



## بررسی آزمایشگاهی تاثیر استفاده از نانو کامپوزیت SBR بر خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از تئوری انرژی آزاد سطحی

علیرضا آذرهوش<sup>۱\*</sup>، غفار رضوانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه بجنورد، دانشکده فنی و مهندسی، عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران  
<sup>۲</sup> دانشگاه غیر دولتی غیرانتفاعی شمال، دانشکده فنی و مهندسی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد راه و ترابری

**خلاصه:** یکی از خرابی‌های متداول در مخلوط‌های آسفالتی، ناشی از تاثیر مخرب رطوبت بر پیوستگی قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه می‌باشد که خرابی رطوبتی نام دارد. به منظور بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر این خرابی از افزودنی‌های ضد عریان شدگی به منظور افزایش چسبندگی قیر-سنگدانه و پیوستگی قیر استفاده می‌شود. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش‌های ترمودینامیک و مکانیکی تاثیر استفاده از نانو کامپوزیت استایرن بوتادین لاستیک (SBR) به عنوان اصلاح‌کننده قیر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بررسی شود. برای شبیه‌سازی شرایط محیطی، نمونه‌های آسفالتی تحت ۱، ۳ و ۵ سیکل یخ-ذوب قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث شده است تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی به ویژه در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های گرانیته بهبود یابد. همچنین، نتایج روش انرژی آزاد سطحی نشان می‌دهد که اصلاح قیر با نانو کامپوزیت SBR باعث افزایش در مولفه بازی و کاهش در مولفه اسیدی قیر پایه می‌شود. این رخداد باعث بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌های اسیدی که مستعد خرابی رطوبتی هستند، می‌شود. همچنین، استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث افزایش انرژی آزاد پیوستگی شده که سبب افزایش مقاومت غشای قیر در برابر گسیختگی از نوع پیوستگی می‌شود. به علاوه، محاسبات بر اساس مفاهیم ترمودینامیک نشان می‌دهد که اصلاح قیر سبب شده است تا میزان انرژی جداسازی در رخداد عریان‌شدگی کاهش یابد که این رخداد از دید ترمودینامیک بیانگر کاهش تمایل سیستم به عریان‌شدگی است.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۲۸

بازنگری: ۳۱-۰۱-۳۱

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

### کلمات کلیدی:

مخلوط‌های آسفالتی

خرابی رطوبتی

تئوری انرژی آزاد سطحی

سیکل یخ-ذوب

نانو کامپوزیت SBR

می‌گیرد و لایه قیر را از روی سطح سنگدانه جدا می‌کند. خرابی رطوبتی می‌تواند در نتیجه هر کدام از این دو دلیل یا ترکیبی از هر دو باشد [۱، ۲].

به منظور بهبود چسبندگی و پیوستگی و در نتیجه کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی دو روش مختلف وجود دارد. روش اول، روشی است که پیشنهاد می‌کند که سطح سنگدانه‌ها با یک ماده مناسب پوشش داده شود تا بار الکتریکی در سطح سنگدانه‌ها معکوس شود و انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها کاهش یابد. روش دوم این

### ۱- مقدمه

رطوبتی که از ساختار روسازی به نحو مناسبی زهکش نشده باشد، می‌تواند باعث ایجاد خرابی در لایه‌های روسازی آسفالتی به نام خرابی رطوبتی شود. این رطوبت می‌تواند باعث از دست دادن پیوستگی در غشای قیر یا از دست دادن چسبندگی در سطح تماس قیر-سنگدانه شود. از دست دادن پیوستگی به این علت است که در نتیجه ارتباط بین قیر و آب، خصوصیات قیر تغییر پیدا می‌کند. همچنین از دست دادن چسبندگی به این علت است که آب بین قیر و سنگدانه قرار

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: azarhoosh@ub.ac.ir



داد که تغییرات ترمودینامیکی در انرژی آزاد سطحی چسبندگی و پیوستگی به ترتیب با جدشدگی در سطح تماس قیر-سنگدانه و رخدادهای ترک در ماستیک ارتباط مستقیم دارد. بی‌حسین [۱۴] در پژوهش خود ابتدا به توسعه روش‌های اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه پرداخت. در ادامه، 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 را مورد بررسی قرار داد. هوسون [۱۵] 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 تأثیرات منفی یا مثبت قابل توجهی بر روی مولفه‌های انرژی آزاد سطحی آنها و انرژی چسبندگی داشته باشد. در مطالعه‌ای توسط مقدس‌نژاد و حامدی [۱۶] 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 رخدادهای شدت خرابی رطوبتی ارتباط دارند. در پژوهش دیگری با استفاده از تحلیل‌های آماری به بررسی تأثیر پارامترهای ترمودینامیک و طرح اختلاط بر رخدادهای خرابی رطوبتی پرداخته شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که پارامترهای ترمودینامیک شامل انرژی آزاد پیوستگی قیر، ضخامت غشای قیر بر روی سطح سنگدانه، انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه و انرژی جدشدگی سیستم در رخدادهای عریان‌شدگی به نحو مناسبی می‌توانند حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مختلف را پیش‌بینی کنند [۱۷].

استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی پیشینه‌ای در حدود ۲۰ تا ۳۰ سال دارد اما پژوهش‌های محدودی نیز به نقش استفاده از این مواد بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مفاهیم ترمودینامیک پرداخته‌اند. در پژوهش‌های انجام شده در مرکز حمل و نقل تگزاس، مخلوط آسفالتی با سنگدانه‌های سیلیسی و قیر دارای SBR ساخته شد. نتایج آزمایش‌ها روی این مخلوط گویای آن بود که پایداری مخلوط بر اساس استاندارد مارشال و ویم افزایش یافته و مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها بهبود یافته است [۱۸]. در مطالعه دیگری، شاخصی برای تعیین حساسیت رطوبتی

است که انرژی سطحی به نحوی تغییر داده شود تا بار الکتریکی قیر به بار الکتریکی مخالف با سطح سنگدانه‌ها تبدیل شود [۳]. 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 [۴-۶]. 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 [۷، ۸].

آزمایش‌های متعددی برای بررسی تأثیر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی و تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد که می‌توان آنها را به دو دسته آزمایش‌هایی که بر روی مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده و سست انجام می‌شوند، تقسیم‌بندی کرد [۹]. آزمایش لاتمن اصلاح‌شده (AASHTO T283) مناسب‌ترین آزمایش موجود در بین این آزمایش‌ها می‌باشد که بر اساس تحقیقات پیشین بیشترین سازگاری را با نتایج میدانی نشان می‌دهد. علیرغم دقت مناسب پیش‌بینی حساسیت رطوبتی میدانی مخلوط‌های آسفالتی، می‌توان گفت این روش بر روی اندازه‌گیری خصوصیات اساسی مواد که به مکانیزم خرابی مربوط است، تمرکز نمی‌کند و شاخص ارائه‌شده بیانگر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر چندین مکانیزم مختلف خرابی در یک عدد بدون تفسیر است. در نتیجه، نمی‌توان گفت که دلیل عملکرد مناسب یا ضعیف یک مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت چه بوده است تا مهندس طراح روسازی بر اساس تفسیر نتایج بتواند مخلوط آسفالتی را با طراحی کند [۱۰، ۱۱]. بر این اساس نیاز به روشی که چسبندگی سیستم قیر-سنگدانه-آب را بر اساس خصوصیات پایه‌ای مواد به صورت کمی درآورد، احساس می‌شود.

#### ۱-۱- مطالعات پیشین

الفینگستون [۱۲] 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. همچنین چنگ [۱۳] در مطالعه خود به بررسی مفاهیم، اندازه‌گیری و کاربرد انرژی آزاد سطحی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخت. نتایج پژوهش وی نشان

## ۱-۲- بیان مسئله و اهداف پژوهش

وقوع و شدت خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با مفاهیم ترمودینامیک ارتباط نزدیک دارد. آنالیز بر اساس روش انرژی آزاد سطحی می‌تواند به فرآیند دقیق طراحی کمک کند که در زمینه صنعت روسازی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. بر این اساس به نظر می‌رسد انجام پژوهشی با تعیین پارامترهای مهم از خصوصیات مواد و تطابق آن با نتایج آزمایش‌های عملکردی می‌تواند در پیش‌بینی خرابی رطوبتی راهگشا باشد. هدف این پژوهش توسعه مفاهیم ذکر شده در سایر علوم نیست، بلکه هدف استفاده از مفاهیم و پارامترهای موثر به منظور بررسی تاثیر افزودنی نانو کامپوزیت SBR در پیشگیری از خرابی مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت است. از این رو مهم‌ترین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از:

- بررسی تاثیر استفاده از نانو کامپوزیت SBR بر اجزای انرژی آزاد سطحی قیر،
- معرفی و محاسبه پارامترهای مورد ارتباط با خرابی رطوبتی از تئوری ترمودینامیک،
- بررسی تاثیر استفاده از نانو کامپوزیت SBR بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت با استفاده از پارامترهای انرژی آزاد سطحی،
- بررسی تاثیر استفاده از نانو کامپوزیت SBR بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش مکانیکی.

## ۲- تئوری انرژی آزاد سطحی

چندین تئوری، انرژی آزاد سطحی مواد را بر اساس ساختار مولکولی‌شان تشریح می‌کنند. یکی از مهمترین تئوری‌هایی که به صورت گسترده برای تشریح مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد مختلف به کار رفته است، تئوری اسیدی-بازی می‌باشد [۲۵]. بر طبق این تئوری، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده‌ای بر اساس 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 با استفاده از رابطه

$$(۱) \text{ به دست می‌آید [۲۶]:}$$

$$\tilde{A}^{Total} = \tilde{A}^{LW} + \tilde{A}^{AB} \quad (۱)$$

بر اساس روش انرژی آزاد سطحی و بارگذاری تکراری ارائه گردید. در این پژوهش درصدی از سطح سنگدانه‌ها که در معرض عریان‌شدگی قرار گرفته اند به عنوان شاخص برای ارزیابی سازگاری بین قیر و سنگدانه برحسب مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی به کار رفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پلیمر SBR بعنوان افزودنی ضد عریان‌شدگی سبب افزایش انرژی آزاد سطحی کل قیر می‌شود که این موضوع سبب کاهش در عریان‌شدگی قیر از روی سطح سنگدانه در حضور آب می‌شود [۱۹]. علاوه بر این، امینی و رجب‌بلوکات بر اساس نتایج نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم تاثیر کامپوزیت SBR و نانو رس را مورد بررسی قرار دادند [۲۰]. نتایج بیانگر آن است که استفاده از افزودنی فوق، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را بصورت چشم‌گیری کاهش می‌دهد.

فلاحی و مدرس [۲۱] در پژوهشی به نقش نانو کامپوزیت استایرن بوتادین استایرن در کاهش خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی و مقاومت کششی غیرمستقیم پرداختند. در پژوهش آنها از اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه به منظور تعیین انرژی آزاد پیوستگی قیر و انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه استفاده شده است. در این مطالعه نشان داده شده است که نتایج روش انرژی آزاد سطحی همبستگی مناسبی با نتایج آزمایش بارگذاری در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای، خدایی و همکاران [۶] به بررسی تاثیر ماده ضد عریان‌شدگی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. این ماده سطح سیلانول سنگدانه‌های اسیدی را به سطح سیلوکسان تبدیل کرده و باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تحت بارگذاری سیکلی مورد استفاده در این پژوهش شده است. همچنین، نتایج روش انرژی آزاد سطحی نشان داده است که استفاده از این پوشش سبب کاهش خصوصیات اسیدی سنگدانه‌ها و بهبود چسبندگی قیر-سنگدانه شده است. علاوه بر این، در پژوهش‌هایی به نقش نانو اکسیدهای فلزی در رخدادهای خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از نانومواد که خصوصیات بازی دارند، باعث بهبود چسبندگی بین قیر، که خصوصیات اسیدی دارد، و سنگدانه‌های اسیدی که مستعد خرابی رطوبتی هستند می‌شوند [۲۲-۲۴].

جدول ۱. کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش (%)

Table 1. Minerals forming aggregates used in this study (%)

Calcium oxide, CaO	Magnesium oxide, MgO	Ferric oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminium oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Silicon dioxide, SiO <sub>2</sub>	سنگدانه
۷۵/۳۹	۱/۳۵	۳/۲۱	۵/۲۴	۸/۱۲	سنگ‌آهک
۱۲/۲۹	۳/۹۱	۷/۱۱	۸/۰۹	۶۵/۱۲	گرانیت

سنگدانه رابطه (۴) هنگامی به کار می‌رود که مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه مورد نظر اندازه‌گیری شده باشند. رابطه (۵) 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 می‌باشند. اگر مقادیر انرژی آزاد چسبندگی منفی باشد این بدان معنی است که دو ماده تمایل به جداسدن از یکدیگر دارند و هر چه مقدار منفی بیشتر شود، پتانسیل جداشدگی قیر و مصالح سنگی بیشتر خواهد شد و در نتیجه پتانسیل رخ دادن عریان شدگی در مخلوط آسفالتی بیشتر خواهد شد [۲۶].

$$W_{123} = - \left[ \begin{aligned} & (2\Gamma_3^{LW}) + (4\sqrt{\Gamma_3^+\Gamma_3^-}) - (2\sqrt{\Gamma_1^{LW}\Gamma_3^{LW}}) \\ & - (2\sqrt{\Gamma_3^+\Gamma_1^-}) - (2\sqrt{\Gamma_1^+\Gamma_3^-}) - (2\sqrt{\Gamma_2^{LW}\Gamma_3^{LW}}) \\ & - (2\sqrt{\Gamma_3^+\Gamma_2^-}) - (2\sqrt{\Gamma_2^+\Gamma_3^-}) + (2\sqrt{\Gamma_1^{LW}\Gamma_2^{LW}}) \\ & + (2\sqrt{\Gamma_1^+\Gamma_2^-}) + (2\sqrt{\Gamma_2^+\Gamma_1^-}) \end{aligned} \right] \quad (5)$$

که در آن  $W_{123}$  انرژی آزاد جداشدگی می باشد.

### ۳- مصالح مصرفی

#### ۳-۱- سنگدانه

در این پژوهش از دو نوع سنگدانه به نام های سنگ‌آهک و گرانیت با حساسیت‌های مختلف در برابر خرابی رطوبتی استفاده شده است. 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 طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) تعیین شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

که در آن  $\Gamma^{Total}$ : انرژی آزاد سطحی کل ماده،  $\Gamma^{LW}$ : مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی و  $\Gamma^{AB}$ : مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی می باشند.

مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی طبق رابطه (۲) از پارامتر اسید لوپیس ( $\Gamma^+$ ) و باز لوپیس ( $\Gamma^-$ ) تشکیل شده است [۲۶].

ز دید ترمودینامیکی انرژی آزاد پیوستگی  $\Delta G_i^c$  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 با استفاده از رابطه (۳) محاسبه نمود [۲۶]:

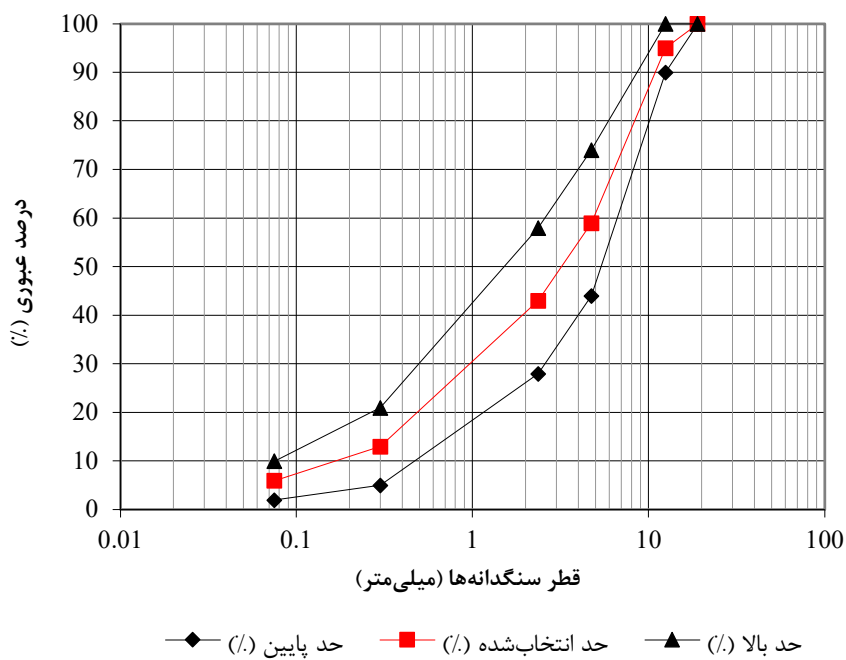
$$\Delta G_i^c = 2\tilde{A}^{Total} \quad (3)$$

که در آن  $\Gamma^{Total}$  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 ترک های خیلی ریز در داخل فاز قیری یا فاز ماستیک مخلوط آسفالتی به کار می‌رود.

انرژی آزاد چسبندگی ( $\Delta G^a$ ) همان طور که قبلا تعریف شد دو مولفه اصلی دارد. مولفه قطبی یا اسیدی-بازی و مولفه غیر قطبی یا لیفشیتز-ون در والز. رابطه (۴) برای مشخص کردن انرژی آزاد چسبندگی بین قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶].

$$\Delta G^a = \Delta G^{aLW} + \Delta G^{aAB} = 2 \left[ \left( \sqrt{\Gamma_1^{LW}\Gamma_2^{LW}} \right) + \left( \sqrt{\Gamma_1^+\Gamma_2^-} \right) + \left( \sqrt{\Gamma_1^-\Gamma_2^+} \right) \right] \quad (4)$$

که در آن  $\Delta G^a$  انرژی آزاد چسبندگی،  $\Delta G^{aLW}$  مولفه غیرقطبی انرژی آزاد چسبندگی،  $\Delta G^{aAB}$  مولفه قطبی انرژی آزاد چسبندگی،  $\Gamma_1^+$  و  $\Gamma_1^-$  مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و  $\Gamma_2^{LW}$  و  $\Gamma_2^+$  و  $\Gamma_2^-$  مولفه‌ها انرژی آزاد سطحی سنگدانه هستند. برای یک مخلوط قیر و



شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی  
**Fig. 1. Aggregates gradation used in this study to make samples of asphalt mixtures**

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

**Table 2. Physical properties of aggregates used in this study**

آزمایش	استاندارد	سنگ آهک	گرانیت	حدود آیین‌نامه
وزن ویژه (درشت‌دانه) ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )				
حجمی	ASTM C ۱۲۷	۲/۴۷	۲/۶۴	-----
موثر		۲/۴۹	۲/۶۵	-----
ظاهری		۲/۵۰	۲/۶۷	-----
وزن ویژه (ریزدانه) ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )				
حجمی	ASTM C ۱۲۸	۲/۴۴	۲/۶۲	-----
موثر		۲/۴۵	۲/۶۴	-----
ظاهری		۲/۴۷	۲/۶۶	-----
وزن ویژه (فیلر) ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	ASTM D ۸۵۴	۲/۴۱	۲/۶۰	-----
حداکثر سایش به روش لس‌آنجلس (%)	ASTM C ۱۳۱	۲۵	۱۸	حداکثر ۳۰
حداکثر جذب آب (%)	ASTM C ۱۲۷	۱/۵	۰/۸	۲/۸
ذرات سوزنی و پولکی (%)	ASTM D ۴۷۹۱	۵	۱۱	حداکثر ۱۵
درصد شکستگی (%)	ASTM D ۵۸۲۱	۸۸	۹۲	وابسته به سطح ترافیک
دوام در برابر سولفات سدیم سدیم (%)	ASTM C ۸۸	۵	۸	حداکثر ۱۲

جدول ۳. نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی قیرهای پایه و اصلاح شده  
Table 3. Results of experiments performed on base and modified bitumens

قیرهای اصلاح شده			قیر پایه	استاندارد	آزمایشها
۵٪ نانو کامپوزیت SBR	۳٪ نانو کامپوزیت SBR	۱٪ نانو کامپوزیت SBR			
۴۷	۵۴	۶۶	۶۹	ASTM D۵-۷۳	درجه نفوذ (mm / ۰/۱)
۷۳	۱۰۱	۱۳۲	>۱۵۰	ASTM D۱۱۳-۷۹	شکل پذیری (cm)
۶۴	۵۹	۵۵	۵۲	ASTM D۳۶-۷۶	نقطه نرمی (°C)
۲۶۶	۲۶۵	۲۶۲	۲۶۱	ASTM D۹۲-۷۸	درجه اشتعال (°C)
۱/۹۶۱	۱/۳۱۲	۰/۵۱۴	۰/۲۳۵	ASTM D۲۱۷۱-۰۷	ویسکوزیته در ۱۳۵ °C (Pa s)

شدن رس با پلیمر کمک می‌کند. همچنین پلیمر SBR خانواده ای از لاستیک های مصنوعی را شامل می‌شود که از استایرن و بوتادین تشکیل شده اند. این مواد مقاومت مناسبی در مقابل ساییدگی و پیرشدگی را دارا می‌باشند. پلیمر SBR بعنوان یک پلیمر متداول با کارایی های زیاد و بالا تعریف می‌شود و در دنیا پرمصرف ترین لاستیک به حساب می‌آید که بعلت 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.

#### ۴- آزمایش های انجام شده بر روی مصالح و مخلوط های آسفالتی

##### ۴-۱- اصلاح قیر

مطالعاتی که تاکنون در زمینه استفاده از مواد پلیمری بعنوان اصلاح کننده انجام شده است به این نکته اشاره داشته اند که مقدار این مواد تا ۵ درصد وزن قیر می‌تواند به بهبود خصوصیات مخلوط های آسفالتی منجر شود [۲۷، ۲۸]. از این رو، در این پژوهش برای اصلاح قیر از ماده پلیمری SBR در مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد (جرم قیر)، استفاده شده است. برای تولید قیرهای اصلاح شده با نانو کامپوزیت پلیمری، ابتدا قیر پایه تا دمای  $180 \pm 5^{\circ}\text{C}$  گرم شده و سپس پلیمر SBR در مقدار مورد نظر به آن اضافه می‌شود. عمل اختلاط در میکسر با سرعت ۴۵۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۲ ساعت انجام می‌شود. در ادامه نانو رس به قیرهای اصلاح شده با SBR در دمای  $180^{\circ}\text{C}$  اضافه می‌شود و عمل اختلاط در میکسر با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۴۵ دقیقه ادامه می‌یابد. همچنین قیر

دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش، دانه بندی میانی استاندارد ASTM برای تولید مخلوط های آسفالتی متراکم است که اندازه اسمی سنگدانه های این دانه بندی ۱۲،۵ میلی متر است. دانه بندی این سنگدانه ها در شکل ۱ نشان شده است. خصوصیات فیزیکی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

##### ۳-۲- 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. همچنین این قیر با استفاده از نانو کامپوزیت SBR در مقادیر مختلف اصلاح شده است و نتایج آزمایش های انجام شده روی آنها در جدول فوق ارائه شده است.

##### ۳-۳- افزودنی ها

در این پژوهش جهت تولید نانو کامپوزیت پلیمری از نانو رس (NC) و پلیمر استایرن بوتادین لاستیک (SBR) استفاده شده است. نانورس ها مواد منحصر به فردی هستند که به عنوان ماده افزودنی برای ساخت نانو کامپوزیت ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری به کار می‌روند. شایع ترین نانو رس مونت موریلنت (از خانواده اسمکتیت) می‌باشد. خالص بودن و ظرفیت تبادل کاتیونی، دو خصوصیت مهم برای موفقیت نانورس ها به عنوان عامل استحکام در پلیمرها به شمار می‌رود. خالص بودن رس خصوصیات مکانیکی پلیمر را افزایش می‌دهد که این به افزایش تبادل کاتیونی رس در ترکیب

جدول ۴. مولفه های انرژی آزاد سطحی مایعهای آزمایش مورد استفاده در آزمایش قطر چسبنده

Table 4. SFE of probe liquids, (mJ/m<sup>2</sup>) used in SD test

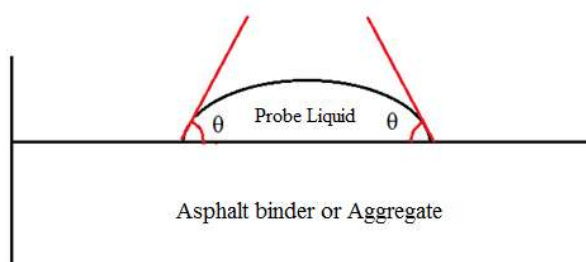
انرژی آزاد سطحی (mJ/m <sup>2</sup> )					نوع مایع آزمایش
مولفه کلی، $\Gamma$	مولفه غیر قطبی، $\Gamma^{LW}$	مولفه قطبی، $\Gamma^{AB}$	مولفه اسیدی، $\Gamma^+$	مولفه بازی، $\Gamma^-$	
۷۲/۸	۲۱/۸	۵۱	۲۵/۵	۲۵/۵	آب
۵۰/۸	۵۰/۸	۰	۰	۰	دی‌یدیمتان
۴۸/۲۹	۲۹	۱۹/۲۹	۳	۳۱	اتیلن گلیکول

برای هر ترکیبی از قیر و سنگدانه و نوع شرایط آزمایش، ساخته شده است تا تکرارپذیری نتایج لحاظ شود [۳۰].

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

به منظور اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها و قیرها می‌توان از روش‌های گوناگونی استفاده کرد که در این پژوهش از روش قطره چسبیده استفاده شده است. روش قطره چسبیده جهت اندازه‌گیری زاویه تماس استاتیکی مایع شاخص (موادی با مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مشخص) با سطح هر نوع از ماده جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد. با تنظیم دما، دوربین و نور، یک قطره مایع شاخص از ارتفاع ۵ میلیمتری بالای سطح افقی ماده مورد آزمایش، توسط میکروسرنگ رها می‌گردد. پس از حالت پایدار قطره یک عکس از آن گرفته می‌شود. با آنالیز این عکس، زاویه بدست می‌آید که میانگین آنها بعنوان زاویه تماس در نظر گرفته می‌شود. برای هر مایع شاخص، با انجام ۳ بار تکرار آزمایش، سه زاویه بدست می‌آید که میانگین آنها گزارش می‌گردد. انحراف معیار متداول برای زاویه تماس اندازه‌گیری شده برای هر مایع شاخص و سطح ماده مورد آزمایش براساس نتایج به دست آمده با سه تکرار باید کمتر از ۵ درجه باشد. در این پژوهش از سه مایع شاخص آب، دی‌یدیمتان و اتیلن‌گلیکول استفاده شده است که مولفه‌های انرژی آزاد سطحی آنها در جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۲، شماتیکی از تکنیک قطره چسبیده و زاویه تماس بین مایع شاخص و سطح صاف ماده مورد آزمایش (قیر یا سنگدانه) را نشان می‌دهد.

بعد از یافتن زاویه  $\theta$  در سطح تماس ماده مورد آزمایش و سه مایع شاخص مختلف، می‌توان ۳ معادله به شکل معادله ۶ تشکیل داد و با حل همزمان ۳ معادله و ۳ مجهول، مولفه‌های انرژی آزاد سطحی



شکل ۲. روش قطره چسبیده جهت اندازه‌گیری زاویه تماس

Fig. 2. Contact angles measured in the sessile drop method

پایه نیز در دما و زمان مشابه در میکسر قرار داده شده است تا تاثیر پیرشدگی مشابه با قیرهای اصلاح‌شده را تجربه کنند.

### ۲-۴- طرح اختلاط

در این پژوهش روش طرح اختلاط مارشال براساس استاندارد ASTM D6927-15 برای تعیین مقدار قیر بهینه مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹]. از این رو، برای ساخت نمونه‌های مارشال، ۳ سری مخلوط ۱۲۰۰ گرمی با ۵ درصد مختلف قیر تهیه گردید. برای تهیه هر نمونه برای شبیه‌سازی ترافیک سنگین به هر طرف نمونه استوانه‌ای ۷۵ ضربه وارد شد. برای دست‌یابی به دماهای اختلاط و تراکم، با استفاده از نمودار دما-ویسکوزیته دمای اختلاط مخلوط بازه دمایی ۱۶۳-۱۶۹ درجه سانتی‌گراد و دمای تراکم آن نیز ۱۵۰-۱۵۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. مقدار قیر بهینه برای مخلوط‌های پایه حاوی سنگدانه‌گرانیت و سنگ آهک به ترتیب برابر ۵/۱ و ۵/۵ درصد تعیین گردید. قابل ذکر است که نمونه‌های حاوی قیرهای اصلاح‌شده با مقادیر مشابه قیر بهینه با نمونه‌های ساده ساخته شده‌اند. قابل ذکر است که در این پژوهش، ۳ نمونه آسفالتی



ماده مورد آزمایش را تعیین کرد [۲۶].

$$\tilde{A}_L^{Total} (1 + \cos \theta) = 2 \left( \sqrt{\tilde{A}_S^{LW} \tilde{A}_L^{LW}} + \sqrt{\tilde{A}_S^+ \tilde{A}_L^-} + \sqrt{\tilde{A}_S^- \tilde{A}_L^+} \right) \quad (۶)$$

که در آن اندیس های S و L برترتیب بیانگر اجزای انرژی آزاد سطحی ماده مورد آزمایش (قیر یا سنگدانه) و مایع شاخص می باشد.

#### ۴-۴- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

مقاومت در برابر خرابی رطوبتی مخلوطهای آسفالتی با کاهش در مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم بعد از سیکل یخ-ذوب براساس استاندارد AASHTO T283 مورد ارزیابی قرار گرفته است [۳۱]. مقاومت کششی بوسیله حداکثر باری که نمونه قبل از گسیختگی می تواند تحمل کند، بیان می شود. مخلوط آسفالتی با مقدار مقاومت کششی بالاتر می تواند مقاومت بهتر در برابر جریان شدگی فراهم کند [۳۲]. بنابراین هر افزودنی که بتواند مقاومت کشش بالاتری را برای مخلوط آسفالتی در شرایط مرطوب و خشک فراهم کند، می تواند عملکرد بلند مدت مخلوط آسفالتی را بهبود دهد.

مصالح کافی برای تولید ۶ نمونه مخلوط آسفالت داغ در درصد قیر بهینه مشخص شده در قسمت قبل با هم مخلوط می شوند. قبل از انجام آزمایش اصلی تعدادی آزمایش برای پیدا کردن تعداد ضربه های لازم برای تراکم نمونه های اصلی برای رسیدن به درصد فضای خالی ۰.۵±۷ مورد نیاز است. درصد فضای خالی مطابق با استاندارد AASHTO T269 مشخص می شود. هنگامی که تعداد ضربات مشخص شده و نمونه متراکم شدند، نمونه ها به دو گروه نمونه های خشک و مرطوب تقسیم می شوند. نمونه های مرطوب، ابتدا به وسیله شرایط خلأ نسبی (فشار مطلق ۶۷-۱۳ کیلوپاسکال) به مدت پنج دقیقه اشباع می شوند. سپس به مدت ۱۰-۵ دقیقه در حالت مستغرق و بدون شرایط خلأ نگهداری می شوند. سپس بیرون آورده و جرم آنها اندازه گیری شده و درصد اشباع نمونه ها به دست می آید. درجه اشباع نمونه ها باید بین ۷۰ تا ۸۰ درصد باشد. نمونه های اشباع شده در داخل کیسه های پلاستیکی قرار داده شده و در آن ۱۰ میلی لیتر آب ریخته می شود. در ادامه نمونه ها در داخل فریزردر دمای ۱۸- درجه سانتی گراد به مدت ۱۶ ساعت نگهداری می شوند. سپس، نمونه ها را در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد برده و پلاستیک ها را برداشته و اجازه داده می شود ۲۴ ساعت در این دما بماند. سپس،

نمونه ها به دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی گراد) آورده می شوند. این نمونه ها را نمونه های مرطوب می نامند.

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی نمونه ها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد انجام می شود. نرخ بارگذاری در این آزمایش در حدود ۵۰/۸ میلی متر بر دقیقه می باشد و تا زمانیکه نمونه گسیخته شود ادامه دارد. مقدار بار در لحظه گسیختگی ثبت می شود.

با استفاده از رابطه (۷) مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم هر شش نمونه بدست می آید.

$$ITS = \frac{2F}{t\pi d} \quad (۷)$$

که در آن ITS مقاومت کششی غیر مستقیم (kPa)، F مقدار حداکثر نیروی قائم اعمال شده (kN)، t میانگین ضخامت نمونه مورد آزمایش (m) و d قطر نمونه مورد آزمایش (m).

میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه های خشک (سه نمونه) و مرطوب (سه نمونه) جداگانه حساب می شود. حساسیت رطوبتی یا پتانسیل جریان شدگی نمونه های مخلوط آسفالتی با نسبت میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه های مرطوب به خشک (برحسب درصد) به دست می آید.

$$TSR = \left( \frac{ITS_{Wet}}{ITS_{Dry}} \right) \times 100 \quad (۸)$$

که در آن TSR نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم،  $ITS_{Wet}$  میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط مرطوب و  $ITS_{Dry}$  میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم در شرایط خشک می باشد. همچنین به منظور بررسی دقیق تر اثر افزودنی ضد جریان شدگی نانو کامپوزیت پلیمری، ۱، ۳ و ۵ سیکل یخ-ذوب به نمونه ها در آزمایش AASHTO T283 اعمال شد.

#### ۵- نتایج

##### ۵-۱- نتایج آزمایش انرژی آزاد سطحی

نتایج مربوط به اندازه گیری اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۵ ارائه شده است. مولفه بازی هر دو سنگدانه از مولفه اسیدی آنها بزرگتر است که این در مورد همه سنگدانه ها وجود دارد اما همانطور که مشخص است نسبت مولفه اسیدی به بازی در سنگدانه های گرانیتهی از سنگ آهک بیشتر



جدول ۵. مولفه های انرژی آزاد سطحی دو نوع سنگدانه  
Table 5. SFE components of aggregates (mJ/m<sup>2</sup>)

انرژی آزاد سطحی (mJ/m <sup>2</sup> )					نوع سنگدانه
مولفه کلی، $\Gamma$	مولفه غیر قطبی، $\Gamma^{LW}$	مولفه قطبی، $\Gamma^{AB}$	مولفه اسیدی، $\Gamma^+$	مولفه بازی، $\Gamma^-$	
۳۶۸/۵۰	۶۵/۳۲	۳۰۳/۱۸	۵۳/۱۲	۴۳۲/۶۱	گرانیت
۲۷۹/۱۷	۵۷/۴۰	۲۲۱/۷۷	۲۲/۳۹	۵۴۹/۱۶	سنگ آهک

جدول ۶. مولفه های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح شده  
Table 6. SFE components of control and modified bitumens (mJ/m<sup>2</sup>)

انرژی آزاد سطحی (mJ/m <sup>2</sup> )					نوع قیر
مولفه کلی، $\Gamma$	مولفه غیر قطبی، $\Gamma^{LW}$	مولفه قطبی، $\Gamma^{AB}$	مولفه اسیدی، $\Gamma^+$	مولفه بازی، $\Gamma^-$	
۱۴/۲۳	۱۲/۲۵	۱/۹۹	۳/۶۳	۰/۲۷	پایه (۶۰-۷۰)
۱۵/۹۵	۱۳/۴۶	۲/۴۹	۳/۵۱	۰/۴۴	اصلاح شده با ۱٪ نانو کامپوزیت SBR
۱۹/۱۱	۱۵/۷۸	۳/۳۳	۳/۴۲	۰/۸۱	اصلاح شده با ۳٪ نانو کامپوزیت SBR
۲۰/۹۱	۱۷/۱۹	۳/۷۲	۳/۳۵	۱/۰۳	اصلاح شده با ۵٪ نانو کامپوزیت SBR

فضای قیر پخش شده است که افزایش دما باعث می شود تا پیوند بین آنها شکسته شود و قیر به یک سیال با رفتار غیرنیوتونی تبدیل شود [۳۳]. نتایج مربوط به اندازه گیری مولفه های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح شده در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که از داده های ارائه شده در این جدول مشخص است، مولفه اسیدی قیر به میزان قابل توجهی از مولفه بازی آن بزرگتر است. این موضوع نشان دهنده این است که قیر خصوصیات اسیدی دارد. همچنین، از داده های ارائه شده در این جدول مشخص است که بخش عمده ای از انرژی آزاد سطحی قیر را مولفه غیرقطبی آن تشکیل می دهد. در واقع، عمده چسبندگی شکل گرفته بین قیر و سنگدانه ناشی از پیوندهای غیرقطبی یا کوالانسی می باشد. استفاده از افزودنی نانو کامپوزیت SBR باعث شده است تا مولفه اسیدی انرژی آزاد سطحی کاهش و مولفه بازی آن افزایش یابد که این موضوع می تواند باعث ایجاد چسبندگی بهتر بین قیر و سنگدانه های اسیدی که مستعد خرابی رطوبتی هستند، شود. همچنین، استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث شده است تا مولفه غیرقطبی قیرهای اصلاح شده در مقایسه با قیر پایه به نحو قابل توجهی افزایش یابد. این مطلب باعث می شود تا پیوندهای غیرقطبی با قدرت بیشتری شکل گیرند. همچنین نتایج انرژی آزاد

است. همچنین سنگدانه های سنگ آهک دارای مولفه بازی بزرگتر و مولفه اسیدی کوچکتر انرژی آزاد سطحی در مقایسه با سنگدانه های گرانیتی هستند. بزرگ بودن مولفه بازی در سنگدانه های سنگ آهک باعث می شود تا پیوندهای قوی تری بین این دسته از سنگدانه ها و قیر که خصوصیات اسیدی دارد، شکل بگیرد و عریان شدگی با احتمال کمتری مورد انتظار باشد.

همچنین، مولفه قطبی سنگدانه های گرانیتی در مقایسه با سنگدانه های سنگ آهک بزرگتر است. این مطلب باعث شکل گیری پیوندهایی بین قیر و سنگدانه های گرانیتی می شود که در حضور آب به راحتی شکسته می شوند. به علاوه، مولفه غیرقطبی سنگدانه های سنگ آهک در مقایسه با سنگدانه های گرانیتی بزرگتر است. مولفه غیرقطبی باعث ایجاد تشکیل پیوندهای کوالانسی می شود که در حضور آب پایدار می ماند.

قیر مخلوطی همگن تک فاز از مولکول های متفاوتی است که این مولکول ها را می توان در دو گروه قطبی و غیرقطبی قرار داد. مولکول های غیرقطبی موجود در قیر به عنوان شبکه یا حلالی برای مولکول های قطبی هستند که باعث خصوصیات الاستیک در قیر در دماهای پایین می شوند. مولکول های قطبی به صورت یکسان در کل

جدول ۷. مولفه های انرژی آزاد سطحی چسبندگی و پیوستگی ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )  
 Table 7. Components of adhesion and cohesion surface free energy ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )

انرژی جداشدگی	انرژی آزاد چسبندگی	انرژی آزاد پیوستگی	نوع مخلوط	
			سنگدانه	قییر
۱۶۸/۳۰	۱۴۳/۴۰	۲۸/۴۶	گرانیت	پایه (۶۰-۷۰)
۱۶۷	۱۴۶/۹۱	۳۱/۹۰		اصلاح شده با ۱٪ نانو کامپوزیت SBR
۱۶۵/۹۲	۱۵۴/۲۶	۳۸/۲۲		اصلاح شده با ۳٪ نانو کامپوزیت SBR
۱۶۵/۳۴	۱۵۷/۹۵	۴۱/۸۲		اصلاح شده با ۵٪ نانو کامپوزیت SBR
۹۷/۳۲	۱۴۷/۲۵	۲۸/۴۶	سنگ آهک	پایه (۶۰-۷۰)
۹۵/۶۸	۱۴۹/۶۸	۳۱/۹۰		اصلاح شده با ۱٪ نانو کامپوزیت SBR
۹۴/۱۷	۱۵۵/۳۸	۳۸/۲۲		اصلاح شده با ۳٪ نانو کامپوزیت SBR
۹۳/۳۲	۱۵۸/۲۱	۴۱/۸۲		اصلاح شده با ۵٪ نانو کامپوزیت SBR

انرژی است که در حین فرآیند عریان شدگی آزاد می شود. با توجه به اینکه این مقادیر منفی هستند، مقادیر قدر مطلق آنها در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج مربوط به ستون انرژی جداشدگی نشان می دهد که استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث کاهش در انرژی جداشدگی شده است. این مطلب بدین معنی است که در رخداد عریان شدگی انرژی کمتری آزاد می شود. کاهش در انرژی جداشدگی سبب می شود تا سیستم تمایل کمتری به عریان شدگی داشته باشد و از نظر ترمودینامیک در حالت پایدارتری باشد.

۳-۵- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

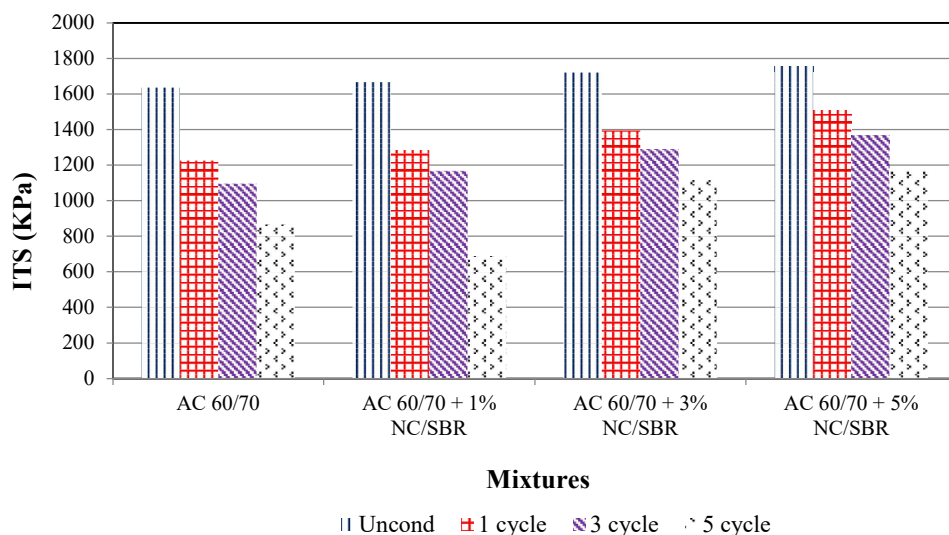
نتایج مربوط به مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ها در سیکل های مختلف شرایط محیطی در شکل های ۳ و ۴ ارائه شده اند. همانطور که مشاهده می شود، مقدار کشش غیرمستقیم نمونه های ساخته شده با افزایش تعداد سیکل های یخ-ذوب کاهش می یابد. کاهش در مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ها با افزایش تعداد سیکل های یخ-ذوب را می توان به از دست دادن چسبندگی مخلوط یا پیوستگی قیر ناشی از حضور بیشتر نمونه ها در معرض رطوبت نسبت داد. می توان از داده های این دو شکل نتیجه گیری کرد که اضافه کردن نانو کامپوزیت SBR به عنوان ماده ضد عریان شدگی، چسبندگی و پیوستگی را در مخلوط افزایش داده و اجازه جابه جایی سریع قیر را از روی سطوح سنگدانه ها نمی دهد و سبب می شود که مخلوط پس از سیکل های یخ-ذوب مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه های بدون مواد افزودنی داشته باشد.

سطحی کل نشان می دهد که استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث شده است تا این پارامتر افزایش یابد. انرژی آزاد سطحی کل رابطه ی مستقیم و خطی با انرژی آزاد پیوستگی دارد. افزایش در انرژی آزاد سطحی کل سبب می شود تا انرژی آزاد پیوستگی افزایش یابد. این روند بدین معناست که انرژی بیشتری نیاز است تا یک ترک در غشای قیر ایجاد شود. افزایش انرژی مورد نیاز برای گسیختگی در غشای قیر باعث کاهش احتمال گسیختگی پیوستگی می شود.

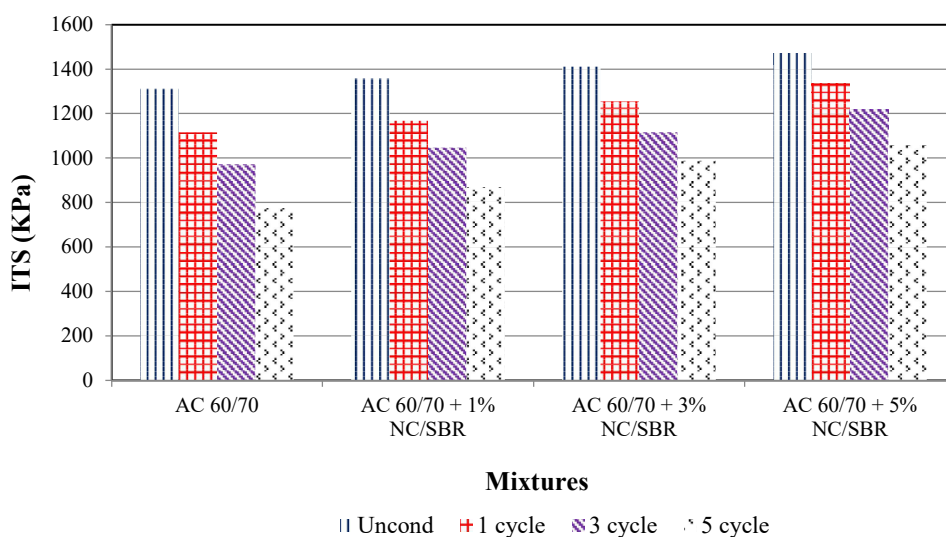
## ۲-۵- نتایج پارامترهای انرژی آزاد سطحی

نتایج مربوط به پارامترهای انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی و انرژی جداشدگی در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که از داده های ارائه شده در این جدول می توان مشاهده نمود، اصلاح قیر باعث شده است تا انرژی آزاد پیوستگی به نحو قابل ملاحظه ای افزایش یابد. این مطلب باعث می شود تا مقاومت قیر در برابر گسیختگی پیوستگی افزایش یابد. همچنین، انرژی آزاد چسبندگی مقداری انرژی مورد نیاز برای ایجاد گسیختگی با سطح واحد در سطح تماس قیر-سنگدانه را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث شده است تا مقدار انرژی آزاد چسبندگی در نمونه های حاوی هر دو نوع سنگدانه افزایش یابد. این مطلب سبب می شود تا مقدار انرژی بیشتری برای جداسازی قیر از واحد سطح سنگدانه مورد نیاز باشد.

انرژی رهاسده سیستم در رخداد عریان شدگی یا انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه در شرایط مرطوب (انرژی جدا شدگی) مقدار



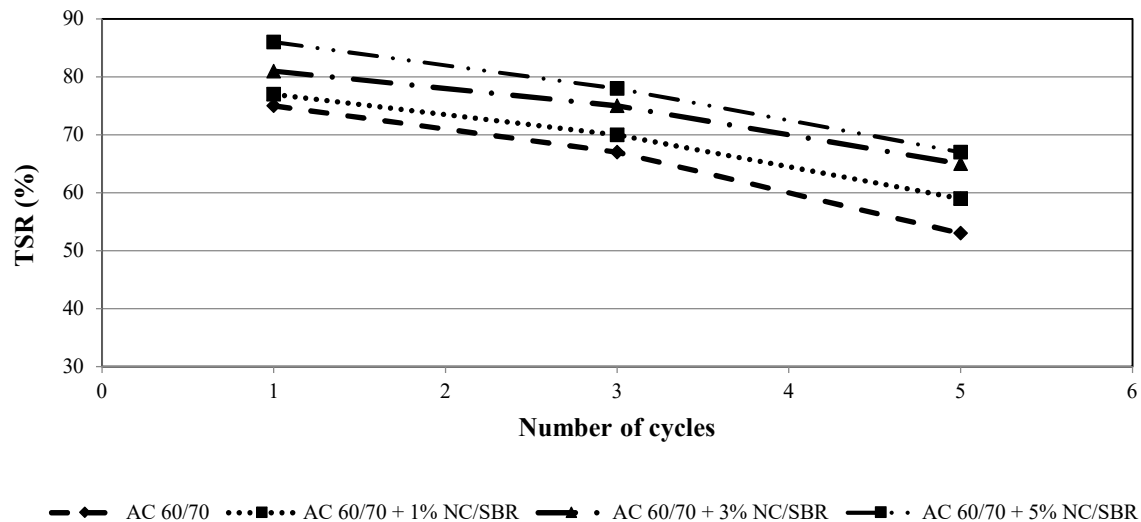
شکل ۳. مقادیر ITS در نمونه های ساخته شده با سنگدانه گرانیت و قیرهای پایه و اصلاح شده  
 Fig. 3. ITS for mixtures made with granite aggregate and control and modified bitumens



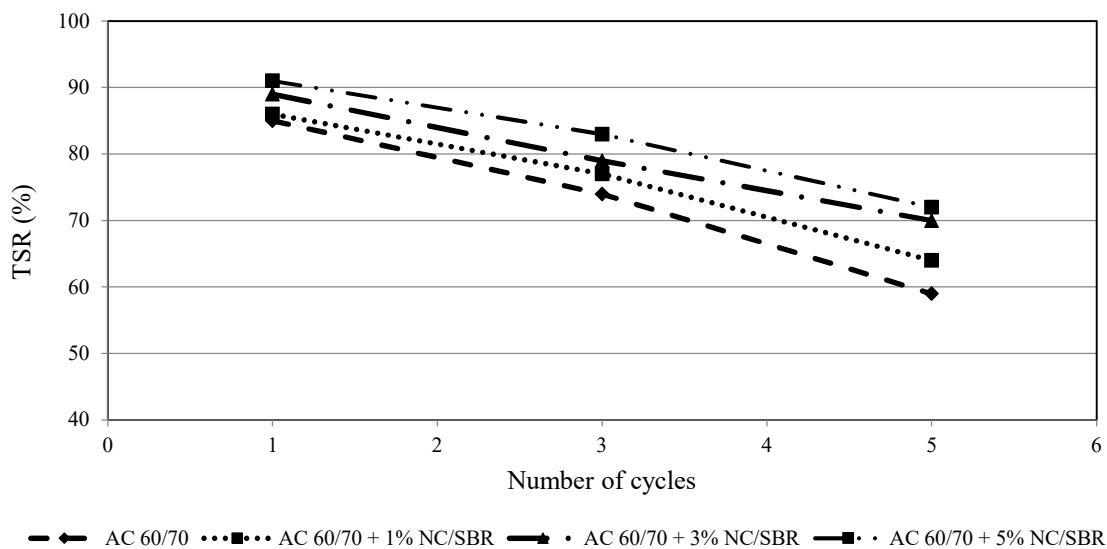
شکل ۴. مقادیر ITS در نمونه های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک و قیرهای پایه و اصلاح شده  
 Fig. 4. ITS for mixtures made with limestone aggregate and control and modified bitumens

مخلوط (انرژی آزاد چسبندگی ضرب در مساحت سطح ویژه سنگدانه) بهتر بوده است که باعث شده رفتار مقاومتی نمونه های این دو گروه تقریباً مشابه باشد. اما در شرایط مرطوب عملکرد نمونه های مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه گرانیتی به مراتب ضعیف تر از نمونه های مشابه ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک بوده است که این پایین بودن مقاومت در نمونه های حاوی سنگدانه گرانیت را می توان به آبدوستی

همچنین نمونه های پایه (بدون افزودنی) ساخته شده با سنگدانه های سنگ آهک در مقایسه با نمونه های حاوی سنگدانه گرانیت دارای عملکرد مشابه ای در برابر بارگذاری در شرایط خشک می باشند. نزدیک بودن مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم به این دلیل است که در استفاده از سنگدانه های گرانیتی مقاومت فیزیکی سنگدانه ها بهتر بوده است اما در استفاده از سنگدانه های سنگ آهک چسبندگی



شکل ۵. تاثیر نانو کامپوزیت SBR و سیکل های یخ و ذوب بر مقادیر TSR نمونه های ساخته شده با سنگدانه گرانیت  
 Fig. 5. Effects of CBR nanocomposite on TSR in mixtures made with granite aggregate



شکل ۶. تاثیر نانو کامپوزیت SBR و سیکل های یخ و ذوب بر مقادیر TSR نمونه های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک  
 Fig. 6. Effects of CBR nanocomposite on TSR in mixtures made with limestone aggregate

آسفالتی اصلاح شده نسبت به نمونه های کنترل بهبود یابد. همچنین، مشاهده می شود که در اکثر نمونه ها کاهش در نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در سیکل ۳ تا ۵ نسبت به سیکل ۱ تا ۳ بیشتر است. در واقع بعد از سیکل های یخ-ذوب قسمتی از سطح سنگدانه ها از قیر جدا شده و این قسمت دیگر دارای چسبندگی مناسب برای تحمل بار نیست. این موضوع سبب می شود بعد از ۳ سیکل یخ-ذوب روند خرابی نمونه تسریع یابد. به طور کلی همانطور که مشاهده می شود

بیشتر کانی های این نوع سنگدانه ها نسبت داد. در واقع پیوندهای قوی شکل گرفته در شرایط خشک در شرایط مرطوب از بین رفته و باعث افت زیاد در مقاومت سنگدانه های این گروه می شود.

نتایج مربوط به نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در سیکل های مختلف یخ-ذوب در نمونه های ساخته شده با سنگدانه های گرانیتی و سنگ آهکی به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ ارائه شده است. استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث شده است تا مقاومت مخلوط های

جدول ۸: نتایج آنالیز واریانس یکطرفه  
Table 8. Results of one-way analysis of variance

P-Value	TSR	نوع مخلوط	
		سنگدانه	قیر
۰/۰۰۱ >	۵۳	گرانیت	پایه (۶۰-۷۰)
	۵۹		اصلاح شده با ۱٪ نانو کامپوزیت SBR
	۶۵		اصلاح شده با ۳٪ نانو کامپوزیت SBR
	۶۷		اصلاح شده با ۵٪ نانو کامپوزیت SBR
۰/۰۰۱ >	۵۹	سنگ آهک	پایه (۶۰-۷۰)
	۶۴		اصلاح شده با ۱٪ نانو کامپوزیت SBR
	۷۰		اصلاح شده با ۳٪ نانو کامپوزیت SBR
	۷۲		اصلاح شده با ۵٪ نانو کامپوزیت SBR

در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ آهک مقاومت بیشتری در برابر خرابی رطوبتی وجود دارد. عمده دلیل این رفتار را می‌توان از روی ساختار کانی‌های تشکیل دهنده این دو نوع سنگدانه در جدول ۱ مشاهده نمود. سنگ آهک عمدتاً از کانی Cao تشکیل شده است در حالیکه سنگدانه‌های گرانیت عمدتاً از  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  تشکیل شده است. دسته بندی سنگدانه‌ها بدین صورت است که سنگدانه‌های سنگ آهک را آبریز و سنگدانه‌های گرانیت را آبدوست در نظر می‌گیرند. با استفاده از روند دو شکل زیر نیز می‌توان تشخیص داد که سنگ آهک در مقایسه با سنگدانه گرانیتی مخلوط‌های مقاوم تری را در برابر رطوبت تولید می‌کنند.

استفاده از نانو کامپوزیت SBR در نمونه‌های با هر دو نوع سنگدانه باعث افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت و بهبود شاخص نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم شده است. همانطور که در شکل های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، استفاده از نانو کامپوزیت SBR تاثیر کمتری را بر روی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک داشته است. دلیل این مطلب را می‌توان به چسبندگی مناسب قیر-سنگدانه در حالت پایه نسبت داد که سنگدانه‌های سنگ آهک در حالت اصلاح نشده نیز چسبندگی مناسبی با قیر که یک ماده اسیدی است، ایجاد می‌کنند. استفاده از نانو کامپوزیت SBR هم مقاومت در شرایط خشک و هم مرطوب نمونه‌های حاوی این سنگدانه را به مقدار مشابهی افزایش می‌دهد. این مطلب باعث می‌شود شاخص نسبت کشش غیرمستقیم در برابر رطوبت در نمونه‌های ساخته شده با این نوع سنگدانه به میزان کمی

بهبود داشته باشد. اما در طرف مقابل، در مورد نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه اسیدی گرانیت استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث بهبود قابل توجه ای در عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت شده است. علاوه براین، از آنالیز واریانس یک جهته به منظور مقایسه میانگین TSR در مخلوط های آسفالتی پس از ۵ سیکل یخ و ذوب استفاده شده است (جدول ۸). همانطور که مشاهده می‌شود مقدار P-Value در مخلوط های آسفالتی ساخته شده با قیرهای کنترل و اصلاح شده برای هردو گروه از سنگدانه کمتر از 05/0 می‌باشد. در نتیجه بر اساس این پارامتر، فرض برابری میانگین TSR مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نانو کامپوزیت SBR در مقایسه با مخلوط کنترل پذیرفته نیست و تفاوت آنها کاملاً معنی دار است.

#### ۶- نتیجه گیری

برای بهبود حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی روش‌های متفاوتی وجود دارد که یکی از متداول ترین 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 نانو کامپوزیت SBR با استفاده از روش‌های مکانیکی و ترمودینامیک پرداخته شود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

• استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث شده است تا مولفه اسیدی و بازی قیر پایه به ترتیب کاهش و افزایش یابند. این رخداد

- [6] A. Khodaii, V. Khalifeh, M. Dehnad, 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*, 26(2) (2013) 259-266.
- [7] F.M. Nejad, M. Arabani, G.H. Hamed, A. Azarhoosh, Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1523-1527.
- [8] M. Arabani, G.H. Hamed, Using the surface free energy method to evaluate the effects of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6) (2010) 802-811.
- [9] M. Solaimanian, J. Harvey, M. Tahmoressi, V. Tandon, Test methods to predict moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements, in: *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-A National Seminar* California Department of Transportation; Federal Highway Administration; National Asphalt Pavement Association; California Asphalt Pavement Alliance; and Transportation Research Board., 2003.
- [10] R.P. Lottman, D.L. Johnson, Pressure-induced stripping in asphaltic concrete, *Highway Research Record*, (340) (1970).
- [11] C. Gorkem, B. Sengoz, Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime, *Construction and Building Materials*, 23(6) (2009) 2227-2236.
- [12] G. Elphinstone, Adhesion and cohesion in asphalt-aggregate systems, (1998).
- [13] D. Cheng, Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete based on surface free energy, (2003).
- [14] A. Bhasin, Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water, Texas A&M University, 2007.
- [15] J.E. Howson, Relationship between surface free energy and total work of fracture of asphalt binder and asphalt binder-aggregate interfaces, 2011.
- [16] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, Using energy parameters based on the surface free energy concept to

باعث می‌شود تا میزان چسبندگی قیر با سنگدانه‌های گرانیتی که خصوصیت اسیدی دارند، افزایش یابد.

• نانو کامپوزیت SBR باعث شده است تا مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی به میزان قابل توجهی افزایش یابد. این موضوع سبب می‌شود تا پیوندهای غیرقطبی که غیرقابل حل در آب هستند، با کیفیت بهتری شکل بگیرند.

• مقدار انرژی آزاد سطحی کل مربوط به قیرهای اصلاح‌شده از قیر پایه بیشتر است. این موضوع باعث می‌شود تا احتمال رخداد خرابی رطوبتی از نوع گسیختگی پیوستگی کاهش یابد.

• افزودن نانو کامپوزیت SBR باعث افزایش انرژی آزاد پیوستگی و مقدار انرژی آزاد چسبندگی و کاهش انرژی جداشدگی در نمونه‌های حاوی هر دو نوع سنگدانه شده است که بیانگر کاهش تمایل سیستم برای عریان‌شدگی است.

• با توجه به اینکه ساختار تشکیل‌دهنده گرانیت دارای کانی‌های با خصوصیات آبدوستی بیشتر است، نمونه‌های ساخته‌شده با این نوع سنگدانه در برابر خرابی رطوبتی مقاومت کمتری را از خود نشان داده‌اند.

• استفاده از نانو کامپوزیت SBR باعث می‌شود تا مقدار نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های با هر دو نوع سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش افزایش یابد.

## مراجع

- [1] H. Ibrahim, A.-A. Wahhab, J. Hasnain, Laboratory study of asphalt concrete durability in Jeddah, *Building and environment*, 33(4) (1998) 219-230.
- [2] R.B. McGennis, T.W. Kennedy, R.B. Machemehl, Stripping and moisture damage in asphalt mixtures, 1984.
- [3] E.J. Yoder, M.W. Witczak, Principles of pavement design, John Wiley & Sons, 1975.
- [4] F.M. Nejad, A. Azarhoosh, G.H. Hamed, M. Azarhoosh, Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 31 (2012) 384-388.
- [5] F. Moghadas Nejad, G.H. Hamed, A. Azarhoosh, Use of surface free energy method to evaluate effect of hydrate lime on moisture damage in hot-mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8) (2012) 1119-1126.



- [25] 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.
- [26] D. Cheng, D. Little, R. Lytton, J. Holste, Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mixtures, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1810) (2002) 44-53.
- [27] F.K.M. Hamed, Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixtures based on dissipated energy concept, *Technische University Darmstadt*, (2010).
- [28] B. Sengoz, A. Topal, G. Isikyakar, Morphology and image analysis of polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, 23(5) (2009) 1986-1992.
- [29] ASTM D6927-15, Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures, in, *West Conshohocken*, 2015.
- [30] ASTM D1074, Annual book of ASTM standards. Road and paving materials, 2000.
- [31] F. Moghadas Nejad, A. Azarhoosh, G.H. Hamed, Laboratory evaluation of using recycled marble aggregates on the mechanical properties of hot mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(6) (2012) 741-746.
- [32] B. Huang, G. Li, L.N. Mohammad, Analytical modeling and experimental study of tensile strength of asphalt concrete composite at low temperatures, *Composites Part B: Engineering*, 34(8) (2003) 705-714.
- [33] D.R. Jones IV, T.W. Kennedy, The asphalt model: results of the SHRP asphalt research program, *Transportation Research Board VTI Rapport A*, 372 (1991) 83-90.
- evaluate the moisture susceptibility of hot mix asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 16(2) (2015) 239-255.
- [17] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, Evaluating the effect of mix design and thermodynamic parameters on moisture sensitivity of hot mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2) (2016) 04016207.
- [18] Y. Yildirim, Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 21(1) (2007) 66-72.
- [19] Gh. H. Hamed, Evaluating the Effect of SBR Polymer Modified Bitumen on the Moisture Susceptibility of HMA, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(5) (2018) 275-278.
- [20] B. Amini, M. Rajab Bolookat, Improvement of Moisture Sensitivity of Asphalt Concrete Mixtures Using Nano-Composites. *IQBQ*. 2013; 13 (3) :123-133
- [21] H.F. Abandansari, A. Modarres, Investigating effects of using nanomaterial on moisture susceptibility of hot-mix asphalt using mechanical and thermodynamic methods, *Construction and Building Materials*, 131 (2017) 667-675.
- [22] G.H. Hamed, Evaluating the effect of asphalt binder modification using nanomaterials on the moisture damage of hot mix asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 18(6) (2017) 1375-1394.
- [23] G.H. Hamed, F.M. Nejad, K. Oveisi, Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide, *Materials and Structures*, 49(4) (2016) 1165-1174.
- [24] Gh. H. Hamed, A. Ali Pour, Evaluation of Moisture sensitivity of asphalt mixtures modified with nanomaterials (ZnO and SiO<sub>2</sub>), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.22060/ceej.2019.15294.5875

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Azarhoosh, Gh. Rezavani, Investigation of using SBR nanocomposite on moisture damage of HMA using surface free energy theory, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(9) (2020) 2211-2226.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16036.6106





