

بررسی اثر دمای اختلاط قیرهای اصلاح شده و تغییرات انرژی آزاد سطحی آن‌ها بر عملکرد مقاومت رطوبتی سیستم قیر و سنگدانه

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

حسین بهمنی، دانشجوی دکتری مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

رضا روشنی، کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

Email: khani@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۳۱ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰

چکیده

نوع عملکرد روسازی آسفالتی به خواص مواد تشکیل‌دهنده آن، روند تولید و اجرا وابسته است. انرژی آزاد سطحی از خصوصیات مهم سنگدانه و قیر در پیش‌بینی نحوه عملکرد مخلوط آسفالتی است. انرژی آزاد سطحی بیانگر میزان چسبندگی قیر و سنگدانه و پارامترهای انرژی مربوط به عملکرد مقاومت رطوبتی ترکیب قیر و سنگدانه است. علاوه بر آن، دمای اختلاط قیرهای اصلاح شده، به عنوان بخشی از روش آماده‌سازی قیرهای اصلاح شده، نقش مؤثری در عملکرد نهایی قیر و ترکیب آن با سنگدانه دارد. در این مقاله، به بررسی تأثیر قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی و دمای آماده‌سازی آن‌ها بر انرژی آزاد سطحی قیر و مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است. برای این مهم، قیرهای اصلاح شده حاوی افزودنی رزین اپوکسی در ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی قیر در دو دمای ۹۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس آماده‌سازی شده و پارامترهای انرژی آزاد سطحی مربوط به حساسیت رطوبتی مورد محاسبه قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد متفاوت ترکیب قیر و سنگدانه در ازای درصدهای افزودنی و دمای آماده‌سازی متفاوت قیر است. در ترکیب قیر و سنگدانه سیلیسی، قیر اصلاح شده با ۶٪ رزین اپوکسی با دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس، و در ترکیب قیر و سنگدانه آهکی، قیر اصلاح شده با ۴٪ رزین اپوکسی با دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس، عملکرد بهینه را به لحاظ مقاومت رطوبتی از خود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: انرژی آزاد سطحی، قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی، مقاومت رطوبتی

۱. مقدمه

حضور رطوبت می‌تواند آسیب جدی به روسازی وارد کند (سانگیورگی، ۲۰۱۷). میزان این آسیب‌دیدگی به

خرابی عریان‌شدگی در برخی روسازی‌های آسفالتی، ناشی از قیر زدگی یا جداشدگی قیر از سطح سنگدانه است (خسروی و همکاران، ۲۰۱۳)، و این خرابی در

بررسی اثر دمای اختلاط قیر های اصلاح شده و تغییرات انرژی آزاد سطحی آن ها بر عملکرد مقاومت رطوبتی سیستم قیر و سنگدانه

همچنین تأثیر مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی آن ها بر مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی پرداخته شد. بنابراین، پتانسیل چسبندگی بین قیر و سنگدانه به خصوصیات ذاتی قیر و سنگدانه وابسته است (کوئی و همکاران، ۲۰۱۴). برای مثال، تأثیر قیرهای اصلاح شده با پلیمر بر خصوصیات چسبندگی در سیستم قیر و سنگدانه توسط هوسن و همکاران (۲۰۱۱) و اسکندر و همکاران (۲۰۱۲) مورد بررسی قرار گرفت. حداقل کار لازم برای ایجاد انتشار ترک در مواد ویسکوالاستیک مربوط به مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی آن ها می شود (گریفت، ۱۹۲۱). در پژوهشی دیگر، از روش تعادل انرژی برای تشریح فرایند انتشار ترک در مواد ویسکوالاستیک استفاده شد. از مهمترین پارامترهای تشخیص پتانسیل ایجاد و انتشار ترک در یک ماده، انرژی پیوستگی^۴ آن ماده است. انرژی پیوستگی یک ماده تحت عنوان دو برابر مقدار کار یا انرژی مورد نیاز برای شکستن آن ماده و تبدیل یک واحد سطح به دو واحد سطح به کار می رود. با تشخیص میزان انرژی پیوستگی هر ماده می توان به میزان انسجام و یکپارچگی آن پی برد. از طرف دیگر، انرژی چسبندگی^۵ میزان کار یا انرژی مورد نیاز جهت جدا کردن دو ماده متفاوت از هم است (لیتل و بهاسین، ۲۰۰۶).

عدم انسجام و شکاف در ساختار قیر ناشی از کمبود انرژی پیوستگی در قیر است. همچنین، شکست و جداشدگی سیستم قیر و سنگدانه از هم در ساختار مخلوط آسفالتی، ناشی از کمبود انرژی چسبندگی بین سنگدانه و قیر است. معمولاً شکست پیوستگی در مخلوط های آسفالتی با ضخامت کم قیر در اطراف سنگدانه ها رخ می دهد. در حالی که شکست چسبندگی در مخلوط آسفالتی، با ضخامت قیر زیاد اتفاق می افتد (لیتل و بهاسین، ۲۰۰۶).

کاهش دوام مخلوط آسفالتی ناشی از حضور رطوبت، و فعل و انفعالات حاصل از آن، به دو پارامتر

میزان چسبندگی^۱ بین سنگدانه و قیر وابسته است. چسبندگی ضعیف بین قیر و سنگدانه، با حضور آب در لایه آسفالتی و بین قیر و سنگدانه، منجر به خرابی روسازی آسفالتی می گردد. آب با ایجاد پیوند با سنگدانه موجب جداشدگی قیر از سطح سنگدانه می شود و در نهایت سطح روسازی آسفالتی را تخریب و ایمنی ترافیک عبوری از راه را کاهش می دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر آن، آسیب حضور رطوبت در روسازی منجر به کاهش عمر مفید روسازی شده و در نتیجه افزایش هزینه های تعمیر و نگهداری روسازی را در پی دارد (موری و همکاران، ۲۰۰۲). با توجه به این عوامل و اثرات مخرب حضور آب در روسازی های آسفالتی، بررسی مکانسیم خرابی رطوبتی و ارائه اقدامات پیشگیرانه آن مورد توجه محققین قرار گرفته است. این موضوع موجب کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری، پس انداز سرمایه، افزایش ایمنی جاده ای و افزایش عمر روسازی آسفالتی می گردد (لیتل و بهاسین، ۲۰۰۶؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

روش های ارزیابی خرابی رطوبتی به دو دسته کمی و کیفی تقسیم بندی می شوند. اما این رویکردها ذاتاً به صورت غیرمستقیم روسازی را ارزیابی می کنند و همچنین پایه تئوری قوی ندارند (فنگ و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین، استفاده از رویکردهای تئوری و نظری در بررسی خرابی رطوبتی مخلوط های آسفالتی ضروری به نظر می رسد. نتایج یک تحقیق (لیتون و همکاران، ۲۰۰۱) نشان داده است که انرژی آزاد سطحی^۲ قیر و سنگدانه می تواند به خوبی در تخمین میزان چسبندگی آن ها مؤثر باشد و در نهایت پتانسیل یک مخلوط آسفالتی برای خرابی رطوبتی را بررسی کند (چنگ و همکاران، ۲۰۰۲). علاوه بر این، در پژوهشی دیگر (هفر و همکاران، ۲۰۰۵) با استفاده از تئوری چسبندگی^۳ به بررسی خصوصیت چسبندگی بین انواع ترکیب قیر و سنگدانه و

4- Cohesive bond energy

5- Adhesive bond energy

1- Adhesion

2- Surface free energy

3- Adhesion theory

شده است (بهمنی و همکاران، ۱۳۹۷). با این وجود، اثر تغییرات روند اختلاط قیر و رزین اپوکسی بر خصوصیات عملکردی قیر و مخلوط‌های آسفالتی حاوی آن، مورد بررسی قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر، علاوه بر بررسی اثر پلیمر رزین اپوکسی بر خصوصیات انرژی آزاد سطحی قیر، شامل اجزای انرژی آزاد سطحی و انرژی پیوستگی قیرهای اصلاح شده و همچنین پارامترهای انرژی مربوط به مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی، اثر دمای آماده‌سازی قیرهای اصلاح شده بر این پارامترها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مفاهیم انرژی آزاد سطحی

انرژی آزاد سطحی هر ماده، انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک سطح جدید با جداسازی مولکول‌های آن ماده از یکدیگر است. انرژی آزاد سطحی هر ماده (γ^{total}) از سه بخش تشکیل شده است: (γ^+) قسمت اسیدی بخش قطبی، (γ^-) قسمت بازی بخش قطبی و (γ^{LW}) قسمت غیرقطبی انرژی آزاد سطحی هستند که از ترکیب مقادیر آن‌ها طبق رابطه (۱) انرژی آزاد سطحی حاصل می‌شود:

$$\gamma^{total} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+\gamma^-} \quad (1)$$

بخش قطبی انرژی آزاد سطحی هر ماده از رابطه (۲) حاصل می‌گردد:

$$\gamma^{AB} \quad (2)$$

انرژی پیوستگی برای قیر (W_{AA}) و انرژی چسبندگی (W_{AS}) برای ترکیب قیر (به اختصار A) و سنگدانه (به اختصار S) در روابط (۳) و (۴) آورده شده‌اند:

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

$$W_{AS} = 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_A^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_S^+\gamma_A^-} + 2\sqrt{\gamma_S^-\gamma_A^+} \quad (4)$$

انرژی چسبندگی سیستم قیر و سنگدانه در حالت بدون حضور آب و انرژی چسبندگی سیستم قیر و سنگدانه در حضور آب (انرژی شکست پیوند^۱) بستگی دارد. هر دو این پارامترها با استفاده از اجزای انرژی آزاد سطحی مصالح مورد استفاده قابل محاسبه است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶). همبستگی زیادی بین اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه با حساسیت رطوبتی مخلوط-های آسفالتی وجود دارد. این همبستگی، بر اساس عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در محل و همچنین نتایج آزمایشگاهی برآورد شده است. همچنین، با استفاده از پارامترهای انرژی چسبندگی و انرژی پیوستگی پارامترهایی معرفی شده‌اند (پارامترهای انرژی EPI و EP2) که میزان چسبندگی قیر و سنگدانه و همچنین میزان ترشوندگی سنگدانه توسط قیر را در یک مخلوط آسفالتی پیش‌بینی می‌کنند، که در نهایت میزان مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاصل از یک نوع قیر و سنگدانه خاص مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (لیتل و بهاسین، ۲۰۰۶؛ چنگ و همکاران، ۲۰۰۲؛ بهاسین و همکاران، ۲۰۰۶).

در این مقاله، به بررسی اثر پلیمر رزین اپوکسی بر انرژی آزاد سطحی قیرها و پارامترهای مربوط به آن پرداخته شده است. با وجود اینکه مطالعات زیادی در حوزه بررسی انرژی آزاد سطحی قیرها به کار گرفته شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ کاکار و همکاران، ۲۰۰۶؛ هبل و سینگ، ۲۰۱۶) اما در مطالعات معدودی به بررسی اثرات قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی بر انرژی آزاد سطحی و پارامترهای انرژی مربوط به آن پرداخته شده است (کونگ و همکاران، ۲۰۰۶). در پژوهشی، به بررسی اثر پلیمر رزین اپوکسی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، به روش انرژی آزاد سطحی قیر، پرداخته شده است. در پژوهش مذکور، قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی در مقادیر وزنی ۱ تا ۵ درصد قیر، کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را سبب

¹- Debonding energy

بررسی اثر دمای اختلاط قیر های اصلاح شده و تغییرات انرژی آزاد سطحی آن ها بر عملکرد مقاومت رطوبتی سیستم قیر و سنگدانه

$$W_{AWS}^{wet} = 2\gamma_W^{LW} + 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_S^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_W^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_W^{LW}} + 4 \times \sqrt{\gamma_W^+\gamma_W^-} - 2\sqrt{\gamma_W^+(\sqrt{\gamma_A^-} + \sqrt{\gamma_S^-})} - 2 \times \sqrt{\gamma_W^-(\sqrt{\gamma_A^+} + \sqrt{\gamma_S^+})} + 2\sqrt{\gamma_A^+\gamma_S^-} + 2\sqrt{\gamma_A^-\gamma_S^+} \quad (7)$$

۳. مواد و روش ها

۳-۱. مواد و مصالح

قیر مورد استفاده در این پژوهش، قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ پالایشگاه اصفهان است. مشخصات قیر پایه شامل: درجه نفوذ قیر ۶۵ دهم میلی متر، نقطه نرمی ۵۰ درجه سلسیوس، درجه اشتعال ۳۲۵ درجه سلسیوس، کشش - پذیری ۱۵۵ سانتی متر و کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ درجه سلسیوس ۳۴۴ ثانیه اندازه گیری شده است.

رزین های اپوکسی در حقیقت نوعی پیش پلیمر هستند که برای اعمال عملکردشان نیاز به جزء دیگری به نام سخت کننده یا هاردنر^۲ دارند. رزین اپوکسی مورد استفاده در این تحقیق یک نوع دی گلیسیدیل اتر بیس فنل آ^۳ متعلق به شرکت پتروشیمی خوزستان است. بر اساس توصیه شرکت سازنده، به ازای هر ۲ واحد رزین اپوکسی، ۱ واحد هاردنر در ترکیب این افزودنی استفاده می شود. مشخصات این پلیمر در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات رزین اپوکسی مورد استفاده در تحقیق

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

۸ درصد آماده سازی شدند. در ۴ نوع از این قیرها دمای اختلاط قیر و رزین اپوکسی ۹۰ درجه سلسیوس و در ۴

بهاسین و لیتل (۲۰۰۷) پارامترهای انرژی مربوط به حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را مطرح کردند که در روابط (۷) و (۸) به آن ها اشاره شده است:

$$EP1 = \frac{W_{AA}}{W_{ASW}^{wet}} \quad (5)$$

$$EP2 = \frac{W_{AS} - W_{AA}}{W_{AWS}} \quad (6)$$

که $EP1$ پارامتر انرژی مربوط به میزان چسبندگی قیر و سنگدانه است. در یک مخلوط آسفالتی حاوی قیر و سنگدانه، میزان چسبندگی قیر و سنگدانه موجب افزایش دوام و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی خواهد شد. پارامتر انرژی $EP2$ پتانسیل ترشوندگی^۱ سنگدانه توسط قیر را نشان می دهد. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، سنگدانه تعامل بیشتری به ایجاد پیوند با قیر در مقابل نفوذ آب خواهد داشت و در نتیجه حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی کمتر است. انرژی شکست پیوند (W_{AWS}^{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 (رابطه ۷):

بر اساس هدف این کار تحقیقاتی، ۸ نوع قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی در مقادیر وزنی ۲، ۴، ۶ و

^۳ Bisphenol A diglycidyl ether

^۱- Wetting

^۲ Hardener

در روش قطره چسبنده، زاویه تماس با عکس گرفتن از قطره مایع قرار گرفته روی سطح قیر اندازه گیری می شود. در این روش، یک نمونه مسطح از قیر زیر یک سرنگ قرار گرفته و قطره مایع از سرنگ روی بستر قیر ریخته شده و سپس به وسیله یک دوربین به صورت عرضی از قطره عکس گرفته می شود. زاویه بین سطح قیر و خط مماس بر قطره در محل تماس با سطح قیر اندازه گیری می شود. زاویه تماس اندازه گیری شده در رابطه (۸) جهت اندازه گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر (γ_A^{LW} ، γ_A^+ و γ_A^-) به کار گرفته می شود (بهمنی و همکاران، ۱۳۹۷).

$$\gamma_L(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_L^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+\gamma_L^-} + 2\sqrt{\gamma_A^-\gamma_L^+} \quad (8)$$

که در آن θ زاویه تماس قطره مایع با سطح قیر و A و L به ترتیب معرف قیر و مایع تحقیقی هستند.

سه مایع آب مقطر، اتیلن گلیکول و فرمامید جهت اندازه گیری زاویه تماس قیر استفاده شده است. در جدول ۲، مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی این مایعات آورده شده است (بهاسین و لیتل، ۲۰۰۷). 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 می شود. در هر تصویر قطره، زاویه چپ و راست اندازه گیری می شود و زاویه تماس با میانگین گیری از زوایای چپ و راست حاصل می گردد. تصاویر موجود در شکل ۱ نحوه انجام آزمایش قطره چسبنده را نمایش می دهند.

نوع دیگر دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس به کار گرفته شده است. روش آماده سازی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی را می توان به مراحل زیر خلاصه کرد:

(۱) حرارت دادن به قیر پایه تا دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس یا ۹۰ درجه سلسیوس

(۲) ترکیب رزین اپوکسی و هاردنر (به ازای هر ۲ واحد رزین اپوکسی ۱ واحد هاردنر) به ازای هر درصد وزنی قیر و حرارت دادن به آن تا دمای ۸۰ درجه سلسیوس

(۳) اضافه کردن ترکیب رزین اپوکسی و هاردنر به قیر و اختلاط آنها در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس یا ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۱ ساعت و با سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه

(۴) عمل آوری قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس در کوره به مدت ۱ ساعت و همچنین در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۱ روز

۲-۳. اندازه گیری انرژی آزاد سطحی

در این پژوهش، از روش قطره چسبنده^۱ برای اندازه گیری انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد آزمایش استفاده شده است. این روش، با اندازه گیری زاویه تماس سطح مشترک قیر و مایعات تحقیقی با مشخصات معلوم، یک روش کاربردی جهت تعیین ویژگی های انرژی آزاد سطحی قیر است.

^۱ Sessile drop method



شکل ۱. آزمایش قطره چسبنده برای اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی

جدول ۲. مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی مایعات تحقیقی

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

آزاد سطحی سنگدانه‌های سلیسی و آهکی مورد استفاده در این تحقیق از منابع معتبر (بهاسین و لیتل، ۲۰۰۷) استخراج شده و در فرایند تجزیه و تحلیل به کار گرفته شده است (جدول ۴).

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 (جدول ۳) (مورائس و همکاران، ۲۰۱۷). انرژی

جدول ۳. زاویه تماس اندازه‌گیری شده مایعات تحقیقی بر سطح قیرهای اصلاح شده

قیر پایه	دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس				دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس			
	٪۲	٪۴	٪۶	٪۸	٪۲	٪۴	٪۶	٪۸
بدون افزودنی	۹۵	۹۰.۳	۹۱	۸۹.۸	۹۵.۵	۹۴.۹	۹۳.۷	۹۳
آب مقطر	۶۵.۷	۶۷.۵	۶۹.۳	۶۹.۳	۶۷.۵	۶۸.۹	۷۴.۷	۷۲.۳
اتیلن گلیکول	۷۲.۸	۷۳.۹	۷۶.۶	۷۵.۴	۷۳.۹	۸۴.۱	۸۰	۷۴
فرمامید								

جدول ۴. مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های آهکی و سلیسی

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 سلیسی	۴۸/۸	۰/۰۰	۴۱۲	۴۸/۸
سنگدانه آهکی	۴۴/۱	۲/۳۷	۲۵۹	۹۳/۶

۴. تحلیل نتایج

پس از آماده‌سازی قیرهای اصلاح شده و انجام آزمایش اندازه‌گیری زاویه تماس، انرژی آزاد سطحی و پارامترهای حاصل از نتایج آن در این بخش مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۴-۱. انرژی آزاد سطحی قیرها

شکل‌های ۲ و ۳ اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شده است، مجموع انرژی آزاد سطحی بخش قطبی (γ^{AB}) و انرژی آزاد سطحی بخش غیر قطبی (γ^{LW})، انرژی آزاد سطحی کل (γ^{total}) قیر را تشکیل می‌دهد. هر چه قیر قطبیت بیشتری داشته باشد و انرژی آزاد سطحی بخش قطبی میزان بیشتری از انرژی آزاد سطحی کل را به خود اختصاص دهد، آن ماده قابلیت پوشش‌دهندگی و چسبندگی بیشتری در ترکیب با سنگدانه خواهد داشت. مقدار انرژی آزاد سطحی بخش قطبی قیر پایه (۹/۶ درصد از انرژی آزاد سطحی کل) در مقایسه با بخش غیرقطبی (۹۰/۶ درصد از انرژی آزاد سطحی کل) نشان از ساختار غیرقطبی قیر پایه دارد و قیر را می‌توان یک ماده غیرقطبی دانست.

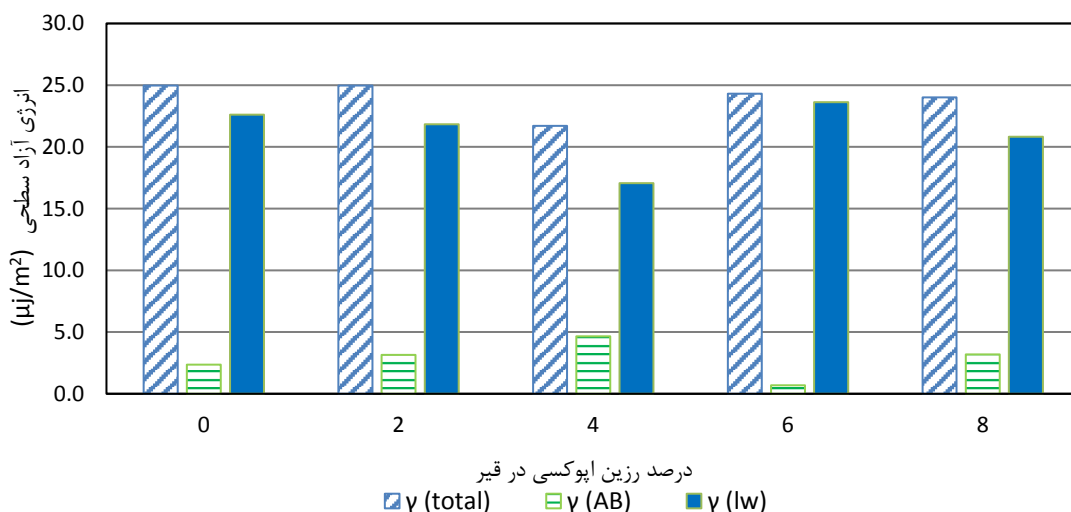
در شکل ۲، به بررسی تغییرات اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی با دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس پرداخته شده است. مطابق این شکل، انرژی آزاد سطحی کل از قیر با صفر تا ۰/۴

رزین اپوکسی با افزایش همراه بوده و پس از آن تا ۰/۸ رزین اپوکسی روند کاهشی به خود می‌گیرد. انرژی آزاد سطحی بخش قطبی روند معکوس انرژی آزاد سطحی کل را در بردارد و قیر اصلاح شده با ۰/۴ رزین اپوکسی بیشترین قطبیت را داراست.

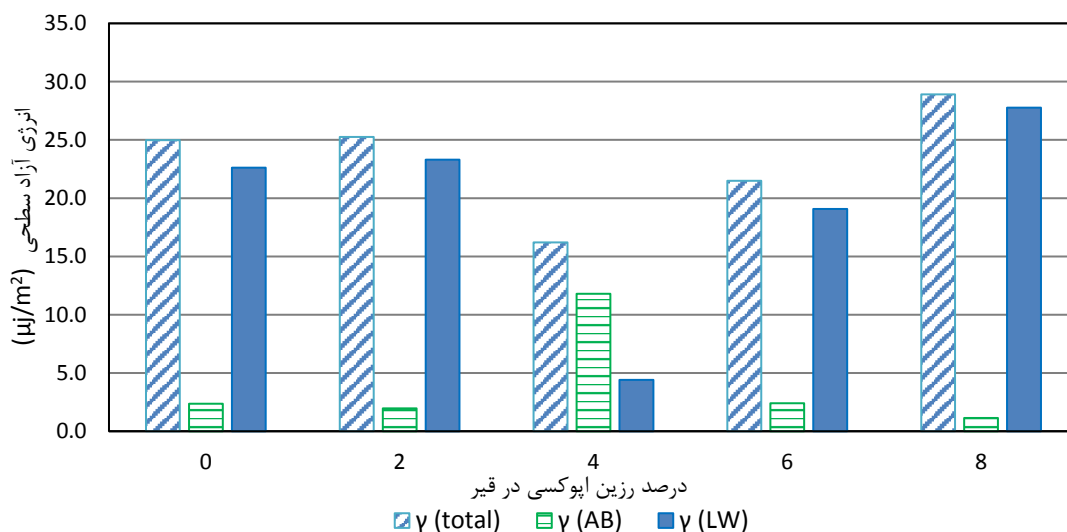
در شکل ۳، تغییرات اجزای انرژی آزاد سطحی قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی با دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس قابل مشاهده است. روند تغییرات اجزای انرژی آزاد سطحی شامل انرژی آزاد سطحی کل و انرژی آزاد سطحی بخش قطبی مشابه قیر اصلاح شده در دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس است و بیشترین قطبیت در آن مربوط به قیر با ۰/۴ رزین اپوکسی است.

در هر دو نوع قیر اصلاح شده (دمای اختلاط ۹۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس) قیر با ۰/۴ رزین اپوکسی بیشترین قطبیت را داراست. این در حالی است که سهم بخش قطبی از انرژی آزاد سطحی کل در قیر اصلاح شده با ۰/۴ رزین اپوکسی در درجه اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس به طور محسوسی بیشتر از سهم بخش غیرقطبی در این نوع قیر است. برای این نمونه قیر (قیر با ۰/۴ رزین اپوکسی) در دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس، درصد انرژی آزاد سطحی بخش قطبی در انرژی آزاد سطحی کل، با وجود اینکه بیشتر از مقدار آن در قیر پایه است، اما به شکل قابل توجهی قطبیت کمتری نسبت به قیر اصلاح شده با ۰/۴ رزین اپوکسی در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس دارد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت نحوه آماده‌سازی قیرهای اصلاح شده بر اجزای انرژی آزاد سطحی قیرها است.

بررسی اثر دمای اختلاط قیر های اصلاح شده و تغییرات انرژی آزاد سطحی آن ها بر عملکرد مقاومت رطوبتی سیستم قیر و سنگدانه



شکل ۲. تغییرات مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای آماده‌سازی شده با رزین اپوکسی در دمای ۹۰ درجه سلسیوس

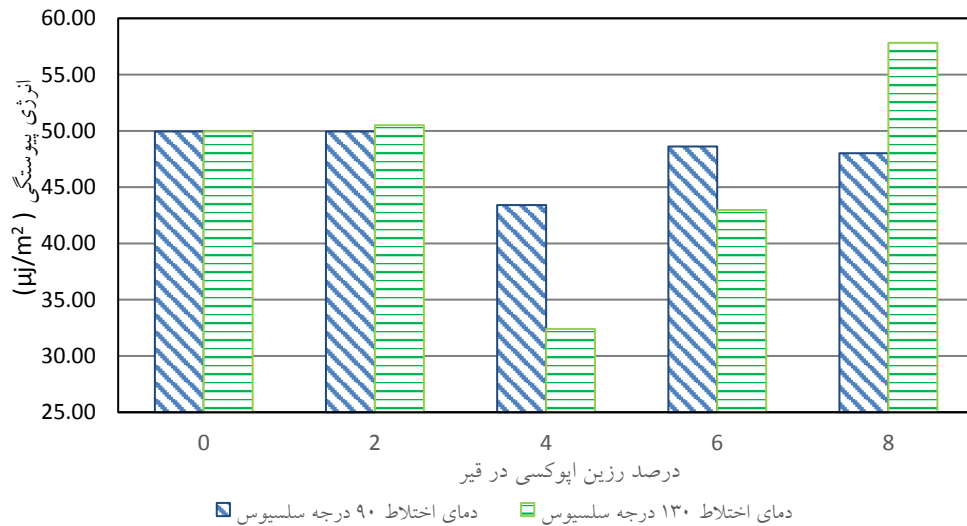


شکل ۳. تغییرات مقادیر اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای آماده‌سازی شده با رزین اپوکسی در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس

است که در تمامی قیرهای اصلاح شده در دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس، انرژی پیوستگی قیر کمتر از انرژی پیوستگی در قیر پایه است. این نتیجه، علاوه بر این که نشان‌دهنده اثر تغییرات دمای اختلاط قیر با رزین اپوکسی در بهبود انسجام و پیوستگی ساختار قیر است و دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس را برای بهبود خاصیت انسجام قیر مؤثر نمی‌داند، بیانگر تأثیر تغییرات درصد افزودنی به کار گرفته شده و ماهیت شیمیایی ایجاد شده ناشی از آن بر انرژی پیوستگی قیر است.

۴-۲. انرژی پیوستگی قیرها

انرژی پیوستگی قیرها به نوعی نشان‌دهنده انسجام و پیوستگی قیر در مقابل انتشار و رشد ترک در ساختار آن است. نمودار شکل ۴، تغییرات انرژی پیوستگی قیرهای مورد آزمایش در این پژوهش را به نمایش می‌گذارد. مطابق نمودار، تمامی قیرهای مورد آزمایش، به استثنای قیرهای اصلاح شده با ۲٪ و ۸٪ رزین اپوکسی که در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس آماده‌سازی شده‌اند، انرژی پیوستگی مساوی یا کمتر از قیر پایه دارند. این در حالی

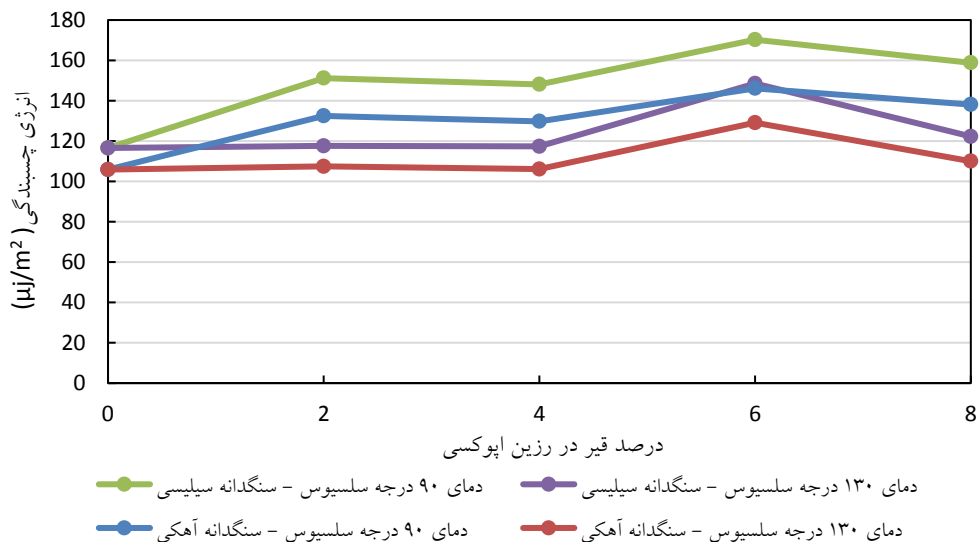


شکل ۴. تغییرات انرژی پیوستگی در قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی

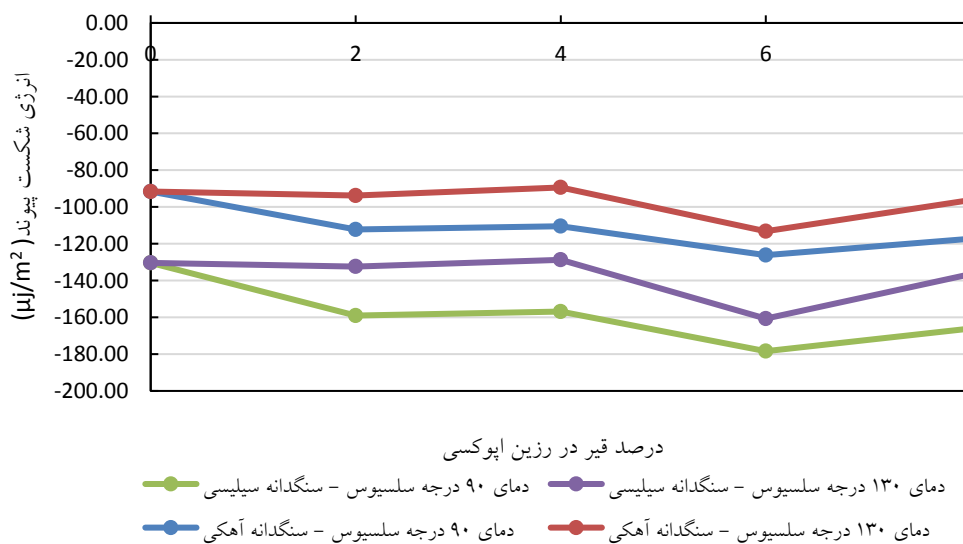
بگیرد، تمایل سنگدانه به پوشش پذیری با قیر در حضور آب بیشتر است و در نتیجه مخلوط آسفالتی حاصل از آن‌ها عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، پارامتر W_{AWS}^{wet} برای ترکیب قیر-های مورد آزمایش با سنگدانه‌های آهکی نسبت به ترکیب این قیرها با سنگدانه سیلیسی مقادیر بیشتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین، قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی با دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس، چه در ترکیب با سنگدانه آهکی و چه در ترکیب با سنگدانه سیلیسی، نسبت به قیرهای اصلاح شده در دمای ۹۰ درجه سلسیوس، عملکرد بهتری در این پارامتر از خود نشان داده است. در تمامی ترکیب‌های قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه‌های سیلیسی و آهکی، قیر با ۴٪ رزین اپوکسی بهترین عملکرد را به ازای این پارامتر داشته است.

۳-۴. انرژی چسبندگی و انرژی شکست پیوند
 شکل ۵، تغییرات انرژی چسبندگی در حالت خشک سنگدانه و قیر (W_{AS}) را نشان می‌دهد. مقادیر W_{AS} برای تمامی قیرهای آماده‌سازی شده در دمای ۹۰ درجه سلسیوس، چه در ترکیب با سنگدانه‌های آهکی و چه در ترکیب با سنگدانه‌های سیلیسی، نسبت به قیرهای آماده‌سازی شده در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس بیشتر است و نشان‌دهنده عملکرد بهتر دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس برای این پارامتر است. همچنین، در دمای ثابت (۹۰ یا ۱۳۰ درجه سلسیوس) مقادیر W_{AS} به ازای ترکیب قیرهای مورد آزمایش با سنگدانه سیلیسی نسبت مقدار آن در ترکیب با سنگدانه آهکی بیشتر است. در شکل ۶، تغییرات انرژی شکست پیوند (W_{AWS}^{wet}) به ازای هر ترکیب قیر و سنگدانه به نمایش گذاشته است. هر چه این پارامتر مقدار مثبت‌تری به خود

بررسی اثر دمای اختلاط قیر های اصلاح شده و تغییرات انرژی آزاد سطحی آن ها بر عملکرد مقاومت رطوبتی سیستم قیر و سنگدانه



شکل ۵. تغییرات انرژی چسبندگی برای قیر آماده‌سازی شده با رزین اپوکسی در دمای اختلاط ۹۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس برای سنگدانه سیلیسی و آهکی



شکل ۶. تغییرات انرژی شکست پیوند برای قیر آماده‌سازی شده با رزین اپوکسی در دمای اختلاط ۹۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس برای سنگدانه سیلیسی و آهکی

پوشش-پذیری سنگدانه توسط قیر را مورد بررسی قرار می‌دهد.

در این بخش، به بررسی هر یک از این پارامترها برای ترکیب قیرهای مورد تحقیق در این پژوهش و سنگدانه‌های آهکی یا سیلیسی پرداخته شده است.

۴-۴. 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

۴-۴-۱. پارامترهای انرژی در ترکیب قیر و سنگدانه

آهکی

شکل های ۷ و ۸ به ترتیب تغییرات مقادیر EP1 و EP2 برای مخلوط های آسفالتی حاوی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه های آهکی را نشان می دهند. شکل ۷ کاهش مقدار EP1 را در تمامی قیرهای اصلاح شده در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس، به جز قیر اصلاح

شده با ۴٪ رزین اپوکسی، را نسبت به قیر پایه نشان می دهد. با این وجود، در این دمای اختلاط، قیر اصلاح شده با ۴٪ رزین اپوکسی با مقدار ۱/۱۸۵ بیشترین مقدار EP1 را در بین قیرهای مورد آزمایش به خود اختصاص داده است. در تمامی قیرهای آماده سازی شده در دمای ۹۰ درجه سلسیوس، EP1 نسبت به قیر پایه با افزایش همراه بوده و بیشترین مقدار آن مربوط به قیر با ۸٪ رزین اپوکسی است.



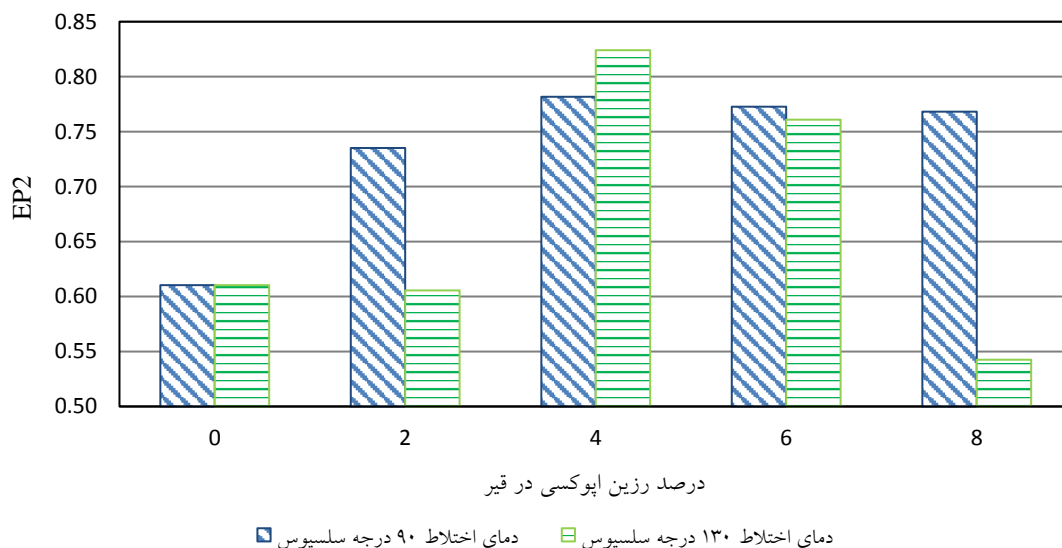
شکل ۷. تغییرات پارامتر EP1 در ترکیب قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه آهکی

نسبت به دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس اثرگذاری بیشتری در افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی داشته اند. این در حالی است که در ترکیب قیر اصلاح شده در ۴٪ رزین اپوکسی با سنگدانه آهکی، میزان هر دو پارامتر EP1 و EP2 در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس بیشتر بوده و عملکرد چسبندگی قیر و سنگدانه و پوشش پذیری سنگدانه توسط قیر بهتر است. بنابراین، در بررسی اثر دمای آماده سازی قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی باید توجه داشت که درصد رزین اپوکسی به کار رفته در تعیین دمای بهینه اختلاط مؤثر است و اثر توأمان نوع قیر اصلاح شده و دمای آماده سازی آن در عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی این افزودنی باید مورد توجه قرار گیرد.

مقدار EP2 مطابق با شکل ۸ در همه قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر پایه با افزایش همراه بوده است. بنابراین، رزین های اپوکسی موجب افزایش پوشش پذیری قیرها بر سطح سنگدانه های آهکی می شوند. روند تغییرات مقدار این پارامتر برای قیرهای اصلاح شده در دو دمای اختلاط ۹۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس مشابه هم هستند. به طوری که با افزایش مقدار رزین اپوکسی تا ۴٪، مقدار این پارامتر با افزایش همراه بوده و پس از آن تا میزان ۸٪ رزین اپوکسی روند کاهشی به خود گرفته است.

به عنوان یک نتیجه کلی از این بخش در ترکیب سنگدانه های آهکی و قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی، قیرهای اصلاح شده در مقادیر وزنی ۲، ۶ و ۸ درصد رزین اپوکسی دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس

بررسی اثر دمای اختلاط قیر های اصلاح شده و تغییرات انرژی آزاد سطحی آن ها بر عملکرد مقاومت رطوبتی سیستم قیر و سنگدانه



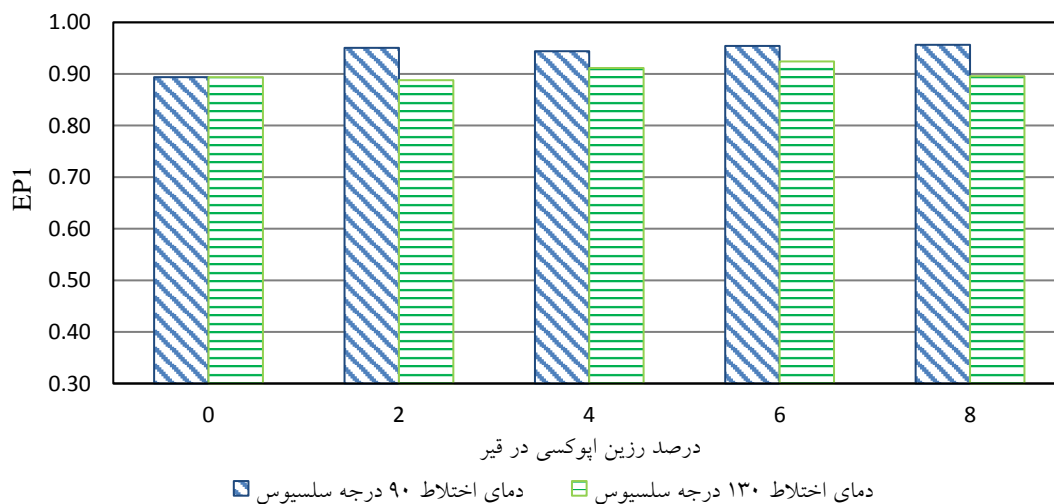
شکل ۸. تغییرات پارامتر EP2 در ترکیب قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه آهکی

در مقدار آن‌ها مشاهده می‌شود (حداقل ۰/۹۴ و حداکثر ۰/۹۶). در قیرهای اصلاح شده در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس، بیشترین مقدار EP1 مربوط به قیر با ۶٪ رزین اپوکسی با مقدار ۰/۹۲ است. نکته قابل توجه این که در تمامی درصدهای قیر اصلاح شده، مقادیر EP1 در دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس از مقادیر آن در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس بیشتر است که نشان از دمای بهینه ۹۰ درجه سلسیوس در اصلاح قیر با رزین اپوکسی برای افزایش چسبندگی بین این نوع قیر اصلاح شده و سنگدانه‌های سیلیسی دارد.

۲-۴-۴. پارامترهای انرژی در ترکیب قیرها و سنگدانه

سیلیسی

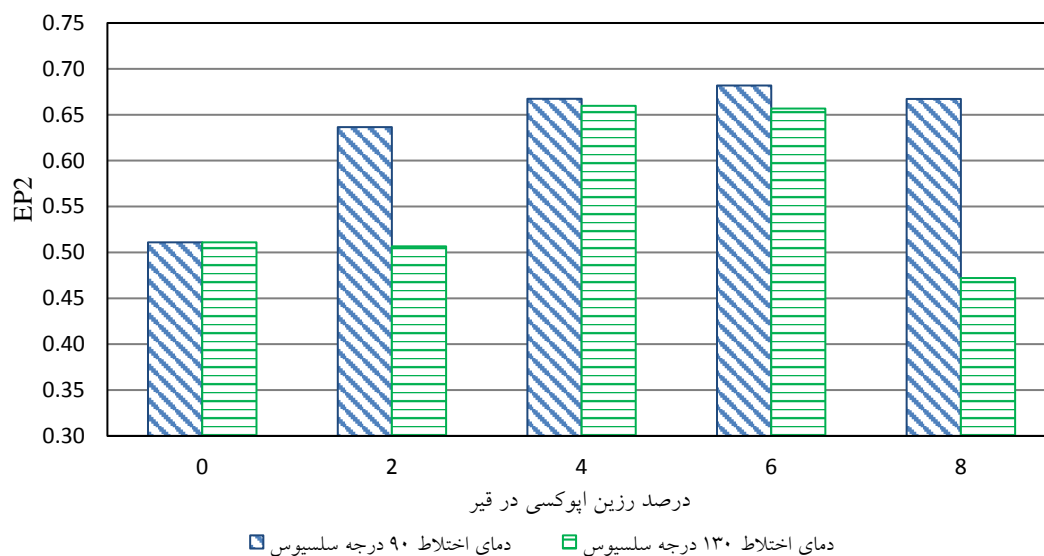
شکل ۹، تغییرات مقادیر پارامتر EP1 را برای مخلوط‌های حاوی قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه سیلیسی نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، پارامتر EP1 قیرهای آماده‌سازی شده در دمای ۹۰ درجه سلسیوس نسبت به قیر پایه مقادیر بیشتری را به خود گرفته‌اند. اما با مقایسه این پارامتر برای درصدهای مختلف این نوع قیرهای اصلاح شده، تفاوت‌های کمی



شکل ۹. تغییرات پارامتر EP1 در ترکیب قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه سیلیسی

نشان می‌دهد. در تمامی درصدهای قیر اصلاح شده، مقادیر EP2 در دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس بیش از مقدار مشابه آن در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس است. بنابراین، دمای بهینه آماده‌سازی قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی جهت بهبود پوشش‌پذیری بر سطح سنگدانه سلیسی دمای ۹۰ درجه سلسیوس است.

تغییرات مقادیر EP2 برای ترکیب قیرهای حاوی رزین اپوکسی و سنگدانه‌های سیلیسی در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. این تغییرات برای دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس و ۱۳۰ درجه سلسیوس روند مشابهی را نشان می‌دهد. به طوری که با افزایش درصد رزین اپوکسی از صفر درصد تا ۶٪، مقدار EP2 روند افزایشی را به خود گرفته و پس از آن در ۸٪ رزین اپوکسی روند کاهشی را



شکل ۱۰. تغییرات پارامتر EP2 در ترکیب قیرهای اصلاح شده با رزین اپوکسی و سنگدانه سیلیسی

پدیده عریان‌شدگی است. مجموع عملکرد سیستم قیر و سنگدانه به لحاظ چسبندگی قیر و سنگدانه و پوشش-دهندگی سطح سنگدانه توسط قیر موجب افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌گردد. بنابراین، سیستم قیر و سنگدانه‌ای که EPI و EP2 بیشتری دارد، عملکرد بهتری را به لحاظ مقاومت رطوبتی خواهد داشت.

با توجه به اینکه عملکرد قیرهای اصلاح شده و ترکیب آن‌ها با سنگدانه می‌تواند وابسته به شرایط آماده-سازی قیر و درصد افزودنی به‌کارگرفته شده در آن باشد، در پژوهش حاضر ۹ نوع قیر مورد استفاده قرار گرفت که شامل قیر پایه و ۸ نوع قیر اصلاح شده با رزین اپوکسی در درصدهای وزنی‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد در دو دمای اختلاط ۹۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس بود. در

۴-۵. تعیین درصد قیر و دمای آماده‌سازی

بهینه

همانطور که در بخش‌های قبل اشاره شد، بررسی انرژی پیوستگی ساختار قیر را مورد تحلیل قرار می‌دهد. البته قابل ذکر است که زیاد بودن انرژی پیوستگی قیر الزاماً در جهت بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی نیست و این پارامتر باید در کنار پارامترهای عملکردی ترکیب قیر و سنگدانه مورد بررسی قرار گیرد. EPI میزان چسبندگی بین قیر و سنگدانه در مخلوط آسفالتی را پیش‌بینی می‌کند و هر چه مقدار آن بیشتر باشد دوام مخلوط آسفالتی و مقاومت رطوبتی حاصل از ترکیب قیر و سنگدانه بهتر است. EP2 میزان پوشش‌پذیری سنگدانه توسط قیر را نشان می‌دهد که افزایش آن نشان‌دهنده بهبود عملکرد قیر در جلوگیری از جذب رطوبت توسط سنگدانه و

بررسی اثر دمای اختلاط قیر های اصلاح شده و تغییرات انرژی آزاد سطحی آن ها بر عملکرد مقاومت رطوبتی سیستم قیر و سنگدانه

سلسیوس اولویت اول را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به نتایج و تفاوت کم مقدار EP1 بین قیر اصلاح شده با ۶ و ۸ درصد رزین اپوکسی و دمای اختلاط ۹۰، قیر اصلاح شده با ۶٪ رزین اپوکسی با دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس به عنوان درصد رزین اپوکسی و دمای اختلاط بهینه در ترکیب با سنگدانه سیلیسی انتخاب شده است. نکته قابل توجه این است که اولویت اول پارامترها برای قیر و سنگدانه سیلیسی دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس دارد که نشان از بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در قیر اصلاح شده در این دما نسبت به دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس دارد.

در ترکیب قیرها و سنگدانه‌های آهکی در هر دو پارامتر EP1 و EP2، اولویت اول مربوط به قیر اصلاح شده با ۴٪ رزین اپوکسی و با دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس است. بنابراین، این نوع قیر اصلاح شده به عنوان قیر بهینه جهت کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی سنگدانه آهکی معرفی می‌شود.

جدول ۵، عملکرد قیرهای اصلاح شده برای پارامترهای EP2، EP1، W_{AA} مورد مقایسه قرار گرفته و به ترتیب بهترین عملکرد اولویت‌بندی شده است. به طوری که اولویت ۱ بهترین عملکرد و اولویت ۹ بدترین عملکرد را دارند.

به لحاظ انرژی پیوستگی، قیرهای اصلاح شده با ۸ و ۲ درصد رزین اپوکسی که در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس آماده‌سازی شده‌اند، اولویت‌های اول و دوم را دارند، قیر پایه در اولویت سوم قرار دارد و بقیه قیرهای مورد آزمایش اولویت‌های بعدی را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین، بهترین عملکرد به لحاظ بهبود ساختار پیوستگی قیر متعلق به قیر اصلاح شده با ۲ و ۸ درصد رزین اپوکسی در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس است.

در ترکیب قیر و سنگدانه سیلیسی، به لحاظ EP1، اولویت‌های اول و دوم قیر اصلاح شده با ۸٪ رزین اپوکسی و ۶٪ رزین اپوکسی با دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس هستند. به لحاظ EP2 قیرهای اصلاح شده با ۶ و ۴ درصد رزین اپوکسی با دمای اختلاط ۹۰ درجه

جدول ۵. اولویت‌بندی عملکردی قیرهای اصلاح شده بر اساس پارامترهای EP2 و EP1، W_{AA} قیر - سنگدانه آهکی

قیر - سنگدانه آهکی		قیر - سنگدانه سیلیسی		قیر	شماره اولویت
EP2	EP1	EP2	EP1	W _{AA}	
4-130	4-130	6-90	8-90	8-130	1
4-90	2-90	4-90	6-90	2-130	2
6-90	8-90	8-90	2-90	0	3
8-90	4-90	4-130	4-90	2-90	4
6-130	6-90	6-130	6-130	6-90	5
2-90	0	2-90	4-130	8-90	6
0	2-130	0	8-130	4-90	7
2-130	8-130	2-130	0	6-130	8
8-130	6-130	8-130	2-130	4-130	9

۵. نتیجه‌گیری

چسبندگی پرداخته شده است. به لحاظ تغییرات انرژی پیوستگی قیر، نتایج نشان داد که دمای اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس عملکرد مناسبی در افزایش انسجام و پیوستگی قیر ندارد. از طرفی، قیرهای آماده‌سازی شده در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس در مقادیر ۲ و ۸ درصد رزین اپوکسی موجب افزایش انرژی پیوستگی

در این پژوهش، به بررسی اثر رزین‌های اپوکسی و دمای اختلاط آن‌ها با قیر، بر خصوصیات انرژی آزاد سطحی قیر شامل انرژی پیوستگی و خصوصیات انرژی آزاد سطحی سیستم قیر و سنگدانه شامل پارامترهای انرژی

اختلاط ۹۰ درجه سلسیوس عملکرد بهتری نسبت به قیرهای آماده‌سازی شده در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس از خود نشان دادند. در ترکیب قیر و سنگدانه آهکی، اثر توأمان دمای اختلاط و درصد رزین اپوکسی موجود در قیر در عملکرد مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی آن‌ها مؤثر بوده است و عملکرد بهتر متعلق به تمام قیر-های اصلاح شده با یک دمای اختلاط خاص نیست. در نهایت، قیر اصلاح شده با ۴٪ رزین اپوکسی در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس بهترین عملکرد مقاومتی رطوبتی را در ترکیب قیر و سنگدانه آهکی از خود نشان داده است.

قیر شدند و در مقادیر ۴ و ۶ درصد رزین اپوکسی با کاهش انرژی پیوستگی همراه بوده‌اند. انرژی چسبندگی قیرهای اصلاح شده در دمای ۹۰ درجه سلسیوس بیشتر از قیرهای اصلاح شده در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس است. انرژی شکست پیوند در قیرهای اصلاح شده در دمای اختلاط ۱۳۰ درجه سلسیوس بیشتر از قیرهای آماده‌سازی شده در دمای ۹۰ درجه سلسیوس است. در ترکیب قیر و سنگدانه سیلیسی، نحوه آماده‌سازی قیرهای اصلاح شده اثر قابل توجهی بر خصوصیات چسبندگی قیر و سنگدانه (EP1) و پوشش‌پذیری سنگدانه توسط قیر (EP2) داشت، و قیرهای اصلاح شده با دمای

۶. مراجع

- بهمنی، ح.، خانی سانجیج، ح.، خواجه امینیان، م. و نعمت‌الهی، م. ۱۳۹۷. "بررسی اثر رزین‌های اپوکسی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی". پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۵(۳): ۵۲-۳۳.
- Bhasin, A., Masad, E., Little, D. and Lytton, R. 2006. "Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage". *Transport. Res. Record*, 1970(1): 2-13.
- Cheng, D., Little, D. N., Lytton, R. L. and Holste, J. C. 2002. "Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mixtures". *Transport. Res. Record*, 1810(1): 44-53.
- Cheng, D., Little, D. N., Lytton, R. L. and Holste, J. C. 2002. "Use of surface free energy properties of the asphalt-aggregate system to predict moisture damage potential (with discussion)". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 71.
- Cong, P., Tian, Y., Liu, N. and Xu, P. 2016. "Investigation of epoxy-resin-modified asphalt binder". *J. Appl. Polym. Sci.*, 133(21).
- Cui, S., Blackman, B. R., Kinloch, A. J. and Taylor, A. C. 2014. "Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters". *Int. J. Adhes. Adhes.*, 54: 100-111.
- Feng, J. L., Guo, Z. Y., Chen, C. J. and Li, D. Z. 2007. "Simulation study of water damage of asphalt mixtures in high-temperature and rainy weather". *J. Build. Mater.*, 10(5): 548-552.
- Griffith, A. A. 1921. "The phenomena of rupture and flow in solids". *Philos. Trans. Royal Soc. London, Series A*, 221(582-593): 163-198.
- Habal, A. and Singh, D. 2016. "Comparison of Wilhelmy plate and Sessile drop methods to rank moisture damage susceptibility of asphalt-aggregates combinations". *Constr. Build. Mater.*, 113: 351-358.
- Hefer, A. W., Little, D. N. and Lytton, R. L. 2005. "A synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 74: 139-196.
- Howson, J., Masad, E., Bhasin, A., Little, D. and Lytton, R. 2011. "Comprehensive analysis of surface free energy of asphalts and aggregates and the effects of changes in pH". *Constr. Build. Mater.*, 25(5): 2554-2564.
- Iskender, E., Aksoy, A. and Ozen, H. 2012. "Indirect performance comparison for styrene-butadiene-styrene polymer and fatty amine anti-strip modified asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 30: 117-124.
- Kakar, M. R., Hamzah, M. O., Akhtar, M. N. and Woodward, D. 2016. "Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive". *J. Clean. Prod.*, 112: 2342-2353.
- Khosravi, H., Abtahi, S. M., Koosha, B. and Manian, M. 2013. "An analytical-empirical investigation of the bleeding mechanism of asphalt mixes". *Constr. Build. Mater.*, 45: 138-144.
- Little, D. N. and Bhasin, A. 2006. "Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement". No. NCHRP, Project 9-37.

- Lytton, R. L., Chen, C. W. and Little, D. N. 2001. "Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, volume III: A micromechanics fracture and healing model for asphalt concrete". No. FHWA-RD-98-143.
- Moraes, R., Velasquez, R. and Bahia, H. 2017. "Using bond strength and surface energy to estimate moisture resistance of asphalt-aggregate systems". *Constr. Build. Mater.*, 130: 156-170.
- Mori, K., Spagnoli, A., Murakami, Y., Kondo, G. and Torigoe, I. 2002. "A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete". *NDT & E Int.*, 35(6): 399-406.
- Sangiorgi, C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C. and Dondi, G. 2017. "A laboratory and filed evaluation of cold recycled mixture for base layer entirely made with reclaimed asphalt pavement". *Constr. Build. Mater.*, 138: 232-239.
- Schapery, R. A. 1984. "Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media". *Int. J. Frac.*, 25(3): 195-223.
- Wang, Z., Xu, C., Wang, S., Gao, J. and Ai, T. 2016. "Utilization of magnetite tailings as aggregates in asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 114: 392-399.
- Wang, X., Su, Z., Xu, A., Zhou, A. and Zhang, H. 2017. "Shear fatigue between asphalt pavement layers and its application in design". *Constr. Build. Mater.*, 135: 297-305.
- Zhang, F., Muhammad, Y., Liu, Y., Han, M., Yin, Y., Hou, D. and Li, J. 2018. "Measurement of water resistance of asphalt based on surface free energy analysis using stripping work between asphalt-aggregate system". *Constr. Build. Mater.*, 176: 422-431.