



## بررسی تأثیر ویژگی های ساختاری سنگدانه ها و اجزای انرژی آزاد سطحی قیر-سنگدانه بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با مواد ضد عریان شدگی

یونس آذریون<sup>۱</sup>، حمید شیرمحمدی<sup>۲</sup>، غلامحسین حامدی<sup>۳</sup>، داود ساعدی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-راه و ترابری، دانشگاه ارومیه  
<sup>۲</sup>استادیار گروه عمران-راه و ترابری، دانشگاه ارومیه  
<sup>۳</sup>استادیار گروه عمران-راه و ترابری، دانشگاه گیلان  
<sup>۴</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-راه و ترابری، دانشگاه ارومیه

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۱۳  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۲-۲۰  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۲۱  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۳

### کلمات کلیدی:

مخلوط آسفالتی  
افزودنی ضد عریان شدگی  
تئوری انرژی آزاد سطحی  
آزمایش کشش غیرمستقیم  
عمر خستگی

**خلاصه:** رطوبت باعث آسیب رساندن به خواص قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه در مخلوط های آسفالتی می شود. مطالعات بسیاری نشان می دهد که استفاده از افزودنی های ضد عریان شدگی می تواند به عنوان یکی از روش های مؤثر در بالا بردن مقاومت مخلوط های آسفالتی در مقابل خرابی رطوبتی مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس در این پژوهش، به بررسی مکانیسم تأثیر مواد ضد عریان شدگی نانو و مایع بر اساس روش های مکانیکی و ترمودینامیکی پرداخته شده است. ۲۴ ترکیب مختلف مخلوط آسفالتی با استفاده از سه نوع سنگدانه، دو نوع قیر پایه و سه نوع افزودنی ضد عریان شدگی مورد بررسی قرار گرفته است. مؤلفه های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه با روش قطره چسبیده و دستگاه جذب جهانی و نسبت عمر خستگی مخلوط های آسفالتی از طریق آزمایش کشش غیرمستقیم اندازه گیری شده است. همچنین ویژگی های ساختاری سنگدانه ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد که استفاده از افزودنی های نانو مواد باعث افزایش خاصیت آبگریزی و کاهش خاصیت آب دوستی در سنگدانه ها می شود. همچنین، استفاده از این نوع افزودنی ها باعث می شود که نسبت عمر خستگی و مقاومت کششی در مخلوط های آسفالتی افزایش یابد. مقادیر افزایش نسبت عمر خستگی بین ۲ تا ۹ درصد بوده است. مقدار افزایش عمر خستگی در شرایط مرطوب بین ۱۰ تا ۲۲ درصد بوده است. به علاوه، افزودنی های نانو مواد بر روی اجزای انرژی آزاد سطحی قیر، اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه، انرژی چسبندگی قیر-سنگدانه و انرژی پیوستگی در مخلوط های آسفالتی تأثیر مثبت می گذارد و باعث بهبود عملکرد این مؤلفه ها در مقابل خرابی رطوبتی می گردد.

### ۱ - مقدمه

ایمنی و راحتی رانندگان را تحت تأثیر قرار می دهند. از بین رفتن چسبندگی که عریان شدگی نیز نامیده می شود، باعث جداشدگی قیر از روی سطح سنگدانه می گردد [۳-۵]. فاکتورهای متفاوتی بر رخداد و شدت خرابی رطوبتی تأثیر می گذارند. این فاکتورها را می توان در دو دسته فاکتورهای داخلی و خارجی دسته بندی کرد. فاکتورهای داخلی در واقع پارامترهایی هستند که به خصوصیات مواد مورد استفاده در مخلوط آسفالتی شامل قیر، سنگدانه و طرح اختلاط این دو ماده باهم ارتباط دارند. فاکتورهای خارجی پارامترهایی هستند که به بررسی شرایط خارج از سیستم مخلوط آسفالتی مانند ترافیک و نوسانات آب و هوایی می پردازند [۶، ۷].

یکی از رایج ترین خرابی ها که در طول عمر بهره برداری روسازی های آسفالتی اتفاق می افتد، خرابی رطوبتی می باشد. نفوذ آب بین قیر و سنگدانه باعث جدا شدن تدریجی قیر از سنگدانه و تضعیف نیروی چسبندگی بین قیر و سنگدانه می گردد. با گسترش این نوع خرابی دوام و مقاومت مخلوط های آسفالتی کاهش می یابد [۱]. هیکس [۲] در مطالعه ای نشان داد که حضور رطوبت در مخلوط های آسفالتی باعث از بین رفتن چسبندگی بین قیر-سنگدانه و پیوستگی ماستیک در مخلوط های آسفالتی می گردد و این دو نوع مکانیزم به طور جدی

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: hamed@guilan.ac.ir



سطحی کل مربوط ماده  $i$ ،  $\Delta G_i^{cLW}$  مؤلفه غیرقطبی کار پیوستگی،  $\Delta G_i^{cAB}$  مؤلفه قطبی کار پیوستگی،  $\Delta G_{ij}^a$  مقدار کار چسبندگی،  $\Gamma_j$  مقدار انرژی آزاد سطحی کل مربوط به ماده  $j$ ،  $\Delta G_{ij}^{aLW}$  مؤلفه غیرقطبی آزاد سطحی تماسی مربوط به ماده  $i$  و  $j$ ،  $\Delta G_{ij}^{aAB}$  مؤلفه قطبی کار چسبندگی می‌باشند. بقیه پارامترها در زیر رابطه ۱ معرفی شده‌اند.

بر اساس روابط ۳ تا ۵ انرژی آزاد چسبندگی دو ماده دلخواه را می‌توان با استفاده از رابطه زیر و با قرار دادن مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی دو ماده محاسبه نمود.

$$\Delta G_{ij}^a = \Gamma_{ij} - \Gamma_i - \Gamma_j = \Delta G_{ij}^{aLW} + \Delta G_{ij}^{aAB} = -2 \left[ \sqrt{\Gamma_i^{LW} \Gamma_j^{LW}} + \sqrt{\Gamma_i^+ \Gamma_j^-} + \sqrt{\Gamma_i^- \Gamma_j^+} \right] \quad (6)$$

همچنین روابط بیان شده تنها به دو ماده محدود نمی‌شوند و می‌توان آن را به بیش از دو ماده تعمیم داد. انرژی جداشدگی قیر و سنگدانه در حضور آب مطابق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\Delta G_{ikj}^a = \Gamma_{ij} - \Gamma_{ik} - \Gamma_{jk} = \Delta G_{ikj}^{aLW} + \Delta G_{ikj}^{aAB} \quad (7)$$

$$\Delta G_{bwa}^a = \Gamma_{ba} - \Gamma_{bw} - \Gamma_{wa} = 2 \left[ \begin{aligned} & -\sqrt{\Gamma_b^{LW} \Gamma_w^{LW}} + \sqrt{\Gamma_a^{LW} \Gamma_w^{LW}} - \\ & \sqrt{\Gamma_b^{LW} \Gamma_a^{LW}} - \Gamma_w^{LW} + \sqrt{\Gamma_w^+} \\ & \left( \sqrt{\Gamma_b^-} + \sqrt{\Gamma_a^-} - \sqrt{\Gamma_w^-} \right) + \\ & \sqrt{\Gamma_w^-} \left( \sqrt{\Gamma_b^+} + \sqrt{\Gamma_a^+} - \sqrt{\Gamma_w^+} \right) - \\ & \sqrt{\Gamma_b^+ \Gamma_a^-} - \sqrt{\Gamma_b^- \Gamma_a^+} \end{aligned} \right]$$

که در آن  $a$  مؤلفه مربوط به سنگدانه؛  $b$  مؤلفه مربوط به قیر و  $w$  مؤلفه مربوط به آب است. همچنین، مقدار انرژی جداشدگی بین قیر-سنگدانه در حضور آب،  $\Delta G_{ikj}^{aLW}$  مؤلفه غیرقطبی انرژی جداشدگی بین قیر-سنگدانه در حضور آب و  $\Delta G_{ikj}^{aAB}$  مؤلفه قطبی انرژی جداشدگی بین قیر-سنگدانه در حضور آب است.

مطالعات زیادی در زمینه استفاده از افزودنی‌های نانو مواد جهت بهبود کیفیت مخلوط‌های آسفالتی، کنترل و پیش‌بینی خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از تئوری انرژی آزاد سطحی و آزمایش کشش غیرمستقیم انجام شده است. برای اولین بار الفیگستون [۱۱] در سال ۱۹۷۷، در پژوهشی با عنوان «چسبندگی و پیوستگی در سیستم قیر و سنگدانه» که به‌عنوان رساله ی دکتری

علیرغم گستردگی استفاده از آزمایش‌های مکانیکی برای تعیین حساسیت رطوبتی، استفاده از آن‌ها مشکلاتی به همراه دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد: عدم استفاده از آزمایش‌هایی با بارگذاری تکراری به‌عنوان شبیه‌سازی بهتر، عدم یکنواختی نتایج آزمایشگاهی با نتایج میدانی، عدم وجود ارتباط درک شده بین روش انجام آزمایش و مکانیزم واقعی خرابی، عدم اندازه‌گیری خصوصیات بنیادین مواد، عدم ارائه دلایل و مکانیزم خرابی، عدم ارائه راهکار اصلاحی مناسب و عدم بیان تأثیر افزودنی‌ها [۸]. مناسب‌ترین آزمایش‌های موجود که بر طبق تحقیقات پیشین، بیشترین سازگاری را با نتایج میدانی نشان می‌دهند، روش آزمایش نسبت کشش غیرمستقیم یا لاتمن اصلاح‌شده و تئوری انرژی آزاد سطحی می‌باشند. در یک پژوهش مشاهده شده است در حدود ۸۱ درصد از مراکز موردبررسی از این روش‌های استاندارد استفاده می‌کنند [۹].

بر اساس تئوری انرژی آزاد سطحی، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده بر اساس نوع نیروهای مولکولی سطحی به سه جزء تقسیم می‌شوند که عبارتند از: الف) جزء غیر قطبی که به آن جزء لیفشیتز-وندروالز (LW) یا جزء پراکنده، ب) جزء اسیدی لوئیس و ج) جزء بازی لوئیس [۱۰]. مطابق با این تئوری، انرژی آزاد سطحی برای همه مواد با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\Gamma^{\text{Total}} = \Gamma^{LW} + \Gamma^{AB} = \Gamma^{LW} + 2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\Gamma^{\text{Total}}$  انرژی آزاد سطحی کل؛  $\Gamma^{LW}$  مؤلفه غیر قطبی؛  $\Gamma^{AB}$  مؤلفه اسیدی-بازی؛  $\Gamma^+$  مؤلفه اسیدی لوئیس و  $\Gamma^-$  مؤلفه بازی لوئیس می‌باشد.

به همین ترتیب انرژی آزاد پیوستگی و چسبندگی را می‌توان با اصطلاحات قطبی و غیر قطبی تعریف کرد.

$$\Delta G_i^c = -2\Gamma_i = \Delta G_i^{cLW} + \Delta G_i^{cAB} \quad (2)$$

$$\Delta G_{ij}^a = \Gamma_{ij} - \Gamma_i - \Gamma_j = \Delta G_{ij}^{aLW} + \Delta G_{ij}^{aAB} \quad (3)$$

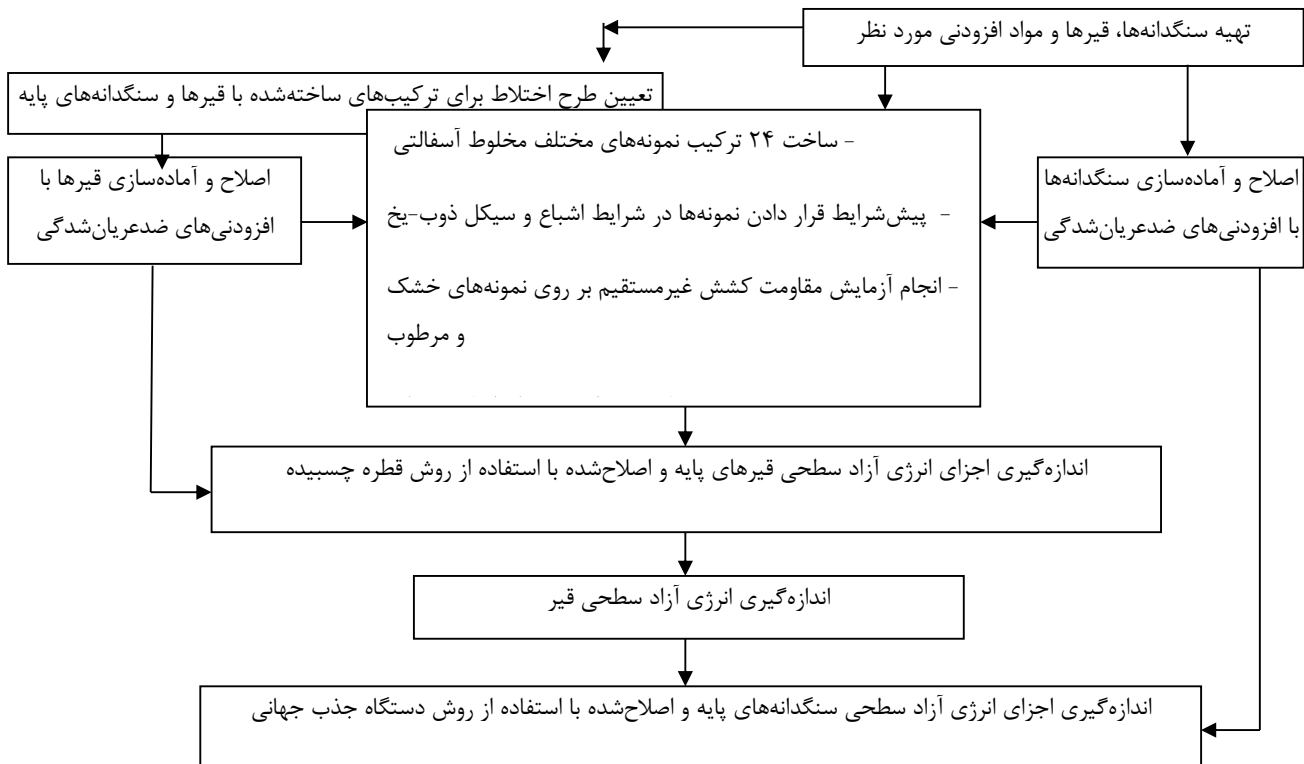
$$\Delta G_{ij}^{aLW} = -2\sqrt{\Gamma_i^{LW} \Gamma_j^{LW}} \quad (4)$$

$$\Delta G_{ij}^{aAB} = -2\left(\sqrt{\Gamma_i^+ \Gamma_j^-} + \sqrt{\Gamma_i^- \Gamma_j^+}\right) \quad (5)$$

در روابط ۲-۵،  $\Delta G_i^c$  مقدار کار پیوستگی،  $\Gamma_j$  مقدار انرژی آزاد

از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از این نوع افزودنی نانو (  $Fe_2O_3$  ) خواص مکانیکی سنگدانه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. همچنین، استفاده از این نوع افزودنی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در مقابل خرابی‌های خستگی و شیارشدگی ارتقا می‌دهد. در پژوهشی دیگر، مدرس و اکبری [۱۴] از دو نوع مواد نانو رس و نانو آهک با درصد‌های وزنی ۳، ۶ و ۹، به‌عنوان افزودنی به مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند. آن‌ها در این پژوهش برای تعیین خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی و تعیین میزان حساسیت مخلوط‌های آسفالتی در مقابل خرابی رطوبتی به ترتیب از روش آزمایش کشش غیرمستقیم و روش انرژی آزاد سطحی استفاده کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شده است که استفاده از نانو رس و نانو آهک مقاومت کششی و نسبت مدول ارتجاعی را در مخلوط‌های آسفالتی افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از این نوع افزودنی‌ها باعث افزایش خاصیت بازی و خاصیت اسیدی در سنگدانه‌ها می‌گردد. در پژوهش دیگری، حامدی [۱۵] از نانو ذرات  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  به‌عنوان افزودنی برای اصلاح سطح سنگدانه‌ها استفاده کرده است. او در پژوهش خود به اصلاح سطح دو نوع سنگدانه آهکی و گرانیتی با استفاده از نانو ذرات پرداخته است و مخلوط‌های حاصل را با استفاده از روش‌های مکانیکی و ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج حاصل از بررسی‌های وی نشان می‌دهد که نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اصلاح‌شده در حالت خشک و مرطوب بیشتر از نمونه‌های کنترل بودند که نشان‌دهنده افزایش مقاومت این نمونه‌ها می‌باشد. همچنین، نتایج حاصل از روش‌های ترمودینامیکی نشان‌دهنده این است که اصلاح سطح سنگدانه‌ها با استفاده از نانو ذرات موجب کاهش انرژی جداسازی و در نتیجه کاهش عریان‌شدگی می‌شود. در واقع، هر چقدر انرژی جداسازی کاهش یابد، سیستم از نظر ترمودینامیکی به حالت پایدارتری می‌رسد و میل به جداسازی قیر از سطح سنگدانه کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای، عربانی و حامدی [۱۶]، تأثیر استفاده از افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی مایع را با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی و همچنین آزمایش مدول دینامیکی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که اضافه کردن افزودنی‌ها موجب افزایش انرژی آزاد سطحی کل قیر می‌شود که این امر باعث جلوگیری از پدیده عریان‌شدگی از طریق افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌شود. همچنین،

در دانشگاه تگزاس انجام داد، کاربرد اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی جهت پیش‌بینی خرابی رطوبتی را نشان داد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که عمده مکانیزم‌های خرابی رطوبتی شامل گسیختگی پیوستگی و چسبندگی بوده است. گسیختگی پیوستگی در سیستم قیر-سنگدانه به انرژی آزاد سطحی ماستیک (ترکیب قیر و فیلر) و گسیختگی چسبندگی در سیستم قیر-سنگدانه به ارتباط بین قیر و سنگدانه ارتباط داده شده است. چنگ [۲۱] در مطالعه خود در سال ۲۰۰۲ به بررسی مفاهیم انرژی آزاد سطحی، اندازه‌گیری و کاربرد آن در مخلوط‌های آسفالتی پرداخت. او در رساله خود از اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی برای کمک به تعیین سازگارترین سیستم قیر و سنگدانه برحسب چسبندگی و مقاومت رطوبتی استفاده کرد و مقاومت پیوستگی و چسبندگی در داخل سیستم قیر و سنگدانه را به‌طور مستقیم به انرژی‌های آزاد سطحی یک سیستم قیر و سنگدانه ارتباط داد. فلاحی و همکاران [۱۲] به بررسی تاثیر استفاده از نانو کامپوزیت در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی و آزمایش کشش غیرمستقیم پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از نانو کامپوزیت، مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را که از دو نوع سنگدانه آهک و گرانیت تشکیل شده‌اند، بهبود می‌بخشد. همچنین، نتایج اندازه‌گیری انرژی آزاد قیر نشان می‌دهد که استفاده از نانو کامپوزیت، نیروی چسبندگی بین قیر-سنگدانه را افزایش می‌دهد که باعث بهبود دوام و مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل خرابی رطوبتی می‌گردد. مطالعه‌ی دیگری توسط مقدس نژاد و همکارانش [۲۳] انجام شده است. آن‌ها در پژوهش خود، اثرات استفاده از افزودنی نانو  $TiO_2$  در چسبندگی بین قیر-سنگدانه را با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی ارزیابی کرده‌اند. اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه به ترتیب توسط دستگاه جذب جهانی و آزمایش صفحه‌ی ویلهلمی محاسبه شده‌اند. نتایج روش انرژی آزاد سطحی نشان داده است که افزودنی نانو  $TiO_2$  باعث بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه شده است. علاوه بر این افزودن نانو  $TiO_2$  منجر به کاهش مؤلفه‌ی اسیدی و افزایش مؤلفه‌ی بازی در سنگدانه‌ها شده است. در تحقیق دیگری شفابخش و همکاران [۱۳] تأثیر استفاده از افزودنی نانو  $Fe_2O_3$  با درصد‌های وزنی مختلف بر روی خصوصیات مکانیکی اجزای مخلوط‌های آسفالتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل



شکل ۱. مراحل انجام پژوهش

Fig. 1. Research steps

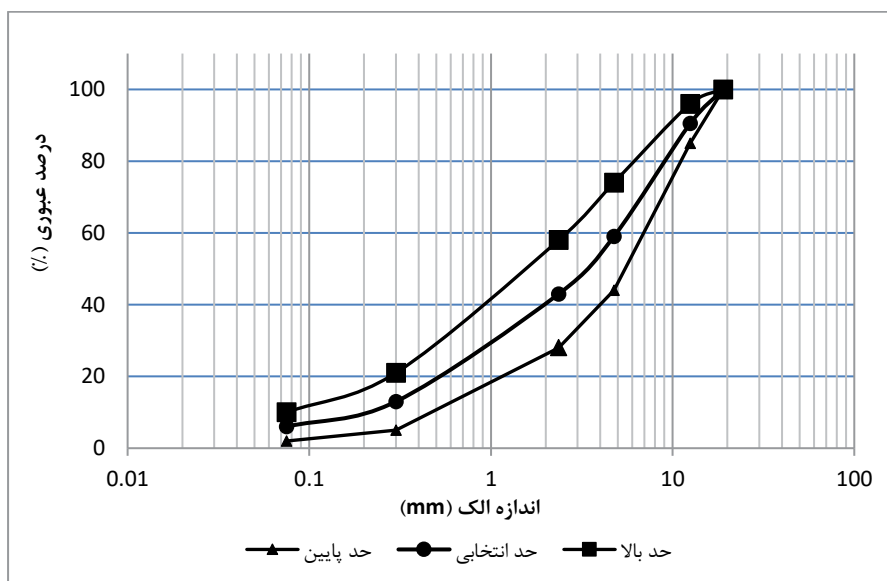
پیوستگی در مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از افزودنی‌ها به قیر و به عنوان پوشش‌دهنده‌ی سنگدانه می‌باشد. در این پژوهش از سه نوع ماده افزودنی نانو کربنات کلسیم، نانو اکسید روی و نانو وتفیکس به عنوان اصلاح‌کننده‌های سنگدانه و قیر استفاده شده است و تأثیرات آن‌ها بر روی نسبت عمر خستگی و اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در قسمت مطالعات پیشین اشاره شد در اکثر مطالعات صورت گرفته از روش‌های مکانیکی برای تعیین حساسیت رطوبتی استفاده می‌کنند، اما در این پژوهش سعی شده است تا به بررسی استفاده از افزودنی‌های نوین در بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی با استفاده از روش‌های ترمودینامیکی پرداخته شود تا بتوان اثر آنها را با استفاده از مفاهیم این تئوری بهتر تحلیل کرد. همچنین، از نتایج آزمایش‌های مکانیکی برای مقایسه با نتایج انرژی آزاد سطحی استفاده شده است.

## ۲- بخش تجربی

مراحل روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش مطابق شکل ۱ انجام شده است.

نتایج آزمایش مدول دینامیکی نشان داد که افزودن این مواد موجب کاهش شاخص  $p$  می‌شود که این امر موجب بهبود مقاومت رطوبتی مخلوط می‌شود (شاخص  $p$  درصد مساحت سطح سنگدانه‌ها است که در معرض رطوبت قرار می‌گیرد). در مطالعه‌ای که توسط مقدس نژاد و همکاران [۱۷] انجام شد، تأثیر استفاده از ماده آهک هیدراته بر خرابی رطوبتی را با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از این ماده، موجب کاهش مؤلفه‌های اسیدی، افزایش مؤلفه‌های بازی و کاهش انرژی سطحی کل سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش شده است که این تغییرات موجب افزایش چسبندگی و پوشش پذیری سنگدانه‌ها و در نهایت باعث بهبود عملکرد مقاومت سنگدانه‌ها در مقابل خرابی رطوبتی شده است.

همانطور که قبلاً گفته شد، یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد این نوع خرابی در روسازی‌های آسفالتی، از بین رفتن چسبندگی و پیوستگی بین قیر و سنگدانه‌ها می‌باشد. لذا برای کنترل و کاهش خرابی رطوبتی، باید میزان انرژی چسبندگی و پیوستگی را در مخلوط‌های آسفالتی بهبود بخشید. یکی از روش‌های افزایش میزان چسبندگی و



شکل ۲. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش  
 Fig. 2. Gradation of aggregates used in this research

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده  
 Table 1. Physical properties of the aggregates used

حدود آیین نامه	سنگ	سنگ آهک	سنگ	استاندارد	آزمایش
وزن ASTM C 127					
	۲/۴۸	۲/۵۹	۲/۶۱	ASTM C 127	حجمی
	۲/۴۹	۲/۶۰	۲/۶۳	ASTM C 127	مؤثر
		۲/۶۲	۲/۶۵	ASTM C 127	ظاهری
وزن ویژه (ریز دانه) ASTM C 128					
	۲/۴۶	۲/۵۷	۲/۶۰	ASTM C 128	حجمی
	۲/۴۸	۲/۵۸	۲/۶۲	ASTM C 128	مؤثر
		۲/۶۱	۲/۶۵	ASTM C 128	ظاهری
	۲/۴۴	۲/۵۶	۲/۵۵	ASTM D854	وزن ویژه (فیلر)
حداکثر ۳۰	۲۶	۲۷	۱۹	ASTM C 131	حداکثر سایش
۲/۸	۱/۷	۰/۸	۱/۲	ASTM C127	حداکثر جذب آب

نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. سنگدانه سنگ آهک از معدن روستای خرم‌آباد واقع در بخش سلفچگان استان قم، سنگدانه گرانیت از معدن روستای صفراآباد در مجاورت آزادراه خلیج فارس (قم-تهران) و سنگدانه کوارتزیت از معدن جمال‌آباد واقع در شهرستان پاکدشت استان تهران تهیه شده است. دلیل اصلی استفاده از این نوع سنگدانه‌ها، درجه آب دوستی متفاوت آن‌ها بوده است تا بتوان تأثیر

#### ۱-۲ مواد

در این پژوهش، از ۳ نوع سنگدانه شامل سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت با ساختار دانه‌بندی بر اساس دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ (طراحی روسازی آسفالتی) استفاده شده است که این دانه‌بندی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. همچنین، خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه امیرکبیر انجام شده است که

جدول ۲. خصوصیات قیرهای پایه مورد استفاده

Table 2. Characteristics of base bitumens used

ویژگی	افت وزنی	درجه اشتعال °C	شکل پذیری Cm	نقطه نرمی °C	درجه نفوذ	چگالی در ۲۵° C	درجه خلوص
استاندارد	ASTM D1754-۷۸	ASTM D92-78	ASTM D113-79	ASTM D36-76	ASTM D5-73	ASTM D70-76	ASTM D2042-۷۶
مقدار مجاز	-	حداقل ۲۳۲	حداقل ۱۰۰	۴۹-۵۶	۶۰-۷۰	-	-
۷۰-۶۰	۰/۷۵	۲۶۲	۱۰۵	۵۱	۶۶	۱/۰۲	۹۹/۵
مقدار مجاز	-	حداقل ۲۳۲	حداقل ۱۰۰	۴۵-۵۲	۸۵-۱۰۰	-	-
۱۰۰-۸۵	۰/۷۵	۲۴۸	۱۱۲	۴۸	۹۱	۱/۰۳	۹۹/۵

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی نانو اکسید روی و نانو کربنات کلسیم مورد استفاده

Table 3. Physical properties of zinc nano oxide and calcium nano carbonate used

نوع ماده	ساختار کریستالی	شکل ذرات	جرم مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	شاخص انکساری	مساحت سطح ویژه (m <sup>2</sup> /gr)	میانگین اندازه ذرات (nm)	جرم مخصوص حجمی (gr/cm <sup>3</sup> )	درجه اسیدیته	درصد آب
نانو اکسید روی	وورتزیت	مکعبی	۵/۵-۵/۶	۲	۴۰±۵	۲۰≈	۱۰-۲۸/۴۸	۸/۹-۵/۵	۰/۷≤
نانو کربنات کلسیم	کلسیت	مکعبی	۲/۵-۲/۶	۱/۲-۱/۷	۳۲±۲	۶۰≈	۱۵۳-۰/۵۴	۸-۱۰/۵	۰/۵≤

جدول ۴. ویژگی‌های فیزیکی و تفیکس BE مورد استفاده

Table 4. Physical properties and BE characteristics used

ویژگی	Wetfix BE
شکل ظاهری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	مایع قهوه‌ای
چگالی در دمای ۲۰ درجه (kg/m <sup>3</sup> )	۹۸۰
دمای اشتعال (°C)	≥218
گرانروی در دمای ۲۰ درجه (mPa.s)	۸۰۰
مقدار اسیدیته (mg KOH/g)	≤10
(HCl/gr) آمین کل	۱۸۵-۱۶۰

نوع سنگدانه‌ها دارای دانه‌بندی یکنواخت باشند تا نوع دانه‌بندی تأثیری بر روی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نداشته باشد. همچنین، در

نوع سنگدانه‌ها با کانی‌های مختلف و با حساسیت‌های مختلف در برابر خرابی رطوبتی را مورد ارزیابی قرار داد. همچنین، تلاش شده است

جدول ۵. مشخصات مخلوطهای آسفالتی ساخته شده  
Table 5. Specifications of asphalt mixtures made

ترکیب	نوع قیر	نوع سنگدانه	نوع افزودنی	اضافه شونده به
۱	۷۰-۶۰	آهک	-	-
۲	۷۰-۶۰	آهک	نانوکربنات کلسیم	سنگدانه
۳	۷۰-۶۰	آهک	نانواکسیدروی	قیر
۴	۷۰-۶۰	آهک	وتفیکس BE	قیر
۵	۷۰-۶۰	گرانیت	-	-
۶	۷۰-۶۰	گرانیت	نانوکربنات کلسیم	سنگدانه
۷	۷۰-۶۰	گرانیت	نانواکسیدروی	قیر
۸	۷۰-۶۰	گرانیت	وتفیکس BE	قیر
۹	۷۰-۶۰	کوارتزیت	-	-
۱۰	۷۰-۶۰	کوارتزیت	نانوکربنات کلسیم	سنگدانه
۱۱	۷۰-۶۰	کوارتزیت	نانواکسیدروی	قیر
۱۲	۷۰-۶۰	کوارتزیت	وتفیکس BE	قیر
۱۳	۱۰۰-۸۵	آهک	-	-
۱۴	۱۰۰-۸۵	آهک	نانوکربنات کلسیم	سنگدانه
۱۵	۱۰۰-۸۵	آهک	نانواکسیدروی	قیر
۱۶	۱۰۰-۸۵	گرانیت	وتفیکس BE	قیر
۱۷	۱۰۰-۸۵	گرانیت	-	-
۱۸	۱۰۰-۸۵	کوارتزیت	نانوکربنات کلسیم	سنگدانه
۱۹	۱۰۰-۸۵	کوارتزیت	نانواکسیدروی	قیر
۲۰	۱۰۰-۸۵	کوارتزیت	وتفیکس BE	قیر
۲۱	۱۰۰-۸۵	کوارتزیت	-	-
۲۲	۱۰۰-۸۵	کوارتزیت	نانوکربنات کلسیم	سنگدانه
۲۳	۱۰۰-۸۵	کوارتزیت	نانواکسیدروی	قیر
۲۴	۱۰۰-۸۵	کوارتزیت	وتفیکس BE	قیر

ارائه شده است. همانطور که مشخص است درصد نانومواد جذب شده توسط سنگدانه‌ی سنگ‌آهک بیشتر است. این موضوع قابل انتظار است، زیرا سنگدانه‌های سنگ‌آهک ساختار متخلخل تری نسبت به سنگدانه گرانیتی و کوارتزیتی دارد. شایان ذکر است، مقدار درصد

این پژوهش، از دو نوع قیر پایه با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ و ۱۰۰-۸۵ از پالایشگاه پاسارگاد تهران استفاده شده است که خصوصیات آن‌ها با استفاده از آزمایشات متداولی مانند آزمایش درجه نفوذ، آزمایش نقطه نرمی و آزمایش شکل پذیری در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه امیرکبیر تعیین شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. به علاوه، سه نوع افزودنی ضدعریان‌شدگی نانو مواد شامل نانو کربنات کلسیم برای پوشش سنگدانه و نانو اکسید روی و نانو وتفیکس BE برای اصلاح قیر، استفاده شده است که ویژگی‌های آنها بر اساس آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه مهندسی شیمی دانشگاه امیرکبیر و مطابقت با کالانمای این محصولات در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. نانومواد مورد استفاده در این پژوهش از شرکت TEKNON اسپانیا و ماده وتفیکس BE از شرکت اگزونوبل سوئد تهیه شده است. با ترکیب مصالح ذکر شده، ۲۴ ترکیب مختلف مخلوط آسفالتی (۱۸ مخلوط آسفالتی متفاوت و ۶ مخلوط شاهد) ایجاد شده است. ترکیبات نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده، در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

برای پوشش دادن سنگدانه‌ها با نانومواد، ابتدا دوغاب نانوماده کربنات کلسیم ساخته شده است. برای تهیه دوغاب نانومواد، ابتدا ۱۰ واحد جرمی از نانومواد به ۲۰۰ واحد جرمی آب اضافه می‌شود. سپس با استفاده از هم زن با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه، این مخلوط به مدت ۴ دقیقه هم زده می‌شود. پس از آنکه نانوذرات تقریباً به شکل همگن در فضای آب پخش شدند، سنگدانه‌ها به دوغاب نانومواد افزوده می‌شود و عمل هم‌زدن با هم زن با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه به مدت ۲ دقیقه ادامه می‌یابد. مقداری از دوغاب نانومواد پس از هم زدن بر روی سطح سنگدانه‌ها جذب می‌شود. برای هم زدن از هم زن هیدرومتری استفاده شده است. در مرحله بعد، سنگدانه‌های مرطوب که پوشش دوغاب نانومواد بر روی سطح آنها تشکیل شده است، بر روی سطح ظرف استیل مشبک پخش می‌شود. بعد از گذشت ۲ ساعت، سنگدانه‌ها داخل گرم خانه گذاشته می‌شوند تا به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند و رطوبت موجود در آنها کاملاً تبخیر شود.

درصد جرمی نانومواد که جذب سنگدانه‌ها شده‌اند، بعد از خشک شدن قابل اندازه‌گیری می‌باشد. درصد‌های جذب شده (درصد جرم نانوذره جذب شده نسبت به جرم کل سنگدانه‌ها) در جدول ۶

جدول ۶. درصد نانومواد جذب شده توسط سطح سنگدانه‌ها

Table 6. Percentage of nanomaterials adsorbed by the surface of aggregates

سنگ آهک	گرانیت	کوارتزیت
۲/۴	۱/۹	۱/۷

نانوماده جذب شده از درصد فیلری که قرار است مورد استفاده قرار گیرد، کسر می‌شود. در واقع، نانوماده جذب شده به عنوان بخشی از فیلر در نظر گرفته شده است.

بر اساس پژوهش‌های پیشین، مشاهده شده است که درصد ماده افزودنی نانو به منظور بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در حدود ۰/۵ تا ۸ درصد است. در این پژوهش از مقدار ۲ درصد جرم قیر نانواکسیدروی به منظور اصلاح قیر استفاده شده است. به این منظور از دستگاه هم زن با دور بالا استفاده شده است. این هم زن توانایی چرخش تا ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه را دارد که در این پژوهش از حداکثر ظرفیت چرخشی این هم زن استفاده شده است. به این منظور قیر را تا دمای ۱۴۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم کرده و نانوماده اکسیدروی به آرامی و به تدریج به آن اضافه شده است. این اختلاط در قیرهای ۷۰-۶۰ و ۸۵-۱۰۰ به مدت ۲۵ دقیقه ادامه داشته است تا ذرات نانوماده به صورت همگن در فضای قیر پخش شوند. به منظور جلوگیری از کاهش دمای قیر در کنار ظرف قیر، از گرم‌کن احاطه‌کننده ظرف قیر استفاده شده است.

دومین ماده اصلاح کننده قیر، ماده ضدعریان‌شدگی مایع تحت نام تجاری وتفیکس BE بود. در این پژوهش، این ماده به مقدار ۰/۵ درصد جرم قیر استفاده شده است. ابتدا قیر را تا دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد گرم کرده و سپس ماده افزودنی را به آرامی به آن اضافه کرده و در هم زن با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه مخلوط می‌شوند. برای این اختلاط از هم زن هیدرومتری استفاده شده است. به منظور جلوگیری از کاهش دمای قیر، از گرم‌کن احاطه‌کننده ظرف قیر استفاده شده است.

۲-۲- روش کار و دستگاه‌های مورد استفاده

۲-۲-۱- آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی

۲-۲-۱-۱- اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها

از دستگاه جذب جهانی که توسط بی‌هاسین [۱۸] توسعه یافته است، استفاده می‌شود. روش اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی سنگدانه توسط دستگاه جذب جهانی به این صورت انجام می‌شود: سه مایع آزمایش که مؤلفه‌های انرژی سطحی آن‌ها از قبل معلوم باشد انتخاب می‌شوند که با توجه به مطالعات پیشین آب، گلیسرول و فرمامید بیشترین استفاده را در بین مایعات قطبی، غیر قطبی و نیمه قطبی داشته‌اند. بعد مقدار بخار مایع جذب شده بر روی سطح سنگدانه و فشار بخار مایع به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شود. در مرحله بعد مساحت سطح ویژه سنگدانه‌ها از رابطه‌ی ۸ تعیین می‌شود.

$$A = \left(\frac{n_m N_0}{M}\right)\alpha \quad (8)$$

که در آن؛  $N_0$  عدد آووگادرو،  $\alpha$  سطح تصویر شده یک مولکول،  $M$  جرم مولکولی بخار مایع مورد آزمایش و  $n_m$  ظرفیت تک لایه که برابر است با تعداد مولکول‌هایی که نیاز است تا سطح سنگدانه در یک لایه پوشیده شود، که از رابطه ۹ بدست می‌آید.

$$n_m = \left(\frac{1}{S+I}\right) \quad (9)$$

در رابطه بالا؛  $S$  و  $I$  به ترتیب شیب و عرض از مبدا نمودار رابطه‌ی بین  $\frac{P}{P_n}$  و  $\frac{P}{n(P_n-P)}$  می‌باشد.  $P$  فشار بخار جزئی،  $P_n$  فشار بخار اشباع و  $n$  جرم بخار جذب شده نسبت به جرم سنگدانه می‌باشد.

بعد از تعیین مساحت سطح ویژه سنگدانه‌ها، با استفاده از رابطه ۱۰ فشار توزیعی تعادلی بخار مایع بر روی سطح سنگدانه‌ها محاسبه می‌شود.

$$\pi_e = \frac{RT}{MA} \int_0^{P_n} \frac{n}{p} dp \quad (10)$$

که در این رابطه؛  $R$  ثابت گازها ( $8.314 \text{ J/k.mole}$ )،  $T$  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.

سپس کار چسبندگی بین یک مایع با یک سنگدانه برحسب مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) بیان می‌شود.

$$W_{S,L}^a = 2\Gamma_L^{\text{Total}} + \pi_e \quad (11)$$



$$\Gamma_L(1 + \cos \theta) = 2 \left[ \left( \sqrt{\Gamma_L^+ \Gamma_S^+} \right) + \left( \sqrt{\Gamma_L^- \Gamma_S^-} \right) \right] \quad (12)$$

### ۲-۲-۲- آزمایش خستگی به روش مقاومت کشش غیرمستقیم

برای انجام آزمایش حساسیت رطوبتی به روش لاتمن اصلاح شده، برای هر مخلوط باید سه نمونه در شرایط مرطوب و سه نمونه در شرایط خشک ساخته شود. نمونه‌هایی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۳/۵±۲/۵ میلی‌متر و یا نمونه‌هایی با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵±۹۵ میلی‌متر در این استاندارد، مورد آزمایش قرار می‌گیرند. نمونه‌ها باید به نحوی متراکم شوند که درصد هوای آن‌ها بین ۷±۰/۵ درصد باشد. در نهایت، نیمی از نمونه‌های هر گروه (سه نمونه) در شرایط خشک باقی می‌مانند و نیمی از آن‌ها به شرایط مرطوب برده می‌شوند (نمونه‌های مرطوب). برای تحت شرایط مرطوب قرار دادن نمونه‌های گروه دوم، ابتدا آن‌ها به وسیله شرایط خلأ نسبی (فشار مطلق ۶۷-۱۳ کیلوپاسکال) به مدت پنج دقیقه اشباع می‌شوند. سپس، به مدت ۱۰-۵ دقیقه در حالت مستغرق و بدون شرایط خلأ نگهداری می‌شوند تا به درصد اشباع بین ۸۰-۷۰ درصد برسد. نمونه‌های اشباع شده درون کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و ۱۰ میلی‌لیتر آب به آن‌ها افزوده می‌شود. نمونه‌ها درون فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت نگهداری می‌شوند. سپس، نمونه‌ها را در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده، پلاستیک‌ها را برداشته و به آن‌ها اجازه داده می‌شود که ۲۴ ساعت در این دما باقی بمانند. در ادامه، نمونه‌ها به دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) آورده می‌شوند و ۲۴ ساعت در این دما باقی می‌مانند. این نمونه‌ها را نمونه‌های مرطوب یا تحت شرایط می‌نامند. نمونه‌های خشک و مرطوب تحت آزمایش‌های مقاومت کشش غیرمستقیم به منظور تعیین عمر خستگی قرار می‌گیرند. در آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم، بارگذاری سیکلی تا لحظه‌ای که نمونه گسیخته شود، انجام می‌شود. مقدار عمر خستگی (تعداد تکرار بار) در لحظه گسیختگی ثبت می‌شود. میانگین عمر خستگی نمونه‌های خشک (سه نمونه) و مرطوب (سه نمونه) جداگانه محاسبه می‌شود. حساسیت رطوبتی یا پتانسیل عریان شدگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با نسبت عمر خستگی نمونه‌های مرطوب به خشک (برحسب درصد) طبق رابطه ۱۳ تعیین می‌شود.

$$NFR = \left( \frac{N_{f_{wet}}}{N_{f_{dry}}} \right) \times 100 \quad (13)$$

که در رابطه بالا؛  $W_{S,V}^a$  کار چسبندگی بین سنگدانه و بخار مایع های مورد آزمایش،  $\Gamma_v^{total}$  انرژی آزاد سطحی کل مایع های مورد آزمایش و  $\pi_e$  فشار توزیع تعادلی بخار مایع بر روی سطح سنگدانه است.

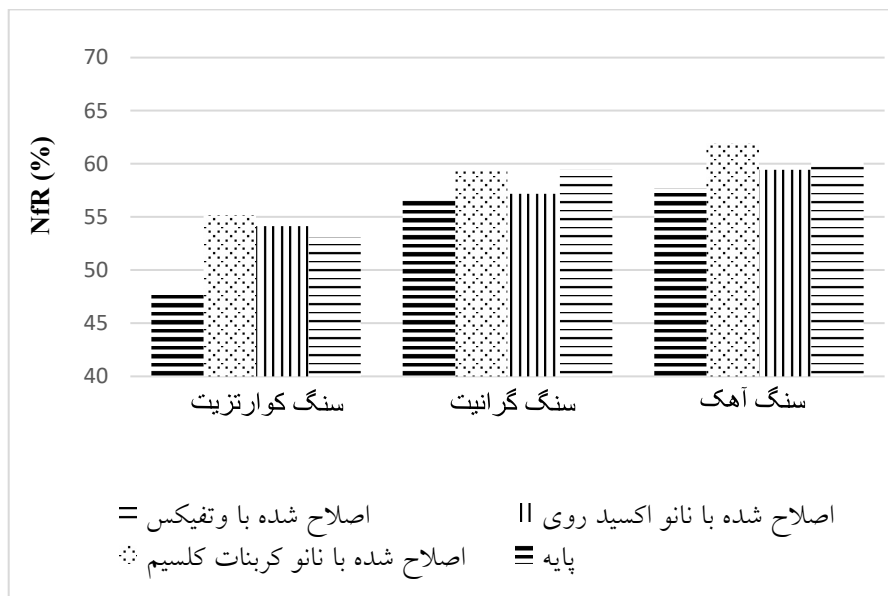
و در آخر برای اندازه‌گیری مؤلفه‌ی انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها سه رابطه بر اساس سه نوع مایع آزمایش مورد استفاده تشکیل می‌شود؛ که با استفاده روش ماتریسی انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نتایج مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی بر اساس مطالعه صورت گرفته در رساله دکتری انجام شده در دانشگاه امیرکبیر [۱۹] بر روی مصالح یکسان به دست آمده است.

### ۲-۲-۱- اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر

اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی با استفاده از روش قطره چسبیده یکی از روش‌های متداولی است که امروزه برای مواد جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیر توسط دستگاه قطره چسبیده، ابتدا نمونه قیر بین منبع نور و دوربین قرار داده می‌شود و محفظه‌ی سیستم کنترل را به دمای مورد نظر رسانده می‌شود. سپس میکرو سرنگ را با مایع آزمایش پر کرده و یک قطره از مایع آزمایش را روی سطح قیر از فاصله‌ی ۵ میلی‌متری پخش می‌شود. بعد از گذشت چند ثانیه توسط دوربین از قطره‌ی روی سطح، عکس گرفته می‌شود. سه مایع آزمایش مورد استفاده در این پژوهش آب، دی‌پدی‌متان و اتیلن گلیکول می‌باشند. برای هر مایع آزمایش سه نمونه آزمایش و سه زاویه ثبت می‌گردد که میانگین آن‌ها به عنوان زاویه تماس مورد نظر ثبت می‌گردد. با انجام این آزمایش برای هر نوع قیر با سه نوع آزمایش مختلف می‌توان سه رابطه مانند رابطه ۱۲ تشکیل داد که اندیس  $L$  نشان‌دهنده مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع آزمایش است که معلوم هستند. زاویه تماس نیز از آزمایش قطره چسبیده به دست می‌آید. سه مؤلفه انرژی آزاد سطحی قیر با اندیس  $S$  مجهول هستند که اگر سه بار با مایع های آزمایش مختلف این آزمایش تکرار شود، سه رابطه به دست می‌آید که در آن‌ها سه مجهول مشترک وجود دارد و با حل هم‌زمان این سه رابطه، این سه مجهول به دست می‌آیند. این آزمایش در گروه آزمایشگاه پلیمرهای زیست سازگار پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شده است.



شکل ۳. نسبت عمر خستگی نمونه های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰  
 Fig. 3. Fatigue life ratio of samples made with AC 60-70



شکل ۴. نسبت عمر خستگی نمونه های ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰  
 Fig. 4. Fatigue life ratio of samples made with AC 100-85

مرطوب به خشک متداول ترین شاخص در تعیین حساسیت رطوبتی یک مخلوط آسفالتی قبل از اجرای آن است که می تواند به پیش بینی عملکرد مخلوط آسفالتی در مرحله طراحی کمک نماید. با تعیین این شاخص می توان پیش بینی مناسبی از عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی داشت. نتایج به دست آمده از این آزمایش برای نمونه های ساخته شده با دو نوع قیر پایه ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ به ترتیب در اشکال ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین، لازم به ذکر است

که در آن؛ NfR نسبت عمر خستگی ( $Nf_{wet}$ ، (%)) میانگین عمر خستگی نمونه های مرطوب و  $Nf_{dry}$  میانگین عمر خستگی نمونه های خشک می باشد.

### ۳- بحث و نتیجه گیری

#### ۳-۱ آزمایش کشش غیر مستقیم

شاخص نسبت عمر خستگی مخلوط های آسفالتی در شرایط

یک عدد بدست می دهد و نمی تواند راهکار مناسبی را برای بهبود حساسیت رطوبتی ارائه دهد.

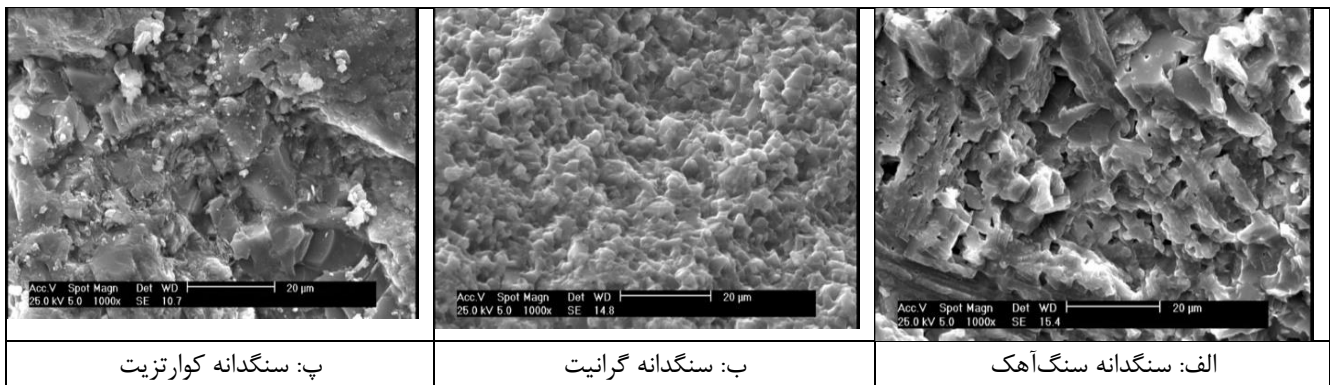
### ۳-۲- تأثیر نوع سنگدانه بر حساسیت رطوبتی

فاکتورهای متفاوتی در رخداد خرابی رطوبتی و مقاومت یک مخلوط آسفالتی در برابر آن موثر هستند. یکی از مهم ترین آنها ساختار کانی‌های تشکیل دهنده سنگدانه مورد استفاده در مخلوط آسفالتی است. دو کانی  $\text{SiO}_2$  و  $\text{CaO}$  (و یا  $\text{CaCO}_3$ ) باعث می‌شوند تا تغییر اساسی در خصوصیات آب‌گریزی یا آب‌دوستی مخلوط آسفالتی ایجاد شود. هرچه درصد کانی  $\text{SiO}_2$  بیشتر باشد، نشان دهنده آن است که میل آب‌دوستی سنگدانه‌ها نیز بیشتر است و بر عکس. به صورت متقابل هر چه درصد کانی  $\text{CaO}$  بیشتر باشد نشان دهنده آن است که میل آب‌گریزی سنگدانه‌ها نیز بیشتر است و برعکس [۲۰]. در واقع دلیل اصلی مقاومت بالای سنگدانه های آهکی و قیر ناشی از شکل‌گیری پیوندهای غیرقابل حل (کووالانسی) در آب است که به علت واکنش فیزیکی بین کلسیم (Ca) (ناشی از  $\text{CaO}$  موجود در سنگدانه) روی سطح سنگدانه و گروه های عملکردی قیر شکل می‌گیرد. در نقطه مقابل می‌توان به سنگدانه های گرانیت اشاره کرد که مقدار کانی  $\text{SiO}_2$  در ساختار کانی های آن‌ها بالاست که باعث میل به آب‌دوستی بالای آنها شده است. در واقع بر روی سنگدانه های اسیدی مانند گرانیت، گروه های هیدروکسیل (OH) یافت می‌شود که این گروه‌ها با گروه های اسید کربوکسیلیک تشکیل پیوند هیدروژنی می‌دهد که در چسبندگی قیر-سنگدانه اسیدی بسیار مؤثر است. اما این پیوند هیدروژنی در حضور آب به راحتی شکسته می‌شود و این دو گروه از یکدیگر جدا می‌شوند و هرکدام با مولکول های آب پیوند هیدروژنی تشکیل می‌دهند. در این پژوهش، برای تعیین ساختار کانی های تشکیل دهنده سنگدانه ها از آزمایش XRF استفاده شده است. نتایج به دست آمده برای سه نوع سنگدانه در این پژوهش در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، مشاهده می‌شود که درصد کانی دی‌اکسید سیلیکون ( $\text{SiO}_2$ ) برای سنگدانه های کوارتزی و گرانیتی دارای بیشترین مقادیر هستند و درصد  $\text{CaO}$  برای سنگدانه های آهکی بیشتر است که این امر گواه بر آب‌دوستی سنگدانه های کوارتزی و گرانیتی و آب‌گریزی سنگدانه آهکی می‌باشد و می‌توان دریافت که چرا

که شاخص نسبت عمر خستگی نمونه های مرطوب به خشک که بر حسب درصد بیان می‌شود، همواره کمتر از ۱۰۰ می‌باشد. زیرا این انتظار وجود دارد که مقاومت مخلوط آسفالتی در نتیجه فرآیند اشباع شدن و قرار گرفتن تحت سیکل یخ-ذوب کاهش یابد. با توجه به نتایج حاصل شده، تاثیر استفاده از سنگدانه ها، قیرها و افزودنی های مختلف بر روی رخداد خرابی رطوبتی کاملاً مشخص می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ها، مشاهده می‌شود که نمونه های ساخته شده با سنگ آهک در هر دو نوع قیر مورد استفاده در این پژوهش دارای بیشترین مقدار نسبت عمر خستگی بوده است که نشان دهنده عملکرد خوب این نوع سنگدانه نسبت به دو سنگدانه دیگر، در برابر خرابی های رطوبتی می‌باشد. در مقابل، نمونه های ساخته شده با سنگدانه کوارتزی کمترین مقادیر نسبت عمر خستگی را برای هر دو نوع قیر به خود اختصاص دادند. با توجه به میل آب‌دوستی کانی های تشکیل دهنده این سنگدانه قابل پیش بینی بود. دلیل پایین بود مقادیر این شاخص برای سنگدانه گرانیتی نیز همین موضوع می‌باشد. چرا که کانی های تشکیل دهنده این سنگدانه نیز همچون سنگدانه کوارتزی میل به جذب آب بیشتری را دارد. بنابراین، با مقایسه بین این سه نوع سنگدانه می‌توان گفت که سنگ آهک به جهت خاصیت آبگریزی خود، پایداری بهتری در برابر رطوبت از خود نشان می‌دهند. از طرف دیگر، عملکرد نمونه های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ بهتر از نمونه های ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ در هر سه نوع سنگدانه بوده است. به علاوه، بر اساس نتایج حاصل شده مشاهده می‌شود که استفاده از هر سه افزودنی ضد‌عربان‌شدگی باعث بهبود قابل توجه نسبت عمر خستگی نمونه های ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه و هر دو نوع قیر مورد استفاده در این پژوهش شده است. از بین این سه افزودنی، وتفیکس در نمونه های ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه و قیر ۶۰-۷۰ اثر بیشتری بر روی عملکرد نمونه های در برابر رطوبت داشته است. در نمونه های مشابه ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ نیز نانو کربنات کلسیم بیشترین تاثیر در بهبود این شاخص را به خود اختصاص داده است. در نهایت، می‌توان ادعا داشت که هر یک از این مولفه ها همراه با ویژگی های مخلوط آسفالتی می‌تواند باعث تضعیف و یا تقویت مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل خرابی رطوبتی شود. با وجود این که آزمایش لاتمن اصلاح شده بهترین تطابق را با نتایج میدانی نشان می‌دهد. ولی نتایج را تنها در قالب

جدول ۷. درصد کانی‌های تشکیل دهنده سنگدانه های مورد استفاده (%)  
**Table 7. Percentage of minerals forming aggregates used (%)**

نوع کانی سنگدانه	Magnesium oxide (MgO)	Ferric oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Aluminium oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	dioxide Silicon (SiO <sub>2</sub> )	Calcium oxide (CaO)
سنگ آهک	۲/۲۴	۳/۸۷	۴/۸۴	۱۶/۵۸	۷۲/۴۷
سنگ گرانیت	۲/۹۲	۷/۰۸	۶/۰۵	۵۲/۱۹	۳۱/۷۵
سنگ کوارتزیت	۱/۷۶	۴/۰۹	۱۳/۶۷	۶۶/۹۶	۱۳/۵۳



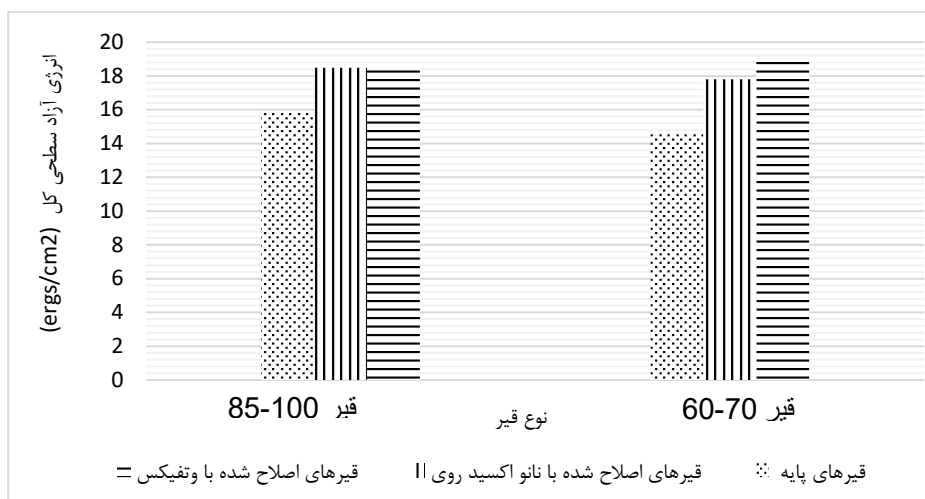
شکل ۵. بررسی ساختار ریزمقیاس سنگدانه‌ها با استفاده از SEM  
**Fig. 5. Investigation of microscale structure of aggregates using SEM**

۳-۳- نتایج اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر  
 اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی با استفاده از روش قطره  
 چسبیده، یکی از روش‌های متداولی است که امروزه برای مواد جامد  
 مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش را می‌توان هم برای سنگدانه و  
 هم برای قیر (به صورت جامد) مورد استفاده قرار داد، به شرطی که  
 مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه، کوچک باشد.

۳-۳-۱ انرژی آزاد سطحی کل قیر  
 انرژی آزاد کل، پارامتری با تأثیر دوگانه به شمار می‌رود و افزایش  
 آن از یک طرف سبب بهبود مقاومت در برابر خرابی رطوبتی از نوع  
 پیوستگی شده و به‌عنوان یک اثر مثبت به شمار می‌آید و از طرف  
 دیگر پوشش‌پذیری قیر روی سطح سنگدانه‌ها را کاهش می‌دهد  
 و به‌عنوان یک اثر منفی به شمار می‌آید. به همین دلیل، افزایش  
 انرژی کل نمی‌تواند دلیل کافی برای بهبود حساسیت رطوبتی باشد.

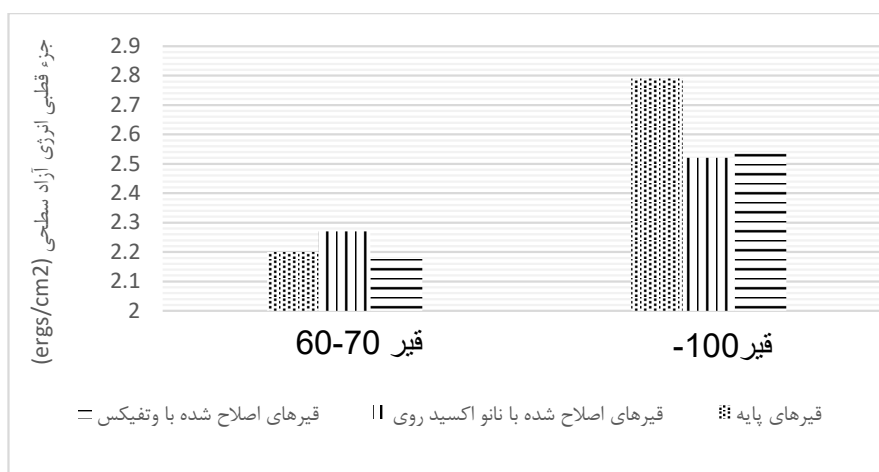
سنگدانه آهکی در نمونه‌های مرطوب عملکرد مناسب‌تری نسبت  
 به سنگدانه‌های کوارتزیتی و گرانیتی داشته‌اند. البته تنها نوع کانی  
 های تشکیل دهنده بر مقاومت مخلوط آسفالتی تأثیرگذار نیست و  
 بافت سطحی سنگدانه‌ها، مساحت سطح ویژه، نوع قیر مصرفی و  
 سازگاری آن با سنگدانه، تأثیر مواد افزودنی و فیلر نیز بر مقاومت  
 مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت، مؤثر است.

همچنین ویژگی‌های ساختاری سنگدانه‌ها با استفاده از  
 دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار  
 گرفته است که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج این  
 بررسی نشان می‌دهد که سنگدانه سنگ‌آهک دارای خلل و فرج  
 بیشتری بوده است. این موضوع باعث می‌شود تا قیر به شکل  
 موثرتری در ساختار سنگدانه نفوذ کند و جداسدن ماستیک از روی  
 سطح سنگدانه سخت‌تر شود. همچنین، خلل و فرج بیشتر باعث  
 جذب قیر و درصد قیر بهینه بالاتری نیز می‌شود.



شکل ۶. انرژی آزاد سطحی کل قیرها (ergs/cm²)

Fig. 6. Total surface free energy of asphalt binder (ergs/cm²)



شکل ۷. جزء قطبی انرژی آزاد سطحی قیرها (ergs/cm²)

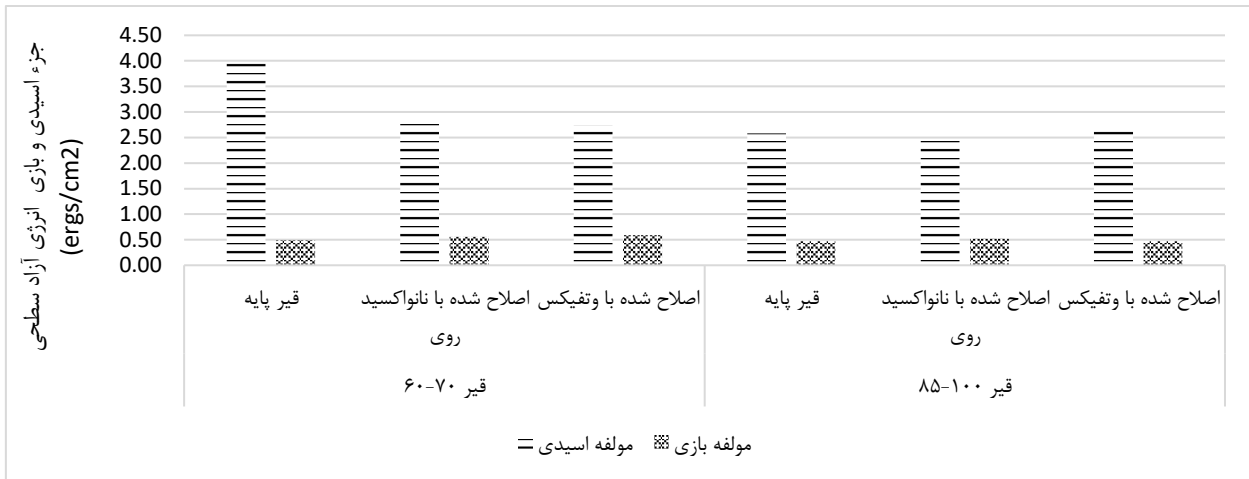
Fig. 7. Polar component of surface free energy of asphalt binder (ergs/cm²)

بنابراین، نتایج حاصل از انرژی آزاد سطحی کل را نمی توان با نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده مقایسه کرد. بسیاری از پژوهش ها به این نتیجه رسیده اند که استفاده از افزودنی های ضدعریان شدگی باعث می شود که انرژی آزاد کل قیر افزایش یابد. این موضوع سبب می شود تا میل به خرابی رطوبتی از نوع گسیختگی پیوستگی کاهش یابد زیرا میزان انرژی موردنیاز برای گسیختگی در ماستیک افزایش می یابد. نتایج انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به داده های ارائه شده در شکل مشخص است که استفاده از افزودنی های ضدعریان شدگی باعث افزایش مقدار انرژی آزاد کل قیر شده اند. استفاده از وتفیکس بر روی

قیر ۶۰-۷۰ و همچنین استفاده از نانو اکسید روی در قیر ۸۵-۱۰۰ تأثیر بهتری در افزایش انرژی آزاد کل قیر داشته اند. همچنین، قیر ۸۵-۱۰۰ در مقایسه با قیر ۶۰-۷۰ دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در حالت پایه می باشد که باعث می شود این قیر در مقایسه با قیر ۶۰-۷۰ گسیختگی پیوستگی کمتری داشته باشد.

### ۳-۱-۱- انرژی آزاد سطحی اسیدی-بازی (قطبی) قیر

نتایج مربوط به انرژی آزاد سطحی قطبی قیر در شکل ۷ ارائه شده است. استفاده از افزودنی های ضدعریان شدگی مخصوصا مواد ضد عریان شدگی مایع در قیر باعث کاهش در خصوصیات قطبی قیر



شکل ۸. مؤلفه های اسیدی و بازی انرژی آزاد سطحی (ergs/cm<sup>2</sup>)  
 Fig. 8. Acidic and basic component of surface free energy of asphalt binder (ergs/cm<sup>2</sup>)

این امر را می‌توان در این موضوع دانست که نانو اکسید روی و ماده وتفیکس دارای خصوصیات بازی بیشتری در مقایسه با خصوصیات اسیدی‌شان هستند که باعث می‌شود تا مؤلفه بازی قیر پایه را افزایش و به همین شکل مؤلفه اسیدی آن را کاهش دهند. این تغییرات باعث بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه های اسیدی که در برابر رطوبت حساس هستند، می‌گردد. استفاده از افزودنی وتفیکس در قیر ۷۰-۶۰ باعث کاهش مؤلفه اسیدی انرژی آزاد سطحی و افزایش مؤلفه بازی آن می‌شود. اما همین ماده در قیر ۱۰۰-۸۵ روند معکوس دارد یعنی مؤلفه اسیدی را تا مقداری افزایش و مؤلفه بازی آزاد سطحی را کاهش می‌دهد. نانو اکسید روی خاصیت بازی دارد. افزودن این ماده به قیرهای ۶۰-۷۰ و ۱۰۰-۸۵ باعث افزایش مؤلفه بازی و کاهش مؤلفه اسیدی در قیرها می‌گردد.

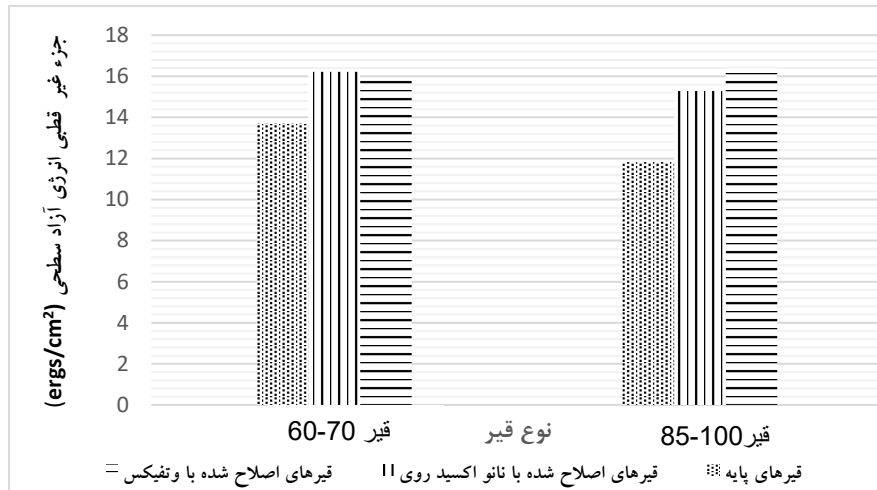
شده است. این موضوع را می‌توان به این دلیل دانست که مواد ضد عریان‌شدگی مایع مورد استفاده در این پژوهش که از خانواده مواد آلی آمینی هستند مؤلفه های انرژی آزاد سطحی قطبی کوچکتری در مقایسه با قیر دارند. قیر ۷۰-۶۰ نسبت به قیر ۱۰۰-۸۵ رفتار قطبی کمتری دارد. افزودنی نانو اکسید روی در قیر ۱۰۰-۸۵ و همچنین، افزودنی وتفیکس در قیر ۷۰-۶۰ نسبت به نمونه‌های دیگر در کاهش انرژی آزاد سطحی قیر عملکرد بهتری را به نمایش گذاشته‌اند. همچنین در قیر ۷۰-۶۰ استفاده از نانو اکسید روی نسبت به نمونه‌های دیگر عملکرد معکوسی داشته است یعنی باعث افزایش انرژی آزاد سطحی در قیر شده است. مهم‌ترین دلیل این رخداد را می‌توان در سازگاری بین پیوندهای ماده نانو اکسید روی و قیر دانست.

### ۳-۱-۳-۲- انرژی آزاد سطحی اسیدی و بازی قیر

با توجه به خاصیت اسیدی قیر، سنگدانه هایی مانند گرانیت و کوارتزیت که خصوصیات اسیدی دارند، مقاومت چسبندگی ضعیفی را با قیر به وجود می‌آورند. در صورتی که سنگدانه با خصوصیات بازی مقاومت چسبندگی قوی را با قیر به وجود می‌آورد. بنابراین، تعیین و کنترل مؤلفه های اسیدی و بازی در مخلوط آسفالتی مهم هست. نتایج مربوط به انرژی آزاد سطحی اسیدی و بازی قیر در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی باعث شده‌اند تا مؤلفه‌های اسیدی انرژی آزاد سطحی کاهش و مؤلفه بازی آن افزایش یابد. دلیل اصلی

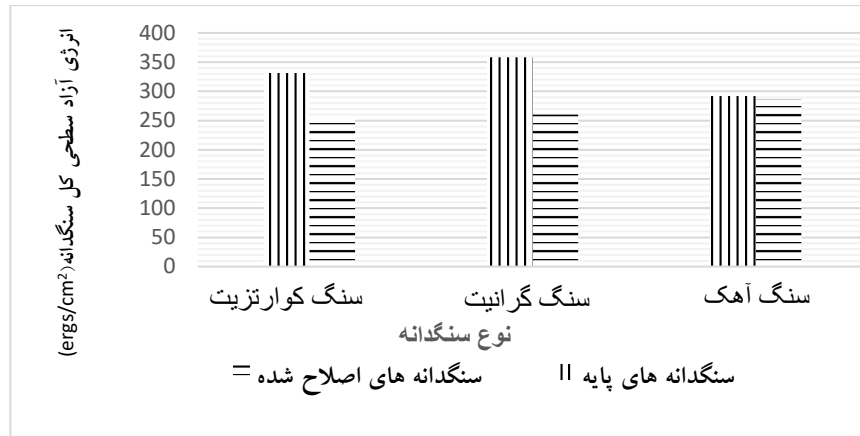
### ۳-۱-۳-۳- انرژی آزاد سطحی غیر قطبی قیر

نتایج مربوط به انرژی آزاد سطحی غیر قطبی قیرها در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشخص است که در قیرهای ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵، استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی باعث افزایش انرژی آزاد سطحی غیر قطبی در قیرها می‌گردد. استفاده از وتفیکس در قیر ۱۰۰-۸۵ و نانو اکسید روی در قیر ۷۰-۶۰ نسبت به ترکیبات دیگر تأثیر بیشتری در افزایش انرژی آزاد سطحی غیر قطبی قیر داشته است. قیر ۷۰-۶۰ در حالت پایه نسبت به قیر ۱۰۰-۸۵ مقدار انرژی آزاد سطحی غیر قطبی بیشتری دارد که این باعث افزایش



شکل ۹. جزء غیر قطبی انرژی آزاد سطحی قیرها ( $\text{ergs}/\text{cm}^2$ )

Fig. 9. Non-polar component of surface free energy of asphalt binder ( $\text{ergs}/\text{cm}^2$ )



شکل ۱۰. انرژی آزاد سطحی کل سنگدانه ها ( $\text{ergs}/\text{cm}^2$ )

Fig. 10. Total free energy of aggregate ( $\text{ergs}/\text{cm}^2$ )

را دارا می‌باشد. خرابی رطوبتی در دو حالت گسیختگی در غشای قیر و گسیختگی در سطح تماس قیر-سنگدانه ظاهر می‌شود. این دو نوع گسیختگی و عوامل ایجاد آن‌ها به مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی اسیدی، بازی و غیر قطبی سه ماده قیر، سنگدانه و آب بستگی دارند بنابراین می‌توان گفت که انرژی آزاد سطحی کل سنگدانه در این دو نوع گسیختگی تأثیر چندانی ندارد.

#### ۳-۲-۳-۲- انرژی آزاد سطحی اسیدی و بازی سنگدانه

اتصال‌های قوی معمولاً هنگامی شکل می‌گیرد که یک ماده اسیدی و یک ماده بازی در تماس با یکدیگر باشند. بر این اساس،

و بهبود نیروی چسبندگی بین قیر و سنگدانه در قیر ۷۰-۶۰ می‌گردد.

#### ۳-۳-۲- مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه

#### ۳-۳-۲-۱- انرژی آزاد سطحی کل سنگدانه

نتایج مربوط به انرژی آزاد سطحی کل سنگدانه‌ها، در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، مشخص شده است که استفاده از افزودنی نانو کربنات کلسیم در هر سه نوع سنگدانه ی سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت باعث کاهش انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها شده است. همچنین در بین سنگدانه‌ها، سنگدانه ی گرانیت نسبت به سنگدانه های کوارتزیت و آهک انرژی آزاد سطحی کل بیشتری



شکل ۱۱. جزء اسیدی و بازی انرژی آزاد سطحی سنگدانه (ergs/cm<sup>2</sup>)

Fig. 11. Acidic and basic component of surface free energy of aggregate (ergs/cm<sup>2</sup>)

این افزایش در مؤلفه بازی سنگدانه ها نسبت به کاهش در مؤلفه اسیدی سنگدانه ها زیاد چشمگیر نمی‌باشد. بیشترین افزایش در مؤلفه بازی در سنگدانه های گرانیت بوده است که این افزایش سبب می‌شود تا چسبندگی این سنگدانه با قیر که خاصیت اسیدی دارد افزایش یابد و احتمال عریان شدگی در حضور آب در سیستم کاهش یابد.

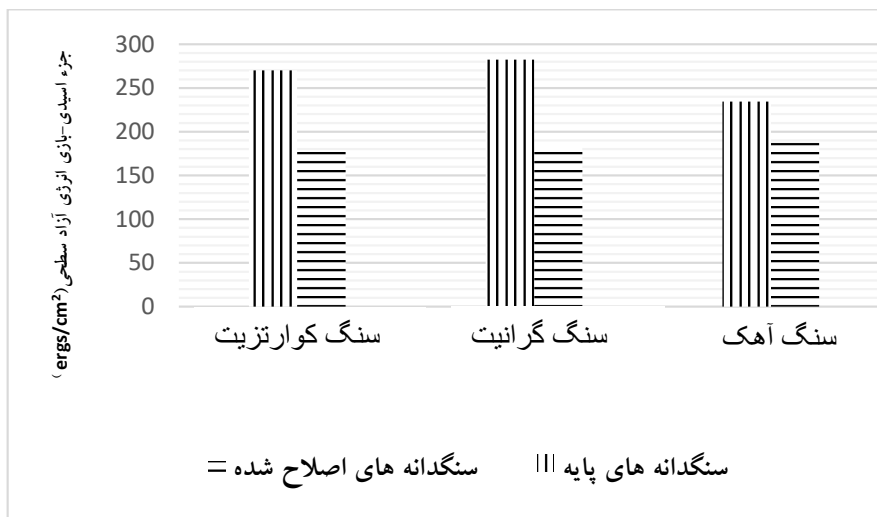
### ۳-۲-۳-۳ انرژی آزاد سطحی قطبی سنگدانه ها

در شکل ۱۲، نتایج مربوط به مؤلفه اسیدی-بازی سنگدانه های پایه و اصلاح شده ارائه شده است. از نتایج ارائه شده مشخص است سنگدانه های اسیدی دارای مؤلفه ی اسیدی-بازی بزرگ تری هستند. استفاده از پوشش نانویی باعث کاهش در میزان قطبیت هر سه نوع سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش تا یک سطح تقریباً یکسان شده است که این موضوع می‌تواند چسبندگی سنگدانه ها با قیر که یک ماده ی غیر قطبی است را افزایش دهد. البته در نتایج ارائه شده، کاهش قابل ملاحظه ای در مورد پارامتر انرژی آزاد قطبی در سنگدانه های گرانیتی پوشیده شده با نانو کربنات کلسیم به دست آمده است. ذکر این نکته ضروری است که یک استثنا در روند ذکر شده در مورد سنگدانه های گرانیتی و کوارتزیتی مشاهده می‌شود. سنگدانه های کوارتزیتی دارای مقدار SiO<sub>2</sub> بیشتری هستند اما جزء قطبی آن‌ها از

انتظار می‌رود که چسبندگی مناسب در حالتی که دو ماده اسیدی یا بازی در تماس باهم هستند، ایجاد نشود. در بعضی پژوهش‌ها گفته می‌شود قیر یک ماده دوسویه است که توانایی واکنش با مواد بازی و اسیدی را دارد اما بررسی‌های شیمیایی بیشتر نشان می‌دهد که قیر یک ماده با خصوصیات اسیدی پایین است. بنابراین سنگدانه های بازی نسبت به سنگدانه های اسیدی می‌توانند اتصال بهتری با قیر ایجاد کنند. مؤلفه های اسیدی و بازی انرژی آزاد سطحی سنگدانه ها در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ مشخص است که مؤلفه اسیدی انرژی آزاد سطحی سنگدانه های سنگ آهک و کوارتزیت به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را دارند که دلیل این تفاوت‌ها هم نوع کانی های تشکیل دهنده ی سنگدانه ها برمی‌گردد. استفاده از افزودنی ضدعریان شدگی نانو کربنات کلسیم باعث شده است تا مؤلفه اسیدی هر سه نوع سنگدانه کاهش یابد که در سنگدانه های گرانیتی و کوارتزیتی این کاهش بیشتر بوده است.

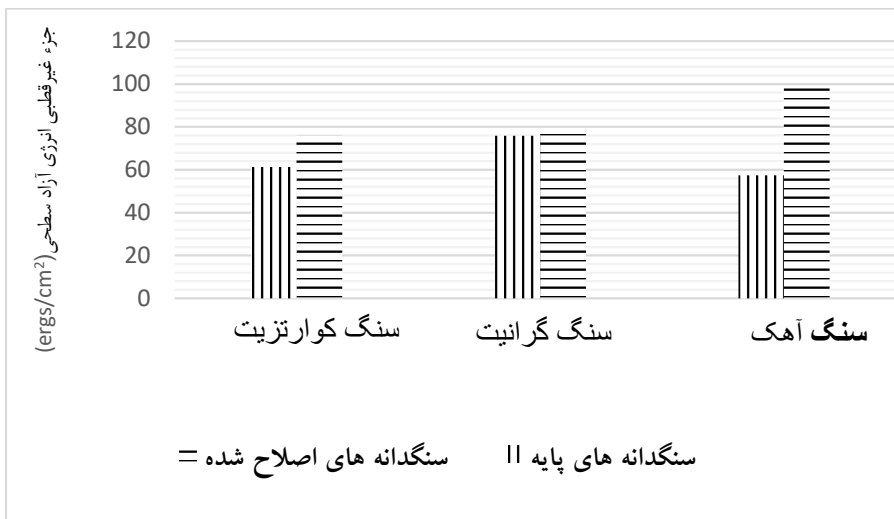
نتایج مربوط به جزء بازی انرژی آزاد سطحی سنگدانه ها، در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشخص است که مؤلفه بازی سنگدانه آهک نسبت به سنگ دانه های گرانیت و کوارتزیت بیشتر است. استفاده از پوشش نانو کربنات کلسیم باعث افزایش مؤلفه بازی در هر سه نوع سنگدانه شده است اما





شکل ۱۲. جزء اسیدی-بازی انرژی آزاد سطحی سنگدانه ها ( $\text{ergs/cm}^2$ )

Fig. 12. Acidic-base component of surface free energy of aggregate ( $\text{ergs/cm}^2$ )



شکل ۱۳. جزء غیر قطبی انرژی آزاد سطحی سنگدانه ها ( $\text{ergs/cm}^2$ )

Fig. 13. Non-polar component of surface free energy of aggregate ( $\text{ergs/cm}^2$ )

کربنات کلسیم باعث شده است تا خصوصیات غیرقطبی سنگدانه ها افزایش یابد که این موضوع سبب افزایش چسبندگی سنگدانه ها با قیر که یک ماده غیرقطبی است، می شود. از طرف دیگر، افزایش جزء غیر قطبی در سنگدانه ها باعث می شود تا میل به چسبندگی سنگدانه ها توسط آب که یک ماده قطبی است، کاهش می یابد.

#### ۴- نتیجه گیری کلی

این پژوهش، به منظور بررسی تاثیر ویژگی های ساختاری

سنگدانه های گرانیتی کمتر است. البته تفاوت در مقدار  $\text{SiO}_2$  این دو سنگدانه و نیز مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی آن ها زیاد نیست.

#### ۳-۲-۴- انرژی آزاد سطحی غیرقطبی سنگدانه

نتایج مربوط به انرژی آزاد سطحی غیرقطبی سنگدانه ها، در شکل ۱۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشخص است که مولفه های قطبی سنگدانه ها از مولفه های غیرقطبی آنها بزرگتر است و به عنوان یک ماده قطبی شناخته می شوند. استفاده از پوشش نانو

تا چسبندگی بیشتری بین قیرهای اصلاح شده و سنگدانه های اسیدی ایجاد شود.

• استفاده از افزودنی های ضدعریان شدگی سبب شده است تا مقدار انرژی آزاد سطحی کل قیر افزایش یابد. این موضوع سبب می شود تا میزان انرژی لازم برای ایجاد ترک خوردگی در قیر افزایش یابد و احتمال رخ داد خرابی رطوبتی کاهش یابد.

• استفاده از افزودنی های ضدعریان شدگی قیر سبب شده است تا مؤلفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیر افزایش یابد. این موضوع می تواند سبب بهبود افزایش در پیوندهای غیرقطبی بین قیر-سنگدانه شود.

• استفاده از افزودنی ضدعریان شدگی قیر، سبب بهبود جزئی در مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی قیر شده اند. این رخ داد می تواند سبب شود تا چسبندگی ضعیف بین قیر-سنگدانه ناشی از غیرقطبی بودن قیر، مقداری افزایش یابد.

• استفاده از نانو کربنات کلسیم باعث کاهش چشمگیر مؤلفه اسیدی انرژی آزاد سطحی سنگدانه و افزایش کم مؤلفه ی بازی آن می شود. همچنین پوشش نانو بر روی سطح سنگدانه ها سبب شده است تا انرژی آزاد غیرقطبی و قطبی سنگدانه ها به ترتیب افزایش و کاهش یابد، که تغییرات ذکر شده باعث بهبود چسبندگی بین سنگدانه ها و قیر می گردد.

### مراجع

- [1] N. M. Wasiuddin, Effect of additives on surface free energy characteristics of aggregates and binders in hot mix asphalt, The University of Oklahoma, 2007.
- [2] R.G. Hicks, Moisture damage in asphalt concrete, Transportation Research Board, 1991.
- [3] Gh. H. Hamed, Effects of polymeric coating the aggregate surface on reducing moisture sensitivity of asphalt mixtures, International Journal of Civil Engineering, 16(9) (2018) 1097-1107.
- [4] Gh. H. Hamed. Evaluating the effect of asphalt binder modification using nanomaterials on the moisture damage of hot mix asphalt, Road Materials and Pavement Design Journal, 18(6) (2017) 1375-1394.
- [5] Gh. H. Hamed, F.M. Moghadas Nejad, The employment of thermodynamic and mechanical methods to evaluate

سنگدانه ها، اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نانو مواد، انجام شده است. در این پژوهش، نسبت عمر خستگی نمونه های مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم و مولفه های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه از طریق تئوری انرژی آزاد سطحی محاسبه شده است. همچنین ویژگی های ساختاری سنگدانه ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی روبشی، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر افزودنی های نانو مواد بر روی مولفه های موثر در رخداد خرابی رطوبتی از قبیل چسبندگی بین قیر-سنگدانه، پیوستگی ماستیک و ساختار تشکیل دهنده ی سنگدانه ها می باشد. با توجه به بررسی های انجام شده، مهم ترین نتایج حاصل از این پژوهش، شامل موارد زیر می باشد:

• استفاده از نانو کربنات کلسیم باعث می شود تا میزان چسبندگی بین قیر-سنگدانه افزایش یابد و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های آسفالتی را بهبود بخشد.

• نمونه های حاوی سنگدانه های سنگ آهک، با داشتن چسبندگی مناسب و مساحت سطح ویژه بالا، بهترین مقاومت کششی غیرمستقیم را در مقایسه با نمونه های ساخته شده با سایر سنگدانه ها داشته اند.

• در نمونه های با قیر و افزودنی مشابه، مقدار دو کانی  $SiO_2$  و  $CaO$  در ساختار سنگدانه باعث می شود تا تغییر اساسی در خصوصیات آب گریزی و آب دوستی مخلوط آسفالتی ایجاد شود. هرچه درصد کانی  $SiO_2$  بیشتر باشد، نشان دهنده ی آن است که میل آب دوستی سنگدانه ها نیز بیشتر است و هرچه درصد کانی  $CaO$  بیشتر باشد، میل آب گریزی سنگدانه ها بیشتر است.

• استفاده از افزودنی نانو کربنات کلسیم، باعث شکل گیری یک لایه از مواد با ساختار بازی بر روی سنگدانه های گرانیتی یا کوارتزی می شود که باعث بهبود چسبندگی این ماده با قیر که تقریباً خواص اسیدی دارد می شود. استفاده از پوشش سطح سنگدانه سبب می شود تا یک مانع محافظتی شکل گیرد که از طرفی باعث می شود تا سطح سنگدانه آب گریز شود و از طرفی چسبندگی مناسب با قیر ایجاد می کند.

• استفاده از افزودنی های ضدعریان شدگی بازی مورد استفاده در این پژوهش سبب شده است تا مؤلفه های اسیدی و بازی انرژی آزاد سطحی قیر به ترتیب کاهش و افزایش یابد. این رخ داد سبب می شود

- [12] 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.
- [13] Z. Kordi, G. Shafabakhsh, Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Construction and Building Materials*, 134 (2017) 530-539.
- [14] A. Akbari, A. Modarres, Effect of clay and lime nano-additives on the freeze-thaw durability of hot mix asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 18(3) (2017) 646-669.
- [15] G.H. Hamed, Investigating the use of nano coating over the aggregate surface on moisture damage of asphalt mixtures, *International Journal of Civil Engineering*, 16(6) (2018) 659-669.
- [16] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, Use of aggregate nanocoating to decrease moisture damage of hot mix asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 17(1) (2016) 32-51.
- [17] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, K. Oveisi, Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA, *Road Materials and Pavement Design*, 16(3) (2015) 536-552.
- [18] A. Bhasin, Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water, Texas A&M University, 2007.
- [19] G.H. Hamed, Moisture Damage of Asphalt Mixtures Modeling Based on Surface Free Energy Theory, Amirkabir University of Technology, Tehran, 2015.
- [20] K. Stuart, Moisture damage in asphalt mixtures-a state-of-the-art report, (1990).
- the impact of nanomaterials on moisture damage of HMA, *Materials and Structures Journal*, 49(11) (2016) 4483-4495.
- [6] J. St Martin, L. Cooley Jr, H.R. Hainin, Production and construction issues for 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.
- [7] 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.
- [8] J. Scherocman, K. Mesch, J. Proctor, The Effect of Multiple Freeze-Thaw Cycle Conditioning on the Moisture Damage in Asphalt Concrete Mixtures: Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 1986.
- [9] R. Lytton, Adhesive fracture in asphalt concrete mixtures. Chapter in Youtcheff, J, in, Press, 2004.
- [10] 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.
- [11] G. Elphinstone, Adhesion and cohesion in asphalt-aggregate systems, Texas A&M University, Texas, 1997.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Y. Azarion, H. Shirmohammadi, G.H. Hamed, D. Saedi, Investigating the Effect of Characteristics of Aggregates and SFE components of Asphalt Binder-Aggregate on the Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures Modified with Anti-Stripping Agents, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(8) (2020) 2109-2128.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15894.6076](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15894.6076)



