

بررسی اثر رزین‌های اپوکسی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی

حسین بهمنی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

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

محسن خواجه امینیان، استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مسعود نعمت الهی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه یزد، یزد، ایران

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

دریافت: ۹۷/۰۳/۰۱ - پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵

صفحه ۵۲-۳۳

چکیده

در این مقاله اثر پلیمر رزین اپوکسی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی بررسی شده است. رزین اپوکسی بدون هاردنر و رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر در درصد وزنی ۰ تا ۵ درصد (۴.۳.۲.۱.۰ و ۵ درصد) جهت اصلاح قیر مورد استفاده قرار گرفته است. روش به کار برده شده برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی روش انرژی آزاد سطحی است. در این روش با اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیرها به روش قطره چسبیده و با استفاده از مقادیر گزارش شده از انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها، پارامترهای انرژی مربوط به حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ترکیب‌های مختلف قیر و سنگدانه مورد تحلیل قرار گرفتند. در پایان قیر پایه و قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر مورد آزمایش FTIR واقع شدند. نتایج نشان دهنده اثر مطلوب رزین‌های اپوکسی سخت شده با هاردنر بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی است. رزین‌های اپوکسی بدون هاردنر تاثیر چندانی بر ترکیب‌های آسفالتی حاوی سنگدانه آهکی نداشتند اما موجب کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های سیلیسی شدند.

واژه‌های کلیدی: رزین اپوکسی بدون هاردنر، رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر، انرژی آزاد سطحی، حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی

۱- مقدمه

کاربردشان آسان است اما هیچکدام از این آزمایش‌ها مکانیسم چسبندگی و جداسازی قیر و سنگدانه را تشریح نمی‌کنند (Bhasin and Little, 2007) (Solaimanian, Harvey and Tahmoressi, 2003). اخیراً محققان گزارش‌هایی در زمینه کاربرد انرژی آزاد سطحی^۱ قیرها و سنگدانه‌ها در تشخیص حساسیت

حساسیت رطوبتی از عوامل خرابی زودرس روسازی‌های آسفالتی است. روش‌های آزمایشگاهی زیادی نظیر آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و آزمایش شیارشدگی چرخ هامبورگ جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی ارائه شده است. اگرچه انجام این آزمایش‌ها ساده و

رنگ و پوشش سطح، چسب‌ها، قالب گیری، کپسول سازی، صنعت هواپیما سازی و کفپوش‌ها استفاده می‌شود. (Augustsson, C., ۲۰۰۴). در یک کار پژوهشی در سال ۲۰۰۸ که در دانشگاه قاضی ترکیه صورت گرفته، اثر رزین‌های اپوکسی بر کارایی بتن آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در این پژوهش از رزین اپوکسی از نوع دی گلیسیدیل اتر بیس فنل آ^۶ استفاده شده‌است. درصد رزین اپوکسی مورد استفاده در این تحقیق از ۰ تا ۶ درصد وزنی قیر است. قیر مورد استفاده دارای درجه نفوذ ۶۲ و نقطه نرمی ۴۶ درجه سانتی گراد بوده‌است. نتایج پژوهش مذکور نشان می‌دهد که با افزایش ۲ درصد رزین اپوکسی به قیر درجه نفوذ به ۵۲ کاهش می‌یابد و نقطه نرمی به ۵۲ درجه سانتی گراد افزایش پیدا می‌کند. با افزایش ۲ درصد وزنی از رزین اپوکسی به قیر، همچنین مقاومت مارشال از ۱۰۴۴ کیلوگرم برای نمونه‌های فاقد رزین به ۱۱۹۹ کیلوگرم افزایش می‌یابد (Çubuk, Gürü and Çubuk, 2009). در پژوهشی تحت عنوان "بررسی آزمایشگاهی خواص قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی" خواص قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی در درصد وزنی‌های قیر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که نسبت بهینه هاردنر در رزین اپوکسی، اثر چندانی بر خصوصیات قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی ندارد. همچنین نشان داده شده است که زمان پخت تاثیر بسزایی در عملکرد نقطه نرمی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی دارد. به طوری که با افزایش زمان پخت از ۰ تا ۶۰ دقیقه، میزان نقطه نرمی تمامی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی از ۱۰ تا ۵۰ درصد با افزایش همراه است (Yu, Cong and Wu, 2009). در پژوهشی دیگر مقاومت حساسیت رطوبتی چند مخلوط آسفالتی با استفاده از روش اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی و همچنین روش مقاومت بیرون کشیدگی^۷ مورد ارزیابی قرار گرفت و میزان همبستگی نتایج این دو روش بررسی شد. سه نوع مصالح سنگی آهکی، گرانیتی و ریولیتی، مورد استفاده قرار گرفتند.

رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی ارائه کرده‌اند. در این مطالعات انرژی آزاد سطحی سنگدانه و قیر، در پیش‌بینی انرژی چسبندگی^۸ و انرژی شکست پیوند^۹ به کارگرفته شده و پارامترهای انرژی مربوط به حساسیت رطوبتی (ER1) و (ER2) با استفاده از مقادیر این دو پارامتر اندازه‌گیری شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌است (Bhasin and Little, 2007) (Arabani, Little and Hamed, 2012) (Roshani and Hamed, 2012) (Wasiuddin et al., 2006) (Bhasin, 2006) (Apeagyei, Grenfell and Airey, 2014) (2006). اساس اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیرها اندازه‌گیری زاویه تماس است. روش قطره چسبندگی^{۱۰} روش متداولی جهت اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیرهاست که عملکرد مثبتی را از خود نشان داده‌است. در این روش زاویه تماس قطره مایع قرار گرفته بر روی سطح قیر با تصویر برداری از قطره اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از مقادیر این زاویه تماس، انرژی آزاد سطحی قیر محاسبه می‌گردد. انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها با روشی تحت عنوان USD^{۱۱} اندازه‌گیری می‌شود (Bhasin and Little, 2007). در مطالعات انجام گرفته در زمینه حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی (Wasiuddin et al., 2006) (Edwards, Tasdemir and Isacson, 2006) (Lambert, Shalaby and Enieb, 2005) (Foroutan Mirhosseini et al., 2016) تاثیر افزودنی‌های متفاوت با استفاده از روش قطره چسبندگی مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات نشان می‌دهد که می‌توان به خوبی از مفاهیم انرژی آزاد سطحی جهت انتخاب مصالح مناسب در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بهره برد. 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 طیف وسیعی از زمینه‌ها شامل

۲-۲- 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 آزاد سطحی مصالغ تعریف می‌شود. انرژی آزاد سطحی (γ) به طور موفقیت آمیزی در مطالعات گذشته جهت محاسبه انرژی پیوستگی قیرها و انرژی چسبندگی سیستم قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار گرفته است (Masad et al., 2006) (van Oss, Chaudhury and Good, 1987).

طبق تئوری اسید و باز (Pocius, 2012)، انرژی آزاد سطحی مواد از ترکیب رابطه (۱) حاصل می‌شود. این رابطه نشان می‌دهد که انرژی آزاد سطحی هر ماده از دو بخش قطبی و غیرقطبی تشکیل شده است. بخش غیر قطبی با بالانویس (LW) نشان داده شده است و منشا الکتروستاتیکی دارد. بخش قطبی با بالانویس (AB) نشان داده شده است و منشا آن فعل و انفعالات اسید و باز است.

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

بخش قطبی انرژی آزاد سطحی مربوط به فعل و انفعالات اسید و باز هر ماده از رابطه (۲) حاصل می‌گردد.

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

که در آن (γ^+) پارامتر الکترون گیرنده قسمت اسید- باز انرژی آزاد سطحی و (γ^-) پارامتر الکترون دهنده قسمت اسید- باز انرژی آزاد سطحی به شمار می‌رود. از ترکیب روابط (۱) و (۲) انرژی آزاد سطحی یک ماده از رابطه (۳) قابل تعریف است:

$$\gamma^{total} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+\gamma^-} \quad (3)$$

۳-۲- انرژی پیوستگی^۸

جاذبه بین مولکولی بین مولکول‌های مشابه یک ماده را انرژی پیوستگی گویند (Bhasin., and Little, 2007).

دو نوع قیر ۲۲-۶۴-PG و ۲۸-۵۸-PG که عموماً در مرکز و غرب آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کار برده شدند. در نهایت ۷ نوع قیر اصلاح شده با افزودنی‌های متفاوت از قیرهای پایه ذکر شده در این پژوهش آماده سازی شدند. نتایج حاصل از پژوهش مذکور نشان می‌دهد که با افزایش سختی قیرها و یا مقاومت پیوستگی آن‌ها، مقاومت بیرون کشیدگی مخلوط‌های آسفالتی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی تحت شرایط کنترل شده دما، بیانگر وابستگی نتایج حاصل از این آزمایش با انرژی چسبندگی سیستم سنگدانه و قیر است (Moraes, Velasquez and Bahia, 2017). در پژوهش حاضر اثر رزین‌های اپوکسی بدون هاردنر و رزین‌های اپوکسی سخت شده با هاردنر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های آهکی و سیلیسی بررسی شده است. برای این مهم با اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیرها به روش قطره چسبندگی و استخراج مقادیر انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها از گزارشات معتبر (Bhasin and Little, 2007) پارامترهای انرژی مربوط به حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی (ER1 و ER2) محاسبه شده و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

۲- مفاهیم انرژی آزاد سطحی

۲-۱- تئوری ترمودینامیکی

تئوری ترمودینامیکی موضوع کشش سطحی را شرح می‌دهد. اساس این تئوری این است که یک ماده به عنوان چسب بر روی یک سطح به عنوان بستر قرار می‌گیرد و چسبندگی زمانی برقرار می‌شود که نیروهای فیزیکی در سطح مشترک آن‌ها به تعادل برسند. اندازه این نیروها عموماً به مفاهیم کمی ترمودینامیک از قبیل انرژی آزاد سطحی مواد مورد استفاده مربوط می‌شود (Pocius, 2012).

$$W_c = 2\gamma \quad (۴)$$

(Reynolds, 2005). انرژی چسبندگی بین مایع و جامد وابستگی ذاتی به ویژگی‌های آن‌ها دارد. بنابراین انرژی چسبندگی دو ماده جامد و مایع به طور مستقیم از تعریف انرژی آزاد سطحی آن‌ها طبق رابطه ۵ قابل بیان است (Bhasin and Little, 2007)

۲-۵- انرژی شکست پیوند

انرژی شکست پیوند (W_{aBWA}^{wet}) مربوط به جایگزینی آب به جای قیر در سیستم قیر و سنگدانه است که به شکل ترکیبی از پارامترهای انرژی آزاد سطحی آب، سنگدانه و قیر قابل توصیف است. از رابطه ۶ جهت تعیین انرژی چسبندگی بین قیر و سنگدانه در حضور آب (انرژی شکست پیوند) استفاده می‌شود. که در آن W ، B و A به ترتیب معرف قیر، آب و سنگدانه هستند. (γ^{LW}) قسمت غیرقطبی انرژی آزاد سطحی، (γ^+) پارامتر اسیدی از انرژی آزاد سطحی و (γ^-) پارامتر بازی از انرژی آزاد سطحی است (Bhasin and Little, 2007).

۲-۶- مقادیر انرژی آزاد سطحی قیرها و سنگدانه‌ها

منابع معتبری انرژی آزاد سطحی قیرها و سنگدانه‌ها را گزارش کرده‌اند. که در این بخش به شرح این موضوع پرداخته می‌شود.

اساس پیوستگی یک مایع یا جامد در جداسازی مولکول‌های آن از یکدیگر است. بنابراین انرژی پیوستگی (W_c) به صورت زیر در رابطه (۴) تعریف می‌شود:

۲-۴- انرژی چسبندگی

انرژی چسبندگی (W_a) نشان دهنده میزان چسبندگی بین مولکولی دو ماده است (Luner, 2001). چسبندگی بین یک ماده جامد و یک ماده مایع به صورت انرژی مورد نیاز برای جدا کردن مولکول‌های آن دو ماده از هم به کار می‌رود که رابطه ۵ (θ) زاویه تماس قطره مایع با سطح جامد و (S) و (L) به ترتیب معرف جامد و مایع هستند. در رابطه فوق پارامترهای انرژی آزاد سطحی ماده جامد شامل (γ_S^+ ، γ_S^{LW} و γ_S^-) مجهول هستند. برای محاسبه مقادیر مذکور، حداقل نیاز به سه مایع با اجزای انرژی آزاد سطحی معلوم (γ_L^{LW} ، γ_L^+ و γ_L^-) است که باید زاویه تماس هر مایع بر روی سطح بستر جامد اندازه‌گیری شود. به عنوان مثال اگر زاویه تماس سه مایع با مشخصات معلوم انرژی آزاد سطحی، بر روی سطح قیری اندازه‌گیری شود طبق رابطه ۵ مقدار اجزای انرژی آزاد سطحی قیر قابل محاسبه است. با وجود مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه و قیر و با استفاده از رابطه ۵ انرژی چسبندگی قیر و سنگدانه در حالت خشک و بدون حضور آب را می‌توان بدست آورد.

در حالی که رابطه (۵) چسبندگی را در حالت خشک (سیستم دو فازه) محاسبه می‌کند، رابطه (۶) محاسبه انرژی چسبندگی را در حضور آب ممکن می‌سازد که در آن انرژی آزاد سطحی از سه قسمت از جمله آب تشکیل می‌شود (Bhasin, and Little, 2007). اگر سه جزء مجهول انرژی آزاد سطحی برای قیر و سنگدانه معلوم گردد، انرژی شکست پیوند قیر و سنگدانه در حضور آب از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$W_a = \gamma_L(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_L^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_S^+\gamma_L^-} + 2\sqrt{\gamma_S^-\gamma_L^+} \quad (۵)$$

$$W_{aBWA}^{wet} = 2\gamma_W^{LW} + 2\sqrt{\gamma_B^{LW}\gamma_A^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_B^{LW}\gamma_W^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_W^{LW}} + 4 \times \sqrt{\gamma_W^+\gamma_W^-} - 2\sqrt{\gamma_W^+(\sqrt{\gamma_B^-} + \sqrt{\gamma_A^-})} - 2 \times \sqrt{\gamma_W^-(\sqrt{\gamma_B^+} + \sqrt{\gamma_A^+})} + 2\sqrt{\gamma_B^+\gamma_A^-} + 2\sqrt{\gamma_B^-\gamma_A^+} \quad (6)$$

۲-۶-۱- انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها

انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها در حدود ۵۰ تا ۴۰۰ میکروژول بر متر مربع متغیر است. از این مقدار انرژی آزاد سطحی، میزان کمی (۳۰ تا ۶۰ میکروژول بر متر مربع) از آن به انرژی آزاد سطحی بخش غیر قطبی اختصاص دارد (Bhasin and Little, 2007). بخش قطبی انرژی آزاد سطحی که خود به دو قسمت بازی و اسیدی تقسیم می‌شود

قسمت اعظم انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها را تشکیل می‌دهد. در این بخش انرژی آزاد سطحی قسمت بازی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ میکروژول بر متر مربع و قسمت اسیدی بین ۰ تا ۱۰۰ میکروژول بر متر مربع متغیر است (Bhasin and Little, 2007). در جدول ۱ مقادیر انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی آورده شده است.

جدول ۱. مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی

نوع سنگدانه	جزء غیر قطبی (mj/m ²)	جزء قطبی بخش اسیدی (mj/m ²)	جزء قطبی بخش بازی (mj/m ²)	انرژی آزاد سطحی کل (mj/m ²)
سنگدانه سیلیسی	۴۸/۸	۰/۰۰	۴۱۲	۴۸/۸
سنگدانه آهکی	۴۴/۱	۲/۳۷	۲۵۹	۹۳/۶

۲-۶-۲- انرژی آزاد سطحی قیر

مطابق با نتایج بدست آمده (Bhasin and Little, 2007)، بخش کوچکی از انرژی آزاد سطحی را بخش قطبی و بخش اعظم آن را بخش غیر قطبی تشکیل می‌دهد. بنابراین قیر ذاتا یک ماده غیر قطبی است (Bhasin and Little, 2007).

به سنگدانه و کاهش میزان پوشش دهندگی قیر بر روی سطح سنگدانه است. بر این اساس پارامترهای انرژی که بتوانند از لحاظ عملکردی با نتایج میدانی همبستگی داشته باشند معرفی می‌شوند (Bhasin and Little, 2007).

۲-۷-۲- پارامترهای انرژی مربوط به حساسیت رطوبتی

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 سطحی مواد معرفی می‌شود که معرف میزان حساسیت رطوبتی یک مخلوط آسفالتی متشکل از یک ترکیب قیر و سنگدانه است. دو عامل اصلی کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی کاهش چسبندگی قیر

۲-۷-۱- پارامتر ERI (مربوط به میزان چسبندگی سنگدانه به قیر)

برای اینکه یک مخلوط آسفالتی حساسیت کمی نسبت به رطوبت داشته باشد تا حد امکان باید (W_a) بزرگتری داشته باشد. با توجه به این که (W_{aBWA}^{wet}) پتانسیل جداشدگی قیر از سنگدانه را نشان می‌دهد، کاهش این پارامتر می‌تواند نشان دهنده افزایش مقاومت یک ترکیب قیر و سنگدانه در برابر رطوبت باشد. بنابراین مقدار پارامتر انرژی حساسیت رطوبتی را تحت نام (ER_1) می‌توان به شکل نسبت انرژی چسبندگی

می‌تواند برای انواع مختلف قیر و سنگدانه بر اساس انرژی آزاد سطحی آن‌ها مورد محاسبه قرار گیرد (Bhasin and Little, 2007).

$$ER1 = \frac{W_a}{W_{aBWA}^{wet}}$$

ضعیف شدن پیوند به دلیل حضور آب است را کاهش می‌دهد. همچنین هر میزان که انرژی پیوستگی قیر بیشتر از انرژی چسبندگی بین قیر و سنگدانه باشد، قیر پوشش دهنده کمتری را می‌تواند بر سطح سنگدانه ایجاد کند. با توجه به مطالب ذکر شده پارامتر ER_2 را می‌توان طبق رابطه (۸) تعریف کرد (Bhasin and Little, 2007) که در آن W_{BB} انرژی پیوستگی قیر است. هر اندازه مقدار پارامتر ER_2 بزرگتر باشد مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی مقاوم‌تر است.

۳- مواد و روش تحقیق

۳-۱- مواد و مصالح مورد استفاده

قیر مورد استفاده در این پژوهش قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ پالایشگاه اصفهان است که خصوصیات اصلی آن در جدول ۲ آورده شده است.

$$ER2 = \frac{W_a - W_{BB}}{W_{aBWA}^{wet}}$$

در حالت خشک به انرژی شکست پیوند تعریف کرد. از رابطه (۷) می‌توان مقدار این پارامتر را محاسبه نمود. هر چه مقدار پارامتر انرژی (ER_1) بیشتر باشد مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت بیشتر است. بنابراین پارامتر (ER_1) (۷)

با وجود اینکه ER_1 پارامتر مهمی در تعیین میزان حساسیت رطوبتی است، اما میزان پوشش پذیری سنگدانه‌ها به وسیله قیر را تعیین نمی‌کند.

۲-۷-۲- پارامتر ER_2 (مربوط به میزان پوشش پذیری سنگدانه توسط قیر)

هر چند که پوشش پذیری یا ترشوندگی^۹ 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 را بیان می‌کند. زیاد بودن ترشوندگی سطح یک سنگدانه به وسیله قیر، پوشش قوی‌تری را بر روی سنگدانه ایجاد می‌کند که این پوشش مانع از جذب آب توسط سنگدانه و در نتیجه عریان شدن مخلوط آسفالتی می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که ترشوندگی یا پوشش‌پذیری خوب، انرژی شکست پیوند (W_{aBWA}^{wet})، که مفهوم آن توانایی یا تمایل مخلوط به (۸)

جدول ۲. ویژگی‌های قیر مورد استفاده در تحقیق

استاندارد	مقدار	نوع آزمایش
ASTM D 70	۱/۰۲	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
ASTM D5	۶۵	درجه نفوذ (برحسب دهم میلی‌متر)
ASTM D36	۵۰	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
ASTM D92	۳۲۴	درجه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)
ASTM D2170	۳۴۴	کند روانی کینماتیکی در (۱۳۵ سانتی‌گراد)
ASTM D113	۱۵۵	کشش پذیری (سانتی‌متر)

نیز توسط شرکت سازنده اعلام می‌شود (Augustsson, 2004). رزین اپوکسی مورد استفاده در این تحقیق یک نوع دی گلیسیدیل اتر بیس فنل آ^{۱۴} با نام تجاری (YD128) با وزن اکی والان ۱۹۰ گرم و وزن مخصوص ۱/۱۷ گرم بر سانتی متر مکعب متعلق به شرکت شیمیایی کوکدو^{۱۵} می‌باشد. هاردنر استفاده شده در این تحقیق یک نوع سیکلو آلفاتیک آمین^{۱۶} با نام تجاری (KH-816) ساخت شرکت شیمیایی کوکدو است. خصوصیات هاردنر مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است. طبق گزارش‌های شرکت سازنده به ازای هر ۱۰۰ گرم رزین اپوکسی ۶۰ گرم هاردنر استفاده می‌شود. زمان پخت نیز ۱ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد و ۱ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد اعلام شده است.

در شیمی واژه اپوکسی به معنای یک حلقه سه عضوی حاوی یک اتم اکسیژن و دو اتم کربن است. رزین‌های اپوکسی در حقیقت نوعی پیش پلیمر هستند که برای اعمال عملکردشان نیاز به جز دیگری به نام سخت‌کننده یا هاردنر^{۱۷} دارند. درصد ترکیب رزین اپوکسی و هاردنر آن برای رزین‌های اپوکسی مختلف متفاوت است که معمولاً از سوی شرکت سازنده اعلام می‌شود. فرایند واکنش میان رزین اپوکسی و هاردنر را پخت^{۱۱} می‌نامند. هاردنر که اغلب یک آمین^{۱۲} می‌باشد پس از اختلاط در نسبت معین با اپوکسی، از طریق واکنش افزایشی با اتصال به سر دو اپوکسی مجزا، تشکیل یک ساختمان مولکولی پیچیده سه بعدی را باعث می‌شود. مدت زمانی را که رزین اپوکسی و هاردنر تحت شرایط مشخصی به پخت کامل می‌رسند زمان پخت^{۱۳} گویند که آن

جدول ۳. مشخصات هاردنر مورد استفاده KH-816

ویژگی	مقدار
10% Naoh	۰/۴
10% H2SO4	۱/۳
Xylene	۰/۲
Ethanol	۳/۸
Water	۰/۶

۴-۲- آماده سازی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی

گرفت. سپس رزین اپوکسی طبق درصد وزنی مشخص از قیر، به قیر حاوی هاردنر اضافه شده و به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه در دمای ۱۳۰ درجه سانتی گراد مختلط مخلوط شد. پس از اتمام عمل اختلاط، نمونه‌های قیری آماده شده به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد و ۱ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نگهداری شدند تا عمل پخت و سخت شدگی رزین اپوکسی انجام گیرد. در قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر، رزین اپوکسی در درصد وزنی‌های ۱ تا ۵ درصد وزنی قیر، به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه و در دمای ۱۳۰ درجه سانتی گراد با قیر خالص مورد اختلاط قرار گرفتند.

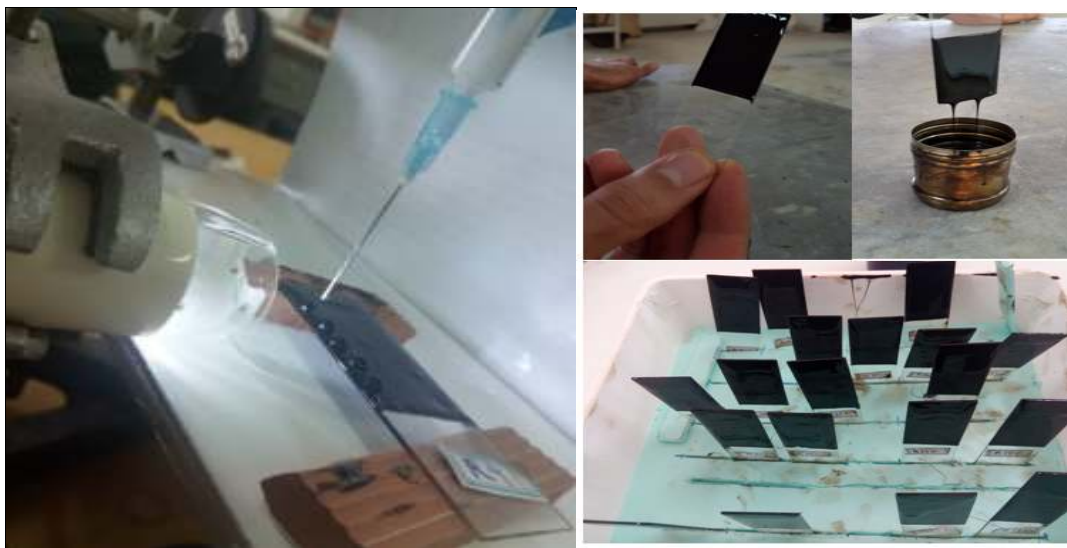
نکته مهمی که در عملکرد رزین اپوکسی و هاردنر مورد توجه است نحوه اختلاط آن‌هاست. عدم اختلاط مناسب رزین و هاردنر موجب می‌شود قسمتی از آن‌ها بدون اینکه وارد فرایند شیمیایی شوند به صورت خام در ترکیب باقی بمانند و در نهایت موجب عملکرد ضعیف مکانیکی و شیمیایی مخلوط شوند. برای تهیه نمونه‌های قیری اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر در درصد وزنی قیر ۱ تا ۵ درصد، ابتدا هاردنر با نسبت مشخص از رزین اپوکسی (به ازای ۱۰۰ گرم رزین اپوکسی، ۶۰ گرم هاردنر) به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه در دمای ۱۳۰ درجه سانتی گراد با قیر خالص مورد اختلاط قرار

۴-۳- آزمایش قطره چسبنده

این روش با اندازه گیری زاویه تماس سطح مشترک جامد، مایع و گاز، یک روش کاربردی جهت تعیین ویژگی‌های سطحی مایع و جامد است. همچنین به طور گسترده‌ای در مطالعات انرژی آزاد سطحی قیرها به کار برده می‌شود (Bhasin and Little, 2007). در روش قطره چسبنده، زاویه تماس با عکس گرفتن از قطره مایع واقع شده بر روی سطح یک جامد اندازه‌گیری می‌شود. در این روش یک نمونه مسطح از یک ماده جامد زیر یک سرنگ قرار گرفته و قطره مایع از سرنگ بر روی بستر جامد ریخته شده و سپس به وسیله یک دوربین به صورت عرضی از قطره عکس گرفته می‌شود. زاویه بین سطح جامد و خط مماس بر قطره در محل تماس با سطح جامد اندازه‌گیری می‌شود. زاویه تماس اندازه‌گیری شده در رابطه ۵ جهت اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی جسم جامد به کار گرفته می‌شود (Reynolds, 2005). با وجود زاویه تماس اندازه‌گیری شده سه مایع با اجزای انرژی آزاد سطحی معلوم بر روی سطح جامد و ایجاد سه معادله سه مجهول از رابطه ۵، اجزای انرژی آزاد سطحی جسم جامد قابل محاسبه است. نحوه اندازه‌گیری زاویه تماس هر مایع با قیر را می‌توان به این شرح بیان کرد: نمونه‌های قیری بر روی سطح یک اسلاید شیشه‌ای آغشته می‌شوند. شکل ۱ روند تهیه نمونه‌های قیری بر سطح اسلایدهای شیشه‌ای و نمونه‌های آماده شده آن‌ها را جهت انجام آزمایش قطره چسبنده نشان می‌دهد. اسلاید شیشه‌ای پوشش داده شده با قیر، روبروی دوربین قرار داده می‌شود. به وسیله یک سرنگ حاوی مایع، یک قطره کوچک از مایع بر سطح قیر ریخته شده و با دوربین از قطره به صورت عرضی عکس گرفته می‌شود. در هر تصویر قطره، زاویه چپ و راست اندازه‌گیری می‌شود و زاویه تماس با میانگین‌گیری از زوایای چپ و راست حاصل می‌گردد (شکل ۳ و ۲). به ازای هر قیر حداقل زاویه تماس پنج قطره از هر مایع باید اندازه‌گیری شود و

میانگین زاویه تماس این پنج قطره به عنوان زاویه تماس مایع با قیر گزارش می‌شود (Moraes, Velasquez and Bahia, 2017). یکی از مهمترین فاکتورهای محاسبه انرژی آزاد سطحی قیرها در استفاده از روش قطره چسبنده، انتخاب مایع مناسب است. مایع مورد استفاده باید خالص، همگن، غیر قابل امتزاج با قیر و مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی آن بر اساس تئوری اسید و باز معلوم باشد (Masad et al., 2006). نکته مهم قابل توجه در مورد انرژی آزاد سطحی مایعات این است که اگر اجزای انرژی آزاد سطحی این مایعات به هم خیلی نزدیک باشد، اجزای انرژی آزاد سطحی مجهول محاسبه شده به خطاهای کوچک اندازه‌گیری زاویه تماس، حساس می‌شوند (Reynolds, 2005).

اندازه‌گیری حساسیت مذکور، با فاکتوری به نام شماره وضعیت^{۱۷} مشخص می‌شود. در این مورد، شماره وضعیت با ماتریس اجزای انرژی سطحی مایع‌های انتخابی محاسبه می‌شود. شماره وضعیت به ویژگی‌های هر ترکیب مایع بستگی دارد و قبل از شروع فرایند آزمایش باید محاسبه گردد. در این تحقیق، شماره وضعیت مایع‌های مورد استفاده با هم مقایسه شد و ترکیب مناسبی جهت استفاده در آزمایش قطره چسبنده انتخاب شد. توصیه می‌شود که ترکیبی که کمترین شماره وضعیت را دارد انتخاب شود. جدول ۴ شماره وضعیت ترکیب‌های مختلف مایعات از آب، اتیلن‌گلیکول، فرمامید و گلیسرول را نشان می‌دهد. به کارگیری سه ترکیب شماره ۱، ۴ و ۵ با توجه به شماره وضعیت که دارند، جهت اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیرها مناسب به نظر می‌رسد. با توجه به شماره وضعیت ترکیبات ۳ و ۲ به کارگیری این ترکیبات موجب حساس بودن آزمایش به خطاهای کوچک می‌شود. در نهایت آب، اتیلن‌گلیکول و فرمامید به عنوان مایع مناسب برای محاسبه انرژی آزاد سطحی قیر انتخاب شدند. ویژگی‌های انرژی آزاد سطحی این مایعات در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۱. اسلاید شیشه‌ای پوشیده شده از قیر جهت انجام آزمایش قطره چسبنده

شکل ۲. قطرات مایع ریخته شده با سرنگ بر سطح قیر و عکس گرفتن از هر قطره با دوربین



شکل ۳. اندازه‌گیری زاویه تماس قطره اتیلن گلیکول بر سطح قیر

جدول ۴. شماره وضعیت ترکیبات مختلف مایعات (Little, Bhasin and Hefer, 2006)

ترکیبات	مایعات تحقیقی	شماره وضعیت
۱	آب، اتیلن گلیکول، فراماید، گلیسرول	۲۰
۲	آب، اتیلن گلیکول، گلیسرول	۱۳۷
۳	گلیسرول، اتیلن گلیکول، فراماید	۵۴
۴	آب، اتیلن گلیکول، فراماید	۲۱
۵	آب، فراماید، گلیسرول	۱۹

جدول ۵. مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی مایعات در ۲۰ درجه سانتی گراد میکروژول بر متر مربع (Bhasin and Little, 2007)

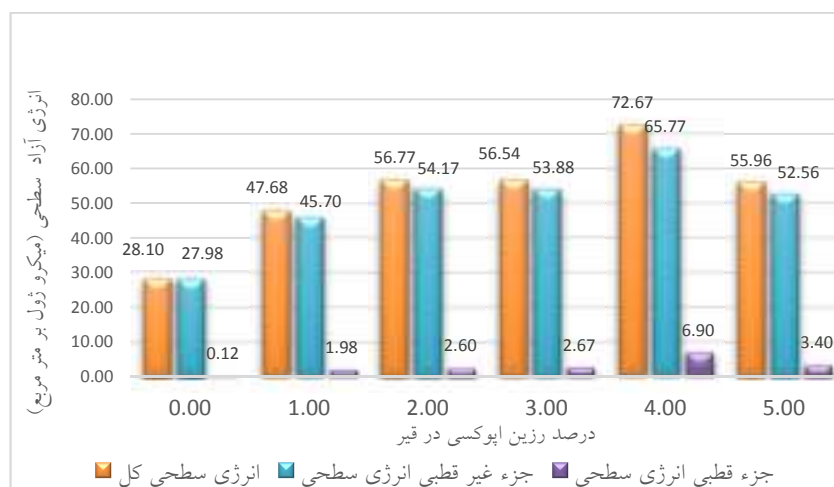
مایع تحقیقی	انرژی آزاد سطحی کل	انرژی آزاد سطحی بخش غیر قطبی	بخش اسیدی انرژی آزاد سطحی	بخش بازی انرژی آزاد سطحی
آب	۷۲/۸	۲۱/۸	۲۵/۵	۲۵/۵
اتیلن گلیکول	۴۸	۲۹	۱/۹۲	۴۷
فرمامید	۵۸	۳۹	۲/۲۸	۳۹/۶

۵-۵- تحلیل نتایج

۱-۵- انرژی آزاد سطحی

میانگین زاویه تماس پنج قطره محاسبه شده است. لازم به ذکر است انحراف معیار زوایای اندازه‌گیری شده نباید بیشتر از ۵ باشد (Bhasin and Little, 2007).

با استفاده از روش اندازه‌گیری زاویه تماس (روش قطره چسبنده)، اجزای انرژی آزاد سطحی قیر پایه و قیرهای اصلاح شده محاسبه شده است. مایع‌های مورد استفاده شامل آب مقطر، اتیلن گلیکول و فرمامید می‌باشد. برای هر مایع،



شکل ۴. تغییرات اجزای انرژی سطحی قیر با افزودن رزین اپوکسی بدون هاردنر

۱-۱-۵- قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر

رابطه ۵، اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد آزمایش محاسبه شده است که نتایج آن در نمودار شکل ۴ قابل مشاهده است.

زاویه تماس قیرهای مورد آزمایش با ۳ مایع مذکور در جدول ۶ آورده شده است. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری زاویه تماس با این ۳ مایع و حل ۳ معادله ۳ مجهول از

جدول ۶. زوایای تماس اندازه‌گیری شده هر مایع بر سطح بستر قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر

نوع قیر	آب مقطر		اتیلن گلیکول		فرمامید	
	میانگین زاویه تماس	انحراف معیار	میانگین زاویه تماس	انحراف معیار	میانگین زاویه تماس	انحراف معیار
قیر پایه	۹۱	۳/۹	۷۱	۳/۸	۷۵	۲/۵
قیر با ۱ درصد رزین اپوکسی	۹۳	۳/۵	۶۸	۱/۵۴	۶۹	۲/۴
قیر با ۲ درصد رزین اپوکسی	۹۳	۱/۶	۶۶	۱/۹	۶۵	۲/۵
قیر با ۳ درصد رزین اپوکسی	۹۳	۱/۹	۶۷	۱/۴۷	۶۷	۵
قیر با ۴ درصد رزین اپوکسی	۸۹	۲/۵	۶۹	۳/۴	۶۶	۳/۳
قیر با ۵ درصد رزین اپوکسی	۹۳	۲/۱	۷۰	۳/۴	۶۹	۲/۵

۵-۱-۲- انرژی آزاد سطحی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر

زاویه تماس قیرهای مورد آزمایش با ۳ مایع مذکور در جدول ۷ آورده شده است. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری زاویه تماس با این ۳ مایع و حل ۳ معادله ۳ مجهول از رابطه ۵، اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد آزمایش محاسبه شده است. تغییرات اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر در نمودار شکل ۵ آورده شده است. با افزودن رزین اپوکسی از ۱ درصد تا ۴ درصد وزنی قیر، افزایش سهم بخش قطبی انرژی آزاد سطحی قیر در مقایسه با بخش غیر قطبی انرژی آزاد سطحی مشاهده می‌شود. به طوری که مقدار انرژی آزاد سطحی

نتایج نشان می‌دهد که در قیر پایه مورد استفاده با انرژی آزاد سطحی کل ۲۸/۱ میکروژول بر متر مربع، ۲۷/۹۸ میکروژول بر متر مربع از انرژی آزاد سطحی قیر پایه را بخش غیر قطبی تشکیل می‌دهد که این موضوع گویای غیر قطبی بودن ساختار قیر بدون افزودنی است. با افزودن رزین اپوکسی از ۱ درصد تا ۵ درصد وزنی قیر، همچنان بخش غیرقطبی قیرهای اصلاح شده در مقایسه با بخش قطبی سهم بیشتری از انرژی آزاد سطحی کل را به خود اختصاص داده است. در نهایت با توجه به نتایج ارائه شده، کامپوزیت قیر- رزین اپوکسی بدون هاردنر موجب افزایش انرژی آزاد سطحی کل شده است و این افزایش بیشتر ناشی از افزایش انرژی آزاد سطحی بخش غیر قطبی است تا بخش قطبی.

و هر ترکیب قیر و سنگدانه از لحاظ حساسیت رطوبتی بررسی شده است. پارامتر ER_1 مربوط به چسبندگی قیر و سنگدانه است که هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد قیر و سنگدانه چسبندگی بهتری با هم دارند. پارامتر ER_2 معرف میزان ترشوندگی سنگدانه‌ها توسط قیر است. هر چه مقدار این پارامتر بزرگتر باشد مفهومش آن است که قیر پوشش دهندگی بهتری روی سطح سنگدانه داشته و بالطبع مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی بالاتر است.

۵-۲-۱- مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه آهکی و قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی

در این قسمت اثر قیرهای اصلاح شده با رزین‌های اپوکسی بدون هاردنر و رزین‌های اپوکسی سخت شده با هاردنر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه آهکی بررسی شده است. نمودار شکل ۶ مقادیر پارامتر ER_1 را به ازای ترکیب سنگدانه آهکی و قیر اصلاح شده با ۰ تا ۵ درصد رزین اپوکسی با و بدون هاردنر نشان می‌دهد. طبق نمودار می‌توان گفت که رزین اپوکسی بدون هاردنر عملکرد مناسب را جهت افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه آهکی و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاصل از آن نداشته است. مقدار پارامتر ER_1 قیر پایه تقریباً از تمامی مقادیر این پارامتر از قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر بیشتر است.

بخش قطبی در قیر پایه از ۰/۱۲ میکروژول بر متر مربع به ۱۹/۵۳ میکروژول بر متر مربع در قیر با ۴ درصد رزین اپوکسی رسیده است. با افزایش درصد رزین اپوکسی به ۵ درصد، انرژی آزاد سطحی بخش قطبی کاهش قابل توجهی می‌یابد اما همچنان مقدار این پارامتر در این قیر اصلاح شده از قیر پایه بیشتر است.

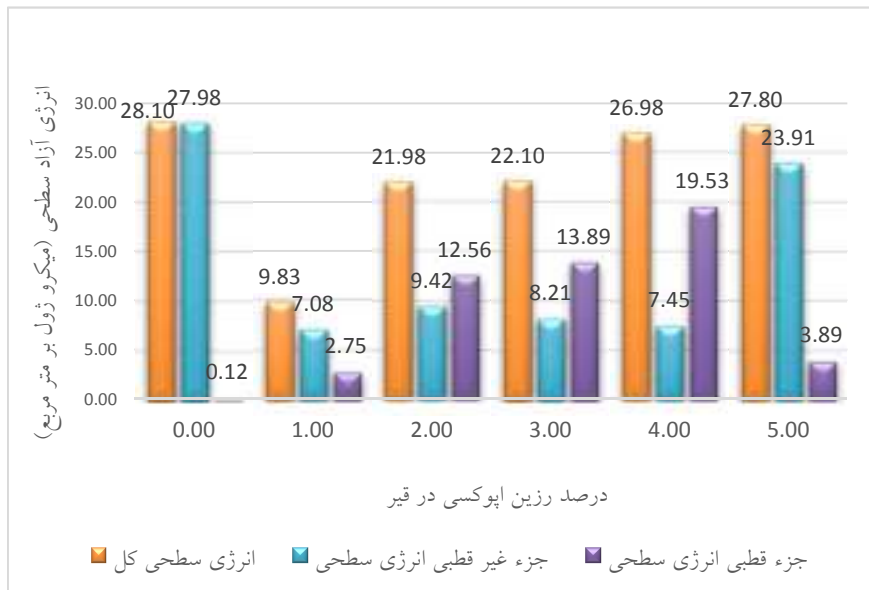
نکته قابل ذکر این است که انرژی آزاد سطحی کل در قیر های با ۴ و ۵ درصد رزین اپوکسی تقریباً مشابه مقدار آن در قیر پایه است و در قیرهای با ۲ و ۳ درصد رزین اپوکسی به مقدار آن در قیر پایه نزدیک است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رزین‌های اپوکسی سخت شده با هاردنر با کاهش بخش غیر قطبی انرژی آزاد سطحی و افزایش بخش قطبی آن و تغییر کم در میزان انرژی آزاد سطحی کل خصوصیات قطبیت قیر را مورد تاثیر قرار می‌دهند و در حقیقت موجب افزایش قطبیت قیر می‌شوند. در نهایت با توجه به نتایج ارائه شده در این بخش، کامپوزیت قیر- رزین اپوکسی با درصد رزین اپوکسی ۴ درصد با توجه به اینکه قیر در این درصد رزین اپوکسی خصوصیات قطبی بیشتری دارد و انرژی آزاد سطحی کل در آن نزدیک به انرژی سطحی قیر پایه است به عنوان بهترین ترکیب در بین ترکیب‌های بررسی شده از قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر شناخته می‌شود.

۵-۲-۲- ارزیابی حساسیت رطوبتی

در این بخش با استفاده از مقادیر محاسبه شده از انرژی آزاد سطحی قیرها و مقادیر موجود از انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها از گزارشات معتبر، پارامترهای انرژی مربوط به حساسیت رطوبتی (ER_1 و ER_2) مورد محاسبه قرار گرفته

جدول ۷. زوایای تماس اندازه‌گیری شده هر مایع بر سطح بستر قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر

نوع قیر	آب مقطر		اتیلن گلیکول		فرمامید	
	میانگین زاویه تماس	انحراف معیار	میانگین زاویه تماس	انحراف معیار	میانگین زاویه تماس	انحراف معیار
قیر پایه	۹۱	۲/۶۴	۷۱/۳	۳/۸	۷۵/۱	۲/۵
۱ درصد رزین اپوکسی	۱۰۲	۱/۵۸	۶۵/۶	۱/۵۴	۷۸/۶	۵
۲ درصد رزین اپوکسی	۸۳/۷	۳/۰۵	۶۳/۶	۱/۹	۷۴/۷۵	۰/۶
۳ درصد رزین اپوکسی	۸۰/۳	۱/۵	۶۸/۵	۱/۴۷	۷۸/۴	۳/۲
۴ درصد رزین اپوکسی	۷۲/۵	۲	۶۱/۸	۳/۴	۷۳/۸	۳/۳
۵ درصد رزین اپوکسی	۷۹/۸	۴/۸۷	۶۲/۸	۳/۴	۶۹/۱	۵/۵



شکل ۵. تغییرات اجزای انرژی سطحی قیر با افزودن رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر

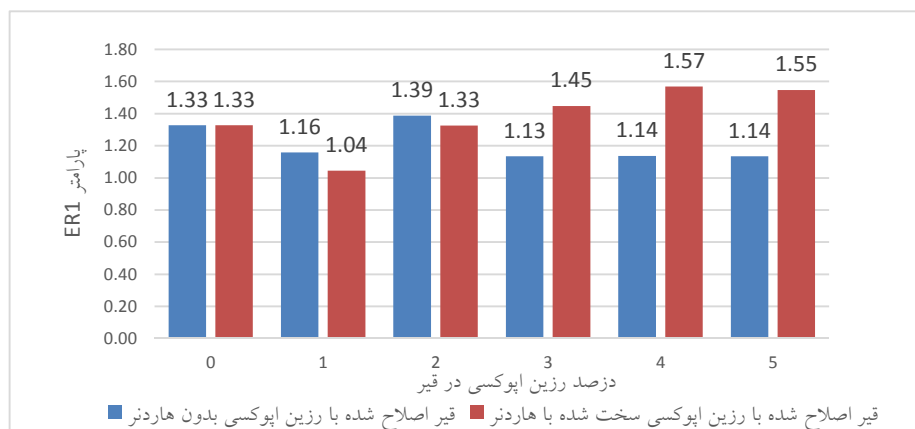
می‌کند. مقادیر پارامتر ER_1 برای ترکیب قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر و سنگدانه آهکی نشان دهنده بهبود عملکرد چسبندگی سنگدانه و قیر در مقایسه با ترکیب قیر پایه و این نوع سنگدانه است. در قیر اصلاح شده

به استثناء مخلوط آسفالتی حاصل از قیر اصلاح شده با ۲ درصد رزین اپوکسی بدون هاردنر که پارامتر ER_1 به ازای آن مقدار $1/38$ میکروژول بر متر مربع را از خود نشان می‌دهد و افزایش انرژی چسبندگی نسبت به قیر پایه را بیان

مقدار پارامتر ER_1 با $1/57$ میکروژول بر متر مربع بیشترین میزان چسبندگی را با سنگدانه آهکی از خود نشان می‌دهد. در مجموع باید گفت که افزودن رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر به قیر موجب بهبود خواص چسبندگی مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه آهکی است.

با ۱ درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر میزان چسبندگی سنگدانه آهکی و این نوع قیر نسبت به قیر پایه با کاهش همراه بوده که ناشی از کاهش انرژی آزاد سطحی قیر و همچنین عدم واکنش مناسب رزین اپوکسی و قیر در این درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر است. با افزایش درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر تا مقدار ۴ درصد،

شکل ۶. تغییرات پارامتر ER_1 ترکیب قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه آهکی

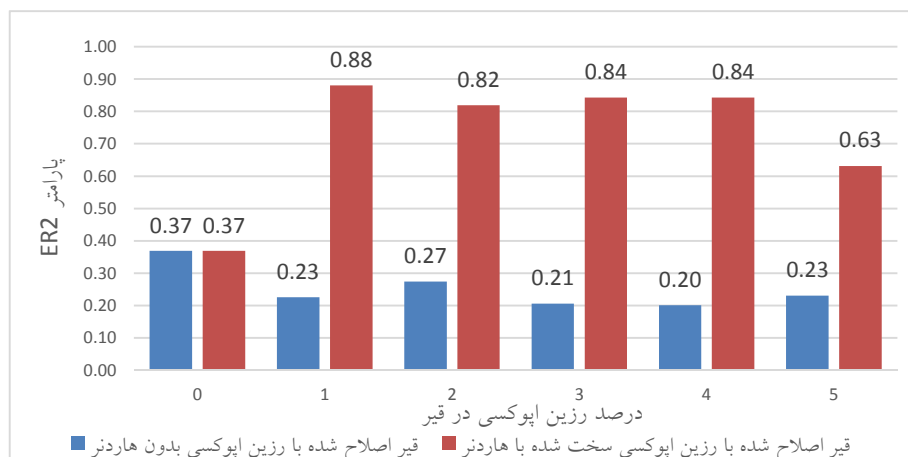


شکل ۷ مقادیر پارامتر ER_2 را به ازای ترکیب سنگدانه آهکی و قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی با و بدون هاردنر نشان می‌دهد. مطابق با نمودار مقادیر این پارامتر در ترکیبات حاوی قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر نسبت به ترکیبات حاوی قیر پایه کاهش یافته است. این نشان دهنده این است که قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر نه تنها باعث بهبود عملکرد پوشش پذیری قیر بر سطح سنگدانه نشده‌اند بلکه موجب ضعف عملکرد ترکیب آسفالتی حاوی سنگدانه آهکی از این لحاظ شده‌اند. در ترکیب قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر و سنگدانه آهکی مقادیر پارامتر ER_2 در تمامی درصدهای رزین اپوکسی با افزایش همراه بوده است. نتایج نشان دهنده افزایش پوشش پذیری سنگدانه‌ها توسط قیر با افزودن رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر است. به طوری که مقدار این پارامتر در قیر پایه از $0/37$ اولیه به ترتیب در درصدهای ۱ تا ۴ درصد رزین اپوکسی به $0/88$

رسیده است. بنابراین از ۱ تا ۴ درصد رزین اپوکسی تقریباً نتایج مشابهی از لحاظ مقدار این پارامتر حاصل شده است. پس از آن در ۵ درصد رزین اپوکسی مقدار ER_2 به $0/63$ کاهش یافته است که البته از مقدار آن در قیر پایه بیشتر است. در نهایت با توجه به مطالب مذکور چند نکته در مورد حساسیت رطوبتی سنگدانه آهکی و قیرهای اصلاح شده قابل ذکر است. قیرهای اصلاح شده با رزین‌های اپوکسی بدون هاردنر نتوانستند عملکرد مناسبی در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته باشند. با وجود اینکه در قیر حاوی ۲ درصد رزین اپوکسی بدون هاردنر پارامتر چسبندگی نسبت به قیر پایه افزایش داشته اما مقدار پارامتر ترشوندگی یا پوشش پذیری با کاهش همراه بوده است و در مجموع می‌توان گفت که این درصد رزین اپوکسی بدون هاردنر هم قابلیت کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه آهکی را نداشته است. قیر اصلاح

پوشش پذیری بهبود عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه آهکی را از خود نشان می‌دهد.

شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر در درصد وزنی‌های ۲ تا ۵ درصد در هر دو پارامتر چسبندگی و



شکل ۷. تغییرات پارامتر ER₂ در ترکیب قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه آهکی

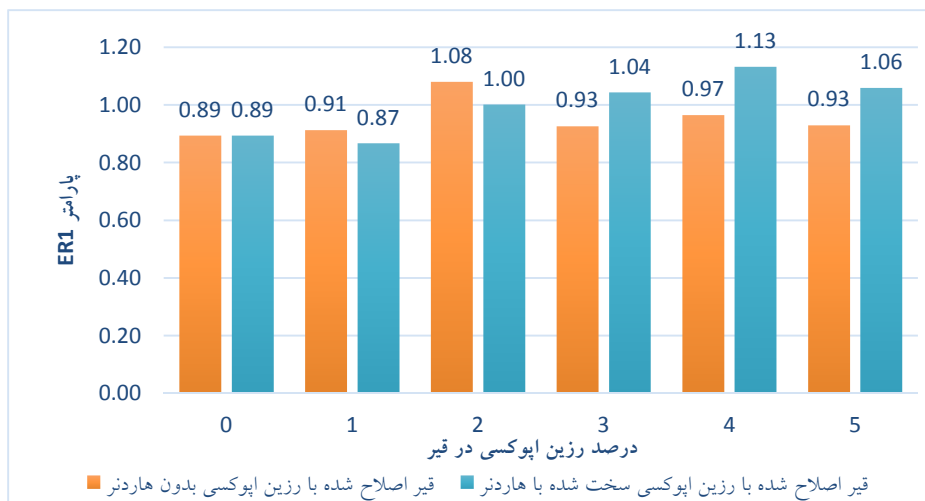
۵-۲-۲- مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه سیلیسی و قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی

رسیده‌است که نشان می‌دهد در این درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر قیر بیشترین عملکرد چسبندگی را با سنگدانه سیلیسی دارد. نمودار شکل ۹ نتایج پارامتر ER₂ را برای ترکیب سنگدانه‌های سیلیسی و قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی با و بدون هاردنر نشان می‌دهد. طبق نمودار رزین‌های اپوکسی بدون هاردنر موجب افزایش مقدار پوشش دهندگی قیر بر سطح سنگدانه سیلیسی شده است اما این افزایش محسوس نیست. به طوری که قیر با ۲ درصد رزین اپوکسی بدون هاردنر با ۰/۲۸ میکروژول بر متر مربع بیشترین مقدار پارامتر ER₂ را داراست. این پارامتر برای قیر پایه مقدار ۰/۲۲ را از خود نشان می‌دهد. نمودار پارامتر ER₂ برای قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر نشان از بهبود عملکرد پوشش پذیری قیر با سنگدانه سیلیسی در استفاده از این نوع افزودنی در تمامی درصدهاست. بیشترین مقدار این پارامتر مربوط به قیر اصلاح شده با ۴ درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر است. در مجموع می‌توان گفت که در ترکیبات حاوی سنگدانه‌های سیلیسی قیرهای اصلاح شده با ۲ درصد رزین اپوکسی بدون هاردنر و قیرهای اصلاح شده با ۴ درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر بهترین عملکرد را از لحاظ حساسیت رطوبتی

نمودار شکل ۸ مقادیر پارامتر ER₁ را به ازای ترکیب سنگدانه سیلیسی و قیر اصلاح شده با ۰ تا ۵ درصد رزین اپوکسی با و بدون هاردنر نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج پیداست قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر در تمامی درصد رزین‌های اپوکسی موجب بهبود عملکرد چسبندگی با ترکیب حاوی سنگدانه سیلیسی شده‌اند. بیشترین مقدار این پارامتر مربوط به قیر با ۲ درصد رزین اپوکسی بدون هاردنر با ۱/۰۸ میکروژول بر متر مربع است. مقادیر پارامتر ER₁ در ترکیب سنگدانه سیلیسی و قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر نسبت به ترکیبات حاوی قیر پایه با افزایش همراه بوده است که این نشان دهنده بهبود عملکرد چسبندگی قیر به سنگدانه ناشی از افزودن این نوع پلیمر است. در قیر اصلاح شده با ۱ درصد رزین اپوکسی مقدار این پارامتر با کاهش همراه بوده است و از ۰/۸۹ میکروژول بر مترمربع در قیر پایه به ۰/۸۷ میکروژول بر متر مربع رسیده است که می‌توان آن را ناشی از کاهش اجزاء انرژی آزاد سطحی قیر و همچنین عدم واکنش مناسب قیر با این درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر دانست. پس از آن با افزایش درصد رزین اپوکسی تا ۴ درصد پارامتر ER₁ به بیشترین مقدار خود (۱/۱۳ میکروژول بر متر مربع)

حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های سیلیسی مناسب‌تر است.

داشته‌اند. در چند که بنابراین عملکرد قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر در مقایسه با قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر در کاهش



شکل ۸. تغییرات پارامتر ER1 در ترکیب قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه سیلیسی



شکل ۹. تغییرات پارامتر ER2 در ترکیب قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه سیلیسی

۳-۵- نتایج آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه (FTIR)

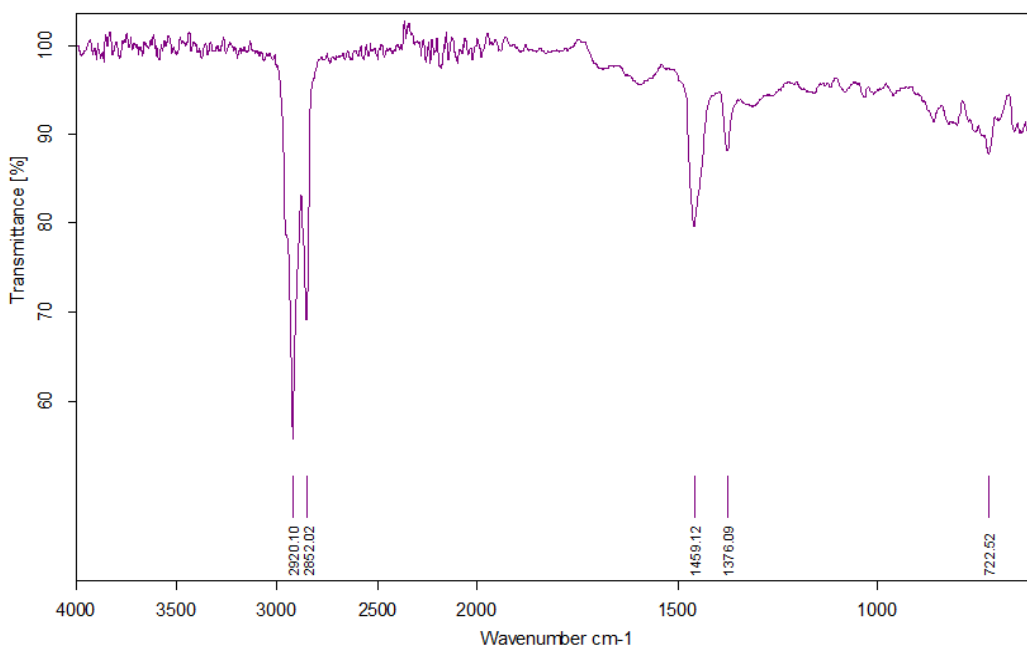
بهینه سخت شده با هاردنر) آنالیز FTIR به عمل آمد که نتایج آن به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده‌است. در نمودار طیف FTIR برای قیر پایه در شکل ۱۰، پیک‌های

در این پژوهش جهت آنالیز شیمیایی اثر رزین‌های اپوکسی و تاثیر آن‌ها بر شیمی قیر، از قیر پایه و قیر حاوی ۴ درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر (درصد رزین اپوکسی

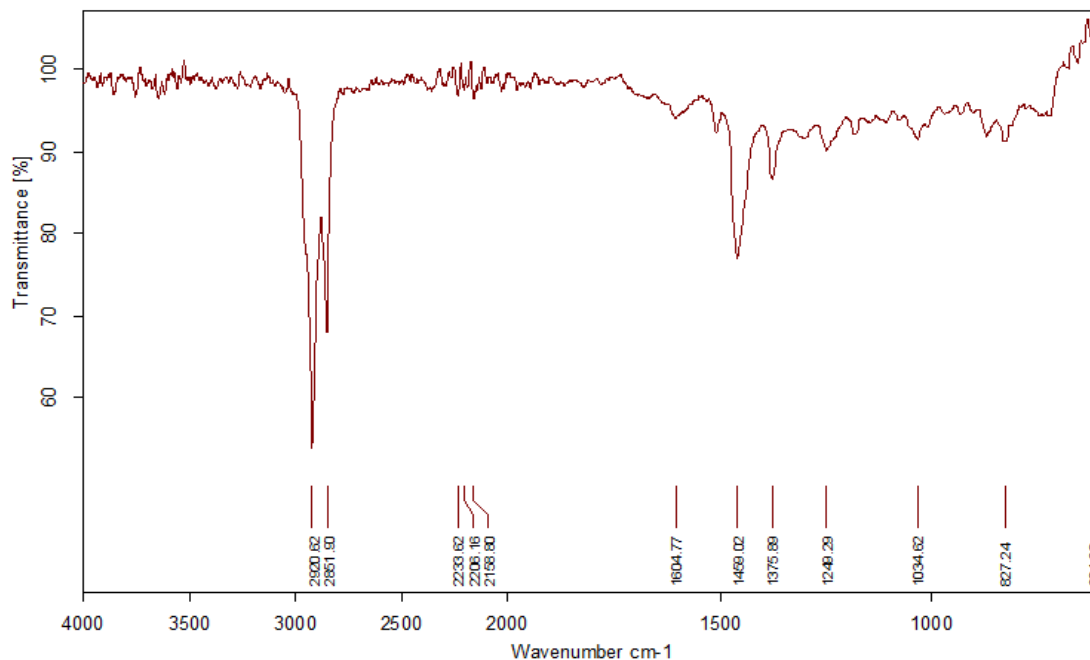
وجود رزین اپوکسی و هاردنر با آن تفاوت دارد. پیک تغییر کرده در نقطه ۲۹۰۲/۱۲۴۹ تعلق به اتصالات (C-N) در هاردنر سیکلو آلفاتیک آمین است. پیک تغییر کرده در نقطه ۱۰۳۴/۶۲ مربوط به اتصالات (C-O) در رزین اپوکسی است. پیک ۸۲۷/۲۴ وجود گروه اپوکسی در قیر را نشان می دهد (Yu, Cong and Wu, 2009).

با توجه به اینکه در اکثر آنالیزهای FTIR مربوط به حساسیت رطوبتی، کاهش حساسیت رطوبتی به دلیل تغییر خاصیت اسیدی قیر و کاهش کربوکسیلیک اسید در قیر است مشاهده می شود در این آزمون پیک مربوط به این اسید تغییر محسوسی نداشته است. در عمل رزین های اپوکسی بدون تغییر در خاصیت اسیدی و با تغییر در خواص قطبیت قیر موجب کاهش حساسیت رطوبتی قیر شده اند.

موجود در ۲۹۲۰/۱ و ۲۸۵۲/۰۲ نشان دهنده اتصالات آلکیل (C-H) در درون قیر است. همچنین اتصالات (C-H) در CH_3 و CH_2 توسط پیک های موجود در نقاط ۱۴۵۲/۱۲ و ۱۳۷۶/۰۹ نشان داده شده است (Bukka, Miller and Oblad, 1991). پیک های موجود در نقطه ۱۷۰۰ اتصال دو گانه عنصر کربن و اکسیژن (C=O) در اسید کربوکسیلیک را توصیف می نماید (Bagampadde, Isacsson and Kiggundu, 2005). در حین اختلاط قیر و سنگدانه، یکی از اجزای قیر که به سرعت جذب سنگدانه ها می شوند اسیدهای کربوکسیلیک است که وجود این گروه در قیر از عوامل مهم در ایجاد خرابی رطوبتی مخلوط آسفالتی است. طبق نمودار شکل ۱۱ مکان های طیف مشخص شده قیر اصلاح شده با ۴ درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر تقریباً مشابه طیف قیر پایه است اما در برخی نقاط به دلیل



شکل ۱۰. طیف آزمون FTIR قیر پایه



شکل ۱۱. طیف آزمون FTIR قیر اصلاح شده با ۴ درصد رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر

۶- نتیجه گیری

حاوی سنگدانه‌های آهکی ندارند اما در ترکیب با سنگدانه‌های سیلیسی موجب بهبود عملکرد رطوبتی مخلوط می‌شوند. درصد بهینه رزین اپوکسی بدون هاردنر در قیر در ترکیب با سنگدانه سیلیسی ۲ درصد است. قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر هم در ترکیب با سنگدانه‌های سیلیسی و هم در ترکیب با سنگدانه‌های آهکی موجب کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی در مقایسه با قیر پایه می‌شوند. ۴ درصد رزین اپوکسی درصد بهینه این افزودنی در قیر به ازای هر دو ترکیب با سنگدانه آهکی و سیلیسی از لحاظ عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی است. طبق نتایج آزمون FTIR رزین‌های اپوکسی بدون تغییر در خاصیت اسیدی و با تغییر در خواص قطبیت قیر موجب کاهش حساسیت رطوبتی قیر شده‌اند.

۷- پی‌نوشت

- 1- Surface Free Energy
- 2- Work Of Adhesion

با توجه به مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و غالب بودن بخش غیر قطبی نسبت به بخش قطبی، قیرها ذاتاً به عنوان یک جسم غیر قطبی شناخته می‌شوند. مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر نشان دهنده افزایش انرژی آزاد سطحی کل آنها نسبت به انرژی آزاد سطحی کل قیر پایه است و این افزایش ناشی از افزایش انرژی آزاد سطحی بخش غیر قطبی است. بنابراین این نوع افزودنی در افزایش قطبیت قیر تاثیر محسوسی نداشته است. مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر نشان دهنده تغییرات کم انرژی آزاد سطحی کل، کاهش انرژی آزاد سطحی بخش غیر قطبی و افزایش انرژی آزاد سطحی بخش قطبی نسبت به قیر پایه است. بنابراین این نوع افزودنی موجب افزایش قطبیت قیر نسبت به قیر پایه شده‌است. قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی بدون هاردنر اثر مثبتی در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی

-Bhasin, A., and Little, D. N. (2007), "Using Surface Energy Measurements to Select Materials for HMA Pavements", NCHRP Research Results Digest 316.

-Bhasin, A. and Little, D. N. (2007), "Characterization of Aggregate Surface Energy Using the Universal Sorption Device", Journal of Materials in Civil Engineering, 19(8), pp. 634–641.

-Bukka, K., Miller, J. D. and Oblad, A. G. (1991), "Fractionation and characterization of Utah tar-sand bitumens: influence of chemical composition on bitumen viscosity", Energy & Fuels, 5(2), pp. 333–340.

-Çubuk, M., Gürü, M. and Çubuk, M. K. (2009), "Improvement of bitumen performance with epoxy resin", Fuel, 88(7), pp. 1324–1328.

-Little, D. N., Bhasin, A., (2006), "Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement", Transportation Research Board.

-Masad, E., Zollinger, C., Bulut, R., Little, D.N. (2006), "Characterization of HMA moisture damage using surface energy and fracture properties", Association of Asphalt Paving Technologists, 75.

-Edwards, Y., Tasdemir, Y. and Isacson, U. (2005), "Influence of Commercial Waxes on Bitumen Aging Properties", Energy & Fuels, 19(6), pp. 2519–2525.

-Foroutan Mirhosseini, S. A. et al. (2016), "Applying surface free energy method for evaluation of moisture damage in asphalt mixtures containing date seed ash", Construction and

- 3- Work Of Debonding
- 4- Sessile Drop Method
- 5- Universal Sorption Device
- 6- Bisphenol-A Diglycidyl Ether
- 7- Pull of Strength
- 8- Work of Cohesion
- 9- Wetting
- 10- Hardner
- 11- Cure
- 12- Amine
- 13- Curing Time
- 14- Bisphenol-A Diglycidyl Ether
- 15- KUKDO
- 16- Cycloalifatic Amin
- 17-Condition Number

۸- مراجع

-APocius, A.V. (2012), "Adhesion and Adhesives Technology", An Introduction. 2nd ed. Hanser Publications.

-Apeageyi, A. K., Grenfell, J. R. A. and Airey, G. D. (2014), "Moisture-induced strength degradation of aggregate–asphalt mastic bonds", Road Materials and Pavement Design.

-Arabani, M., Roshani, H. and Hamedi, G. H. (2012), "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.

-Augustsson .C (2004), "Epoxy Handbook", Nils Malmgren AB.

-Bagampadde, U., Isacson, U. and Kiggundu, B. M. (2005), "Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures", International Journal of Pavement Engineering.

Energy Of Cellulose Ether Films”,
Colloids And Surfaces A
Physicochemical And Engineering
Aspects.

-Reynolds, P. (2005), “Wetting of
Surfaces,” in Cosgrove, T. (ed.) Colloid
Science: Principles, Methods and
Applications. 2nd Editio. Wiley-
Blackwell.

-Solaimanian, M., Harvey, J.,
Tahmoressi, M., T. (2003), “Test
Methods to Predict Moisture Sensitivity
of Hot-Mix Asphalt Pavements”,
Moisture Sensitivity of Asphalt
Pavements A National Seminar,
pp. 77–110.

-Wasiuddin, N. M. et al. (2006),
“Acid-Base Characteristics of an Asphalt
Binder with and without Anti-Strip
Additives”, in Airfield and Highway
Pavement. Reston, VA: American
Society of Civil Engineers, pp. 412–424.

-Yu, J., Cong, P. and Wu, S. (2009),
“Laboratory investigation of the
properties of asphalt modified with epoxy
resin”, Journal of Applied Polymer
Science, 113(6), pp. 3557–3563.

Building Materials, 125, pp. 408–416.

-Ghabchi, R., Singh, D., Zaman, M.,
Tian, Q. (2013), “Application of Asphalt-
aggregates Interfacial Energies to
Evaluate Moisture-induced Damage of
Warm Mix Asphalt”, Procedia - Social
and Behavioral Sciences, 104, pp. 29–38.

-J. Lambert, J., Shalaby, A., Enieb, M.
(2013), “Wettability, surface tension and
surface free energy behavior of short-
term aging and liquid antistrips modified
HMA binders”, International Journal of
Pavements Conference.

-Moraes, R., Velasquez, R. and Bahia, H.
(2017), “Using bond strength and surface
energy to estimate moisture resistance of
asphalt-aggregate systems”, Construction
and Building Materials, 130,
pp. 156–170.

-Van Oss, C. J., Chaudhury, M. K. and
Good, R. J. (1987), “Monopolar
surfaces”, Advances in Colloid and
Interface Science, 28, pp. 35–64.

-P.E. Luner, E. O. (2001),
“Characterization Of The Surface Free --

