



بررسی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای انرژی آزاد سطحی

علیرضا آذرهوش، فریدون مقدس‌نژاد*

دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۵ بهمن ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۶ آبان ۱۳۹۵
پذیرش: ۱ آذر ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۵ آذر ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

مخلوط‌های آسفالتی
ترک‌های خستگی
انرژی آزاد سطحی
چسبندگی
پیوستگی

چکیده: ترک‌های خستگی یکی از انواع خرابی‌های غالب و اساسی در مخلوط‌های آسفالتی برای دماهای میانی محسوب می‌شوند. از آنجاییکه این نوع از خرابی عمدتاً به دو صورت شکست پیوستگی (در قیر یا فاز ماستیک) و شکست چسبندگی (در سطح تماس قیر با سنگدانه) اتفاق می‌افتد. بنابراین یکی از خصوصیات اساسی مصالح مصرفی در مخلوط‌های آسفالتی که بر نوع گسیختگی تأثیر گذار است، انرژی آزاد سطحی سیستم قیرسنگدانه می‌باشد. در این پژوهش، اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها و قیرها بترتیب توسط آزمایش دستگاه جذب جهانی و آزمایش قطره چسبیده تعیین گردید. همچنین جهت ارزیابی تأثیر پارامترهای چسبندگی و پیوستگی بر عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی، نمونه‌های ساخته شده با ترکیب‌های متفاوتی از قیر و سنگدانه تحت انجام آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند.

نتایج نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های سنگ‌آهک و قیر ۱۰۰-۸۵ دارای بالاترین عمرخستگی در مقایسه با سایر مخلوط‌ها می‌باشند. زیرا سنگ‌آهک بدلیل مساحت سطح ویژه بالا دارای بالاترین میزان چسبندگی با قیر می‌باشد. علاوه بر این نمونه‌های ساخته شده با قیر ۱۰۰-۸۵ دارای مقدار انرژی آزاد چسبندگی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های مشابه ساخته شده با قیر ۷۰-۶۰ می‌باشند. از طرف دیگر قیر ۱۰۰-۸۵ دارای مقادیر انرژی آزاد پیوستگی بزرگتری در مقایسه با قیر ۷۰-۶۰ است.

۱- مقدمه

خرابی‌های غالب در روسازی‌های انعطاف‌پذیر^۱ شامل ترک‌های خستگی^۲، شیارشدگی^۳ و ترک‌های حرارتی^۴ می‌شوند. این خرابی‌ها اغلب اوقات بدلیل کیفیت پایین مصالح مصرفی، نگهداری ضعیف روسازی، افزایش بارمحوری، حجم بالای ترافیک و عوامل محیطی اتفاق می‌افتند [۱]. ترک‌های خستگی بعنوان یکی از خرابی‌های نامبرده، در دماهای میانی تحت بارگذاری ترافیک تکراری اتفاق می‌افتد. این خرابی عمدتاً به دو صورت روی می‌دهد: ۱- شکست پیوستگی^۵، که در قیر یا فاز ماستیک^۶ روی می‌دهد و ۲- شکست

چسبندگی^۷، که در تماس قیر با سنگدانه اتفاق می‌افتد [۲]. یکی از مهم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای چسبندگی و پیوستگی، روش انرژی آزاد سطحی^۸ می‌باشد. این روش بر اساس خصوصیات بنیادین مصالح که در مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر از دست دادن چسبندگی و پیوستگی موثر هستند، پایه‌گذاری شده است. مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در روش انرژی آزاد سطحی، پیوستگی قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه در شرایط خشک و مرطوب می‌باشد [۳].

تئوری انرژی آزاد سطحی بیان می‌کند که مولکول‌های موجود در حجم مواد در همه جهات به وسیله سایر مولکول‌ها احاطه شده‌اند و به همین علت این مولکول‌ها دارای سطح بالاتری از انرژی چسبندگی در مقایسه با مولکول‌های موجود در سطح هستند. این مطلب در شکل ۱ نشان داده شده است. بنابراین، مقداری انرژی باید صرف شود تا مولکول‌های موجود در حجم را از توده حجم جدا کرده و به وضعیت مولکول‌های سطحی رساند. این کار

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir

- 1 Flexible pavements
- 2 Fatigue cracking
- 3 Rutting
- 4 Thermal cracking
- 5 Cohesive fracture
- 6 Mastic

- 7 Adhesive fracture
- 8 Surface free energy method

فاز ماستیک اتفاق می‌افتد می‌تواند مفید واقع شود. این پژوهش‌ها نشان دادند که انرژی پیوستگی بعنوان یک مشخصه مهم از مصالح، یک پارامتر تاثیرگذار در مدل ارائه شده می‌باشد که بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تاثیرگذار است [۱۱ و ۱۲].

در این پژوهش، با استفاده از مفاهیم ترمودینامیک و پارامترهای انرژی آزاد سطحی، تاثیر انواع مختلف از سنگدانه و قیر بر رفتار و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت انجام آزمایش خستگی بر روی نمونه‌های آسفالتی از آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم^۴ استفاده گردید. بنابراین، اهداف مهم این پژوهش را می‌توان بدین صورت بیان کرد:

- تعیین پارامترهای انرژی آزاد سطحی سه نوع سنگدانه و دو نوع قیر مورد استفاده در این پژوهش،
- انتخاب بهترین ترکیب قیر-سنگدانه که مخلوط‌های آسفالتی حاوی آن‌ها در برابر ترک‌های خستگی مقاوم‌تر هستند.
- معتبرسازی نتایج آزمایش انرژی آزاد سطحی با استفاده از نتایج آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم.

۲- مولفه‌های انرژی آزاد سطحی

پیوستگی و چسبندگی در سیستم قیر-سنگدانه مخلوط‌های آسفالتی بطور عمده از نیروهای بین مولکولی لیفشیتز-ون‌دروالز^۵ و اسیدی-بازی ناشی می‌شود. براساس تئوری ترمودینامیک، تغییرات ترمودینامیکی در انرژی آزاد سطحی چسبندگی و پیوستگی بترتیب به ایجاد ترک و گسیختگی در سطح تماس قیر و سنگدانه و در قیر مرتبط است. بنابراین جهت محاسبه کار چسبندگی و پیوستگی، تعیین اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه حیاتی می‌باشد. با دانستن مشخصات چسبندگی و پیوستگی یک مخلوط آسفالتی می‌توان خرابی‌هایی همچون حساسیت رطوبتی^۶، خود ترمیمی^۷ و ترک‌های خستگی در آن را مورد ارزیابی قرار داد [۲].

یکی از تئوری‌هایی که به صورت گسترده برای تشریح مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد مختلف به کار می‌رود، تئوری اسیدی-بازی می‌باشد [۱۳]. بر طبق این تئوری، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده‌ای براساس نوع نیروهای مولکول‌های سطحی به سه جز تقسیم می‌شود. این مولفه‌ها عبارتند از:

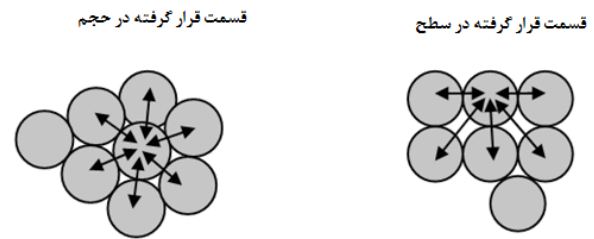
الف- جزء غیرقطبی که به آن جز لیفشیتز-ون‌دروالز یا جز پراکنده می‌گویند،

ب- جزء اسیدی لوییس،

ج- جزء بازی لوییس.

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

برابر با انرژی آزاد سطحی مواد است. انرژی آزاد سطحی را مقدار کاری که نیاز است تا یک واحد از سطح جدید مواد در شرایط خلأ ایجاد شود، تعریف می‌کنند [۴].



شکل ۱: تفاوت در نیروهای درون مولکولی در سطح و حجم

Fig.1. Differences in Intermolecular Forces at the Surface and in the Bulk

در دهه اخیر، مطالعات نسبتاً زیادی در زمینه استفاده از پارامترهای چسبندگی و پیوستگی، براساس روش‌های انرژی آزاد سطحی، جهت ارزیابی خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی صورت پذیرفته است [۵-۱۰]. اما مطالعاتی که به بررسی تاثیر پارامترهای انرژی آزاد سطحی بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی بپردازد محدود می‌باشد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

چنگ^۱ در سال ۲۰۰۲ [۲] مطالعه جامعی بر روی مفاهیم اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی و کاربرد آن در روسازی‌های آسفالتی انجام داد. در واقع این پژوهش اولین پژوهشی است که در آن به استفاده از مفاهیم انرژی آزاد سطحی برای تعیین خرابی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است. ایشان در رساله خود از مفهوم انرژی آزاد سطحی برای کمک به تعیین سازگارترین سیستم قیر-سنگدانه برحسب چسبندگی استفاده کرده‌اند و مقاومت پیوستگی و چسبندگی در داخل سیستم قیر-سنگدانه را به طور مستقیم به انرژی‌های آزاد سطحی یک سیستم قیر-سنگدانه ارتباط داده‌اند. در این پژوهش رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی براساس قانون پایه شاپری برای مکانیک شکست^۲ مواد ویسکوالاستیک^۳ و مفهوم انرژی آزاد سطحی مورد بررسی قرار گرفت. چنگ عنوان داشت که ترک‌های خستگی به دو دلیل گسیختگی پیوستگی و چسبندگی که به ترتیب در قیر و در سطح تماس قیر و سنگدانه اتفاق می‌افتند، ناشی می‌شود. از این رو دو شاخص خستگی مکانیستیک براساس گسیختگی پیوستگی و چسبندگی برای پیش‌بینی عمر خستگی ارائه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که انرژی آزاد سطحی یک پارامتر بنیادی در ارائه شاخص خستگی براساس قانون پایه شاپری برای مکانیک شکست مواد ویسکوالاستیک می‌باشد.

در مطالعات دیگری، نشان داده شد که استفاده از انرژی پیوستگی جهت پیش‌بینی رشد ترک‌های خستگی با فرض اینکه این گسیختگی در

4 Indirect tensile fatigue test

5 Lifshitz-van der Waals

6 Moisture susceptibility

7 Healing

1 Cheng

2 Fracture mechanics

3 Viscoelastic

رابطه‌ی ۴ برای مشخص کردن انرژی آزاد چسبندگی بین قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\Delta G_i^a = \Delta G_i^{aLW} + \Delta G_i^{aAB} = 2[(\sqrt{(\Gamma_s^{LW} \Gamma_1^{LW})}) + (\sqrt{(\Gamma_s^+ \Gamma_1^+)}) + (\sqrt{(\Gamma_s^- \Gamma_1^-)})] \quad (4)$$

که در آن:

ΔG_i^{aa} : انرژی آزاد چسبندگی

ΔG_i^{aLW} : مولفه غیرقطبی انرژی آزاد چسبندگی

ΔG_i^{aAB} : مولفه قطبی انرژی آزاد چسبندگی

Γ_1^{LW} و Γ_1^+ و Γ_1^- : مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر

Γ_s^{LW} و Γ_s^+ و Γ_s^- : مولفه‌ها انرژی آزاد سطحی سنگدانه

برای یک مخلوط قیر و سنگدانه رابطه‌ی ۴ هنگامی به کار می‌رود که مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه مورد نظر اندازه‌گیری شده باشند. از نظر پدیدارشناسی تشریح می‌شود که کار چسبندگی مقدار نیروی خارجی است که برای جدایی دو ماده در سطح تماسشان در شرایط خلأ مورد نیاز است.

۳- سنگدانه و قیر مصرفی

در این پژوهش به ترتیب از دو و سه نوع متفاوت قیر و سنگدانه جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شده‌است. جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر مشخصات شیمیایی و فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی می‌باشند. هم‌چنین دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده‌است. حداکثر اندازه اسمی این دانه‌بندی ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. علاوه بر این، جهت ارزیابی خصوصیات قیرهای مصرفی در این پژوهش آزمایش‌های قراردادی مانند درجه نفوذ، نقطه نرمی و انگمی انجام شد. نتایج آزمایش‌های فوق بر روی قیرهای مصرفی در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

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

که در آن:

Γ : انرژی آزاد سطحی کل ماده

Γ^{LW} : مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی

Γ^\pm : مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی

Γ^+ : مولفه اسیدی

Γ^- : مولفه بازی

بر طبق اصول ارائه‌شده توسط ون اوس^۱ [۱۳] قسمت اسیدی-بازی از پارامتر اسید لوپیس و باز لوپیس تشکیل شده‌است.

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

که در آن:

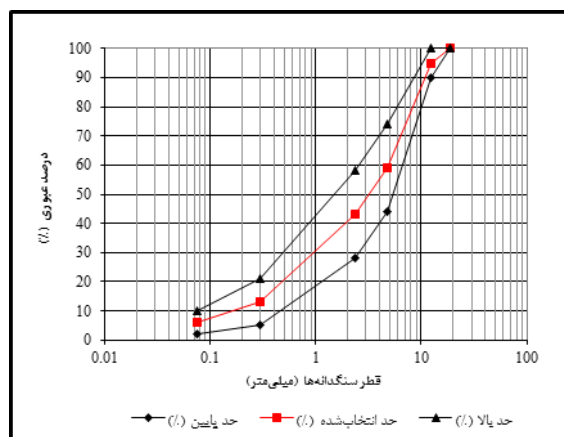
Γ^+ : مولفه اسیدی

Γ^- : مولفه بازی

از دید ترمودینامیکی انرژی آزاد پیوستگی (ΔG_i^c)، مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک ترک با سطح واحد در داخل یک ماده تعریف می‌شود. کار پیوستگی یک مایع، کار مورد نیاز برای جداسازی یک ستون مایع با مساحت سطح مقطع واحد در شرایط خلأ به دو قسمت تعریف می‌شود. این تعریف را می‌توان برای مواد جامد نیز بسط داد. براساس تعریف انرژی آزاد سطحی، ساده‌است تا کار کل پیوستگی را برای مواد گوناگون به شرح زیر نشان داد:

$$\Delta G_i^c = 2\Gamma \quad (3)$$

انرژی آزاد چسبندگی (ΔG_i^c) همانطور که پیش‌تر تعریف شد، دو جز اصلی دارد. جز قطبی یا اسیدی-بازی و جز غیرقطبی یا لیفشیتز-ون‌دروالز.



شکل ۲: دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی

Fig. 2. Gradation of the aggregates used in this study

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

Table 1. Chemical composition of the aggregates used in the study

Calcium oxide, CaO	Magnesium oxide, MgO	Ferric oxide, Fe ₂ O ₃	Aluminium oxide, Al ₂ O ₃	Silicon dioxide, SiO ₂	سنگدانه
۷۲/۴۷	۲/۲۴	۳/۸۷	۴/۸۴	۶/۵۸	سنگ‌آهک
۳۱/۷۵	۲/۹۲	۷/۰۸	۶/۰۵	۵۲/۱۹	گرانیت
۱۳/۵۳	۱/۷۶	۴/۰۹	۱۳/۶۷	۷۷/۹۶	کوارتزیت

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Physical properties of the aggregates used in the study

حدود آیین‌نامه	کوارتزیت	گرانیت	سنگ‌آهک	استاندارد	آزمایش
وزن ویژه (درشت‌دانه) (gr/cm ³)					
-----	۲/۴۸	۲/۶۱	۲/۵۹	ASTM C 127	حجمی
-----	۲/۴۹	۲/۶۳	۲/۶۰		موثر
-----	۲/۵۲	۲/۶۵	۲/۶۲		ظاهری
وزن ویژه (ریزدانه) (gr/cm ³)					
-----	۲/۴۶	۲/۶۰	۲/۵۷	ASTM C 128	حجمی
-----	۲/۴۸	۲/۶۲	۲/۵۸		موثر
-----	۲/۴۹	۲/۶۵	۲/۶۱		ظاهری
-----	۲/۴۴	۲/۵۵	۲/۵۶	ASTM D854	وزن ویژه (فیلر) (gr/cm ³)
حداکثر ۳۰	۲۶	۱۹	۲۷	ASTM C 131	حداکثر سایش به روش لس‌انجلس (%)
۲/۸	۱/۷	۱/۲	۰/۸	ASTM C127	حداکثر جذب آب (%)
حداکثر ۱۵	۶	۹	۳	ASTM D 4791	ذرات سوزنی و پولکی (%)
وابسته به سطح ترافیک	۸۶	۹۱	۸۹	ASTM D 5821	درصد شکستگی (%)
حداکثر ۱۲	۷	۴	۲	ASTM C 88	دوام در برابر سولفات سدیم سدیم (%)

جدول ۳: خصوصیات قیرهای پایه مورد استفاده در این پژوهش

Table 3. Results of the experiments conducted on asphalt binders used in the study

درجه خلوص (%)	افت وزنی (%)	درجه اشتعال (° C)	شکل پذیری (cm)	نقطه نرمی (° C)	درجه نفوذ (°/1 mm)	چگالی در ۲۵ ° C	ویژگی
ASTM D2042-76	ASTM D1754-78	ASTM D92-78	ASTM D113-79	ASTM D36-76	ASTM D5-73	ASTM D70-76	استاندارد
-	-	حداقل ۲۳۲	حداقل ۱۰۰	۴۹-۵۶	۶۰-۷۰	-	مقدار مجاز
۹۹/۵	۰/۷۵	۲۶۲	۱۰۵	۵۱	۶۶	۱/۰۲	۶۰-۷۰
-	-	حداقل ۲۳۲	حداقل ۱۰۰	۴۵-۵۲	۸۵-۱۰۰	-	مقدار مجاز
۹۹/۵	۰/۷۵	۲۴۸	۱۱۲	۴۸	۹۱	۱/۰۳	۸۵-۱۰۰

۴- برنامه آزمایشگاهی

۴-۱- طرح اختلاط

نمونه‌های مخلوط آسفالت گرم که برای انجام آزمایش تهیه می‌شوند تحت شرایط کاملاً کنترل شده و استاندارد که حتی الامکان مشابه شرایط کارگاهی باشد، ساخته و آزمایش می‌شوند. تعیین درصد قیر بهینه براساس استاندارد مربوطه^۱ صورت گرفته است. عمل تراکم نمونه‌های مخلوط آسفالتی بوسیله ۷۵ ضربه چکش مارشال، که ۴/۵ کیلوگرم وزن دارد و از ارتفاع ۴۵ سانتی متری سقوط می‌کند، انجام می‌گیرد [۱۴].

درصد قیر مناسب بتن آسفالتی با استفاده از منحنی‌های آزمایش مارشال تعیین می‌شود. لذا مقدار قیری که برای ساختن بتن آسفالتی بکار می‌رود میانگین مقادیری است که بیشترین استقامت، بیشترین وزن مخصوص و مناسب‌ترین مقدار فضای خالی را در بتن آسفالتی سبب می‌شود. مقدار قیر بهینه برای سنگدانه‌های سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت به ترتیب مقادیر ۵/۵، ۵/۲ و ۵ درصد به دست آمد.

۴-۲- اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی مصالح

در این پژوهش، اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها و قیرها به ترتیب توسط آزمایش دستگاه جذب جهانی^۲ و آزمایش قطره چسبیده^۳ تعیین گردید. اندازه‌گیری مستقیم اجزای انرژی آزاد سطحی یک جسم جامد به ندرت امکان‌پذیر است. روش اجرایی تر این است که با اندازه‌گیری کار چسبندگی بین جسم جامد و موادی که اجزای انرژی آزاد سطحی آن‌ها معلوم است این اجزا تعیین شود. به این مواد که به کمک آن‌ها اجزای انرژی آزاد سطحی جسم جامد تعیین می‌شود، مواد شاخص^۴ گفته می‌شود. حداقل باید سه نوع

ماده شاخص را از سه نوع مایع مختلف که غیرقطبی^۵، نیمه قطبی^۶ و قطبی^۷ می‌باشند، انتخاب کرد. برای موادی با انرژی‌های سطحی بالا مانند سنگدانه، کار چسبندگی بین سنگدانه و بخار ماده شاخص را می‌توان از جذب سطحی همدم^۸ تعیین کرد. یک جذب سطحی همدم رابطه‌ای بین فشار بخار یک ماده شاخص به جرم بخار جذب‌شده بر روی سطح سنگدانه است.

رابطه ۵ ارتباط بین کار چسبندگی بین یک بخار و یک ماده در فاز جامد را براساس تئوری اسیدی-بازی به مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مرتبط می‌سازد. اندیس‌های V و S به ترتیب به بخار مواد شاخص و جامد اشاره دارد و سایر پارامترها در بخش ۳ معرفی شده‌اند.

$$W_{S,V}^a = -2[(\Gamma_S^{LW} \Gamma_V^{LW})^{0.5} + (\Gamma_S^+ \Gamma_V^-)^{0.5} + (\Gamma_S^- \Gamma_V^+)^{0.5}] \quad (5)$$

که در آن:

$W_{S,V}^a$: کار چسبندگی بین سنگدانه و بخار مایعات مورد آزمایش می‌باشد.

برای به دست آوردن اجزای انرژی آزاد سطحی قیر، شبیه آنچه برای به دست آوردن اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها گفته شد، نیاز به داشتن حداقل ۳ مایع آزمایش است. زاویه تماس بین قیر و یک مایع را می‌توان با استفاده از روش قطره چسبیده به دست آورد. در این روش یک مایع آزمایش بر روی یک سطح افقی صاف از قیر پخش می‌شود. عکس قطره مایع شکل گرفته بر روی سطح قیر با استفاده از دوربین گرفته می‌شود. زوایای تماس با آنالیز عکس گرفته‌شده توسط نرم‌افزار به دست می‌آید. قابل ذکر است، که برای هر قطره مایع برای تعیین زاویه تماس سه تکرار مورد استفاده قرار گرفته است. این قطره در نقاط مختلف قیر انداخته شده است تا اثر قطره قبلی باعث ایجاد خطا نشود. همه اندازه‌گیری‌ها در دمای آزمایشگاه که روی

- 5 non-polar
- 6 mono-polar
- 7 bipolar
- 8 Isothermal adsorption

- 1 ASTM- D6927-15
- 2 Universal sorption device (USD)
- 3 Sessile drop (SD)
- 4 probe material

$$N_f = k_1 (1/\varepsilon_t)^{-k_2} \quad (7)$$

که در آن:

N_f : تعداد بارگذاری

k_1 و k_2 : ضرایب مربوط به خصوصیات مخلوط آسفالتی مورد نظر می‌باشد [۱۷].

۵- نتایج و بحث

۵-۱- آزمایش انرژی آزاد سطحی

۵-۱-۱- قیرها

برای اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر در روش قطره‌چسبنده، ابتدا باید زاویه تماس سه مایع آزمایش با قیر مورد نظر اندازه‌گیری شود. برای اینکه بتوان مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر را از روی زوایای تماس با مایع‌های آزمایش تعیین کرد، باید از مایع‌هایی استفاده نمود که مولفه‌های انرژی آزاد سطحی آن‌ها معلوم باشد. معمولاً برای اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی با روش زاویه تماس از یک ماده قطبی، یک ماده غیرقطبی و یک ماده نیمه‌قطبی استفاده می‌شود که این مواد در این پژوهش به ترتیب آب، دی‌یدومتان و اتیلن‌گلیکول بوده‌اند. مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع‌های آزمایش مورد نظر در این پژوهش در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع‌های آزمایش مورد استفاده در آزمایش قطر چسبنده

Table 4. SFE of solvent liquids used in the contact angle method

نوع مایع آزمایش	انرژی آزاد سطحی (mJ/m ²)			
	مولفه کل، Γ	مولفه قطبی، Γ^{LW}	مولفه قطبی، Γ^{AB}	مولفه اسیدی، Γ^+ بازی، Γ^-
آب	۷۲/۸	۲۱/۸	۵۱	۲۵/۵
دی‌یدومتان	۵۰/۸	۵۰/۸	۰	۰
اتیلن‌گلیکول	۴۸/۲۹	۲۹	۱۹/۲۹	۳

پوشش‌دهی یکی از توانایی‌های مایع‌ها در تماس با سطح جامد می‌باشد که با زاویه تماس ارتباط دارد. این پارامتر در نتیجه تماس دو ماده که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. اگرچه این مفهوم معنای متفاوتی با چسبندگی دارد اما براساس نظر بعضی پژوهشگران می‌تواند شرایط لازم برای ایجاد چسبندگی مناسب را فراهم کند. هر چه زاویه تماس جسم مایع بر روی سطح جامد کمتر باشد نشان دهنده این است که

۲۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم‌شده، انجام گرفته است. در نهایت زوایای تماس با مایع‌های آزمایش مختلف با استفاده از روابط کار چسبندگی برای تعیین مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با انجام آزمایش ذکر شده برای هر نوع قیر با سه نوع مایع آزمایش مختلف می‌توان سه رابطه مانند رابطه ۶ تشکیل داد که اندیس L نشان‌دهنده مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع آزمایش است که معلوم هستند. زاویه تماس نیز از آزمایش قطره چسبیده به دست می‌آید. سه مولفه انرژی آزاد سطحی با اندیس S مجهول هستند که اگر سه بار با مایع آزمایش‌های مختلف این آزمایش تکرار شود، سه رابطه بدست می‌آید که در آنها سه مجهول مشترک وجود دارد که با حل همزمان این سه رابطه این سه مجهول به دست می‌آیند.

$$W_{S,V}^a = -2[(\Gamma_S^{LW} \Gamma_V^{LW})^{0.5} + (\Gamma_S^+ \Gamma_V^-)^{0.5} + (\Gamma_S^- \Gamma_V^+)^{0.5}] \quad (6)$$

جزئیات بیشتر در زمینه اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها و قیرها خارج از هدف این پژوهش می‌باشد و می‌تواند در سایر مراجع قابل دسترسی باشد [۱۵ و ۱۶].

۴-۳- آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش توسط آزمایش کشش غیرمستقیم بدست آمده است. گسیختگی به وسیله اندازه‌گیری میزان تغییر شکل عمودی نمونه تعیین می‌شود و معیار خستگی، گسیختگی یا ایجاد جابجایی قائم برابر با ۱۲/۷ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) می‌باشد [۱۷].

آزمایش خستگی معمولاً به دو صورت بارگذاری با تنش ثابت و کرنش ثابت انجام می‌گیرد که در این پژوهش از روش تنش ثابت استفاده شده است. در آزمایش با تنش ثابت، کرنش با تعداد پالس‌های بارگذاری افزایش می‌یابد. با داشتن کرنش کششی معین برای هر میزان از تنش می‌توان رابطه بین کرنش کششی و تعداد سیکل‌های منجر به شکست را رسم کرد. بارگذاری به صورت شبه سینوسی با فرکانس ۲ هرتز (۰/۱ ثانیه بارگذاری و ۰/۴ ثانیه استراحت) و سطح تنش بر اساس شکست نمونه در ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تکرار بارگذاری انتخاب شده و به نمونه‌ای به قطر ۱۰/۶ میلی‌متر، ارتفاع ۴۰ میلی‌متر اعمال می‌شود.

در این پژوهش آزمایش خستگی تحت تنش ۶۰۰ کیلو پاسکال و در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است. عمر خستگی یک نمونه آسفالتی به کرنش کششی در نمونه‌های بارگذاری شده بستگی دارد. هنگامی که در مقیاس لگاریتمی، مقدار کرنش کششی نمونه‌ها در برابر تعداد سیکل بارگذاری ترسیم گردد، رابطه خطی بین این دو پارامتر بدست می‌آید. پیش‌بینی عمر خستگی با استفاده از آنالیز رگرسیون توسط رابطه ۷ انجام می‌شود.

جدول ۶: مولفه‌های انرژی آزاد سطحی دو نوع قیر

Table 6. SFE Components of the two types of Asphalt Binders

انرژی آزاد سطحی (mJ/m ²)					نوع قیر
مولفه کل، Γ	مولفه غیر قطبی، Γ^{LW}	مولفه قطبی، Γ^{AB}	مولفه اسیدی، Γ^+	مولفه بازی، Γ^-	
۱۴/۳۵	۱۳/۲۰	۱/۱۵	۲/۷۸	۰/۱۲	۶۰-۷۰
۱۵/۸۹	۱۳/۶۹	۲/۲۰	۲/۵۸	۰/۴۷	۸۵-۱۰۰

۱- ۲- سنگدانه‌ها

برای اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها حداقل سه مایع آزمایش که مولفه‌های انرژی آزاد سطحی آن‌ها معلوم است، مورد نیاز است تا با حل همزمان سه معادله نظیر رابطه ۵ مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه مورد نظر به دست آید. معمولاً برای اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی در آزمایش دستگاه جذب جهانی از سه مایع آزمایش با قطبیت‌های مختلف استفاده می‌شود که در این پژوهش آب، فرمامید و گلیسرول به ترتیب مایع‌های قطبی، نیمه‌قطبی و غیرقطبی در نظر گرفته شده‌اند که مولفه‌های انرژی آزاد سطحی آن‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۷: مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع‌های آزمایش مورد استفاده در آزمایش دستگاه جذب جهانی

Table 7. SFE of solvent liquids used in the USD method

انرژی آزاد سطحی (mJ/m ²)					نوع مایع آزمایش
مولفه کل، Γ	مولفه غیر قطبی، Γ^{LW}	مولفه قطبی، Γ^{AB}	مولفه اسیدی، Γ^+	مولفه بازی، Γ^-	
۷۲/۸	۲۱/۸	۵۱	۲۵/۵	۲۵/۵	آب
۶۴	۳۴	۳۰	۳/۹۲	۵۷/۴	گلیسرول
۵۸	۳۹	۱۹	۲/۲۸	۳۹/۶	فرمامید

جدول ۸: مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سه نوع سنگدانه

Table 8. SFE Components of three types aggregate

انرژی آزاد سطحی (mJ/m ²)					نوع سنگدانه
مولفه کل، Γ	مولفه غیر قطبی، Γ^{LW}	مولفه قطبی، Γ^{AB}	مولفه اسیدی، Γ^+	مولفه بازی، Γ^-	
۳۵۸/۴۸	۷۵/۹۰	۲۸۲/۵۸	۴۴/۵۰	۴۴۸/۵۹	گرانیت
۲۸۶/۹۹	۵۷/۴۰	۲۲۹/۵۹	۲۳/۱۹	۵۶۸/۲۴	سنگ آهک
۳۳۱/۵۸	۶۱/۳۰	۲۷۰/۲۸	۴۷/۳۰	۳۸۶/۱۰	کوارتزیت

قابلیت پوشش‌دهی آن ماده بهتر است. معمولاً زوایای تماس کمتر از ۹۰ درجه را به‌عنوان پوشش‌پذیری خوب و زوایای تماس بزرگتر از ۹۰ درجه را به‌عنوان پوشش‌پذیری ضعیف در نظر می‌گیرند. همانطور که از داده‌های جدول ۵ مشاهده می‌شود، مایع‌های آزمایش روی قیر ۸۵-۱۰۰ دارای زاویه تماس‌های کوچکتری در مقایسه با قیر ۶۰-۷۰ هستند. این رخداد مورد انتظار بود، زیرا قیرهای با درجه نفوذ بیشتر دارای قابلیت روانی بیشتری هستند که این پارامتر می‌تواند در پوشش‌پذیری موثر باشد. البته ساختار قیر و نوع مایع مورد استفاده در تعیین پوشش‌دهی تعیین‌کننده است.

جدول ۵: زاویه تماس بین مایع‌های آزمایش و دو نوع قیر (درجه)

Table 5. The contact angle between the solvent liquids and the two types of asphalt binders, (degree)

نوع قیر	نوع مایع آزمایش	
	آب	دی‌یدومتان
۶۰-۷۰	۱۰۴/۶۹	۸۸/۸۸
۸۵-۱۰۰	۱۰۱/۹۸	۸۷/۸۱

مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش براساس زوایای تماس ارائه‌شده در جدول ۵ و رابطه ۶ محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است.

انرژی آزاد کل پارامتری با تاثیر دوگانه به شمار می‌آید زیرا افزایش آن سبب بهبود مقاومت در برابر خرابی خستگی از نوع پیوستگی شده که یک اثر مثبت در کاهش گسیختگی پیوستگی به شمار می‌آید و از طرفی باعث کاهش در پوشش‌پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه می‌شود که برای ایجاد چسبندگی مناسب بین قیر-سنگدانه نامطلوب است. زیرا افزایش در پوشش‌پذیری سبب می‌شود تا سطح تماس بیشتری از سنگدانه توسط قیر پوشش داده شود که می‌تواند به موثر بودن چسبندگی مناسب بین قیر و سنگدانه کمک کند.

نتایج اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد که قیر ۸۵-۱۰۰ دارای انرژی آزاد سطحی کل بیشتری در مقایسه با قیر ۶۰-۷۰ است که باعث می‌شود تا این قیر گسیختگی پیوستگی کمتری را در مقایسه با قیر ۶۰-۷۰ تجربه کند.

همانطور که از داده‌های ارائه‌شده در جدول ۶ مشخص است، مولفه قطبی قیر در مقایسه با مولفه غیرقطبی آن بسیار کوچک است. حتی دیده شده‌است، در بعضی از تحقیقات مولفه قطبی قیر برابر با صفر محاسبه شده است [۱۹]. براین اساس می‌توان گفت قیر یک ماده با خصوصیات قطبی ضعیف است که پیوند آن با سایر مواد نیز عمدتاً از طریق مولفه غیرقطبی و پیوندهای کوالانسی می‌باشد. در کل می‌توان گفت قیر ۶۰-۷۰ نسبت به قیر ۸۵-۱۰۰ رفتار قطبی بیشتری از خود نشان داده است.

بزرگتری در مقایسه با سنگدانه‌های گرانیته و کوارتزیتی هستند. مساحت سطح ویژه بزرگتر علاوه بر اینکه باعث افزایش انرژی مورد نیاز برای از بین بردن چسبندگی می‌شود، سبب ایجاد نیروی قفل‌وبست سنگدانه‌ای بهتر نیز می‌شود که باعث مقاومت بهتر مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌های خستگی می‌شود.

جدول ۹: مساحت سطح ویژه سه نوع مصالح سنگی

Table 9. Specific surface area of three types aggregate

نوع سنگدانه	نوع مایع آزمایش		
	آب	گلیسرول	فرمامید
گرانیت	۱/۹۸	۱/۸۳	۱/۹۲
سنگ‌آهک	۲/۲۶	۲/۲۷	۲/۱۶
کوارتزیت	۱/۷۹	۱/۸۳	۱/۸۷

انرژی آزاد پیوستگی قیرهای ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ بترتیب برابر mJ/m^2 ۲۸/۷۰ و ۳۱/۷۸ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود انرژی آزاد پیوستگی قیر ۱۰۰-۸۵ در مقایسه با قیر ۷۰-۶۰ $۱۰/۷۳$ درصد بیشتر است که این مطلب نشان‌دهنده این است که مقاومت این قیر در برابر ترک‌خوردگی در غشای قیری بیشتر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از افزایش مقاومت قیر در برابر ترک‌خوردگی که با افزایش در انرژی آزاد پیوستگی قیر به دست می‌آید ناشی از مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیر است و مولفه اسیدی-بازی نقش چندانی در بهبود یا تضعیف مقاومت قیر در برابر گسیختگی از نوع پیوستگی ندارد. در واقع مولفه‌های قطبی بیشتر بر روی میزان چسبندگی قیر-سنگدانه می‌توانند مفید باشند.

نتایج انرژی آزاد سطحی ترکیبات مختلف قیر و سنگدانه در جدول ۱۰ ارائه شده است. با مقایسه بین انرژی آزاد چسبندگی هریک از سنگدانه‌ها و دو نوع قیر می‌توان دریافت که نوع قیر تاثیر چندانی بر انرژی آزاد چسبندگی نداشته است و نتایج ارائه‌شده برای هر دو نوع قیر مورد استفاده مشابه یکدیگر بوده است. در مورد نمونه‌های ساخته‌شده با قیر ۷۰-۶۰ می‌توان گفت که نمونه‌های این گروه در مقایسه با با نمونه‌های مشابه ساخته‌شده با قیر ۱۰۰-۸۵، به ترتیب برای سنگدانه‌های گرانیته، سنگ‌آهک و کوارتزیت دارای ۲/۲۴، ۱ و ۲/۶۰ درصد مقدار انرژی آزاد چسبندگی ضعیف‌تری دارند. همچنین مقدار انرژی آزاد چسبندگی کل (انرژی آزاد چسبندگی ضرب در مساحت سطح ویژه سنگدانه) در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌آهک در مقایسه با دو نوع سنگدانه گرانیته و کوارتزیتی بیشتر است.

همانطور که از داده‌های این جدول مشخص است انرژی آزاد کل سنگدانه‌ها از ۲۸۶/۹۹ تا ۳۵۸/۴۸ (mJ/m^2) متغیر است. همانطور که در قبل بدان اشاره شد، خرابی خستگی در دو حالت ظاهر می‌شود. حالت اول گسیختگی در قشای قیری است که به انرژی آزاد پیوستگی قیر ارتباط دارد و حالت دوم گسیختگی در سطح تماس قیر-سنگدانه است که به انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه مربوط است که این پارامترها با استفاده از مولفه‌های اسیدی، بازی و غیرقطبی دو ماده قیر و سنگدانه به دست می‌آیند. براین اساس می‌توان گفت نقش انرژی آزاد کل سنگدانه در این دو نوع گسیختگی مشهود نیست. در واقع این انتظار وجود ندارد که گسیختگی در حجم سنگدانه رخ بدهد و در تئوری‌های ارائه‌شده برای چسبندگی توجهی به انرژی آزاد کل جسم جامد (سنگدانه) نشده است. البته باید توجه داشت، مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند، به صورت مستقیم در چسبندگی بین سنگدانه-قیر تاثیر می‌گذارد.

مفاهیم ارائه‌شده در تئوری‌های اتصال شیمیایی که براساس اندازه‌گیری درجه اسیدیته نتیجه‌گیری می‌کنند، بیان می‌کنند که اتصال‌های قوی معمولاً هنگامی شکل می‌گیرد که یک ماده اسیدی و یک ماده بازی در تماس با یکدیگر باشند. براین اساس انتظار وجود دارد که چسبندگی مناسب در حالتی که دو ماده اسیدی یا بازی در تماس با هم هستند، ایجاد نشود. در واقع می‌توان گفت هر چه درجه اسیدیته دو ماده بیشتر با هم اختلاف داشته باشد (یک ماده بازی قوی با یک ماده اسیدی قوی)، قدرت اتصال بیشتر می‌شود. 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 [۱۸]. بنابراین می‌توان گفت که سنگدانه‌های بازی می‌توانند اتصال بهتری نسبت به سنگدانه‌های اسیدی با این ماده برقرار کنند.

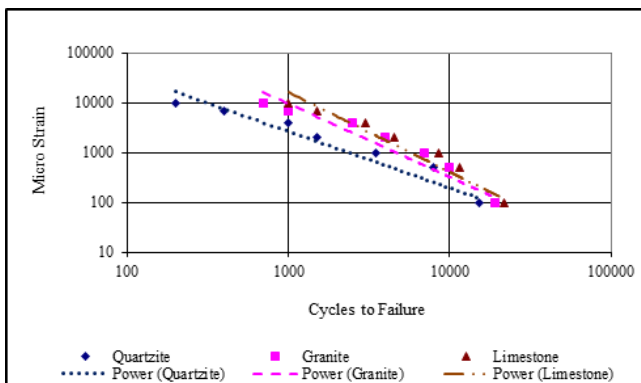
از طرف دیگر عموماً سنگدانه‌ها خصوصیات غیرقطبی ضعیفی دارند و بیشتر خصوصیات آنها قطبی است. همانطور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، سنگدانه‌های گرانیته و کوارتزیت دارای مولفه غیرقطبی به مراتب کوچکتری (قطبیت بیشتر) در مقایسه با سنگ‌آهک هستند. در نتیجه خصوصیات غیرقطبی بیشتر سنگدانه‌های آهک موجب افزایش چسبندگی آنها با قیر که یک ماده غیرقطبی است می‌شود.

۵-۱-۳- پارامترها

در این پژوهش در خلال اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه با استفاده از آزمایش دستگاه جذب‌جهانی، مقدار مساحت سطح ویژه سنگدانه مورد بررسی نیز بدست آمد. باتوجه به اینکه برای هر سنگدانه سه مقدار مساحت سطح ویژه به دست می‌آید، از مقدار میانگین حسابی این سه عدد استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مساحت سطح ویژه سنگدانه‌های مختلف در جدول ۹ ارائه شده است. سنگدانه‌های سنگ‌آهک با توجه به خلل و فرج سطحی که دارند، دارای مقادیر مساحت سطح ویژه

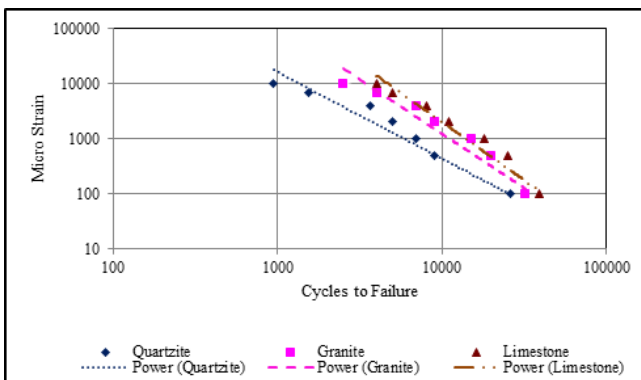
یکسانی نیز دارند، افزایش در مقاومت در نمونه‌های با سنگدانه‌های مشابه را می‌توان تنها به تفاوت در عملکرد نوع قیر و یا سازگاری بین قیر-سنگدانه نسبت داد. استفاده از قیر ۸۵-۱۰۰ باعث شده است تا انرژی آزاد پیوستگی بیشتری در قیر ایجاد شود و در نتیجه احتمال رخداد خرابی در فضای ماستیک کاهش یابد.

همچنین استفاده قیر ۸۵-۱۰۰ میزان انرژی چسبندگی بیشتری بین قیر-سنگدانه ایجاد می‌کند که این مطلب سبب می‌شود تا مقدار انرژی بیشتری برای جداشدگی قیر از سطح سنگدانه و رخداد خرابی از نوع گسیختگی چسبندگی مورد نیاز باشد.



شکل ۳: مقایسه رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰

Fig. 3. Fatigue behavior of the different mixes for asphalt binder 60-70



شکل ۴: مقایسه رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰

Fig. 4. Fatigue behavior of the different mixes for asphalt binder 85-100

جدول ۱۰: مقادیر انرژی آزاد چسبندگی ترکیبات مختلف از قیر و سنگدانه

Table 10. Surface free energy of adhesion

نوع سنگدانه	نوع قیر	انرژی آزاد چسبندگی (mJ/m ²)
گرانیت	۶۰-۷۰	۱۳۸/۵۵
	۸۵-۱۰۰	۱۴۱/۶۶
سنگ‌آهک	۶۰-۷۰	۱۳۷/۸۸
	۸۵-۱۰۰	۱۳۹/۲۵
کوارتزیت	۶۰-۷۰	۱۲۷/۱۸
	۸۵-۱۰۰	۱۳۰/۴۹

۵-۲- آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

در شکل‌های ۳ و ۴ به مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خستگی بر روی نمونه‌های آسفالتی حاوی ترکیبات متفاوت سنگدانه-قیر پرداخته شده است. در این شکل‌ها، خطوط رگرسیون از میان نمونه‌ها در هر سطح کرنش رسم شد. نتایج حاصله یک رابطه خطی مناسب بین لگاریتم کرنش کششی و لگاریتم عمر خستگی را نشان می‌دهد. همچنین معادله خستگی، مقادیر k_1 و k_2 و ضرایب همبستگی مربوط به هر یک از مخلوط‌ها در جدول ۱۱ آورده شده است. در حالت کلی با مقایسه بین عمر خستگی نمونه‌های ساخته شده با هر دو نوع قیر مورد استفاده در این پژوهش می‌توان گفت که سنگدانه‌های گرانیتی و سنگ‌آهک از نظر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی رفتار مشابه و بهتری در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه کوارتزیتی دارند. با توجه به دانه‌بندی مشابه برای سنگدانه هر سه گروه، می‌توان گفت دلیل نزدیک بودن مقدار عمر خستگی به این دلیل است که در استفاده از سنگدانه‌های گرانیتی مقاومت فیزیکی سنگدانه‌ها بهتر بوده است اما در استفاده از سنگدانه‌های سنگ‌آهک چسبندگی مخلوط (انرژی آزاد چسبندگی ضرب در مساحت سطح ویژه سنگدانه) بهتر بوده است که باعث شده رفتار مقاومتی نمونه‌های این دو گروه تقریباً مشابه باشد.

همانطور که در بخش قبل بدان اشاره شد مساحت سطح ویژه سنگدانه سنگ‌آهک و کوارتزیت به ترتیب بیشترین و کمترین است که این پارامتر علاوه بر افزایش نیروی چسبندگی، می‌تواند سبب ایجاد قفل‌وبست بهتر در جهت ایجاد مقاومت بهتر در مخلوط‌های با سطح ویژه بالاتر شود. بنابراین از آنجاییکه سنگدانه‌های کوارتزیتی در مقایسه با سنگدانه‌های سنگ‌آهک و گرانیتی هم از مقاومت سنگدانه‌ای و هم از نظر چسبندگی با قیر در سطح پایین‌تری هستند در نتیجه دارای عمرخستگی کمتری می‌باشند.

همچنین همانطور که مشاهده می‌شود مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ دارای عمرخستگی بیشتری در مقایسه با مخلوط‌های حاوی قیرهای ۶۰-۷۰ می‌باشند. با توجه به اینکه نوع سنگدانه‌های مورد استفاده در نمونه‌های ساخته شده با هر دو نوع قیر یکسان است و طبیعتاً درصد شکستگی

جدول ۱۱: معادلات خستگی و ضرایب آن‌ها برای انواع مخلوط‌های آسفالتی

Table 11. Fatigue prediction equations of mixtures

ضریب همبستگی (R_2)	ضریب k_2	ضریب k_1	معادله مدل خستگی	عمر خستگی		مخلوط‌های آسفالتی	
				درصد تغییر	مقدار	نوع قیر	نوع سنگدانه
۰/۹۱۵	۱/۴۶۷	۲×۱۰۸	$N_f=2 \times 10^8 \varepsilon^{(-1.467)}$	۶۷/۲۸	۱۹۲۳۴	۶۰-۷۰	گرانیت
۰/۹۳۷	۱/۹۶۶	۹×۱۰۱۰	$N_f=9 \times 10^{10} \varepsilon^{(-1.966)}$		۳۲۱۷۴	۸۵-۱۰۰	
۰/۹۳۰	۱/۱۳۴	۷×۱۰۶	$N_f=7 \times 10^6 \varepsilon^{(-1.134)}$	۷۹/۵۴	۲۱۹۵۶	۶۰-۷۰	سنگ‌آهک
۰/۹۶۲	۲/۱۱۵	۶×۱۰۱۱	$N_f=6 \times 10^{11} \varepsilon^{(-2.115)}$		۳۹۴۲۰	۸۵-۱۰۰	
۰/۹۲۶	۱/۱۳۴	۷×۱۰۶	$N_f=7 \times 10^6 \varepsilon^{(-1.134)}$	۷۱/۳۲	۱۵۳۲۷	۶۰-۷۰	کوارتزیت
۰/۹۴۴	۱/۵۷۲	۸×۱۰۸	$N_f=8 \times 10^8 \varepsilon^{(-1.572)}$		۲۶۲۵۸	۸۵-۱۰۰	

۶- نتیجه‌گیری

در میان خرابی‌های روسازی، خرابی رطوبتی و خستگی ارتباط نزدیک‌تری با پارامترهای ترمودینامیک و انرژی آزاد سطحی دارند. براین اساس در این پژوهش سعی شده است تا شبکه مناسبی از قیر و سنگدانه تهیه شود و پارامترهای انرژی موثر آنها که در رخداد خرابی خستگی موثر هستند، اندازه‌گیری و محاسبه شوند. سپس با مقایسه این نتایج با خروجی‌های آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم به بررسی تاثیر این پارامترها بر روی خرابی خستگی پرداخته شود. در این قسمت مهم‌ترین نتایج حاصل شده از پژوهش حاضر آورده شده است:

۱. نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های سنگ‌آهک با داشتن چسبندگی مناسب و مساحت سطح ویژه بالا دارای بالاترین عمرخستگی در مقایسه با نمونه‌های ساخته‌شده با سایر سنگدانه‌ها می‌باشند.
۲. سنگ‌آهک در مقایسه با سنگدانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی دارای انرژی آزاد قطبی کمتری می‌باشد. در نتیجه این مشخصه موجب چسبندگی بیشتر بین این سنگدانه با قیر که یک ماده غیرقطبی است می‌شود.
۳. چسبندگی در نمونه‌های حاوی سنگدانه کوارتزیت به علت داشتن خصوصیات بالای اسیدی پایدار نیست.
۴. سنگدانه‌های گرانیتی با وجود داشتن انرژی آزاد چسبندگی بیشتر، عملکرد ضعیف‌تری در مقایسه با سنگدانه‌های آهکی داشته‌اند. مهم‌ترین دلیل این رخداد را می‌توان بیشتر بودن مساحت سطح ویژه سنگدانه‌های آهکی در برابر سنگدانه‌های گرانیتی دانست.
۵. قیر ۸۵-۱۰۰ دارای مقادیر انرژی آزاد پیوستگی بزرگتری در مقایسه با قیر ۶۰-۷۰ است که این مطلب نشان‌دهنده این است که مقاومت این قیر در برابر ترک‌خوردگی در غشای قیری بیشتر است.
۶. نمونه‌های ساخته‌شده با قیر ۸۵-۱۰۰ دارای مقدار انرژی آزاد

چسبندگی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های مشابه ساخته‌شده با قیر ۶۰-۷۰ می‌باشند و در نتیجه احتمال وقوع ترک‌های خستگی در سطح تماس قیر - سنگدانه برای این مخلوط‌ها کمتر است.

مراجع

- [1] Y. Huang, R.N. Bird, O. Heidrich, A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, Resources, Conservation and Recycling, 52(1) (2007) 58-73.
- [2] 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.
- [3] D. Packham, Work of adhesion: contact angles and contact mechanics, International journal of adhesion and adhesives, 16(2) (1996) 121-128.
- [4] A. Bose, Measurement of work of adhesion between asphalt and rock, Unpublished Report. Rhode Island: Department of Chemical Engineering, University of Rhode Island, (2002).
- [5] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, Using energy parameters based on the surface free energy concept to evaluate the moisture susceptibility of hot mix asphalt, Road Materials and Pavement Design, 16(2) (2015) 239-255.
- [6] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, K. Oveisi, Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA, Road Materials and Pavement Design, (ahead-of-print) (2015) 1-17.
- [7] M. Arabani, G.H. Hamed, Using the surface free energy method to evaluate the effects of polymeric aggregate

- [12] D.N. Little, A. Bhasin, A. Hefer, Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement, Transportation Research Board, 2006.
- [13] 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.
- [14] ASTM D6927-15, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures, in: ASTM 93.080.20, 2015.
- [15] A. Bhasin, Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water, Texas A&M University, 2007.
- [16] A.W. Hefer, A. Bhasin, D.N. Little, Bitumen surface energy characterization using a contact angle approach, Journal of Materials in Civil Engineering, (2006).
- [17] BSEN, Test methods for hot mix asphalt, part 24: resistance to fatigue, in: British Standard Institution 12697-24, 2012.
- [18] K.D. Stuart, Moisture damage in asphalt mixtures-a state-of-the-art report, (1990).
- treatment on moisture damage in hot-mix asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, 23(6) (2010) 802-811.
- [8] M. Arabani, G.H. Hamed, Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistrip additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt, International Journal of Pavement Engineering, 15(1) (2014) 66-78.
- [9] M. Arabani, H. Roshani, G.H. Hamed, Estimating moisture sensitivity of warm mix asphalt modified with zycosoil as an antistrip agent using surface free energy method, Journal of Materials in Civil Engineering, 24(7) (2011) 889-897.
- [10] 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.
- [11] E. Masad, V. Castelo Branco, D. Little, R. Lytton, An improved method for the dynamic mechanical analysis of fatigue failure of sand asphalt mixtures, Federal Highway Administration, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, FHWA/473630, (2006).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

A.R. Azarhoosh, F. Moghadas Nejad, Evaluating Fatigue Life of Asphalt Mixtures Using Surface Free Energy Parameters, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(2) (2018) 365-376.

DOI: 10.22060/ceej.2016.869

