

مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی رزین اپوکسی و سنگدانه‌های آهکی و سیلیسی

علمی - پژوهشی

حسین بهمنی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

حامد خانی سانجی*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: khani@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۳۲۲-۳۰۳

چکیده

در این پژوهش اثر رزین‌های اپوکسی بر مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با ترکیب قیر و سنگدانه‌های آهکی و سیلیسی با اندازه‌گیری خصوصیات انرژی آزاد سطحی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش آزمایشگاهی به کارگرفته شده روش مبتنی بر اندازه‌گیری زاویه تماس چند مایع کاوشگر و تحت عنوان روش قطره چسبیده است. تغییرات میزان قطبیت قیرها، مقاومت پیوستگی، مقاومت چسبندگی، مقاومت شکست پیوند، پارامتر انرژی مربوط به عملکرد چسبندگی و پارامتر انرژی مربوط به عملکرد ترشوندگی سطح سنگدانه توسط قیر به ازای هر ترکیب قیر و سنگدانه‌های آهکی و سیلیسی در این تحقیق به دست آمده است. نتایج نشان داد رزین‌های اپوکسی موجب افزایش قطبیت قیرها می‌شوند اما تاثیر مثبتی بر افزایش مقاومت پیوستگی قیرها ندارند. برای همه ترکیب‌های قیر-سنگدانه حاوی رزین اپوکسی مورد مطالعه عملکرد چسبندگی و ترشوندگی نسبت به ترکیب‌های حاوی قیر پایه افزایش داشته است که نشان دهنده عملکرد مناسب این افزودنی در بهبود مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است.

واژه‌های کلیدی: انرژی آزاد سطحی، قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی، مقاومت رطوبتی، سنگدانه آهکی و سیلیسی

۱- مقدمه

شکست روسازی به حساب نمی‌آید، اما منجر به تسریع چندین خرابی روسازی از جمله شیار شدن، کنده‌شدن، قیرزدگی می‌شود (Wasiuddin et al., 2007). خرابی رطوبتی منجر به ایجاد هزینه‌های زیادی برای سازمان‌های مسئول تعمیر و نگهداری راه‌ها می‌شود (al te Caro, 2008). چندین عامل در ایجاد شرایط یا جلوگیری از ایجاد خرابی رطوبتی دخیل هستند که از آن‌ها می‌توان به میزان سازگاری بین ترکیب سنگدانه و قیر همچنین به شرایط

آسیب رطوبتی از دست دادن مقاومت و سختی مخلوط‌های آسفالتی ناشی از حضور رطوبت است (al et Huang, 2009). گسترش آسیب رطوبت عموماً از طریق دو مکانیسم اصلی رخ می‌دهد: از دست رفتن چسبندگی و یا از دست دادن پیوستگی (al et Cheng, 2003). شکست چسبندگی شامل از بین رفتن چسبندگی سنگدانه و قیر اطراف آن است، در حالی که شکست پیوستگی در داخل ساختار قیر رخ می‌دهد. اگرچه آسیب رطوبتی یک حالت

بررسی می‌شود شامل تست لاتمن اصلاح شده^۲، چرخ هامبورگ^۳، تست غوطه وری مارشال (al et Huang, ۲۰۰۵). با این وجود، این رویکردها قادر به بررسی ویژگی‌های اساسی مواد برای پیش بینی قابلیت چسبندگی و ترشوندگی هر ترکیب قیر-سنگدانه نیستند (Kanitpong & Bahia, ۲۰۰۳).

یک ویژگی مهم مواد در مورد حساسیت رطوبتی ترکیبات آسفالتی، انرژی آزاد سطحی قیر^۴ و سنگدانه است. انرژی آزاد سطح این مواد را می‌توان برای تعیین مقاومت پیوستگی^۵، مقاومت چسبندگی^۶ و مقاومت شکست پیوند^۷ استفاده کرد. در روش انرژی آزاد سطحی، از خواص انرژی آزاد سطحی مواد برای ارزیابی هر دو ویژگی چسبندگی و قابلیت ترشوندگی سطح سنگدانه توسط قیر و در نتیجه حساسیت به رطوبت و احتمال عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود (Bahia & Kanitpong, ۲۰۰۳). در تحقیقات متعدد گذشته نشان داده شد که روش انرژی آزاد سطحی برای انتخاب مواد مقاوم در برابر رطوبت مناسب است (al et Aschenbrenner, ۱۹۹۵; Jones & Little, ۲۰۰۳). روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری انرژی سطحی ترکیبات آسفالتی وجود دارد. در برخی از تحقیقات، انرژی آزاد سطح قیر و اجزای سنگدانه‌ها به ترتیب با استفاده از روش صفحه ویلهلمی^۸ و دستگاه جذب جهانی (USD)^۹ اندازه‌گیری شده است (al et Amini, ۲۰۱۷). همچنین در بسیاری از مطالعات روش قطره چسبیده به خوبی به جهت اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیرها استفاده شده است. در این تحقیقات، اثر افزودنی‌ها بر مکانیسم چسبندگی قیر و سنگدانه‌ها با استفاده از روش قطره چسبیده^{۱۰} مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعات نشان داد که روش قطره چسبیده تکنیک مناسبی برای ارزیابی اثر رطوبت بر سیستم قیر-سنگدانه و ارزیابی ترکیب‌های آسفالتی با اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی است (H. al et Bahmani, ۲۰۲۲; al et Bahmani Hossein, ۲۰۲۲; Gholamzadeh & Mansourian, ۲۰۱۷). با وجود اینکه مطالعاتی در حوزه اثر رزین‌های اپوکسی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی شده‌است و این

رطوبت و زهکشی در روسازی اشاره کرد (et Mallick al, ۲۰۰۵). استفاده از افزودنی‌ها و اصلاح کننده‌های مختلف در مخلوط آسفالتی یکی از اقدامات محبوب و مقرون به صرفه‌ای است که توسط سازمان‌های حمل و نقلی برای کاهش اثرات خرابی رطوبتی اتخاذ شده است. دو فرآیند اصلی در بهبود شرایط مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی موثرند: ۱) عملکرد چسبندگی قیر و سنگدانه، ۲) عملکرد ترشوندگی و پوشش‌دهی سطح سنگدانه توسط قیر (al et Cheng, ۲۰۰۳). اگر ماده افزودنی بخواهد در بهبود خصوصیات قیر و آسفالت مورد استفاده قرار گیرد باید درصد و میزان استفاده از افزودنی در واحد وزن قیر، عوامل اقتصادی و میزان اثرگذاری فنی در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه قرار گیرد (et Sebaaly al, ۲۰۰۷). از افزودنی‌های مورد استفاده در جهت اصلاح قیرها پلیمرها هستند که با تغییر درجه عملکردی قیرها خواص آن‌ها را به ویژه در دماهای بالا بهبود می‌بخشند (al et Bhasin, ۲۰۰۶). این افزودنی‌ها با بهبود شرایط چسبندگی بین قیر و سنگدانه موجب عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی‌های رطوبتی می‌شوند (et Zhou al, ۲۰۱۷). یکی از پلیمرهایی که اخیراً به عنوان اصلاح کننده قیرها مورد توجه قرار گرفته‌است، پلیمر رزین اپوکسی به‌عنوان یک ماده ترموست است که می‌تواند حساسیت به شکست^۱ مواد آسفالتی را کاهش دهد (al et Cubuk, ۲۰۰۹)، و با موفقیت در روسازی پل‌ها، فرودگاه‌ها روسازی راه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است (Hefer, ۲۰۰۴). همچنین قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی خواص بسیار خوبی مانند پایداری در دمای بالا، مقاومت در برابر ترک در دمای پایین، مقاومت در برابر خستگی و دوام را از خود نشان داده‌است. علاوه بر این، این نوع قیر اصلاح شده برای جلوگیری از شیارشدن، قیرزدگی، ترک خوردن و پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی توصیه شده‌است (al et Cubuk, ۲۰۰۹). با این وجود اثرات این افزودنی بر مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی انواع سنگدانه کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. آسیب رطوبتی در ترکیب‌های آسفالتی معمولاً با استفاده از روش‌ها و رویکردهای مکانیکی

۲- مفاهیم انرژی آزاد سطحی

مولکول‌های بخش عمده‌ای از مواد توسط مولکول‌های دیگر احاطه شده‌اند. در نتیجه این مولکول‌ها دارای سطح بالایی از انرژی پیوند در مقایسه با مولکول‌های سطحی هستند. بنابراین کاری جهت جدا کردن مولکول‌ها و ایجاد سطح جدید باید انجام گیرد. این کار به عنوان انرژی سطحی آزاد مصالح تعریف می‌شود. انرژی آزاد سطحی (γ) به طور موفقیت آمیزی در مطالعات گذشته جهت محاسبه مقاومت پیوستگی قیرها و مقاومت چسبندگی و مقاومت شکست پیوند در سیستم قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار گرفته است (Bhasin & Little, ۲۰۰۷)

طبق تئوری (GvOC)^{۱۱} یا تئوری اسید و باز، انرژی آزاد سطحی مواد از ترکیب معادله (۱) حاصل می‌شود. که شامل یک جزء غیر قطبی یا لیفشیتر-واندروالسی^{۱۲} که با بالا نویس LW نشان داده شده است و منشا الکتروستاتیکی دارد و یک جزء قطبی که با بالانویس AB نشان داده شده است و منشا آن فعل و انفعالات اسید و باز لوئیس است.

$$\gamma^{total} = \gamma^{LW} + \gamma^{AB}$$

به مجموع این نیروهاست که با (γ^{LW}) نشان داده می‌شود. قسمت مربوط به اسید و باز از رابطه (۲) حاصل می‌گردد (Bhasin & Little, ۲۰۰۷).

$$\gamma^{AB} = 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-}$$

از انرژی آزاد سطحی به شمار می‌رود. از ترکیب روابط (۱) و (۲) انرژی آزاد سطحی یک ماده از رابطه (۳) قابل تعریف است (Bhasin & Little, ۲۰۰۷)؛

$$\gamma^{total} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-}$$

مطالعات عملکرد مطلوب این افزودنی را اثبات کردند، اما حداکثر درصد وزنی استفاده شده این افزودنی در این پژوهش‌ها ۸ درصد وزنی قیر است و در مورد اثرات درصد‌های افزودنی بالاتر نیاز به انجام تحقیقات است (al et Khani, ۲۰۲۰). در این کار پژوهشی محققان به بررسی اثرات پلیمر رزین اپوکسی بر مقاومت رطوبتی ترکیب‌های حاوی سنگدانه‌های آهکی و سیلیسی با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی پرداخته‌اند. برای این مهم قیر پایه و چهار نوع قیر اصلاح شده با ۵ تا ۲۰ درصد رزین اپوکسی به کار گرفته شد که در نهایت ۱۰ ترکیب آسفالتی حاوی هر نوع قیر و سنگدانه مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین در این مطالعه نسبت به بررسی تصاویر گرفته شده از قیرهای مورد مطالعه در ابعاد میکرو با دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته شده‌است.

(۱)

معادله ۱ نشان می‌دهد که نیروهای پراکندگی^{۱۳} و فعل و انفعالات اسید و باز مستقل از هم هستند. GVOC اشاره کرده است که نیروهای لیفشیتر-واندروالسی شامل نیروی لاندن، نیروی دو قطبی-دو قطبی و حتی نیروهای کوچکتر از نیروهای دو قطبی است. اصطلاح انرژی آزاد سطح مربوط

(۲)

که در آن (γ^+) پارامتر الکترون گیرنده قسمت اسید- باز انرژی آزاد سطحی یا پارامتر اسید لوئیس از انرژی آزاد سطحی است، و (γ^-) پارامتر الکترون دهنده قسمت اسید- باز انرژی آزاد سطحی یا پارامتر بازی لوئیس

(۳)

اگر زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه باشد اصطلاحاً گفته می‌شود که مایع جامد را خیس کرده است و این وضعیت تحت عنوان ترشوندگی و چسبندگی خوب مطرح می‌شود. اگر زاویه تماس بیش از ۹۰ درجه باشد، مایع سطح جامد را خیس نکرده و در این شرایط ترشوندگی و چسبندگی ضعیف به شمار می‌رود. بنابراین ترشوندگی کم سطح زاویه تماس بزرگی را نتیجه می‌دهد و ترشوندگی زیاد سطح زاویه تماس کوچکی را نتیجه می‌دهد.

در نتیجه، زاویه تماس یک پارامتر مهم در فرایند ترشوندگی است، که با اندازه‌گیری آن می‌توان انرژی آزاد سطحی جامد را تشخیص داد. ترشوندگی خوب برای چسبندگی مورد نیاز از انرژی آزاد سطحی کم حاصل می‌شود. رابطه بین انرژی سطحی جامد، مایع و سطح مشترک جامد و مایع، و همچنین زاویه تماس طبق معادله یانگ در رابطه (۴) بیان شده است (Bhasin & Little, ۲۰۰۷).

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L(\cos\theta)$$

مایع یا جامد در جداسازی مولکول‌های آن از یکدیگر است. بنابراین مقاومت چسبندگی (W_C) به صورت زیر در رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$W_C = 2\gamma$$

سطح مایع - جامد قبلی منجر می‌شود. مقاومت چسبندگی وابستگی ذاتی به شرایط هر دو، مایع و جامد دارد. بنابراین، تعریف برای مقاومت چسبندگی به طور مستقیم از تعریف انرژی آزاد سطحی و معادله دوپر قابل بیان است (Bhasin & Little, ۲۰۰۷):

$$W_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL} = W_a$$

مایع، (γ_S) انرژی آزاد سطحی جامد، (γ_L) کشش سطحی مایع و (γ_{SL}) انرژی آزاد سطح مشترک مایع و جامد است که با رابطه (۷) قابل تعریف است.

$$\gamma_{SL} = \left(\sqrt{\gamma_S^{LW}} - \sqrt{\gamma_L^{LW}} \right)^2 + 2(\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} + 2\sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+})$$

تمایل یک مایع برای خیس کردن یک سطح جامد که به شکل قطره با سطح جامد تماس پیدا می‌کند را ترشوندگی گویند (Bhasin & Little, ۲۰۰۷).

نظریه جذب ترمودینامیکی بیان می‌کند که چسبندگی در شرایط ترشوندگی کافی رخ می‌دهد. از این رو، صرف نظر از ماهیت پیوندهای بین دو ماده، شرط لازم برای چسبندگی خوب ترشوندگی کافی است. درجه خیس شدن یا ترشوندگی با تعادل بین نیروهای چسبندگی و پیوستگی تعیین می‌شود. یکی از روش‌های تعیین کمی ویژگی‌های مرطوب کردن سطح توسط یک مایع، اندازه‌گیری زاویه تماس (θ) قطره مایع قرار گرفته در سطح یک جامد است. زاویه تماس صفر تحت عنوان ترشوندگی کامل مطرح می‌شود و در حقیقت مایع خود به خود بر سطح جامد پخش می‌شود.

(۴)

که در آن (γ_S) انرژی آزاد سطحی جامد، (γ_{SL}) انرژی آزاد سطح مشترک مایع و جامد، (γ_L) انرژی آزاد سطحی مایع و (θ) زاویه تماس است. جاذبه بین مولکولی بین مولکول‌های مشابه را پیوستگی گویند. اساس پیوستگی یک

(۵)

مقاومت چسبندگی (W_a) نشان دهنده میزان تعامل بین مولکولی بین دو ماده است [۴۸]. چسبندگی بین یک ماده جامد و یک ماده، به صورت مقاومت مورد نیاز برای جدا کردن آن دو ماده به کار می‌رود (Bhasin & Little, ۲۰۰۷). بدین ترتیب، مقاومت چسبندگی به ایجاد سطوح جدید (به عنوان مثال، بخار-مایع و جامد-بخار)، و تخریب

(۶)

که در آن W_a مقاومت چسبندگی در حالت خشک، W_{SL} انرژی مورد نیاز برای جداسازی سطح جامد از سطح

(۷)

پارامتر بازی لوئیس از انرژی سطحی است. اصطلاحات S و L به ترتیب به جامد و مایع برمی‌گردد. رابطه بین انرژی آزاد سطحی و زاویه تماس با معادله یانگ قابل نوشتن است، با ترکیب روابط ۴ و ۶ داریم:

$$Wa = 0.5 \gamma_l (1 + \cos\theta) \quad (۸)$$

با ترکیب روابط (۶)، (۷) و (۸) با رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$Wa = 2\sqrt{\gamma_{Li}^{LW} \gamma_S^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_{Li}^+ \gamma_S^-} + 2\sqrt{\gamma_{Li}^- \gamma_S^+} \quad (۹)$$

اندازه‌گیری شود طبق رابطه ۹ مقدار انرژی آزاد سطحی قیر قابل محاسبه است (Bhasin & Little, ۲۰۰۷). مقاومت شکست پیوند (W_{aBWA}) مربوط به جایگزینی آب به جای قیر در سیستم قیر و سنگدانه است که به شکل ترکیبی از پارامترهای انرژی سطح آب، سنگدانه و قیر قابل توصیف است:

$$W_{aBWA} = 2\gamma_W^{LW} + 2\sqrt{\gamma_B^{LW} \gamma_S^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_B^{LW} \gamma_W^{LW}} - 2\sqrt{A\gamma_S^{LW} \gamma_W^{LW}} + 4 \times \sqrt{\gamma_W^+ \gamma_W^-} - 2\sqrt{\gamma_W^+ (\sqrt{\gamma_B^-} + \sqrt{\gamma_S^-})} - 2 \times \sqrt{\gamma_W^- (\sqrt{\gamma_B^+} + \sqrt{\gamma_S^+})} + 2\sqrt{\gamma_B^+ \gamma_S^-} + 2\sqrt{\gamma_B^- \gamma_S^+}$$

می‌شود. این محاسبات ۳ معادله خطی برای هر یک از قیر و سنگدانه ایجاد می‌کند. معادلات ایجاد شده اجزا مجهول انرژی آزاد قیر و سنگدانه را به دست می‌آورد. اگر سه جزء مجهول انرژی آزاد سطحی برای قیر و سنگدانه معلوم گردد، مقاومت چسبندگی قیر و سنگدانه در حضور آب از معادله ۲ قابل محاسبه است (Bhasin & Little, ۲۰۰۷).

ارتباط عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با انرژی آزاد سطحی مواد تشکیل دهنده آن، بر اساس اصول ترمودینامیکی و مکانیک شکست انجام می‌گیرد. در این بخش پارامترهایی براساس اجزای انرژی آزاد سطح معرفی می‌شود که معرف میزان حساسیت رطوبتی یک مخلوط آسفالتی متشکل از یک

که در آن (γ^{LW}) قسمت غیرقطبی یا واندروالسی انرژی سطحی، γ^+ پارامتر اسید لوئیس از انرژی سطحی و (γ^-)

که در آن پارامترهای بستر جامد مجهول شامل γ_S^{LW} ، γ_S^+ و γ_S^- هستند. بنابراین برای محاسبه مقادیر مذکور، حداقل نیاز به سه مایع با مشخصات انرژی آزاد معلوم است (γ_L^- ، γ_L^+ ، γ_L^{LW}) باید زاویه تماس هر مایع بر روی بستر جامد اندازه‌گیری شود. به عنوان مثال اگر زاویه تماس سه مایع با مشخصات معلوم انرژی سطح، بر روی بستر (۱۰)

که در آن (γ^{LW}) قسمت غیرقطبی یا واندروالسی انرژی سطحی (γ^+) پارامتر اسید لوئیس از انرژی سطحی و (γ^-) پارامتر بازی لوئیس از انرژی سطحی است و S و B، W به ترتیب مربوط به آب، قیر و سنگدانه هستند (Bhasin & Little, ۲۰۰۷). در حالی که معادله ۹ چسبندگی را در حالت خشک (سیستم دو فازه) محاسبه میکند، معادله ۱۰ محاسبه مقاومت چسبندگی را در حضور آب ممکن می‌سازد که در آن انرژی سطحی از سه قسمت از جمله آب تشکیل می‌شود. برای استفاده از زاویه تماس در پیش‌بینی مقاومت چسبندگی در حضور آب، زاویه تماس سه مایع مختلف با اجزای انرژی سطحی معلوم، با قیر و سنگدانه اندازه‌گیری

رطوبت باشد. بنابراین مقدار پارامتر انرژی حساسیت رطوبتی را تحت نام EP_1 می‌توان به شکل نسبت مقاومت یا مقاومت چسبندگی در حالت خشک (W_{ab}) به مقاومت شکست پیوند در حضور آب (W_{abw}) تعریف کرد. بنابراین از رابطه (۱۱) می‌توان مقدار این پارامتر را محاسبه کرد. هر چه مقدار پارامتر انرژی EP_1 بیشتر باشد مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت بیشتر است. بنابراین پارامتر EP_1 می‌تواند برای انواع مختلف قیر و سنگدانه بر اساس انرژی آزاد سطحی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Bhasin & Little, ۲۰۰۷).

$$ER_1 = W_{ab} / W_{abw}$$

سنگدانه به وسیله قیر پوشش قوی‌تری را بر روی سنگدانه ایجاد می‌کند. که این پوشش مانع از جذب آب توسط سنگدانه و در نتیجه جریان شدگی مخلوط آسفالتی می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که ترشوندگی خوب مقاومت شکست پیوند (W_{abw}) که مفهوم آن توانایی یا تمایل مخلوط به ضعیف شدن پیوند به دلیل حضور آب است را کاهش می‌دهد. با توجه به مطالب ذکر شده پارامتر ER_2 را می‌توان طبق رابطه (۱۲) تعریف کرد (Bhasin & Little, ۲۰۰۷).

$$ER_2 = (W_{ab} - W_{bb}) / W_{abw}$$

ترکیب قیر و سنگدانه است. دو عامل اصلی کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی چسبندگی قیر به سنگدانه و میزان پوشش پذیری قیر روی سطح سنگدانه است. بر این اساس پارامترهای انرژی که بتوانند از لحاظ عملکردی با نتایج میدانی همبستگی داشته باشند معرفی می‌شوند.]

برای اینکه مخلوطی حساسیت کمی نسبت به رطوبت داشته باشد تا حد امکان باید (W_{ab}) بزرگتری داشته باشد. با توجه به این که (W_{abw}) پتانسیل جداسازی قیر از سنگدانه را نشان می‌دهد، کاهش این پارامتر می‌تواند نشان دهنده افزایش مقاومت یک ترکیب قیر و سنگدانه در برابر

(۱۱)

با وجود اینکه EP_1 پارامتر مهمی در تعیین میزان حساسیت رطوبتی است، اما میزان ترشوندگی سنگدانه‌ها به وسیله قیر را تعیین نمی‌کند. هر چند که ترشوندگی و چسبندگی هر دو به انرژی آزاد سطحی مربوط می‌شوند، اما تعاریف عملکردی متفاوتی دارند. ترشوندگی به توانایی مواد در مرطوب سازی سطح مواد دیگر برمی‌گردد. از طرف دیگر چسبندگی انرژی مورد نیاز برای جداسازی دو ماده از هم گفته می‌شود. بنابراین زیاد بودن ترشوندگی سطح یک

(۱۲)

که در آن W_{bb} مقاومت چسبندگی قیر است.

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده در تحقیق

مقدار	استاندارد	آزمایش
۱/۰۲	ASTM D70	چگالی قیر در ۲۵ درجه سانتی گراد (گرم بر سانتی متر مکعب)
۶۶	ASTM D5	درجه نفوذ (۰/۱ میلی متر)
۵۲	ASTM D36	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
۳۲۹	ASTM D92	درجه اشتعال (درجه سانتی گراد)
۱۵۰	ASTM D2170	ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه سانتی گراد (cS)
۱۱۰	ASTM D113	کشش پذیری (سانتی متر)

سنگدانه آهکی استفاده شد. مقادیر مختلف رزین اپوکسی (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) برای تهیه قیر اصلاح شده استفاده شد. در مجموع ۱۰ نوع ترکیب آسفالتی مورد ارزیابی قرار

۳- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق پنج نوع قیر، شامل چهار نوع قیر اصلاح شده به همراه دو نوع سنگدانه یعنی سنگدانه سیلیسی و

هستند، استفاده شده است. ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌ها که با انجام آزمایش XRF حاصل شده‌است در جدول ۲ آمده است. رزین اپوکسی یکی از پلیمرهای ترموست پر کاربرد می‌باشد که به دلیل خواص خوبی چون مقاومت حرارتی و شیمیایی عالی، قدرت چسبندگی بالا به طیف وسیعی از مواد، در دسترس بودن آن به صورت جامد و مایع، خواص مکانیکی خوب، مقاومت گرمایی بالا و استحکام بالا، کاربردهای گوناگونی به خصوص در ساخت کامپوزیت‌ها دارد. از رزین‌های اپوکسی در بسیاری از زمینه‌ها شامل رنگ و پوشش سطح، چسب‌ها، قالب گیری، کفپوش‌ها استفاده می‌شود. ویژگی‌ها شیمیایی رزین اپوکسی مورد استفاده در این تحقیق جدول ۳ و شکل ۱ ذکر شده است.

گرفت. با اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی هر نوع قیر و سنگدانه، پارامترهای انرژی مرتبط با حساسیت رطوبتی هر یک از ترکیبات آسفالتی محاسبه شد و در نتیجه مقاومت رطوبتی هر قیر و ترکیب سنگدانه مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۱- مواد و مصالح

در این تحقیق قیر رایج در ایران که توسط پالایشگاه اصفهان با درجه نفوذ ۶۰ تا ۷۰ تهیه شده است مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات اصلی قیر مصرفی در جدول ۱ آمده است. همچنین از دو نوع سنگدانه یعنی سنگدانه آهکی و سیلیسی که دارای طیف قابل توجهی از ویژگی‌ها از نظر کانی‌شناسی و درجه مقاومت متفاوت در برابر رطوبت

جدول ۲. مشخصات کانی شناسی سنگدانه مورد استفاده در تحقیق

عنصر	سنگدانه آهکی (%)	سنگدانه سیلیسی (%)
K ₂ O	۰/۲	۰/۶
Fe ₂ O ₃	۰/۳۵	۰/۵
MgO	۱/۵	۰/۹
Al ₂ O ₃	۱/۲	۸/۷
SiO ₂	۱/۳	۵۵/۲
CaO	۵۵/۸	۱۱
L.O.I.	۳۹/۶	۲۳/۱

جدول ۳. مشخصات رزین اپوکسی مورد استفاده در تحقیق

ویژگی	مقدار
Viscosity (cP)	10000 – 14000
Epoxy equivalent weight (g/eq)	185 – 192
Epoxy group content (mol/100g)	0/52-0/54
Hydrolysable Chlorine (% wt)	<0/1
Non-volatile materials (% wt)	>99/3

۳-۲- آماده‌سازی قیرهای اصلاح شده

خاص تهیه شد. ابتدا قیر خالص که در دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد از قبل گرم شده بود با مقدار مشخص شده رزین

قیر اصلاح شده با افزودن درصد مشخص رزین اپوکسی شامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیر تحت یک فرآیند

شدند. پس از اتمام فرآیند اختلاط، نمونه های قیر به ترتیب در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد و سپس ۲۵ درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت و یک روز نگهداری شدند.

اپوکسی (۰، شامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیر) به مدت مشخصی از زمان اختلاط (۱۰ دقیقه) با سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه و در دمای ۱۳۰ درجه سانتی گراد مخلوط

مایع تحقیقی	γ_S^{LW} ($\mu\text{j}/\text{m}^2$)	γ_S^+ ($\mu\text{j}/\text{m}^2$)	γ_S^- ($\mu\text{j}/\text{m}^2$)	γ_S^{total} ($\mu\text{j}/\text{m}^2$)
آب مقطر	۲۱/۸	۲۵/۵	۲۵/۵	۷۲/۸
اتیلن گلیکول	۲۹	۱/۹۲	۴۷	۴۸
فرمامید	۳۹	۲/۲۸	۳۹/۶	۵۸

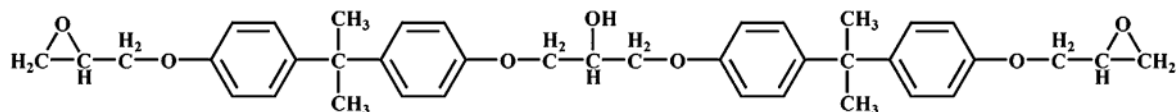
جدول ۴. اجزای انرژی آزاد سطحی مایع های کاوشگر مورد استفاده در تحقیق

۱۳۵ درجه سانتیگراد در ظرف ۵۰ میلی لیتری حرارت داده شدند. قیر گرم شده بر روی سطح اسلاید شیشه ای به ابعاد ۷۵ X ۲۵ میلی متر ریخته شد. نمونه های شیشه ای پوشیده شده با قیر در خشک کن نگهداری و تا دمای اتاق سرد شدند. برای هر یک از قیرهای مورد مطالعه، حداقل ۳ نمونه (تعداد مایع کاوشگر) تهیه شد. اسلایدهای شیشه ای قیر بین یک منبع نور و یک دوربین قرار گرفتند. یک میکرو سرنگ پر از مایع کاوشگر در بالای سطح قیر قرار داده شد و یک قطره کوچک از مایع کاوشگر از سرنگ روی سطح قیر پخش شد و تصویری از قطره با استفاده از دوربین گرفته شد. برای هر نمونه قیر، زاویه تماس حداقل سه قطره از هر مایع کاوشگر اندازه گیری شد و میانگین آنها به عنوان زاویه تماس آن مایع کاوشگر با قیر در نظر گرفته شد. مقادیر زاویه تماس در معادله زیر برای به دست آوردن اجزای انرژی آزاد سطحی قیر جایگزین می شوند (Bhasin & Little, ۲۰۰۷).

۳-۳- روش قطره چسبیده و محاسبه اجزای انرژی آزاد سطحی قیرها

روش قطره چسبیده یک روش رایج برای اندازه گیری انرژی آزاد سطح جامدات و مایعات است (Little & Bhasin, ۲۰۰۷). در این مطالعه از آن برای اندازه گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیرها استفاده شد. بر اساس این روش، انرژی آزاد سطح با استفاده از زوایای تماس سه مایع کاوشگر بر روی بستر قیر محاسبه می شود (Little & Bhasin, ۲۰۰۷). مایعات کاوشگر مورد استفاده در این مطالعه آب مقطر، اتیلن گلیکول و فرمامید بودند. این مایعات همیشه مقدار یکسانی از مقادیر اجزای انرژی آزاد سطح دارند، که می تواند برای محاسبه اجزای انرژی آزاد سطح برای سایر مواد مانند قیر، همانطور که توسط باسین و لیتل گزارش شده است، استفاده شود. اجزای انرژی آزاد سطحی مایع های کاوشگر انتخاب شده در این تحقیق برای محاسبه اجزای انرژی آزاد سطحی قیر در جدول ۴ ارائه شده است. در فرآیند روش قطره چسبیده، قیرهای تهیه شده تا دمای

$$\gamma_{Li}(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_B^{LW}\gamma_{Li}^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_B^+\gamma_{Li}^-} + 2\sqrt{\gamma_B^-\gamma_{Li}^+} \quad (13)$$



شکل ۱. فرمول شیمیایی رزین اپوکسی

بسیاری از محققان دیگر را نیز مجبور کرده است (Hossein al et Bahmani, ۲۰۲۲) انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها را از منابع معتبر انتخاب کنند. به دلیل در دسترس نبودن این ابزار، انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها (به عنوان مثال، سنگدانه آهکی و سیلیسی) به طور مستقیم در مطالعه حاضر اندازه گیری نشد، و مقادیر از منابع معتبر استفاده شده است (Bhasin & Little, ۲۰۰۷). در این مطالعه دو نوع از سنگدانه‌هایی با ویژگی‌های مختلف انرژی از آزاد سطحی (سنگدانه سیلیسی و سنگدانه آهکی) استفاده شد. اگرچه مولفه‌های انرژی آزاد سطح سنگدانه‌های مورد استفاده در روش انرژی آزاد سطحی دقیقاً مقادیر انرژی آزاد سطح سنگدانه‌های موجود نیستند، اما می‌توانند الگوی تغییرات مقادیر پارامترهای انرژی مرتبط با حساسیت به رطوبت مخلوط‌های آسفالتی را نشان دهند. جدول ۵ اجزای انرژی آزاد سطحی مصالح سنگی مورد استفاده در این مطالعه را خلاصه می‌کند.

که γ_{Li}^+ ، γ_{Li}^{LW} و γ_{Li}^- اجزای انرژی آزاد سطح مایع کاوشگر هستند و γ_B^+ ، γ_B^{LW} و γ_B^- اجزای انرژی آزاد سطحی قیر هستند. علاوه بر این γ_{Li} انرژی آزاد سطحی کل مایع کاوشگر است و θ نشان دهنده زاویه تماس بین قیر و مایع کاوشگر است. با جایگزینی مقادیر انرژی آزاد سطحی هر مایع کاوشگر در معادله (۸)، سه معادله با سه مجهول (γ_B^- و γ_B^+ و γ_B^{LW}) به دست می‌آید. با حل مجموعه این معادلات، اجزای انرژی آزاد سطح قیر مشخص می‌شود (Bhasin & Little, ۲۰۰۷).

۳-۴- اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها

بسیاری از محققان اندازه‌گیری موفقیت‌آمیز انرژی آزاد سطح سنگدانه‌ها را با استفاده از دستگاه جذب جهانی (USD) گزارش کرده بودند (Bhasin & Little, ۲۰۰۷). با این حال، در دسترس نبودن و گرانی دستگاه جذب جهانی،

جدول ۵. اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های مورد استفاده در تحقیق

نوع سنگدانه	γ_S^{LW} ($\mu\text{J}/\text{m}^2$)	γ_S^+ ($\mu\text{J}/\text{m}^2$)	γ_S^- ($\mu\text{J}/\text{m}^2$)	γ_S^{total} ($\mu\text{J}/\text{m}^2$)
سنگدانه سیلیسی	۴۸/۸	۰/۰۰	۴۱۲	۴۸/۸
سنگدانه آهکی	۴۴/۱	۲/۳۷	۲۵۹	۹۳/۶

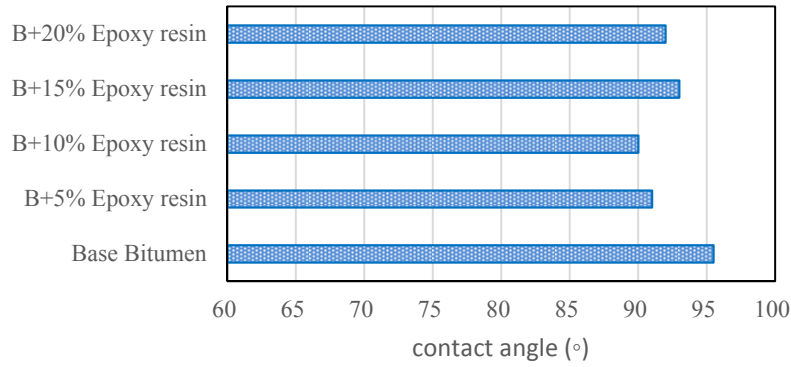
۴- تحلیل نتایج

۴-۱- زاویه تماس مایع‌های کاوشگر با قیرهای مورد مطالعه

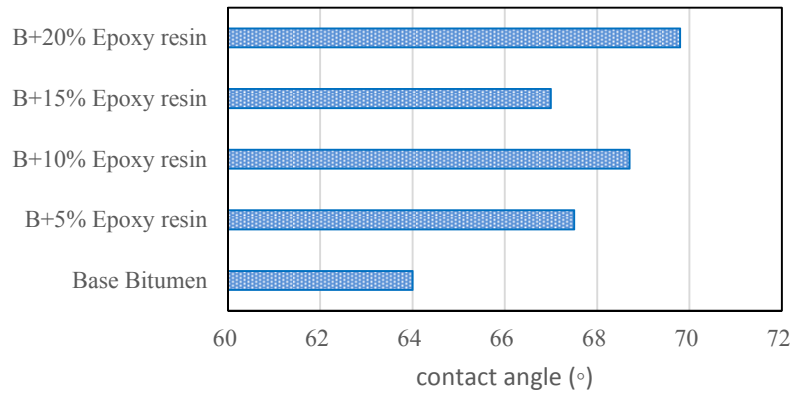
نشان‌دهنده تغییر در ویژگی‌های ترمودینامیکی و خواص فیزیکی و شیمیایی قیر ناشی از اصلاح با رزین اپوکسی است که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته می‌شود. از این اطلاعات به منظور اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد مطالعه استفاده می‌شود.

شکل ۲ زاویه تماس سه مایع کاوشگر (آب، اتیلن گلیکول و فرمامید) را با قیرها با استفاده از روش چسبیده نشان می‌دهد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، اصلاح قیر با رزین اپوکسی زاویه تماس آب را کاهش می‌دهد اما زاویه تماس اتیلن گلیکول و فرمامید را با قیر افزایش می‌دهد. این امر

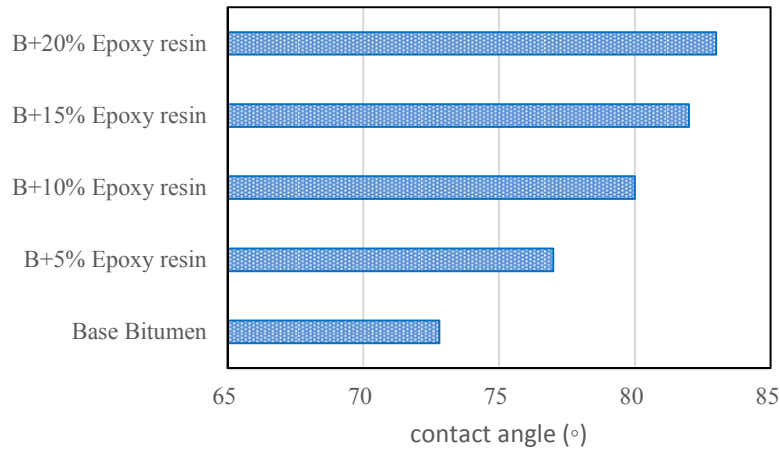
الف) آب مقطر



ب) اتیلن گلیکول



ج) فرمامید



شکل ۲. زاویه تماس مایع‌های کاوشگر با قیرهای مورد مطالعه

۲-۴- اجزای انرژی آزاد سطحی قیرها

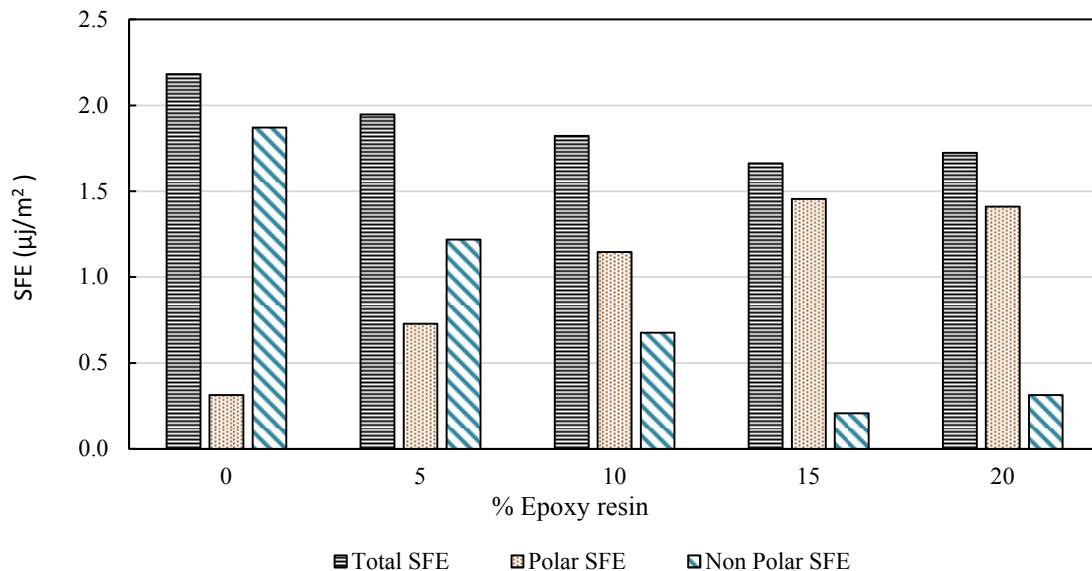
با استفاده از مقادیر زاویه تماس سه مایع کاوشگر بر روی سطح قیر، اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد مطالعه محاسبه شد. شکل ۳ تغییرات اجزای انرژی آزاد سطحی قیر را در مقابل درصد رزین اپوکسی نشان می دهد.

با توجه به نتایج، رزین اپوکسی باعث افزایش بخش قطبی انرژی آزاد سطحی قیر و کاهش بخش غیر قطبی آن می شود. بنابراین، رزین های اپوکسی قطبیت قیر را افزایش داده اند. بیشترین درجه قطبیت در قیر با رزین اپوکسی ۱۵ درصد با مقدار ۱۴/۵ میکروژول بر متر مربع و کمترین قطبیت در قیر پایه با مقدار ۲/۴ میکروژول بر متر مربع مشاهده شد. همچنین نتایج نشان می دهد که رزین اپوکسی انرژی آزاد سطحی کل قیرها را کاهش می دهد که حداقل مقدار آن به قیر با ۱۵ درصد رزین اپوکسی مربوط می شود و حداکثر مقدار آن به قیر پایه اختصاص یافته است. این اطلاعات مربوط به تغییر مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی

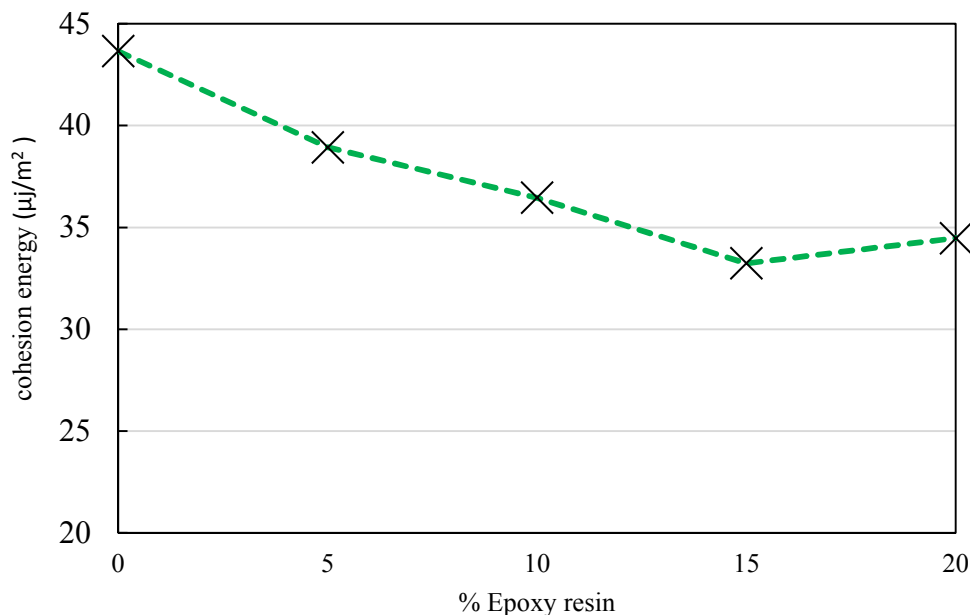
برای به دست آوردن سایر پارامترهای مربوط به عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی است.

۳-۴- انرژی پیوستگی قیرها

انرژی پیوستگی قیرها به نوعی نشان دهنده انسجام و پیوستگی قیر در مقابل انتشار و رشد ترک در ساختار آن است. شکل ۴ تغییرات انرژی پیوستگی را برای قیر با درصدهای مختلف رزین اپوکسی نشان می دهد که با معادله ۵ تعیین شده است. افزایش این پارامتر نشان دهنده افزایش مقاومت قیر در برابر رشد ترک است. با توجه به این شکل، افزودن رزین اپوکسی نمی تواند پارامتر انرژی پیوستگی را افزایش دهد. در قیرهایی با رزین اپوکسی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، انرژی پیوستگی کمتر از قیر پایه است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که رزین های اپوکسی عملکرد پیوستگی قیر را بهبود نمی بخشد.



شکل ۳. اجزای انرژی سطحی قیرهای مورد مطالعه



شکل ۴. تغییرات انرژی پیوستگی در قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی

۴-۴- مقاومت چسبندگی ترکیب قیر و سنگدانه

شکل ۵ تغییرات مقاومت چسبندگی برای ترکیب‌های حاوی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی چه در ترکیب با سنگدانه‌های آهکی و چه در ترکیب با سنگدانه‌های سیلیسی نشان می‌دهد. افزایش مقدار این پارامتر را می‌توان بهبود عملکرد رطوبتی هر ترکیب قیر و سنگدانه دانست. مطابق این شکل، رزین‌های اپوکسی موجب بهبود عملکرد مقاومت چسبندگی ترکیب‌های حاوی سنگدانه‌های آهکی و سیلیسی به جز در قیرهای حاوی ۵ درصد رزین اپوکسی می‌شوند. برای هر دو نوع سنگدانه، بیشترین مقدار مقاومت چسبندگی در حالت خشک متعلق به قیر با ۱۵ درصد رزین اپوکسی است.

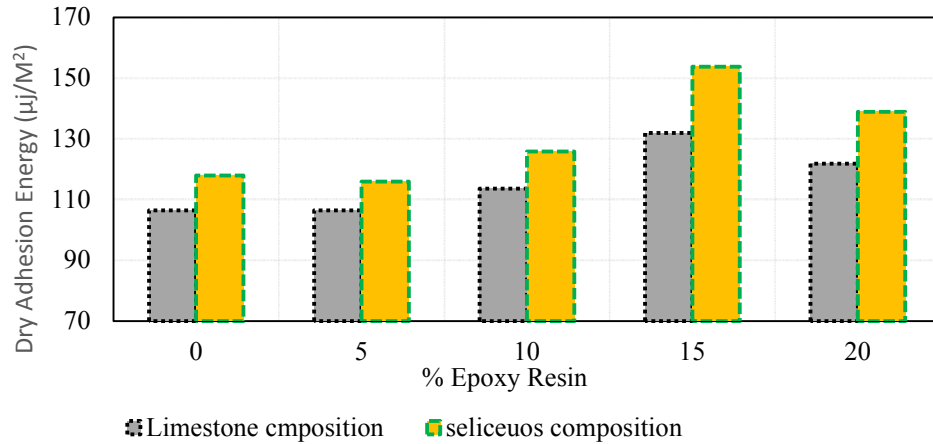
مخلوط آسفالتی حاصل از آن‌ها عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. مطابق این شکل پارامتر برای ترکیب قیرهای مورد آزمایش با سنگدانه‌های آهکی نسبت به ترکیب این قیرها با سنگدانه سیلیسی مقادیر بیشتری را از خود نشان می‌دهد. در تمامی ترکیب‌های اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی قیر با ۱۵ درصد رزین اپوکسی بهترین عملکرد را به ازای این پارامتر داشته است.

۴-۶- پارامترهای انرژی مربوط به حساسیت رطوبتی

پارامترهای انرژی EP1 و EP2 پارامترهایی هستند که با استفاده از مقادیر انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه، میزان مقاومت رطوبتی ترکیب مخلوط آسفالتی حاصل از آن‌ها را پیش‌بینی می‌کنند. پارامتر EP1 بیانگر میزان چسبندگی قیر به سنگدانه است و پارامتر EP2 میزان پوشش پذیری سنگدانه توسط قیر را مورد بررسی قرار می‌دهد.

۴-۵- مقاومت شکست پیوند ترکیب قیر و سنگدانه

در شکل ۶ تغییرات مقاومت شکست پیوند به ازای هر ترکیب قیر و سنگدانه به نمایش گذاشته است. هر چه این پارامتر مقدار مثبت‌تری به خود بگیرد تمایل سنگدانه به پوشش‌پذیری با قیر در حضور آب بیشتر است و در نتیجه

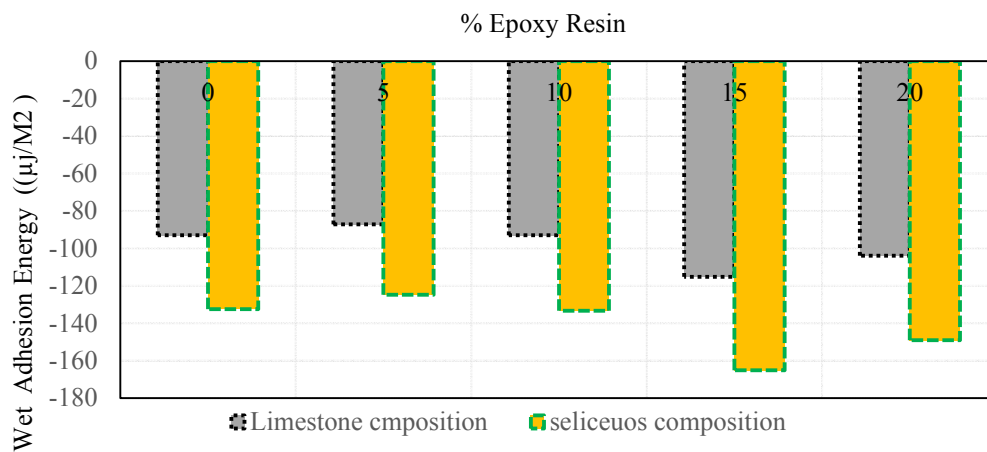


شکل ۵. تغییرات مقاومت چسبندگی برای قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی

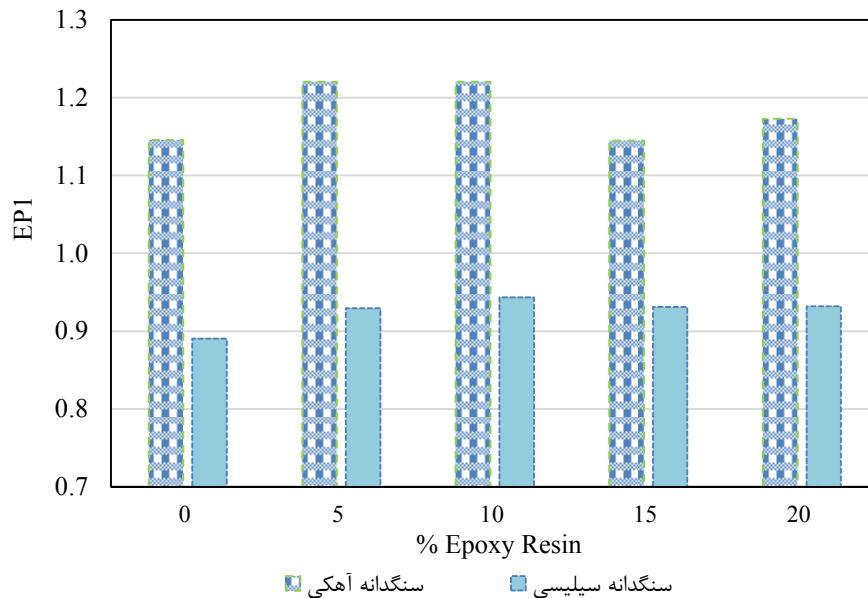
۴-۶-۱- پارامتر انرژی مربوط به عملکرد چسبندگی ترکیب قیر- سنگدانه

آهکی، قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی عملکرد چسبندگی را در مقایسه با قیر پایه افزایش می‌دهد. بهترین عملکرد چسبندگی در بین ترکیب‌های حاوی سنگدانه آهکی در قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی ۵ درصد است. اما در ترکیب‌های حاوی سنگدانه سیلیسی، قیرهای اصلاح شده با ۱۰ درصد رزین اپوکسی بهترین عملکرد چسبندگی را دارند.

شکل ۷ مقادیر پارامتر EPI را براساس درصد رزین اپوکسی موجود در قیر برای هر ترکیب از سنگدانه‌ها نشان می‌دهد. افزایش پارامتر EPI نشان دهنده افزایش و بهبود عملکرد چسبندگی بین قیر و سنگدانه است. با توجه به این شکل، روند پارامتر EPI برای ترکیبات حاوی سنگدانه‌های مختلف متفاوت است. برای تمامی قیرهای اصلاح شده برای ترکیب‌های سیلیسی و همچنین ترکیب‌های حاوی سنگدانه



شکل ۶. تغییرات انرژی شکست پیوند برای قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی



شکل ۷. تغییرات پارامتر EPI در ترکیب قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی

۴-۷- تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی

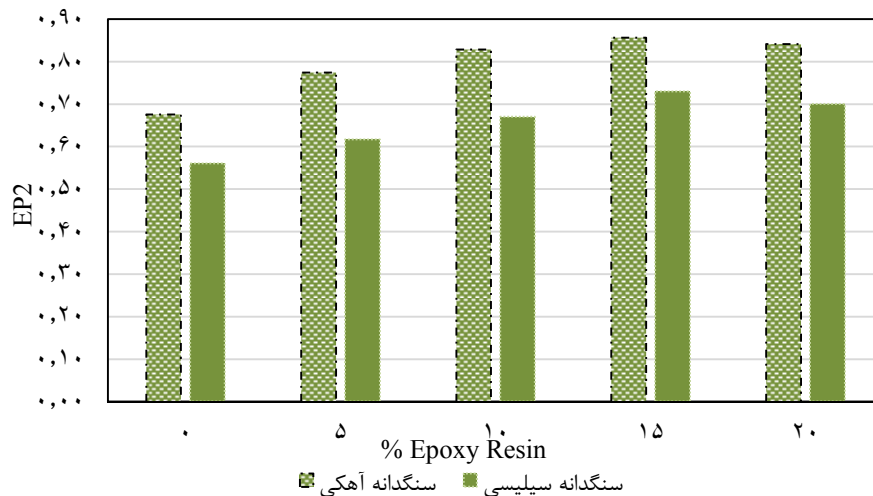
میکروسکوپ نیروی اتمی یک ابزار تصویربرداری است که به جهت مطالعه مواد و همچنین بررسی مواد دارای چند فاز مانند قیرها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. تعدادی از مطالعات پژوهشی تضاد بین فازها را در تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی در نمونه‌های پیرشده و پیر نشده مقایسه کردند و دریافتند که تضاد فازها موجب کاهش عملکرد قیر و در نتیجه کاهش توانایی آن در چسبندگی به سنگدانه‌ها می‌شود (Hou et al., 2017).

شکل ۹ تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی را برای قیرهای مورد مطالعه نشان می‌دهد. مطابق این شکل می‌توان دریافت که در نمونه‌های حاوی رزین اپوکسی تضاد بین فازها کاهش می‌یابد. در حقیقت نسبت به قیر پایه فاز تاریک روشن‌تر و فاز روشن تیره‌تر می‌شود که این نشان دهنده بهبود عملکرد قیرهای حاوی رزین اپوکسی در چسبندگی نسبت به قیر پایه است.

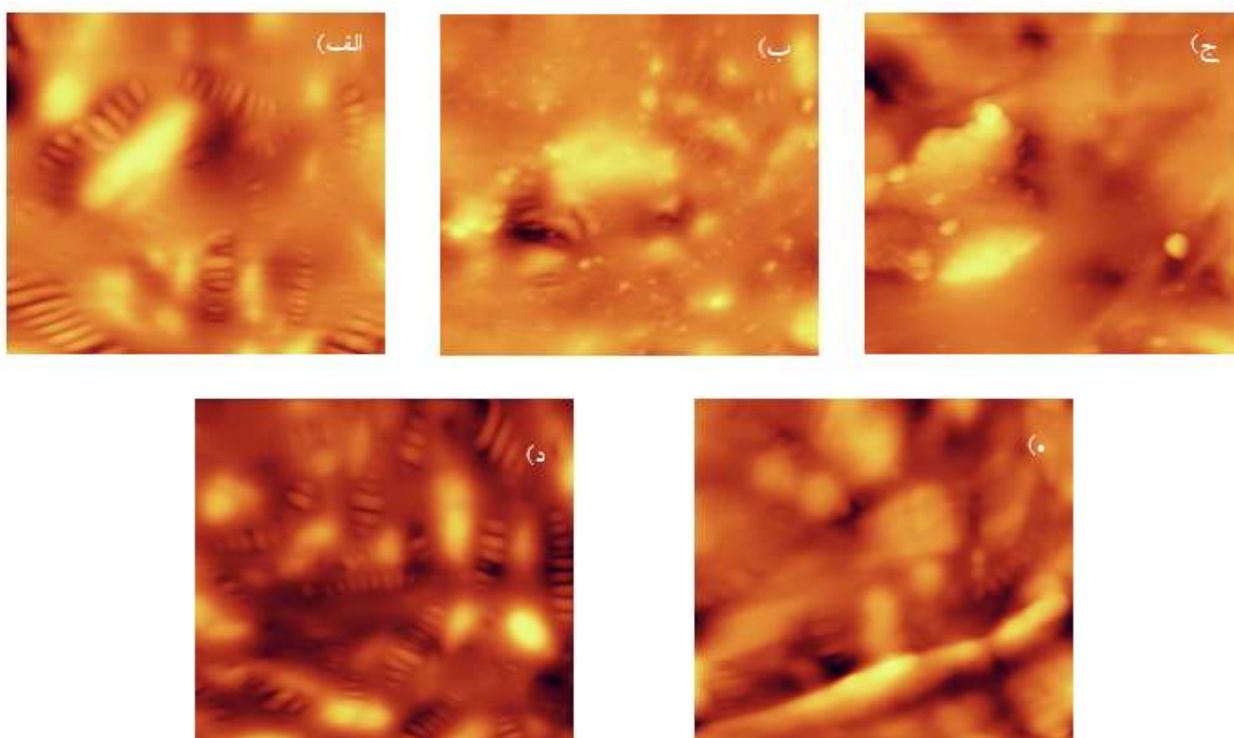
۴-۶-۲- پارامتر انرژی مربوط به عملکرد ترشوندگی

در ترکیب قیر-سنگدانه

شکل ۸ مقادیر پارامتر EP2 را بر اساس درصد رزین اپوکسی موجود در قیر برای هر ترکیب از سنگدانه‌ها نشان می‌دهد. افزایش پارامتر EP2 نشان دهنده افزایش ترشوندگی قیر در سطح سنگدانه است. در ترکیب‌های حاوی سنگدانه سیلیسی و سنگدانه‌های آهکی، پارامتر EP2 با افزودن رزین اپوکسی به قیر در مقایسه با ترکیب حاوی قیر پایه افزایش یافته است. در تمام این ترکیب‌ها، قیر با ۱۵ درصد رزین اپوکسی دارای بالاترین EP2 بهترین عملکرد چسبندگی است. بنابراین، با توجه به نتایج پارامترهای EP1 و EP2، رزین‌های اپوکسی برای ترکیبات حاوی انواع سنگدانه‌ها می‌توانند عملکرد بین قیر و سنگدانه را بهبود بخشند. بر اساس نتایج، قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی عملکرد چسبندگی و ترشوندگی را برای ترکیب‌های حاوی سنگدانه‌های سیلیسی، آهکی بهبود می‌بخشد.



شکل ۸. تغییرات پارامتر EP2 در ترکیب قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (الف) قیر پایه، (ب) قیر با ۵ درصد رزین اپوکسی، (ج) قیر با ۱۰ درصد رزین اپوکسی، (د) قیر با ۱۵ درصد رزین اپوکسی و (ه) قیر با ۲۰ درصد رزین اپوکسی

۵- نتیجه گیری

بهبود عملکرد پیوستگی قیرها ناشی از اصلاح با این افزودنی است.

برای تمامی قیرهای اصلاح شده در ترکیب‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و همچنین ترکیب‌های حاوی سنگدانه‌های آهکی، قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی مقدار پارامتر EP1 و در حقیقت عملکرد چسبندگی را در مقایسه با ترکیب‌های آسفالتی حاوی قیر پایه افزایش می‌دهد. بهترین عملکرد چسبندگی در بین ترکیب‌های حاوی سنگدانه آهکی در قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی ۵ درصد است. اما در ترکیب‌های حاوی سنگدانه سیلیسی، قیرهای اصلاح شده با ۱۰ درصد رزین اپوکسی بهترین عملکرد چسبندگی را دارند. در ترکیب‌های حاوی سنگدانه سیلیسی و سنگدانه‌های آهکی، پارامتر EP2 با افزودن رزین اپوکسی به قیر در مقایسه با ترکیب حاوی قیر پایه افزایش یافته‌است. در تمام این ترکیب‌ها، قیر با ۱۵ درصد رزین اپوکسی دارای بالاترین EP2 و در نتیجه بهترین عملکرد ترشوندگی را داراست.

در این مطالعه مقاومت رطوبتی ترکیب‌های حاوی رزین اپوکسی با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج این مطالعه را می‌توان به موارد زیر خلاصه نمود:
اصلاح قیر با رزین اپوکسی در بازه ۵ تا ۲۰ درصد زاویه تماس آب را کاهش می‌دهد. اما زاویه تماس اتیلن گلیکول و فرمامید را با قیر افزایش می‌دهد. این امر نشان‌دهنده تغییر در ویژگی‌های ترمودینامیکی و خواص فیزیکی و شیمیایی قیر ناشی از اصلاح با رزین اپوکسی است

رزین‌های اپوکسی در بازه ۵ تا ۲۰ درصد قطبیت قیر را افزایش داده‌اند. بیشترین درجه قطبیت در قیر با رزین اپوکسی ۱۵ درصد و کمترین قطبیت در قیر پایه است.

نتایج مقادیر پارامتر انرژی پیوستگی نشان می‌دهد قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی مقدار انرژی پیوستگی کمتری نسبت به قیر پایه دارند که این موضوع نشان دهنده عدم

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Fracture
2. Modified Lottman Test
3. Hamburg Wheel Tracking
4. Surface Free Energy
5. Cohesion Energy
6. Dry Adhesion Energy
7. Wet Adhesion Energy
8. Wilhelmy Plate
9. Universal Sorption Device
10. Sessile Drop Method
11. Good-Vanoss-Chaudhury
12. Lifshitz-Van Der Waals
13. Dispersive Force

۷- مراجع

-Amini, B., Rajablookat, M. J., Abdi, A., & Salehfard, R., (2017), "Investigating the influence of using nano-composites on storage stability of

modified bitumen and moisture damage of HMA", Petroleum Science and Technology, 35(8), pp.800-805.

- Aschenbrener, T., McGennis, R., & Terrel, R., (1995), "Comparison of several moisture susceptibility tests to pavements of known field performance (with discussion and closure)", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 64.
- Bahmani, H., Khani Sanij, H., Roshani, R., Majidi Shad, M. M., Hosseini, S. H., Edalati, M., Olazar, M., & Almasi, S. A., (2022), "Influence of Mixing Conditions of Modified Bitumen on Moisture Sensitivity of Asphalt Compounds", *International Journal of Engineering*, 35(5), pp.855-864.
<https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.05b.02>.
- Bahmani, H., Sanij, H. K., & Peiravian, F., (2022), "Estimating Moisture Resistance of asphalt mixture containing epoxy resin using Surface Free Energy Method and Modified Lottman test", *International Journal of Pavement Engineering*, 23(10), pp.3492-3504.
- Bhasin, A., Masad, E., Little, D., & Lytton, R., (2006), "Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage", *Transportation research record*, 1970(1), pp.2-13.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N., (2008), "Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms", *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), pp.81-98.
- Cheng, D., Little, D. N., Lytton, R. L., & Holste, J. C., (2003), "Moisture damage evaluation of asphalt mixtures by considering both moisture diffusion and repeated-load conditions", *Transportation research record*, 1832(1), pp.42-49.
- Cubuk, M., Gürü, M., & Çubuk, M. K., (2009), "Improvement of bitumen performance with epoxy resin", *Fuel*, 88(7), pp.1324-132.
- Hefer, A. W., (2004), "Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond", *Texas A&M University*.
- Hou, Y., Wang, L., Wang, D., Guo, M., Liu, P., & Yu, J., (2017), "Characterization of bitumen micro-mechanical behaviors using AFM, phase dynamics theory and MD simulation. *Materials*, 10(2), 208.
- Huang, J. F., Wu, S. P., Ma, L. X., & Liu, Z. F., (2009), "Material selection and design for moisture damage of HMA pavement", *Materials Science Forum*.
- Huang, S. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., & Claine Petersen, J., (2005), "Impact of lime modification of asphalt and freeze-thaw cycling on the asphalt-aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage", *Journal of materials in civil engineering*, 1, pp.711-718.
- Kanitpong, K., & Bahia, H., (2003), "Evaluation of the extent of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance".
- Khani, H., Bahmani, H., & Roshani, R., (2020), "Evaluating the Effect of Modified-Bitumens Mixing Temperature and Their Surface Free Energy Variations on Moisture Resistance Performance of Bitumen-Aggregates System", *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 6(1), pp.29-44.

-Little, D. N., & Bhasin, A., (2007), "Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement".

-Little, D. N., & Jones, D., (2003), "Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements", National seminar on moisture sensitivity of asphalt pavements,

-Mallick, R. B., Pelland, R., & Hugo, F., (2005), "Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt", International Journal of Pavement Engineering, 6(2), pp.125-136.

-Mansourian, A., & Gholamzadeh, S., (2017), "Moisture susceptibility of hot mix asphalt containing asphalt binder modified with nanocomposite", Road Materials and Pavement Design, 18(6), pp.1434-1447.

-Sebaaly, P. E., Little, D., Hajj, E. Y., & Bhasin, A., (2007), "Impact of lime and liquid antistripping agents on properties of Idaho hot-mix asphalt mixture", Transportation research record, 1998(1), pp.65-74.

-Wasiuddin, N. M., Fogle, C. M., Zaman, M. M., & O'Rear, E. A., (2007), "Effect of antistripping additives on surface free energy characteristics of asphalt binders for moisture-induced damage potential", Journal of testing and evaluation, 35(1), pp.36-44.

-Zhou, W., Xia, Y., Tsai, F.-C., Jiang, T., Zhao, H., & Wen, J., (2017), "Effects of compound curing agent on the thermo-mechanical properties and structure of epoxy asphalt", International Journal of Pavement Engineering, 18(10), pp.928-936.

Moisture Resistance of Asphalt Mixtures Containing Epoxy Resin Additives and Limestone and Siliceous Aggregates

Hossin Bahmani, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Hamed Khani Sanij, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

E-mail: khani@yazd.ac.ir

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

This research evaluated the effect of epoxy resins on the moisture resistance of asphalt mixtures of each bitumen and aggregate (limestone and siliceous) combination by measuring their surface free energy characteristics. The laboratory method measured the contact angle of several probe liquids called the Sessile Drop method. Bitumen polarity, cohesion energy, adhesion energy, bonding energy, energy parameter related to adhesion performance and energy parameter related to wetting performance of aggregate surface by bitumen for each combination of bitumen and limestone and siliceous aggregates were investigated. The results show that epoxy resins increase the polarity of bitumen, but they do not have a positive effect on increasing the cohesion energy of bitumen. For all the studied bitumen-aggregate compounds containing epoxy resin, the adhesion and wetting performance has increased compared to the compounds containing base bitumen, which indicates the proper performance of this additive in improving the moisture resistance of asphalt mixtures.

Keywords: Surface Free Energy, Modified Bitumen with Epoxy Resin, Moisture Resistance, Limestone and Siliceous Aggregates