲-۲- طرح اختلاط

در این پژوهش روش طرح اختلاط مارشال براساس استاندارد AASHTO T245 برای تعیین درصد قیر بهینه مطابق با نشریه ۲۳۴ مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷]. تعیین درصد قیر بهینه در این پژوهش بر اساس دستورالعمل MS-2 انستیتو آسفالت تعیین شده است.

۳-۲-۳- آزمایش بارگذاری تکراری

آزمایش بارگذاری تکراری برای تعیین مدول مخلوط‌های آسفالتی در شرایط مرطوب و خشک استفاده شده است. برای تحت شرایط مرطوب قراردادادن نمونه‌ها از شبیه‌سازی به روش AASHTO T283 استفاده شده است. در این پژوهش، آزمایش تعیین مدول دینامیکی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فرکانس بارگذاری ۱ هرتز تحت بارگذاری سینوس مثبت با سطح تنش ۳۰۰۰ مگاپاسکال انجام شده است. مقدار مدول دینامیکی برای هر مخلوط در یک سیکل بارگذاری خاص با استفاده از رابطه‌ی ۱۳ قابل اندازه‌گیری است.

جدول ۴: خصوصیات مکانیکی پلیمر SBR مورد استفاده در این پژوهش

Table 4. Mechanical Properties of SBR Polymer used in this research

مقدار	ویژگی
۱۸	مقاومت کششی (MPa)
۵۴۴	درصد افزایش طول تا پارگی (%)
۴۹/۲	گرانروی مونی (در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)
-۶۰	دمای انتقال شیشه‌ای (سانتی‌گراد)
۲/۷	شاخص پراکندگی
۹/۵	درجه اسیدیته

1 Styrene
2 Butadiene

$$W_{S,V}^a = 2\Gamma_L^{Total} + \pi_e \quad (8)$$

که در آن،

Γ_v^{total} کار چسبندگی بین سنگدانه و بخار مایعات مورد آزمایش، $W_{S,Va}$ انرژی آزاد سطحی کل مایعات مورد آزمایش و π_e فشار توزیع تعادلی بخار مایع بر روی سطح سنگدانه است.

فشار توزیع تعادلی بخار مایع بر روی سطح سنگدانه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\pi_e = \frac{RT}{MA} \int_0^{p_n} \frac{n}{p} dp \quad (9)$$

که در آن،

R ثابت گازها (۸/۳۱۴ J/k.mole)، T دمای آزمایش (Kelvin)، M جرم مولکولی بخار مایع مورد آزمایش، n جرم بخار جذب شده در واحد جرم سنگدانه در فشار بخار p و A مساحت سطح ویژه سنگدانه است.

مساحت سطح ویژه سنگدانه با استفاده از رابطه (Branauer, Emmett, and Teller (BET) به طریق زیر تعیین می‌شود:

$$A = \left(\frac{n_m N_0}{M} \right) \alpha \quad (10)$$

که در آن، N_0 عدد آووگادرو، و α سطح تصویر شده یک مولکول، و n_m ظرفیت تک لایه که برابر است با تعداد مولکول‌هایی که نیاز است تا سطح سنگدانه در یک لایه پوشیده شود که طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$n_m = \left(\frac{1}{S+I} \right) \quad (11)$$

که در آن، S و I به ترتیب شیب و عرض از مبدأ نمودار رابطه بین P/P_n و $P/n(P_n-P)$ ، p فشار بخار جزئی، P_n فشار بخار اشباع، و n جرم بخار جذب شده نسبت به جرم سنگدانه است.

مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سه نوع ماده تحقیق مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۵ آورده شده است.

$$|E^*| = \frac{\sigma_{max}}{\epsilon_{max}} \quad (6)$$

که در این رابطه، σ_{max} مقدار حداکثر تنش برای یک سیکل خاص و ϵ_{max} مقدار کرنش متناظر در همان سیکل است. نسبت مدول با توجه به رابطه زیر برای هر سیکل به دست می‌آید که به عنوان شاخصی برای حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته می‌شود [۱۸ و ۱۹]. هر چه مقدار پارامتر K طبق رابطه‌ی ۱۴ بزرگتر باشد، بدین معنی است که مقاومت مخلوط آسفالتی تحت اثر همزمان ترافیک و رطوبت بیشتر است.

$$K = \frac{E_{wet}^*}{E_{dry}^*} \times 100 \quad (7)$$

که در این رابطه، E_{wet}^* و E_{dry}^* به ترتیب بیانگر مقدار مدول دینامیکی در شرایط مرطوب و خشک می‌باشند.

۳-۲-۴ اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه

به منظور اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها و قیرها می‌توان از روش‌های گوناگونی استفاده کرد. با توجه به حساسیت اندازه‌گیری در این آزمایش‌ها، در این پژوهش از روش‌هایی استفاده شده است که در پژوهش‌های پیشین به دقت بالاتر آنها نسبت به سایر آزمایش‌های رایج اشاره شده است [۲۰]. انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها و قیرهای مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب با استفاده از روش (Universal Sorption Device (USD و صفحه ویلهلمی که بوسیله بی حسین و لیتل [۲۱] و هفر و همکاران [۲۲، ۲۳] توسعه داده شده است، اندازه‌گیری شده‌اند.

رابطه بین کار چسبندگی و میانگین هندسی اجزای انرژی آزاد سطحی به صورت خطی است. بنابراین، کار چسبندگی با سه نوع بخار مایع لازم است تا یک مجموعه‌ای از سه رابطه خطی ایجاد شود و این معادلات برای به دست آوردن سه جزء انرژی آزاد سطحی سنگدانه به کار رود. حتماً باید سه نوع مایع تحقیق را از سه نوع مایع مختلف که یکی از آن‌ها غیرقطبی، یکی قطبی و یکی حالت میانه داشته باشد، انتخاب کنند. رابطه زیر کار چسبندگی بین یک سنگدانه و یک بخار مایع را به گسترش فشار بخار بر روی سطح سنگدانه مرتبط می‌کند.

جدول ۵: مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد تحقیق برای اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها (ergs/cm²)

Table 5. Surface energy free energy components of research materials for measuring the energy of free surface energy of aggregates (ergs/cm²)

مولفه‌های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm ²)				
مولفه‌های انرژی آزاد سطحی	بازی	اسیدی	قطبی	غیرقطبی
ان هگزان	۰	۰	۰	۱۸/۴
متیلن پروپیل کتون	۱۹/۶	۰	۰	۲۴/۷
آب	۲۵/۵	۲۵/۵	۵۱	۲۱/۸

هندسی صفحه بیان می‌شود. بنابراین، زاویه تماس بین مایع و سطح صفحه جامد را می‌توان از طریق معادله زیر محاسبه نمود:

$$\cos \theta = \frac{\Delta F + V_{im}(\rho_L - \rho_{air} * g)}{P_L \Gamma_L^{total}} \quad (14)$$

در این معادله P_L محیط صفحه آغشته به قیر، Γ_L^{total} انرژی آزاد سطحی مایع تحقیق، θ زاویه تماس بین صفحه و مایع آزمایش، V_{im} حجم صفحه که در داخل سیال وارد شده است، ρ_L جرم مخصوص مایع و ρ_{air} وزن مخصوص هوا و g شتاب گرانش می‌باشند. همانطور که قبلاً ذکر شد برای تعیین اجزای انرژی آزاد سطحی قیر نیاز به سه مایع تحقیق مختلف است که اجزای انرژی آزاد سطحی آنها معلوم باشد. در این پژوهش از سه مایع آب، روغن و فرمامید به علت اجزای انرژی آزاد سطحی نسبتاً بزرگ، غیرقابل مخلوط بودن با قیر و اجزای انرژی آزاد سطحی متفاوتشان استفاده شده است. مولفه‌های انرژی سطحی آنها در جدول ۶ آورده شده است.

۴- نتایج

۴-۱- نتایج طرح اختلاط

درصد قیر بهینه در مورد نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک و گرانیته به ترتیب ۵/۸ و ۵/۵ بوده است. سنگدانه‌های آهکی با توجه به خلل و فرج سطحی که دارند، میزان قیر بیشتری را به صورت غیرمفید به خود جذب می‌کنند. این مطلب باعث می‌شود تا درصد قیر بهینه بیشتری در مقایسه با سنگدانه‌های گرانیته که خلل و فرج کمتری دارند، جذب شود. نکته قابل ذکر این است که طرح اختلاط فقط برای نمونه‌های حاوی سنگدانه و قیرهای پایه انجام شده است. زیرا اگر در نمونه‌های حاوی قیر کنترل و اصلاح شده از درصد قیرهای مختلف استفاده شود، متغیر درصد قیر نیز می‌تواند به عنوان عاملی تاثیرگذار بر نسبت مدول در شرایط مرطوب به خشک باشد و نتایج تحلیل نتایج را با خطا مواجه سازد.

براساس معادله یانگ-دوپره، ون اوس و همکاران [۱۴] در سال ۱۹۸۸ رابطه زیر را بین انرژی آزاد چسبندگی گیس ($\Delta G_{L,S}$)، کار چسبندگی ($W_{L,S}$)، زاویه تماس (θ) یک ماده مایع تحقیق (L) در تماس با یک جسم جامد (S) و با داشتن اجزای انرژی آزاد سطحی هر دو ماده مایع و جامد ارائه کردند.

$$-\Delta G_{L,S}^a = W_{L,S}^a = \Delta G_L^{total} (1 + \cos \theta) = 2[(\Gamma_s^{LW} \Gamma_L^{LW})^{0.5} + (\Gamma_s^+ \Gamma_L^-)^{0.5} + (\Gamma_s^- \Gamma_L^+)^{0.5}] \quad (12)$$

معادله ۱۲ اساس معادله‌ای است که برای محاسبه اجزای انرژی آزاد سطحی قیر با استفاده از زاویه تماس به کار می‌رود. در این معادله، جسم جامد (S) با قیر جابجا می‌شود و مایع تحقیق (L) مایع آزمایش است که اجزای انرژی آزاد سطحی آن معلوم می‌باشد. اگر جزر اجزای انرژی آزاد سطحی قیر را مجهول فرض کرده و آن را با X_1 ، X_2 و X_3 نمایش دهند، معادله ۱۳ به شکل معادله زیر بیان می‌شود:

$$\Gamma_L^{total} (1 + \cos \theta) = 2[(\Gamma_s^{LW})^{0.5} * x_1 + (\Gamma_s^+)^{0.5} * x_2 + (\Gamma_s^-)^{0.5} * x_3] \quad (13)$$

زاویه تماس اندازه‌گیری شده مایع تحقیق با قیر و اجزای انرژی آزاد سطحی مایعات تحقیق که معلوم هستند، تشکیل یک معادله و سه مجهول را می‌کنند. اگر سه مایع تحقیق متفاوت را با یک قیر مشخص مورد بررسی قرار داده شوند، سه معادله و سه مجهول تشکیل می‌شود که می‌توان سه مجهول مورد نظر که اجزای انرژی آزاد سطحی قیر هستند را بدست آورد.

در سال ۱۸۶۳، برای کمی کردن زاویه تماس بین یک مایع، ویلهلمی برای اولین بار یک روش غیرمستقیم را پیشنهاد داد که در آن یک صفحه در یک مایع غوطه‌ور می‌شد. چون در حین این فرآیند صفحه در حال حرکت است (با سرعت چند میکرون در ثانیه)، این یک روش اندازه‌گیری زاویه تماس براساس تعادل شبه استاتیک می‌باشد. از تعادل ساده بین نیروهای این حالت، تفاوت بین وزن صفحه در هوا و آب (ΔF)، براساس جرم مخصوص مایع، انرژی آزاد سطحی مایع، زاویه تماس بین مایع و صفحه جامد و ابعاد

جدول ۶: مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد تحقیق برای اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر (ergs/cm^2)

Table 6. Surface energy free energy components of research materials for measuring the energy of free surface energy of bitumen (ergs/cm^2)

مولفه‌های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm^2)					مولفه‌های انرژی آزاد سطحی
کل	غیرقطبی	قطبی	اسیدی	بازی	
۷۲/۸	۲۱/۸	۵۱	۲۵/۵	۲۵/۵	آب
۶۲/۸	۳۴	۲۸/۸	۳/۹۲	۵۷/۴	گلیسرول
۵۸	۳۹	۱۹	۲/۲۸	۳۹/۶	فرمامید

۴-۲- نتایج آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی

نتایج مربوط به اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۷ ارائه شده است. مولفه بازی سنگدانه‌های سنگ‌آهک و گرانیت (به ترتیب ۵۲۲/۴ و ۵۲۵/۸) از مولفه اسیدی آنها (به ترتیب ۳۱/۷ و ۲۰/۵) بزرگتر است که این در مورد همه سنگدانه‌ها وجود دارد اما همانطور که مشخص است نسبت مولفه اسیدی به بازی سنگدانه‌های گرانیتی به سنگ‌آهک بیشتر است. مولفه غیرقطبی سنگدانه‌های سنگ‌آهک و گرانیت (به ترتیب ۶۷/۱ و ۶۸/۸) به یکدیگر نزدیک است اما مولفه قطبی سنگدانه‌های سنگ‌آهک (۲۵۷/۵) از گرانیت (۲۰۷/۷) بیشتر است که این مطلب باعث شده است تا انرژی آزاد سطحی کل مربوط به سنگدانه‌های سنگ‌آهک به مقدار قابل توجهی از سنگدانه گرانیتی بیشتر باشد.

نتایج مربوط به انرژی آزاد سطحی قیرهای کنترل و اصلاح‌شده در جدول ۸ ارائه شده است. همانطور که از داده‌های جدول مشخص است، مولفه اسیدی قیر پایه (۲/۶۹) در برابر مولفه بازی آن (۰/۴۵) بسیار بزرگتر است. این مطلب باعث می‌شود تا قیر خصوصیات اسیدی بیشتری داشته باشد. خصوصیات اسیدی قیر باعث شکل‌گیری پیوندهای قوی‌تری با مواد بازی مانند سنگدانه‌های سنگ‌آهک می‌شود. استفاده از ماده پلیمر SBR باعث شده تا هم مولفه اسیدی و هم مولفه بازی قیرهای اصلاح‌شده افزایش یابد. مقدار درصد افزایش مولفه بازی در مقایسه با مولفه اسیدی بیشتر است که این باعث شکل‌گیری خصوصیات بازی بیشتر در قیرهای اصلاح‌شده با این ماده می‌شود. افزایش در درصد این ماده از ۲ تا ۴ درصد هم باعث افزایش تغییرات ذکرشده می‌شود.

نتایج ستون مولفه اسیدی-بازی یا قطبی انرژی آزاد سطحی در جدول ۸ نشان می‌دهد که مواد افزودنی مورد استفاده در این پژوهش باعث شده‌اند تا مولفه قطبی قیر نیز از ۲/۲۰ به ترتیب در نمونه‌های قیر اصلاح‌شده با ۲ و ۴ درصد SBR به ۳/۰۷ و ۳/۶۷ افزایش یابد. در مورد تاثیر مثبت یا منفی این پارامتر در چسبندگی قیر-سنگدانه نمی‌توان با قاطعیت نظر داد. تنها مطلب قابل ذکر این است که افزایش در خصوصیات قطبی قیر باعث می‌شود تا میل به چسبندگی آن به مواد قطبی مانند سنگدانه و آب افزایش یابد.

از نتایج ستون مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیر در جدول ۸ می‌توان مشاهده نمود که استفاده از پلیمر SBR باعث شده است تا مولفه غیرقطبی قیرهای اصلاح‌شده در مقایسه با قیر پایه از ۱۱/۳۶ به ترتیب در نمونه‌های قیر اصلاح‌شده با ۲ و ۴ درصد SBR به ۱۲/۲۸ و ۱۳/۸۴ افزایش یابد. این مطلب باعث می‌شود تا پیوندهای غیرقطبی با قدرت بیشتری شکل گیرند.

نتایج ستون انرژی آزاد سطحی کل نشان می‌دهد که استفاده از پلیمر SBR باعث شده است تا این پارامتر از ۱۳/۵۶ به ترتیب در نمونه‌های قیر اصلاح‌شده با ۲ و ۴ درصد SBR به ۱۵/۳۵ و ۱۷/۵۱ افزایش یابد. انرژی آزاد سطحی کل رابطه‌ی مستقیم و خطی با انرژی آزاد پیوستگی دارد. افزایش در انرژی آزاد سطحی کل سبب می‌شود تا انرژی آزاد پیوستگی افزایش یابد. این روند بدین معناست که انرژی بیشتری نیاز است تا ترک مشخصی در غشای قیر ایجاد شود. افزایش انرژی مورد نیاز برای گسیختگی در غشای قیر باعث کاهش احتمال گسیختگی پیوستگی می‌شود.

جدول ۷: مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

Table 7. Free energy components of aggregates used in this research

مولفه‌های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm ²)					مولفه‌های انرژی آزاد سطحی
کل	غیرقطبی	قطبی	اسیدی	بازی	
۳۲۴/۶	۶۷/۱	۲۵۷/۵	۳۱/۷	۵۲۲/۴	سنگ‌آهک
۲۷۶/۶	۶۸/۸	۲۰۷/۷	۲۰/۵	۵۲۵/۸	گرانیت

جدول ۸: مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای کنترل و اصلاح‌شده مورد استفاده در این پژوهش

Table 8. Controlled and modified bituminous free surface energy components used in this research

مولفه‌های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm ²)					مولفه‌های انرژی آزاد سطحی
کل	غیرقطبی	قطبی	اسیدی	بازی	
۱۳/۵۶	۱۱/۳۶	۲/۲۰	۲/۶۹	۰/۴۵	قیر ۶۰-۷۰
۱۵/۳۵	۱۲/۲۸	۳/۰۷	۲/۹۸	۰/۷۹	قیر ۶۰-۷۰ اصلاح‌شده با ۲ درصد SBR
۱۷/۵۱	۱۳/۸۴	۳/۶۷	۳/۲۷	۱/۰۳	قیر ۶۰-۷۰ اصلاح‌شده با ۴ درصد SBR

۴-۳- نتایج پارامترهای انرژی آزاد سطحی

نتایج مربوط به پارامترهای انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی و انرژی جداشدگی در شکل‌های ۲ تا ۴ ارائه شده‌اند. همانطور که از داده‌های ارائه شده در جدول ۸ مشخص است، استفاده از پلیمر SBR باعث شده است تا مقدار انرژی آزاد پیوستگی افزایش یابد. این مطلب نشاندهنده این است که برای رخداد ترک خوردگی در غشای قیری نیروی بیشتری نیاز است که احتمال رخداد گسیختگی پیوستگی را کمتر می‌کند.

نتایج مربوط به انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه در شرایط خشک در جدول ۸ نشان داده شده است. این پارامتر مقداری انرژی مورد نیاز برای ایجاد گسیختگی با سطح واحد در سطح تماس قیر-سنگدانه را نشان می‌دهد. از داده‌های این شکل می‌توان مشاهده نمود، استفاده از افزودنی‌های پلیمری باعث شده است تا مقدار انرژی آزاد چسبندگی در نمونه‌های حاوی هر دو نوع سنگدانه افزایش یابد. این مطلب سبب می‌شود تا مقدار انرژی بیشتری برای جداسازی قیر از واحد سطح سنگدانه مورد نیاز باشد. افزایش در درصد ماده پلیمری باعث تغییر قابل توجهی در انرژی آزاد چسبندگی شده است. مقادیر انرژی آزاد چسبندگی در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتهی بزرگتر است. این مطلب نشاندهنده این است که انرژی بیشتری برای جداسازی قیر از واحد سطح سنگدانه‌های گرانیتهی نیاز است. البته باید به این مطلب توجه داشت که سنگدانه‌های سنگ‌آهک مساحت سطح ویژه بزرگتری دارند. این موضوع باعث می‌شود تا مقدار نیروی کل مورد نیاز برای جداسازی در مورد سنگدانه‌های با تخلخل بیشتر مانند سنگ‌آهک بیشتر باشد.

انرژی رهشده سیستم در رخداد عریان‌شدگی یا انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه در شرایط مرطوب (انرژی جدا شدگی) مقدار انرژی است که در حین فرآیند عریان‌شدگی آزاد می‌شود. با توجه به اینکه این مقادیر منفی هستند، مقادیر قدر مطلق آنها در جدول ۸ ارائه شده است. بر اساس اصول ترمودینامیک هر فرآیندی که انرژی‌زا باشد، به صورت خودبخودی انجام می‌شود. پس این انتظار وجود دارد که هنگامی که آب وارد سیستم قیر-سنگدانه می‌شود، جداشدن قیر از روی سطح سنگدانه و رخداد عریان‌شدگی به صورت خودبخودی انجام شود. نکته مهم این است که هر چه مقدار انرژی آزاد شده بیشتر باشد، شدت عریان‌شدگی بیشتر خواهد بود. نتایج ارائه شده در جدول ۸ نشان می‌دهد که استفاده از پلیمر SBR در نمونه‌های ساخته شده با هر دو نوع سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش باعث کاهش در انرژی جداشدگی شده است. افزایش در درصد این ماده‌ها نیز باعث شده است تا مقدار این پارامتر کاهش یابد. این مطلب باعث می‌شود تا میل به عریان‌شدگی با افزایش در درصد ماده پلیمری کاهش یابد. همانطور که داده‌های ارائه شده در شکل نشان می‌دهد در عریان‌شدگی ترکیب‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیتهی مقدار انرژی بسیار بیشتری آزاد می‌شود که نشاندهنده این است که عریان‌شدگی در واحد سطح سنگدانه‌های گرانیتهی با تمایل بیشتری رخ می‌دهد.

۴-۴- نتایج آزمایش‌های بارگذاری تکراری

برای ترکیب‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی آزمایش بارگذاری تکراری در شرایط خشک و مرطوب انجام شده و مدول سختی مخلوط‌های آسفالتی در سیکل‌های مختلف طبق رابطه‌ی ۱۳ به دست آمده است. سپس، برای هر نمونه مخلوط آسفالتی در هر سیکل نسبت مدول مرطوب به خشک طبق رابطه‌ی ۱۴ به دست آمده است. نتایج نسبت مدول برای نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک و گرانیتهی به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. می‌توان از داده‌های شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده کرد که تاثیر استفاده از سنگدانه‌ها، قیرها و افزودنی‌های مختلف بر روی رخداد خرابی رطوبتی کاملاً محسوس است. هر کدام از این اجزاء به همراه ویژگی‌های مخلوط می‌تواند باعث بهبود یا تضعیف مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی شود.

همانطور که از داده‌های ارائه شده در شکل ۵ مشخص است، نمونه‌های ساخته شده با قیر کنترل کمترین مقدار نسبت مدول در شرایط مرطوب به خشک را از خود نشان داده‌اند. استفاده از پلیمر SBR باعث شده است تا نسب مدول در این نمونه‌ها افزایش یابد. هر چه درصد افزودنی پلیمری بیشتر شده است، بهبود در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های کنترل آشکارتر شده است. تفاوت در نسبت مدول مرطوب به خشک در سیکل‌های کم بارگذاری در بین نمونه‌های کنترل و نمونه‌های اصلاح شده کم است. هر چه تعداد سیکل‌های بارگذاری بیشتر می‌شود، این تفاوت نیز بیشتر می‌شود. در واقع می‌توان گفت که نرخ کاهش نسبت مدول (شیب نمودار) در نمونه‌های کنترل نسبت به نمونه‌های اصلاح شده بیشتر است. روند مشابه با نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک را در مورد نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیتهی نیز می‌توان مشاهده نمود. تفاوت قابل ذکر در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیتهی در مقایسه با سنگدانه‌های سنگ‌آهک این است که استفاده از افزودنی SBR توانسته است در نمونه‌های ساخته شده با این گروه از سنگدانه‌ها بهبود بیشتری ایجاد کند. دلیل این امر را می‌توان به این مسئله نسب داد که نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک دارای مقاومت بالایی در برابر خرابی رطوبتی هستند و بهبود در عملکرد آنها به سختی و به مقدار کم ایجاد می‌شود. همانطور که در تحلیل نتایج روش انرژی آزاد سطحی مشاهده شد، استفاده از مواد پلیمری باعث افزایش در انرژی آزاد پیوستگی و چسبندگی در شرایط خشک شده است. این دو رخداد سبب کاهش گسیختگی در غشای قیری و سطح تماس قیر-سنگدانه می‌شود که مقاومت مخلوط آسفالتی در شرایط بارگذاری را افزایش می‌دهد. قراردادن نمونه‌ها تحت شرایط مرطوب باعث شده است تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر بارگذاری کاهش یابد. این مطلب مورد انتظار بوده است. زیرا اثر رطوبت باعث کاهش در پیوستگی قیر و از دست دادن چسبندگی قیر-سنگدانه می‌شود که این عوامل سبب می‌شود تا مقاومت مخلوط آسفالتی کاهش یابد. استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی سبب شده است تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی بهبود یابد. همانطور که در قسمت پیشین گفته شد، استفاده از مواد پلیمری به عنوان اصلاح‌کننده‌ی قیر

بارگذاری دچار عریان‌شدگی می‌شوند، درک کرد. نسبت سختی (مدول) در شرایط مرطوب به خشک را می‌توان با نسبت چسبندگی بین قیر-سنگدانه در شرایط خشک و مرطوب یکسان در نظر گرفت [۲۴]. این مفهوم در رابطه زیر نشان داده شده است.

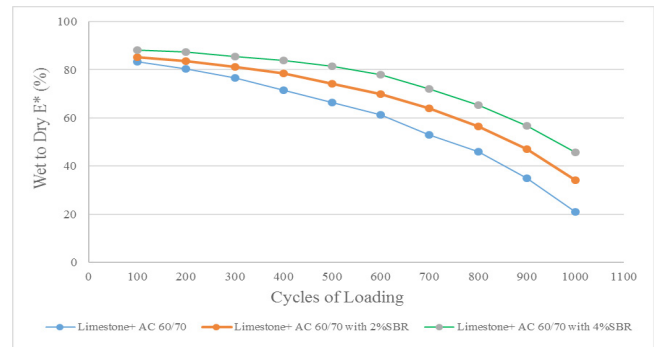
$$E_{wet}^* / E_{dry}^* = [\Delta G_{12}^*(1-P) + \Delta G_{132} P] / [\Delta G_{12}] \quad (۸)$$

که در آن، ΔG_{12} مقدار انرژی چسبندگی قیر-سنگدانه، ΔG_{123} مقدار انرژی جدایش یا انرژی سیستم قیر-سنگدانه در حالت اشباع و P درصدی از سطح سنگدانه‌ها است که دچار عریان‌شدگی شده است. برای آزمایش بارگذاری تکراری کنترل کرنش رابطه ۸ را می‌توان به رابطه ۹ تبدیل کرد.

$$E_{wet}^* / E_{dry}^* = (\sigma / \varepsilon)_{wet} / (\sigma / \varepsilon)_{dry} = \varepsilon_{wet} / \varepsilon_{dry} = [\Delta G_{12}^*(1-P) + \Delta G_{132} P] / [\Delta G_{12}] \quad (۹)$$

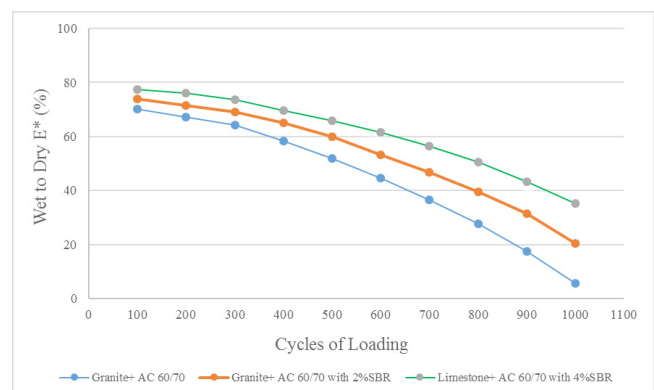
نتایج مربوط به درصد عریان‌شدگی قیر از روی سطح سنگدانه‌ها در مورد نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک و گرانیت به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از افزودنی پلیمری باعث شده است تا درصد عریان‌شدگی قیر از روی سطح سنگدانه‌ها در سیکل‌های مختلف بارگذاری کاهش یابد. همچنین، می‌توان مشاهده نمود که شیب نمودار درصد عریان‌شدگی در برابر سیکل‌های بارگذاری روند صعودی دارد. در واقع، در سیکل‌های ابتدایی بارگذاری تقریباً همه سنگدانه‌ها با قیر به یکدیگر چسبیده‌اند. هر چه میزان در معرض قرارگیری نمونه‌ها در شرایط مرطوب و تکرار بارگذاری بیشتر می‌شود، درصد بیشتری از سطح سنگدانه‌ها از قیر عریان می‌شوند. این مطلب باعث می‌شود که کاهش چسبندگی به همراه کاهش درصد سنگدانه‌ها که به یکدیگر متصل هستند، یکدیگر را تشدید کرده و روند عریان‌شدگی قیر از روی سطح سنگدانه با شیب بیشتری ادامه یابد. با مقایسه بین شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک دارای مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته‌شده با سنگدانه‌های گرانیتی هستند. فاکتورهای متفاوتی در رخداد خرابی رطوبتی و مقاومت یک مخلوط آسفالتی در برابر آن موثر هستند که یکی از مهم‌ترین آنها ساختار کانی‌های تشکیل دهنده سنگدانه مورد استفاده در مخلوط آسفالتی است. دو کانی CaO و SiO_2 (و یا $CaCO_3$) باعث می‌شوند تا تغییر اساسی در خصوصیات آبریزی یا آبدوستی مخلوط آسفالتی ایجاد شود.

باعث کاهش در مقدار انرژی آزاد جدایش و تمایل کمتر مخلوط آسفالتی برای عریان‌شدگی می‌شود.



شکل ۲: نسبت مدول دینامیکی در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک

Fig. 2. Dynamic modulus ratio in samples made with limestone aggregates



شکل ۳: نسبت مدول دینامیکی در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های گرانیتی

Fig. 3. Dynamic modulus ratio in samples made with granite aggregates

۴-۵ درصد عریان‌شدگی سطح سنگدانه‌ها در سیکل‌های بارگذاری چنگ [۶] به صورت موفقیت‌آمیزی تئوری ویسکوالاستیک غیر خطی پیوسته که توسط شاپری برای خرابی مواد ارائه شده بود را برای توصیف رفتار مخلوط آسفالتی تحت بارگذاری کنترل کرنش و تنش به کار گرفت. او تئوری شاپری که در آن گفته شده بود که پیش‌بینی خرابی براساس تئوری انتشار قابل معتبرسازی با آزمایش‌های بارگذاری تکراری است، را استفاده نمود. بنابراین، در بارگذاری تکراری، خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان با محاسبه درصدی از سطح سنگدانه‌ها که در سیکل‌های مختلف

- افزودن پلیمر SBR باعث افزایش انرژی آزاد پیوستگی و مقدار انرژی آزاد چسبندگی و کاهش انرژی آزاد شده سیستم در رخداد عریان‌شدگی در نمونه‌های حاوی هر دو نوع سنگدانه شده است که بیانگر کاهش تمایل سیستم برای عریان‌شدگی است.

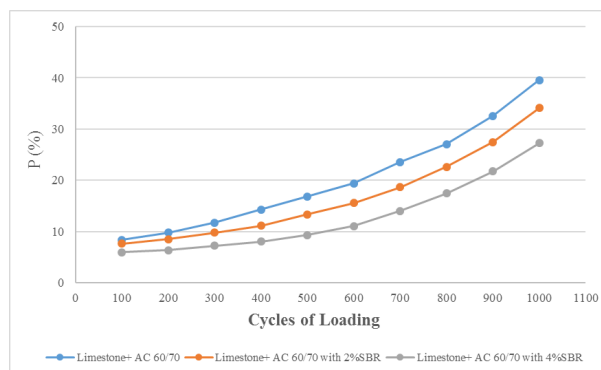
- شاخص درصد عریان‌شدگی، که بر اساس ترکیب نتایج آزمایش بارگذاری تکراری در شرایط خشک و مرطوب به همراه نتایج پارامترهای ترمودینامیک به دست آمده است، نشان می‌دهد نمونه‌های ساخته‌شده با قیر کنترل در سیکل‌های بارگذاری در شرایط مرطوب با نرخ بیشتری دچار عریان‌شدگی می‌شوند و نرخ افت مدول باربری در آنها سریع‌تر از نمونه‌های اصلاح‌شده است.

- استفاده از پلیمر SBR باعث شده تا هم مولفه اسیدی و هم مولفه بازی قیرهای کنترل افزایش یابد. مقدار درصد افزایش مولفه بازی در مقایسه با مولفه اسیدی بیشتر است که این باعث شکل‌گیری خصوصیات بازی بیشتر در قیرهای اصلاح‌شده با این ماده می‌شود.

- افزودن پلیمر SBR باعث شده است تا مولفه قطبی قیر افزایش یابد. در مورد تاثیر مثبت یا منفی این پارامتر در چسبندگی قیر-سنگدانه نمی‌توان با قطعیت نظر داد. تنها مطلب قابل ذکر این است که افزایش در خصوصیات قطبی قیر باعث می‌شود تا میل به چسبندگی آن به مواد قطبی مانند سنگدانه و آب افزایش یابد.

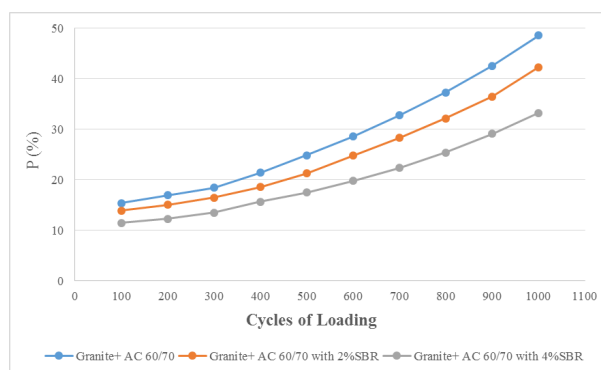
مراجع

- [1] K.D. Stuart, Moisture damage in asphalt mixtures-a state-of-the-art report, (1990).
- [2] R.B. McGennis, T.W. Kennedy, R.B. Machemehl, Stripping and moisture damage in asphalt mixtures, 1984.
- [3] G.H. Hamed, Evaluating the Effect of Asphalt Binder Modification Using Nanomaterials on the Moisture Damage of HMA, Road Materials and Pavement Design, (2016) In press.
- [4] I.L. Al-Qadi, I.M. Abauwad, H. Dhasmana, A.R. Coenen, Effects of Various Asphalt Binder Additives/Modifiers on Moisture-Susceptible Asphaltic Mixtures, 0197-9191, Illinois Center for Transportation, 2014.
- [5] G.M. Elphingstone, Adhesion and Cohesion in Asphalt-aggregate Systems, Texas A&M University, 1997.
- [6] D. Cheng, Surface Free Energy of Asphalt-Aggregate System and Performance Analysis of Asphalt Concrete, Texas A&M University, 2002.
- [7] A. Bhasin, Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water, Texas A&M University, 2006.



شکل ۴: درصد عریان‌شدگی سطح سنگدانه‌ها در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های سنگ آهک

Fig. 4. Percentage of surface aggregate stripping in samples made with limestone aggregates



شکل ۵: درصد عریان‌شدگی سطح سنگدانه‌ها در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های گرانیتی

Fig. 5. Percentage of aggregate surface stripping in samples made with granite aggregates

۵- نتیجه‌گیری

برای بهبود حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی روش‌های متفاوتی وجود دارد که یکی از متداول‌ترین آنها استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی است. مشکلات فنی و اجرایی مواد ضد عریان‌شدگی موجود و نیز نقص‌های فنی موجود در روش‌های ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی باعث شده است تا در این پژوهش به بررسی تاثیر استفاده از ماده پلیمر SBR با استفاده از روش‌های مکانیکی و ترمودینامیک پرداخته شود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

- استفاده از پلیمر SBR باعث شده است تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی به ویژه در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های گرانیتی بهبود یابد.

- [17] D. ASTM, Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, in: Annual Book of Astm Standards. Philadelphia PA: American Society for Testing and Materials, America, 1998.
- [18] B.D. Shah, Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes, Texas A&M University, 2003.
- [19] A. Khodaii, V. Khailfeh, M. Dehand, G.H. Hamed, Evaluating the Effect of Zycosoil on Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Using the Surface Energy Method, Journal of Materials in Civil Engineering, (2013).
- [20] D.N. Little, A. Bhasin, A. Hefer, Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement, Transportation Research Board, 2006.
- [21] A. Bhasin, D.N. Little, Characterization of aggregate surface energy using the universal sorption device, Journal of Materials in Civil Engineering, 19(8) (2007) 634-641.
- [22] A.W. Hefer, Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond, Texas A&M University, 2004.
- [23] A.W. Hefer, A. Bhasin, D.N. Little, Bitumen surface energy characterization using a contact angle approach, Journal of Materials in Civil Engineering, 18(6) (2006) 759-767.
- [24] M. Witzak, K. Kaloush, T. Pellinen, M. El-Basyouny, Appendix A-Test method for dynamic modulus of asphalt concrete mixtures for permanent deformation, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report, 465 (2002).
- [8] J.E. Howson, Relationship between surface free energy and total work of fracture of asphalt binder and asphalt binder-aggregate interfaces, Texas A&M University, 2011.
- [9] J.E. Howson, Relationship between surface free energy and total work of fracture of asphalt binder and asphalt binder-aggregate interfaces, Texas A&M University, 2011.
- [10] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, Evaluating the effect of mix design and thermodynamic parameters on moisture sensitivity of HMA, Materials in Civil Engineering, (2016) In press
- [11] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, Using energy parameters based on the surface free energy concept to evaluate the moisture susceptibility of hot mix asphalt, Road Materials and Pavement Design, (ahead-of-print) (2014) 1-17.
- [12] Superpave Fundamentals. Reference Manual, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, FHWA, 2012.
- [13] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, Use of aggregate nanocoating to decrease moisture damage of hot mix asphalt, Road Materials and Pavement Design, (ahead-of-print) (2015) 1-20.
- [14] C.J. Van Oss, M.K. Chaudhury, R.J. Good, Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems, Chemical Reviews, 88(6) (1988) 927-941.
- [15] A. Standard, D7369, "Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2003).
- [16] Wikipedia, Styrene Butadiene Rubber, in, Wikipedia, the free encyclopedia, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Gh. H. Hamed, Evaluating the Effect of SBR Polymer Modified Bitumen on the Moisture Susceptibility of HMA, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 865-876.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12929.5296

