

## بررسی اثر کربن بلک بر حساسیت رطوبتی آسفالت متخلخل و SMA با استفاده از پارامترهای انرژی آزاد سطحی

مقاله علمی - پژوهشی

مهدی فرجی، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسن طاهرخانی\*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [taherkhani.hasan@znu.ac.ir](mailto:taherkhani.hasan@znu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

صفحه ۵۸-۳۷

### چکیده

حساسیت رطوبتی یکی از خرابی‌های مهم روسازی‌های آسفالتی است که در اثر جدایی پیوند بین قیر و مصالح سنگی در محل اتصال آن‌ها توسط اثر آب ایجاد می‌شود. یکی از راه‌های موجود برای افزایش مقاومت در برابر خرابی‌های ناشی از رطوبت، استفاده از افزودنی‌ها است. در این پژوهش، اثر افزودنی کربن بلک یا دوده صنعتی به یک قیر خالص و مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و آسفالت ماستیک درشت دانه (SMA) ساخته شده با آن از نظر حساسیت رطوبتی مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر ۰، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶٪ (نسبت به وزن قیر) از کربن بلک به قیر افزوده شده و آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و درجه انکمی و اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مکانیزم اثر افزودنی کربن بلک بر میزان افزایش مقاومت در برابر خرابی‌های ناشی از رطوبت با استفاده از روش‌های انرژی آزاد سطحی و مقایسه آن با نتایج آزمایش مقاومت کششی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان درجه نفوذ و درجه انکمی قیر تا ۸٪ کاهش و بعد از آن افزایش می‌یابد. نقطه نرمی قیر نیز تا ۸٪ افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر نیز نشان می‌دهد که با افزودن کربن بلک تا ۸٪ انرژی سطحی کل افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. همچنین، مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب آسفالت متخلخل تا ۸٪ کربن بلک افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. نسبت مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی نیز تا ۸٪ افزودنی کربن بلک افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق همچنین مشخص می‌کند که همبستگی خوبی بین پارامترهای به دست آمده از انرژی سطحی و نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با نسبت مقاومت کششی به دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: کربن بلک، حساسیت رطوبتی، قیر، انرژی آزاد سطحی

### ۱-مقدمه

قیر-سنگدانه شود. در واقع، رطوبت سبب می‌شود تا خصوصیات قیر تغییر یابد و آن را در برابر گسیختگی پیوستگی تضعیف نماید. همچنین، به علت آبدوستی سنگدانه‌ها (به ویژه سنگدانه‌های اسیدی) این انتظار وجود دارد که وارد

رطوبتی که از ساختار روسازی به نحو مناسبی زهکشی نشده باشد، می‌تواند باعث ایجاد خرابی در لایه‌های آسفالتی روسازی شود. این رطوبت می‌تواند باعث از دست دادن پیوستگی در غشای قیر یا از دست دادن چسبندگی در سطح تماس

اندازه‌گیری پارامترهای پیوستگی و چسبندگی است که بسیاری از مشخصه‌های اساسی و تأثیرگذار در مقاومت مصالح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از مهم‌ترین پارامترهایی که با استفاده از انرژی آزاد سطحی مطالعه می‌شود می‌توان به چسبندگی و پیوستگی بین قیر و مصالح سنگی در حالت خشک و مرطوب اشاره کرد (Packham, 1996). چسبندگی و پیوستگی در حضور قیر و مصالح سنگی با استفاده از دو تئوری لیفشیتز و ندروالز و اسید - بازی لوییس به دست می‌آید که هر دو تئوری بخشی از روش‌های ترمودینامیکی هستند. بر اساس تئوری ترمودینامیکی ایجاد ترک و شکست در سطح تماس قیر و مصالح سنگی مخصوصاً در بخش قیری مربوط به تغییرات انرژی آزاد سطحی چسبندگی و پیوستگی است. بنابراین، برای محاسبه کار چسبندگی و پیوستگی، نیاز به شناخت مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و مصالح سنگی است (Cheng et al., 2002).

دوده‌ی صنعتی یا کربن بلک از مهم‌ترین انواع کربن‌های صنعتی محسوب می‌شود که از احتراق ناقص هیدروکربن‌های نفتی در مجاورت شعله تشکیل می‌شود. کربن بلک به گروهی از مواد با سطح و تخلخل بالا گفته می‌شود. این نوع از ساختار گرافیتی به علت فراهم کردن منافذ یا شکاف برای جایگزینی مولکول‌ها بسیار اهمیت دارد. این منافذ سطح فعالیت داخلی را افزایش می‌دهد. انواع کربن‌بلک با خواص مختلف از نظر اندازه، شکل، حفرات و تخلخل وجود دارد (Livingston, 1989).

مهم‌ترین ویژگی‌های کربن بلک عبارتند از:

- با توجه به سطح بالا آن را با نرخ بالایی از فعالیت و جذب مشخص می‌کنند

- دارای تخلخل بالا و سطح تماس بالا با فاز جاذب است.

- مانند گرافیت، کربن‌بلک ساختار متشکل از صفحات شش ضلعی افقی است که به طور نامنظم در هم قفل می‌شوند و چنین اتمی می‌تواند با اتم‌های دیگر پیوند تشکیل دهد و گروه‌های عامل چندگانه را در کربن فعال ایجاد کند (Yao and Mnismith, 1986).

فرضیه استفاده از دوده صنعتی به عنوان یک مسلح کننده برای اولین بار توسط آلیوتی در سال ۱۹۶۲ ارائه گردید (Aliotti, 1962). والرگا و گردلی به این نتیجه رسیدند که استفاده از کربن‌بلک مقاومت رویه آسفالتی در برابر شیار شدگی در دمای بالا و دوام لایه آسفالتی را افزایش

شدن آب به سیستم قیر سنگدانه باعث ایجاد گسیختگی در سطح تماس این دو ماده شود. از دست دادن چسبندگی به خصوص در مورد سنگدانه‌های اسیدی با احتمال و شدت بیشتری رخ می‌دهد (Moghaddas Nejad et al., 2012).

خرابی رطوبتی را می‌توان از دست دادن مقاومت و دوام در مخلوط‌های آسفالتی ناشی از تأثیر رطوبت تعریف کرد. خرابی رطوبتی در حالت کلی به دو فرایند کلی تقسیم می‌شود: (۱) از دست دادن چسبندگی (۲) از دست دادن پیوستگی. از دست دادن چسبندگی به این علت است که آب بین قیر و سنگدانه قرار می‌گیرد و لایه قیر را از روی سطح سنگدانه جدا می‌کند. از دست دادن پیوستگی به این علت است که در نتیجه ارتباط بین قیر و آب خصوصیات قیر تغییر پیدا می‌کند. خرابی رطوبتی می‌تواند در نتیجه هر کدام از این دو دلیل یا ترکیبی از هر دو باشد (Pell and Taylor, 1969; Ibrahim et al., 1998).

هنگامی که دو ماده در تماس مولکولی با هم قرار می‌گیرند، یک فرایند چسبندگی بین آن‌ها تشکیل می‌شود که اندازه آن بسته به نوع تعامل مولکول‌های دو فاز دارد (Shanahan, 1991). نظریه‌هایی که چسبندگی پیوند قیر و سنگدانه را شرح می‌دهد شامل تئوری‌های مکانیکی، شیمیایی، مرز ضعیف و ترمودینامیکی می‌شود (Kanitpong and Bahia, 2003). تئوری‌های مکانیکی، ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌ها از قبیل بافت، تخلخل و سطح مخصوص را در مقاومت پیوندی موثر می‌دانند. نظریه شیمیایی نشان می‌دهد که چسبندگی بستگی به pH و گروه‌های عاملی از قیر و سنگدانه دارد. نظریه مرز ضعیف گسیختگی را همیشه در ضعیف‌ترین پیوند از سطح مشترک قیر و سنگدانه‌ها می‌داند. در نهایت، نظریه ترمودینامیکی سازگاری بین قیر، سنگدانه و آب را با توجه به تفاوت در انرژی‌های سطحی آنها بررسی می‌کند.

مولکول‌های موجود در داخل یک ماده دارای سطح انرژی بالایی نسبت به مولکول‌های موجود در سطح ماده می‌باشند و همچنین برای جدا کردن مولکول‌های موجود در داخل ماده و ایجاد یک سطح جدید مولکولی بایستی کار انجام شود. مقدار کار مورد نیاز برای ساختن یک مساحت واحد از یک سطح جدید ماده مورد نظر تعریف انرژی آزاد سطحی است و آن را با علامت  $\Gamma$  نشان می‌دهند (Little and Bhasin, 2006). روش انرژی آزاد سطحی یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای

دهد. آن‌ها دریافتند که حساسیت دمایی و نیز پتانسیل گسترش ترک دمای پایین آسفالت نیز کاهش یافته است (Vallerga and Gridley, 1980; 1979). ون و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به بررسی اثرات کربن بلک بر خواص حرارتی، مکانیکی و الکتریکی نمونه‌های مخلوط آسفالتی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزودن ۷٪ کربن بلک به آسفالت، دمای نقطه نرمی و مدول برشی افزایش می‌یابد و مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد و با افزایش میزان کربن‌بلک، این اثرات ادامه می‌یابد (Wen and Chung, 2004). خالد در سال ۲۰۱۳ به بررسی خصوصیات فیزیکی قیر اصلاح شده با کربن‌بلک پرداخت که نتایج این آزمایش نشان داد که کربن‌بلک باعث کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی می‌شود. علاوه بر این، او نشان داد که کربن‌بلک باعث افزایش مقاومت در برابر ترک‌های دمای پایین و تغییر شکل دایمی می‌شود (Khalid, 2013). در پژوهش دیگری، خواص رئولوژیکی و مکانیکی قیرهای اصلاح شده با ۰ تا ۲۰ درصد کربن‌بلک مطالعه شده است. نتایج آزمایش خزش نشان می‌دهد که دوده صنعتی، ویسکوزیته قیر را در دمای پایین تغییر نمی‌دهد، ولی در غلظت‌های بالا (۱۵ تا ۲۰ درصد) قیر را در برابر شیار شدگی مقاوم می‌سازد. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نیز حاکی از مستعد بودن قیر حاوی کربن‌بلک در برابر ترک‌های حرارتی است (Astana, 2009). ژونگ و همکارانش به ارزیابی اثر کربن‌بلک در اندازه‌های مختلف و درصد‌های مختلف بر مقاومت به ترک‌های خستگی در دماهای میانی و مقاومت به شیار شدگی در دماهای بالا پرداختند و دریافتند که، به طور کلی، کربن‌بلک می‌تواند مقاومت به شیار شدگی و ترک‌های خستگی قیر را بهبود دهد. اما، اندازه ذرات نیز در روند تأثیرات موثر است. آنها بهترین درصد و اندازه را به ترتیب ۲٪ وزن قیر و ۲٫۶ میکرومتر پیشنهاد دادند (Zhong et al., 2021). لی و کیم با افزودن کربن‌بلک به دست آمده از سوختن تیرهای ضایعاتی در مقادیر مختلف ۰ تا ۲۰ درصد وزن قیر دریافتند که کربن‌بلک باعث افزایش نقطه نرمی و ویسکوزیته چرخشی، کاهش مقاومت به ترک‌های خستگی و افزایش مقاومت به ترک‌های حرارتی می‌شود (Lee and Kim, 2022). ژانگ و همکارانش با ترکیب کربن‌بلک و روغن زیستی، به اثرات آنها بر مشخصات مکانیکی قیر پرداختند و نتیجه‌گیری نمودند که کربن‌بلک رفتار قیر را در

دماهای بالا بهبود می‌دهد و در ترکیب روغن زیستی با کربن‌بلک قیری با رفتار بهتری در دماهای پایین و بالا ایجاد می‌گردد (Zhang et al., 2021). وانگ و همکارانش با افزودن کربن‌بلک به دست آمده از لاستیک‌های ضایعاتی به قیر دریافتند که کربن‌بلک باعث بهبود پایداری در دمای بالا، انتقال حرارت، ظرفیت گرمایی و خود ترمیمی قیر می‌گردد (Wang et al., 2022). با بررسی عملکرد روسازی یک راه در طی مدت ۶ سال بهره برداری از آن که از کربن‌بلک برای اصلاح قیر مخلوط آسفالتی مورد رویه استفاده شده بود دریافت شد که افزودن کربن‌بلک خرابی‌های سطحی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد که به دلیل کنترل نور ماوراء بنفش می‌باشد (Sasaki and Nitta, 2021). تن زاده و شفافبخش به بررسی خصوصیات مکانیکی قیر اصلاح شده با کربن‌بلک و نانو کربن‌بلک به دست آمده از ضایعات پتروشیمی در مقادیر مختلف و حساسیت رطوبتی با استفاده از پارامترهای انرژی سطحی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که ذرات کربن‌بلک و نانو کربن‌بلک شاخص نفوذ و مدول سختی قیر را افزایش دادند. همچنین، انرژی سطحی کل به مقدار ۵۰ و ۸۰٪ با افزودن ۱۰٪ کربن‌بلک و ۷٪ نانو کربن‌بلک افزایش یافت. آنها همچنین دریافتند که تر شونده‌گی با نانو کربن‌بلک بیشتر از کربن‌بلک بوده است. حساسیت رطوبتی ناشی از کربن‌بلک و نانو کربن‌بلک نیز نشان داده شد که بهبود می‌یابد (Tanzadeh and Shafabakhsh, 2020). مخلوط‌های آسفالت متخلخل متشکل از مصالح سنگی با دانه بندی باز بوده که درصد فضای خالی بالایی در حدود ۱۸ تا ۲۲٪ دارند. استفاده از آنها در رویه روسازی‌های دارای مزایای بهبود ایمنی رانندگی، از بین بردن پاشش آب و هیدروپلینینگ و کاهش صدا می‌باشد (Ren et al., 2021; Yu et al., 2015). به دلیل تماس مکرر و مستقیم با آب، مخلوط‌های آسفالت متخلخل حساسیت بیشتری به آسیب رطوبتی دارند و از این رو خرابی‌های شن زدگی و عریان شدگی ناشی از رطوبت از نگرانی‌های مهم در مورد این مخلوط‌ها می‌باشد (Wang et al., 2021; Zhang and Leng, 2017; Mo et al., 2009). بنابراین، ارزیابی حساسیت رطوبتی و درک مکانیزم گسترش آسیب رطوبتی در طرح این مخلوط‌ها دارای اهمیت زیادی است. همچنین، آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA) مخلوطی با دانه بندی باز می‌باشد که محبوبیت زیادی

طبق این تئوری، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده‌ای، براساس نوع نیروهای مولکول‌های سطح، به سه مولفه تقسیم می‌شود. الف- مولفه غیرقطبی یا مولفه لیفشیتز-ون دروالز (LW)، ب- مولفه اسیدی لوئیس، ج- مولفه بازی لوئیس. انرژی آزاد سطحی کل با ترکیب این مولفه‌ها از طریق رابطه ۱ به دست می‌آید (Arabani and Hamed, 2014).

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

که در آن  $\Gamma$  انرژی آزاد سطحی کل ماده،  $\Gamma^{LW}$  مولفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی و  $\Gamma^{AB}$  مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی است. مولفه قطبی انرژی آزاد سطحی طبق رابطه ۲ از پارامتر اسید لوئیس ( $\Gamma^+$ ) و باز لوئیس ( $\Gamma^-$ ) تشکیل شده است (Arabani and Hamed, 2014).

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

از دید ترمودینامیکی انرژی آزاد پیوستگی  $\Delta G^{ic}$  مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک ترک با سطح واحد در داخل یک ماده تعریف می‌شود. براساس تعریف انرژی آزاد سطحی، ساده است تا کار کل پیوستگی را برای مواد گوناگون به شرح رابطه ۳ نشان داد (Arabani and Hamed, 2014).

$$\Delta G^{ic} = 2\Gamma \quad (3)$$

که در آن  $\Gamma$  انرژی آزاد سطحی کل ماده مورد نظر است. کار پیوستگی یک قیر یک پارامتر مهم است که در بعضی از معادلات پایه مکانیک شکست برای تعیین انرژی مورد نیاز برای رشد ترک های خیلی ریز در داخل فاز قیری یا فاز ماستیک مخلوط قیری به کار می‌رود (Cheng et al., 2002).

انرژی آزاد چسبندگی ( $\Delta G_i^a$ ) یا کار چسبندگی بین دو ماده تابعی از مولفه‌های انرژی آزاد سطحی هر کدام می‌باشد. توصیف پدیدار شناسی کار چسبندگی یا انرژی آزاد چسبندگی مقدار کار خارجی مورد نیاز برای جدا کردن دو ماده در سطح مشترک آنها در خلاء می‌باشد. کار چسبندگی دارای دو مولفه اصلی قطبی یا اسیدی-بازی و مولفه غیر قطبی یا لیفشیتز-ون دروالز می‌باشد. رابطه (۴) برای مشخص کردن انرژی آزاد چسبندگی بین قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Arabani and Hamed, 2014).

در سطح دنیا پیدا نموده است. این مخلوط اولین بار در آلمان در سالهای دهه ۶۰ قرن بیستم ابداع شد. استفاده از این مخلوط به دلیل مزایای زیاد از جمله مقاومت بالا در برابر شیارشدگی و خستگی رشد زیادی نموده است. به دلیل استفاده از این مخلوط در رویه روسازی‌ها، به طور مداوم در معرض سیکل‌های تر و خشک شدن و یا یخ زدن و آب شدن است، که به دلیل ساختار متخلخل آن پتانسیل بالاتری برای خرابی آسیب رطوبتی دارد (Khodaii et al., 2012).

مطالعات صورت گرفته در منابع موجود نشان می‌دهد که به طور کلی افزودنی کربن بلک چندان مورد مطالعه پژوهشگران صورت نگرفته است، حال آنکه به دلیل ارزان بودن و همچنین ماهیت کربنی می‌تواند تاثیر مثبت بر نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی داشته باشند. همچنین استفاده از روش - AASHTO 283 به عنوان یک روش پر هزینه و زمان بر شناخته می‌شود که برای هر آزمایش نیاز به ۶ نمونه آسفالتی برای تعیین مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب است. از طرف دیگر بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد بررسی تاثیر استفاده از کربن‌بلک بر حساسیت رطوبتی آسفالت متخلخل و ماستیک سنگی درشت دانه نیز انجام نگرفته است. بنابراین، اهداف این تحقیق شامل بررسی تاثیر کربن‌بلک بر حساسیت رطوبتی آسفالت متخلخل و ماستیک سنگی درشت دانه با دو روش AASHTO T283 و پارامترهای انرژی آزاد سطحی می‌باشد. در صورت هماهنگی و تطابق مناسب نتایج روش انرژی آزاد سطحی و لاتمن اصلاح شده می‌توان از روش کم هزینه‌تر انرژی آزاد سطحی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی استفاده کرد. از طرف دیگر در این تحقیق تاثیر کربن‌بلک بر خصوصیات قیر نیز مطالعه می‌گردد.

## ۲- تئوری انرژی آزاد سطحی

چندین تئوری، انرژی آزاد سطحی مواد را بر اساس ساختار مولکولی‌شان تشریح می‌کنند. از مهمترین تئوری‌هایی که به صورت گسترده برای تشریح مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد مختلف به کار رفته است، می‌توان به تئوری اسیدی-بازی اشاره کرد (Moghaddas Nejad et al., 2012).

$$\Delta G_i^a = \Delta G_i^{aLW} + \Delta G_i^{aAB} = 2 \left[ \left( \sqrt{\Gamma_S^{LW} \Gamma_l^{LW}} \right) + \left( \sqrt{\Gamma_S^+ \Gamma_l^-} \right) + \left( \sqrt{\Gamma_S^- \Gamma_l^+} \right) \right] \quad (4)$$

نظر اندازه‌گیری شده باشند. رابطه ۵ برای محاسبه چسبندگی قیر و سنگدانه در حضور آب مورد استفاده قرار می‌گیرد که اندیس‌های ۱، ۲، ۳ به ترتیب نشان دهنده قیر، سنگدانه و آب می‌باشند. اگر مقادیر انرژی آزاد چسبندگی منفی باشد این بدان معنی است که دو ماده تمایل به چسبندگی با یکدیگر دارند و هر چه مقدار منفی بیشتر شود این تمایل افزایش می‌یابد (Arabani and Hamedi, 2014).

$\Delta G_i^a$  = انرژی آزاد چسبندگی

$\Delta G_i^{aLW}$  = جز غیر قطبی انرژی آزاد چسبندگی

$\Delta G_i^{aAB}$  = جز قطبی انرژی آزاد چسبندگی

$\Gamma_l^+$  و  $\Gamma_l^-$  و  $\Gamma_l^{LW}$  = اجزای انرژی آزاد سطحی قیر

$\Gamma_S^+$  و  $\Gamma_S^-$  و  $\Gamma_S^{LW}$  = اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه

برای یک مخلوط قیر و سنگدانه رابطه ۴ هنگامی به کار

می‌رود که مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه مورد

$$\Delta G_{132}^a = +\Gamma_{13} + \Gamma_{23} - \Gamma_{12} = - \left[ \begin{aligned} & (2\Gamma_3^{LW}) + (4\sqrt{\Gamma_3^+ \Gamma_3^-}) - (2\sqrt{\Gamma_1^{LW} \Gamma_3^{LW}}) - (2\sqrt{\Gamma_3^+ \Gamma_1^-}) - (2\sqrt{\Gamma_1^+ \Gamma_3^-}) - (2\sqrt{\Gamma_2^{LW} \Gamma_3^{LW}}) \\ & - (2\sqrt{\Gamma_3^+ \Gamma_2^-}) - (2\sqrt{\Gamma_2^+ \Gamma_3^-}) - (2\sqrt{\Gamma_1^{LW} \Gamma_2^{LW}}) + (2\sqrt{\Gamma_1^+ \Gamma_2^-}) + (2\sqrt{\Gamma_2^+ \Gamma_1^-}) \end{aligned} \right] \quad (5)$$

می‌آید که در آنها سه مجهول مشترک وجود دارد که با حل همزمان این سه رابطه، این سه مجهول به دست می‌آیند (Van Oss et al., 1988).

(۶)

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

$\Gamma_S^-$ ،  $\Gamma_S^+$ ،  $\Gamma_S^{LW}$  = به ترتیب مؤلفه لیفشیتر و ندروالز، مؤلفه

اسیدی لوئیس و مؤلفه بازی لوئیس برای ماده مجهول می‌باشند.

$\Gamma_l^-$ ،  $\Gamma_l^+$ ،  $\Gamma_l^{LW}$  = به ترتیب مؤلفه لیفشیتر و ندروالز، مؤلفه

اسیدی لوئیس و مؤلفه بازی لوئیس برای پروب‌ها می‌باشند.

انرژی آزاد سطحی چسبندگی قیر سنگدانه از- انرژی آزاد سطحی چسبندگی آب- سنگدانه ضعیف‌تر است. این رابطه بر اساس این حقیقت است که اجزای انرژی سطحی آب از اجزاء متناظر آن در قیرها بزرگ‌تر است. تفاوت بین این انرژی‌های آزاد سبب می‌شود تا سنگدانه‌ها از قیر عریان شوند.

هنگامی که این تفاوت بیشتر می‌شود تمایل سنگدانه‌ها برای عریان شدگی در حضور آب افزایش می‌یابد. در نتیجه، در پژوهش‌های مختلف، پارامترهایی برای تحلیل و پیش‌بینی خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی ارائه شده است. اولین پارامتر که در W104\_NCHRP به آن اشاره شده است، نسبت کار چسبندگی قیر- سنگدانه در حالت خشک  $W_{AB}$

## ۲-۱- اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی

به منظور اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها و قیرها می‌توان از روش‌های گوناگونی استفاده کرد که روش قطره چسبیده (روش SD) یکی از متداول‌ترین روش‌هایی است که امروزه هم برای سنگدانه و هم برای قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رابطه با این آزمایش می‌توان گفت که یک مایع آزمایش بر روی سطح افقی صاف قیر پخش می‌شود. عکس قطره مایع شکل گرفته بر روی سطح سنگدانه یا قیر با استفاده از دوربین گرفته می‌شود. زوایای تماس با مایع‌های آزمایش مختلف با استفاده از روابط کار حاصل از چسبندگی برای تعیین مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای هر مایع آزمایش حداقل سه نمونه باید آزمایش و سه زاویه ثبت شود که میانگین آن‌ها به عنوان زاویه تماس مورد نظر ثبت می‌گردد. در این پژوهش از سه مایع آزمایش آب، فرمامید و گلیسرول استفاده شده است (Wei and Zhang, 2012).

انجام آزمایش ذکر شده برای هر نوع سنگدانه و یا قیر با سه نوع مایع آزمایش مختلف می‌توان سه رابطه مانند رابطه ۶ تشکیل داد که اندیس  $\Gamma$  نشان دهنده مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع آزمایش است که معلوم هستند. زاویه تماس نیز از آزمایش قطره چسبیده به دست می‌آید. سه مولفه انرژی آزاد سطحی قیر با اندیس S مجهول هستند که اگر سه بار با مایع آزمایش‌های مختلف این آزمایش تکرار شود، سه رابطه بدست

به دلیل استفاده از دو نوع مخلوط متفاوت (مخلوط SMA و متخلخل) در این پژوهش از دو نوع دانه بندی استفاده شده است. برای آسفالت متخلخل دانه بندی شماره ۱ از محدوده دانه بندی توصیه شده در نشریه ۲-۳۸۴ با حداکثر اندازه اسمی ۱۲٫۵ میلیمتر استفاده شده است. برای مخلوط SMA از دانه بندی با حداکثر اندازه اسمی ۹٫۵ میلیمتر مطابق نشریه NCHRP 425 استفاده گردیده است. محدوده دانه بندی‌ها و حد وسط آنها برای مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و SMA در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

### ۳-۲- قیر

انتخاب نوع قیر بر اساس شرایط محیطی، ترافیک عبوری و عملکرد مورد انتظار از مخلوط‌های آسفالتی متخلخل انتخاب می‌گردد. در این تحقیق از قیر ۷۰-۶۰ شرکت نفت پاسارگاد استفاده شده است. جدول ۳ مشخصات قیر مصرفی در این تحقیق را نشان می‌دهد.

### ۳-۳- کربن بلک یا دوده صنعتی

اضافه کردن اصلاح‌کننده فیلر کربن‌بلک به قیر خالص، خصوصیات رئولوژیکی قیر را تغییر می‌دهد و می‌تواند بر روی رفتار ویسکوالاستیک آن اثرگذار باشد. در این پژوهش، کربن بلک به دلیل داشتن ماهیت کربنی، ارزان بودن و بهبود مشخصات ریزش قیر که از معیارهای مهم و اساسی در بکارگیری دو نوع آسفالت SMA و متخلخل می‌باشد، به صورت درصد وزنی قیر به عنوان ماده افزودنی استفاده گردید. افزودنی کربن بلک از نوع N-330 (شکل ۲) از شرکت دوده صنعتی پارس تهیه گردید که مشخصات آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

به کار چسبندگی بین قیر-سنگ‌دانه در حالت مرطوب  $W_{AB}^{wet}$  است که در رابطه ۷ نشان داده شده است (Little and Bhasin, 2006).

$$ER_1 = \left| \frac{W_{AB}}{W_{AB}^{wet}} \right| \quad (۷)$$

دومین پارامتر، نسبت تفاوت کار چسبندگی بین قیر-سنگ‌دانه در حالت خشک و کار پیوستگی قیر  $W_{BB}$  به کار چسبندگی بین قیر-سنگ‌دانه در حالت مرطوب است که در رابطه ۸ نشان داده شده است (Little and Bhasin, 2006).

$$ER_2 = \left| \frac{(W_{AB} - W_{BB})}{(W_{AB}^{wet})} \right| \quad (۸)$$

### ۳- مصالح مصرفی

مواد و مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل سنگ‌دانه، قیر و کربن بلک می‌باشند که هر یک به طور مختصر توضیح داده شده است.

### ۳-۱- سنگ‌دانه

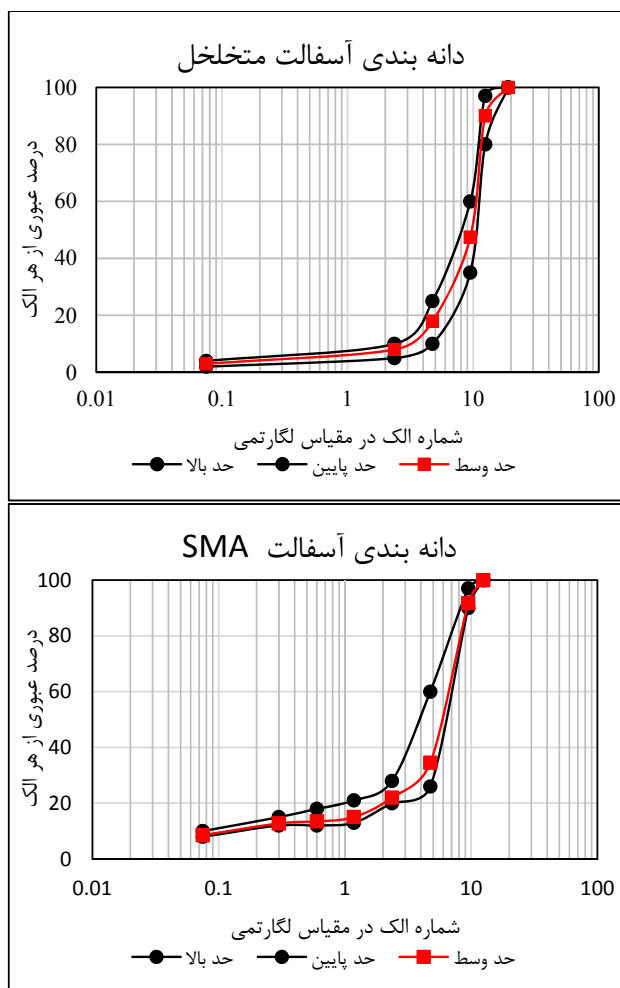
مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و SMA از جنس آهکی دولومیتی می‌باشد که از شرکت نگین گستران راه زندیگان در شهر زنجان تهیه شد. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی در (جدول ۱) و مشخصات فنی مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

جذب آب (%)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۰٫۸	۲٫۶۵	۲٫۷۱	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱٫۲	۲٫۶۵	۲٫۷۳	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
-		۲٫۸۶	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰
	۲٫۶۶۷		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی $G_{sb}$ (گرم بر سانتی متر مکعب)

جدول ۲. مشخصات فنی مصالح سنگی

نتایج آزمایش		روش آزمایش	مشخصه
ریزدانه	درشت دانه		
۷۸	-	AASHTO-T176	ارزش ماسه‌ای
-	۲۷	AASHTO-T96	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس
-	در یک جبهه ۱۰۰ در دو جبهه ۹۸	ASTM-D5821	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴
	۲۰	-	درصد سلیس مصالح سنگی ( $\text{SiO}_2$ )
۳	-	AASHTO-M6	ضریب نرمی ماسه
-	۲۰	BS-812	درصد تورق
۰,۷	۱,۳	AASHTO-T104	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم
	بیش از ۹۵ درصد	ASTM-D1664	درصد اندود به قیر مصالح سنگی
-	ندارد	ASTM-D4791	درصد دانه‌های پهن و دراز



شکل ۱. دانه بندی استفاده شده در این پژوهش



شکل ۲. کرین بلک N330 مورد استفاده در تحقیق

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی در تحقیق

مشخصه	روش آزمایش	نتیجه
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، برحسب ۰/۱ میلی متر	ASTM-D5	۶۴
نقطه نرمی، برحسب درجه سانتی گراد	ASTM-D36	۵۱,۱
مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی گراد، برحسب سانتی متر	ASTM-D113	>۱۰۰
درجه اشتعال، برحسب درجه سانتی گراد	ASTM-D92	۳۰۵
وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (گرم بر سانتی متر مکعب)	ASTM-D70	۱,۰۱۸
کندروانی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)	ASTM-D2170	۸۴۱
کندروانی در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)	ASTM-D2170	۳۵۲
کندروانی در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)	ASTM-D2170	۱۳۱
حلالیت قیر (درصد)	ASTM-D2042	۹۹,۹
فرآیند اون لایه نازک قیر، تغییر جرم اولیه (درصد)	ASTM-D1754	۰,۰
درجه نفوذ پسماند فرآیند اون لایه نازک قیر (۰,۱ میلی متر)	ASTM-D5	۳۳
درجه نفوذ قیر پسماند نسبت به قیر اولیه (درصد)	ASTM-D5	۶۶
کشش پذیری پسماند فرآیند اون لایه نازک قیر (سانتی متر)	ASTM-D113	>۵۰

جدول ۴. مشخصات دوده صنعتی نوع N-330

عدد پدی ASTM D1510 (mg/g)	77 - 87	مقدار ذرات ریز (پاکت) (%) (Max)	10
عدد سطحی نیتروژن (m <sup>2</sup> /g)	73 - 83	ASTM D1508	
عدد جذب (cm <sup>3</sup> /100g)	97 - 107	دانسیتته ریزشی	400-360
ته رنگی دوده (قدرت سیاهی) (ITRB%)	99 - 109	ASTM D1513 (gr/Lit)	
عدد رنگ بری تولوئن (%) (Min)	85	سختی ذرات دوده سانتی نیوتن یا CN	Oct-40
مقدار خاکستر (%) (Max)	0.75	ASTM D5230	
مقدار ذرات ریز (بیگ بگ) (%) (Max)	7	مقدار ذرات فرآر (%) (Max)	1
مقدار ذرات ریز (بیگ بگ) (%) (Max)	7	غربال شماره ۳۵ (Max) ppm باقیمانده الک	10
مقدار ذرات ریز (بیگ بگ) (%) (Max)	7	ASTM D1514	
مقدار ذرات ریز (بیگ بگ) (%) (Max)	7	غربال شماره ۳۲۵ (Max) (ppm)	1000
مقدار ذرات ریز (بیگ بگ) (%) (Max)	7	ASTM D1506	
مقدار ذرات ریز (بیگ بگ) (%) (Max)	7	اتلاف حرارت (%) (Max)	9-7.5
مقدار ذرات ریز (بیگ بگ) (%) (Max)	7	ASTM D1509	
مقدار ذرات ریز (بیگ بگ) (%) (Max)	7	مقدار ذرات فرآر (%) (Max)	9-7.5
مقدار ذرات ریز (بیگ بگ) (%) (Max)	7	ASTM D1508	

#### ۴- آماده سازی قیر اصلاح شده و مخلوط‌های آسفالتی

همانطور که قبلاً گفته شد، در این پژوهش از افزودنی کربن بلک با مقادیر ۰، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ درصد جرم قیر استفاده شده است. این قیرها، به ترتیب، با  $OB+0\%C$ ،  $OB+4\%CB$ ،  $OB+8\%CB$ ،  $OB+12\%CB$ ،  $OB+12\%CB$  نشان داده می‌شوند. به این منظور، قیر خالص تا دمای ۱۶۰ درجه گرم شده و سپس مقدار مورد نظر ماده به آن اضافه شده و با فرکانس ۵۰ هرتز به مدت ۹۰ دقیقه عمل اختلاط با میکسر ساخته شده در آزمایشگاه انجام گرفت. به منظور شبیه‌سازی شرایط، نمونه‌هایی که در آنها افزودنی وجود ندارد، نیز در همین شرایط قرار گرفته‌اند. سپس از قیر بدون افزودنی اصلاح‌شده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌های آسفالتی مقدار درصد قیر بهینه برای درصد افزودنی‌های مختلف و برای هر مخلوط محاسبه گردید. طرح اختلاط برای آسفالت متخلخل به روش کشور اسپانیا انجام گردید. بر اساس این روش مقدار درصد فضای حداقلی برابر ۲۰ درصد، مقدار حداکثر سایش در آزمایش کانتابرو پیر نشده برابر ۲۵ درصد و حداقل درصد قیر برابر ۴/۵ درصد است. در این پژوهش، از مقدار درصد قیر متناسب با درصد فضای خالی ۲۰ درصد استفاده شد که قیر بهینه برای آسفالت متخلخل ۵،۲۶٪ تعیین گردید. همچنین، طرح اختلاط برای مخلوط‌های آسفالتی SMA از روش مارشال انجام گردیده و درصد قیر ۶،۴٪ تعیین گردید. طرح اختلاط برای قیر بدون افزودنی انجام گردید و برای مخلوط‌های حاوی قیرهای همراه با افزودنی، از همان درصد قیر بدست آمده برای قیر بدون افزودنی استفاده شد. ولی مقدار دمای اختلاط و تراکم به ازای افزایش هر ۴ درصد کربن بلک ۴ درجه سانتی‌گراد اضافه شد. ساخت نمونه‌های آسفالتی متخلخل شامل سه مرحله حرارت دادن مصالح سنگی و قیر، اختلاط سنگ‌دانه و قیر و سپس تراکم است. به دلیل ساختار اسکلتی و غالب بودن قسمت درشت‌دانه نمونه متخلخل، جهت کنترل ارتفاع نمونه در حد متعارف از نمونه‌های ۱۰۵۰ گرمی استفاده گردید. پس از توزین سنگ‌دانه‌ها طبق دانه‌بندی، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و در داخل گرمخانه قرارداد شدند. قیر مصرفی نیز به مدت ۱/۵ ساعت در دمای اختلاط قرارداد شد. بعد از گرم شدن قیر و مصالح سنگی، قیر داخل مخلوط‌کن

ریخته شده و مصالح سنگی به آن اضافه گردیده و به خوبی در میکسر آزمایشگاهی مخلوط گردید. مخلوط موردنظر به مدت ۳۰ دقیقه در دمای تراکم قرارداد شد. قابل‌ذکر است که قالب‌های مارشال نیز در داخل گرمخانه و در دمای تراکم قرارداد شدند. در این تحقیق جهت تراکم از چکش مارشال استفاده شد. تعداد ضربات وارده برای تراکم نمونه‌های آسفالت متخلخل ۵۰ ضربه به هر طرف نمونه بود. پس از تراکم، نمونه‌های آسفالتی به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرارداد شدند تا به دمای محیط برسند. بعد از سرد شدن مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده، نمونه‌های ساخته‌شده از قالب‌های مارشال خارج شدند.

برای ساخت نمونه‌های SMA، مصالح سنگی مطابق دانه‌بندی تعیین‌شده، وزن شده و در سینی‌های فلزی ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در داخل اون با دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، قرار گرفت. قیر به‌طور جداگانه به مدت ۲ ساعت در دمای اختلاط در داخل اون، گرم شده و بعد از آن قیر داخل مخلوط‌کن ریخته شده و مصالح سنگی به آن اضافه گردید. عمل مخلوط کردن چند دقیقه ادامه یافته تا قیر به‌خوبی سطح مصالح سنگی را بپوشاند. بعد از آن، مخلوط ساخته‌شده در دمای تراکم در داخل اون گذاشته شد. هم‌زمان قالب‌های فلزی مارشال داخل اون گذاشته شدند. بعد از مدت یک ساعت، قالب‌ها روغن‌کاری و پر شدند. قالب‌های پرشده در محل مخصوص به خود، زیر چکش مارشال که چند دقیقه قبل از کوبیدن گرم می‌شود، قرار گرفته و متراکم شدند. در مخلوط آسفالتی SMA، از ۵۰ ضربه مارشال برای تراکم استفاده شد؛ چراکه تعداد ضربه بیشتر علاوه بر عدم ایجاد تراکم بیشتر، باعث شکستگی بالا در مصالح سنگی می‌شود.

#### ۵- آزمایش‌های انجام گرفته

آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش شامل تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM و آزمایش‌های رایج بر روی قیر بدون افزودنی و حاوی درصد‌های مختلف از کربن بلک، آزمایش زاویه سطح تماس بر روی مصالح سنگی و قیرها و آزمایش حساسیت رطوبتی بر روی مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و SMA حاوی قیرهای اصلاح شده مختلف می‌باشند که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

### ۱-۵- آزمایش‌های رایج بر روی قیر

آزمایش درجه نفوذ، نقطه نرمی و درجه انگی بر روی قیرهای مختلف، به ترتیب، مطابق با استانداردهای ASTM D36، D5 و ASTM D113 انجام گرفت.

### ۲-۵- آزمایش زاویه تماس

در این تحقیق با توجه به امکانات موجود از روش زاویه سطح تماس برای اندازه گیری انرژی آزاد سطحی در دانشکده شیمی دانشگاه زنجان استفاده شد (شکل ۳). از این روش برای تعیین انرژی آزاد سطحی جامدات و در برخی موارد برای تعیین انرژی آزاد سطحی مایعات استفاده می‌شود. روش انجام این آزمایش بدین صورت است که با زاویه سطح تماس از یک نوع مایع با خصوصیات مشخص انرژی آزاد سطحی بر روی سطح ماده مورد نظر و اندازه‌گیری زاویه تماس، پارامترهای انرژی آزاد سطحی بدست می‌آید. مایع‌های مورد استفاده در این آزمایش آب، فرمامید و گلیسرول به ترتیب مایع‌های قطبی،

نیمه قطبی و غیر قطبی، به عنوان مایع مشخصه در نظر گرفته شده‌اند که مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. برای تعیین پارامترهای انرژی آزاد سطحی، نیاز به تکرار آزمایش با حداقل سه مایع مشخصه مختلف می‌باشد. معمولاً انرژی آزاد سطحی برحسب واحد  $\frac{erg}{cm^2}$  بیان می‌شود که معادل  $\frac{mj}{m^2}$  است. زاویه تماس به عنوان زاویه‌ای که از برخورد سطح تماس مایع مشخصه با ماده مورد نظر بدست می‌آید تعریف می‌شود. زاویه تماس زیاد نشانه انرژی آزاد سطحی کم و زاویه تماس کم نشان دهنده انرژی آزاد سطحی زیاد می‌باشد. زاویه تماس صفر زمانی اتفاق می‌افتد که قطره بطور کامل بر روی سطح پخش شود. سپس با استفاده از زاویه تماس‌های بدست آمده و همچنین در اختیار داشتن مشخصات مایع‌های مشخصه می‌توان اجزای مختلف انرژی آزاد سطحی را با استفاده از روابط مربوط بدست آورد (Wei and Zhang, 2012).

جدول ۵. مؤلفه انرژی آزاد سطحی مایع‌های استفاده‌شده در این پژوهش ( $erg / Cm^2$ )

نوع مایع	انرژی آزاد سطحی کل ( $\Gamma$ )	مؤلفه غیر قطبی ( $\Gamma^{LW}$ )	مؤلفه قطبی ( $\Gamma^{AB}$ )	مؤلفه اسیدی ( $\Gamma^+$ )	مؤلفه بازی ( $\Gamma^-$ )
آب	۷۲.۸	۲۱.۸	۵۱	۲۵.۵	۲۵.۵
فرمامید	۵۸	۳۹	۱۹	۲/۲۸	۳۹.۶
گلیسرول	۶۴	۳۴	۳۰	۳/۹۲	۵۷.۴



شکل ۳. چگونگی تعیین زاویه تماس در روش SD

### ۳-۵- آزمایش حساسیت رطوبتی به روش

#### AASHTO T283

در این پژوهش، به منظور بررسی تاثیر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی از روش مکانیکی براساس استاندارد AASHTO T283 به عنوان فراگیرترین روش موجود استفاده شده است. به منظور بررسی روشن‌تر تفاوت در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مختلف، از آزمایش‌های نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم استفاده شده

است. برای انجام آزمایش حساسیت رطوبتی به روش لاتمن اصلاح شده برای هر مخلوط باید سه نمونه در شرایط مرطوب و سه نمونه در شرایط خشک ساخته شود. نمونه‌ها باید به نحوی متراکم شوند که درصد هوای آنها بین  $0.5 \pm 7\%$  درصد باشد. نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش با استفاده از دستگاه چکش مارشال ساخته شده است. برای رسیدن به درصد هوای مورد نظر ابتدا بایستی تعداد ضربات مورد نیاز

مرطوب به خشک (برحسب درصد) با استفاده از رابطه ۱۰ به دست می‌آید.

$$TSR = 100(ITS_{wet}/ITS_{dry}) \quad (10)$$

که در آن TSR نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم ( $ITS_{wet}$ ، %) میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب ( $ITS_{dry}$ ، KPa)، و میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های خشک (KPa) است (AASHTO, 2007).

### نتایج

در این قسمت نتایج هر یک از آزمایش‌های انجام گرفته بر روی قیرها، مصالح سنگی و مخلوط‌های آسفالتی ارائه می‌شود.

### نتایج تصاویر SEM

جهت بررسی نحوه اختلاط قیر با افزودنی کربن بلک، از عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی با SEM استفاده شد. عکس‌های مورد نظر بعد از ۲۴ ساعت از سطح قیرهای اصلاح شده با کربن بلک گرفته شد. شکل ۵ تصاویر SEM گرفته شده از قیرهای اصلاح شده با کربن بلک را نشان می‌دهند. با توجه به عکس‌های SEM گرفته شده از سطح قیرهای اصلاح شده با کربن بلک می‌توان نتیجه گرفت که مقدار سازگاری بین قیر و ماده افزودنی تا ۸ درصد افزایش پیدا می‌کند و بعد از آن احتمالاً به دلیل افزایش بیش از حد مواد کربن‌بلک و کاهش یکپارچگی مخلوط کاهش سازگاری مشاهده می‌گردد.

برای رسیدن به این درصد از تراکم مشخص شود. پس از متراکم کردن نمونه قطر و ارتفاع آنها اندازه‌گیری می‌شود. سپس، وزن مخصوص حقیقی و حداکثر اندازه‌گیری می‌شود و بر اساس آنها حجم و میزان حجم حفرات هوا اندازه‌گیری می‌شود. سپس، نیمی از نمونه‌های هر گروه (سه نمونه) در شرایط خشک باقی می‌ماند (نمونه‌های خشک) و نیمی از آنها (سه نمونه) باید تحت شرایط سیکل یخ قرار گیرند (نمونه‌های مرطوب) (AASHTO, 2007).

سپس نمونه‌ها تحت آزمایش کشش غیر مستقیم قرار می‌گیرند. بارگذاری آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم با نرخ بارگذاری ۵,۰۸ سانتی متر (۲ اینچ) بر دقیقه انجام می‌شود تا لحظه‌ای که نمونه گسیخته شود. مقدار بار در لحظه گسیختگی ثبت می‌شود. با استفاده از رابطه ۹ مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم هر شش نمونه بدست می‌آید.

$$ITS = (2P)/(\pi Dt) \quad (9)$$

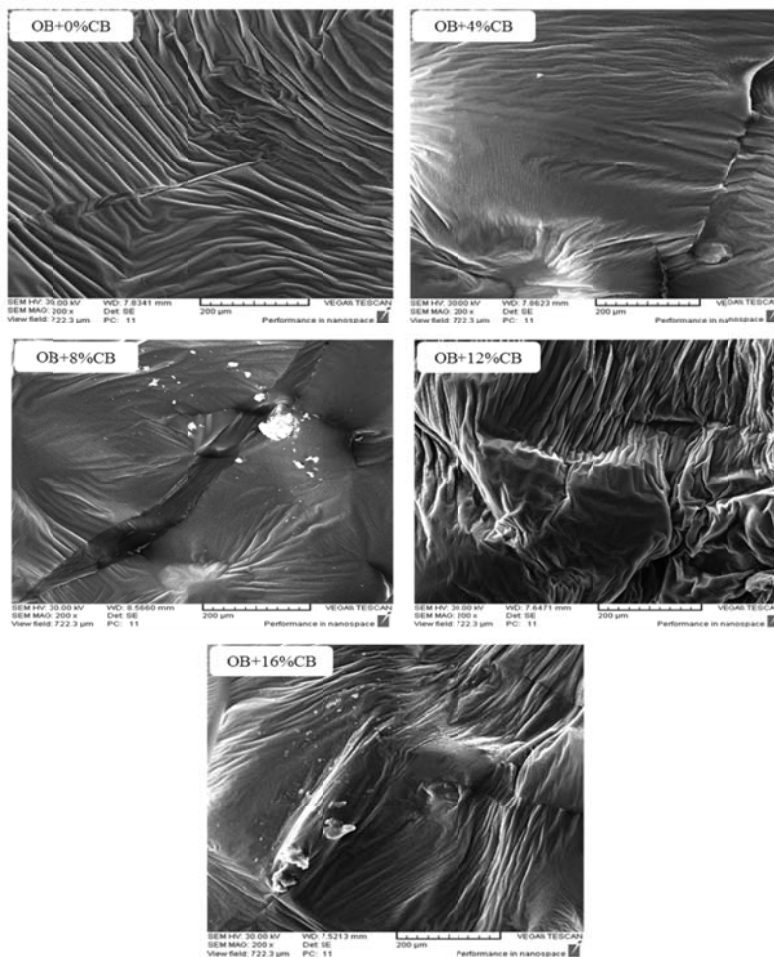
که در آن، ITS مقدار مقاومت کشش غیر مستقیم (کیلوپاسکال)، P مقدار بار در لحظه گسیختگی (کیلونیوتن)، t ضخامت نمونه آسفالتی (m)، و d قطر نمونه آسفالتی (m) است.

شکل ۴ نحوه عمل آوری نمونه‌های مرطوب و آزمایش کشش غیر مستقیم را نشان می‌دهد.

میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های خشک (سه نمونه) و مرطوب (سه نمونه) جداگانه حساب می‌شود. حساسیت رطوبتی یا پتانسیل عریان‌شدگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با نسبت میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های



شکل ۴. نحوه انجام آزمایش حساسیت رطوبتی



شکل ۵. تصاویر SEM گرفته شده از مخلوط‌های اصلاح شده با کربن بلک

### نتایج آزمایش‌های رایج بر روی قیرها

جدول ۶ نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و درجه انگی بر روی قیرها را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد کربن بلک تا ۸٪ مقدار درجه نفوذ نسبت به قیر بدون افزودنی کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این نتیجه بیانگر این است که افزودن کربن بلک سفتی قیر را افزایش می‌دهد. کاهش درجه نفوذ به معنای کاهش روانی و افزایش دوام در دماهای بالا و متوسط می‌باشد. با توجه به عکس‌های SEM گرفته شده از سطح قیرهای اصلاح شده با کربن بلک مشاهده گردید که مقدار سازگاری بین قیر و ماده افزودنی تا ۸ درصد افزایش و بعد از آن احتمالاً به دلیل افزایش مقدار کربن در کربن بلک و کاهش یکپارچگی مخلوط کاهش می‌یابد. نتایج

آزمایش نقطه نرمی نیز نشان می‌دهد با افزایش درصد کربن بلک تا ۸ درصد نقطه نرمی افزایش پیدا کرده و بعد از آن کاهش می‌یابد. افزایش نقطه نرمی منجر به کاهش حساسیت حرارتی قیرهای اصلاح شده می‌شود. افزایش نقطه نرمی بدین معناست که رفتار ویسکوز قیر با افزایش دما به تأخیر می‌افتد. نتایج آزمایش انگی نشان می‌دهد که افزایش درصد کربن بلک تا ۸ درصد باعث کاهش شکل‌پذیری قیر شده و بعد از آن روند معکوس می‌گردد. این خاصیت نشانه‌ای از چسبندگی قیرها است، هراندازه قیر چسبنده‌تر باشد، قابلیت شکل‌پذیری بیشتری خواهد داشت و نیز دانه‌های مصالح سنگی را به خوبی به هم می‌چسباند.

جدول ۶. مشخصات قیرهای اصلاح شده

آزمایش های انجام شده			
انگمی (سانتی متر)	نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)	درجه نفوذ (دهم میلی متر)	نوع قیر
۸۱,۶	۵۷,۵	۴۹,۳	OB+0%CB
۴۰,۷	۶۰,۳	۴۵,۷	OB+4%CB
۳۶	۶۴,۲	۴۰,۷	OB+8%CB
۳۷,۳	۶۳,۸	۴۱,۱	OB+12%CB
۳۸,۸	۶۲,۸	۴۲,۱	OB+16%CB

### نتایج انرژی آزاد سطحی

۱۶٪ نیز اضافه می‌شود که به دلیل طبیعت بازی این افزودنی می‌باشد. همچنین، همان طور که از داده‌های ارائه شده در جدول ۱۰ برای قیرهای اصلاح شده با کربن بلک مشخص است، مؤلفه قطبی قیر در حالت بدون افزودنی در مقایسه با مؤلفه غیر قطبی آن بسیار کوچک است. بر این اساس می‌توان گفت قیر یک ماده با خصوصیات قطبی ضعیف است که پیوند آن با سایر مواد نیز عمدتاً از طریق مؤلفه غیر قطبی و پیوندهای کووالانسی می‌باشد. دلیل عمده خاصیت قطبی ضعیف مربوط به مؤلفه بازی قیر می‌باشد که مقدار ناچیزی داشته و تقریباً برابر صفر است. انرژی آزاد سطحی کل پارامتری با تأثیر دوگانه به شمار می‌آید، زیرا افزایش آن سبب بهبود مقاومت در برابر خرابی خستگی از نوع پیوستگی شده که یک اثر مثبت در کاهش گسیختگی پیوستگی به شمار می‌آید و از طرفی باعث کاهش در پوشش پذیری قیر بر روی سطح سنگ‌دانه می‌شود که برای ایجاد چسبندگی مناسب بین قیر-سنگ‌دانه نامطلوب است. زیرا افزایش در پوشش پذیری سبب می‌شود تا سطح تماس بیشتری از سنگ‌دانه توسط قیر پوشش داده شود که می‌تواند به مؤثر بودن چسبندگی مناسب بین قیر و سنگ‌دانه کمک کند.

آزمایش زاویه تماس بر روی هر یک از نمونه‌های مصالح سنگی برش داده شده و قیرها انجام شد که نتایج آنها برای هر مایع مشخصه، به ترتیب، در جداول ۷ و ۸ نشان داده شده است. مقدار زاویه ارائه شده برای هر قطره به دو صورت زاویه سمت چپ و سمت راست بود که مقدار زاویه ارائه شده در جداول ۷ و ۸ نشان دهنده میانگین دو زاویه سمت چپ و راست می‌باشد.

مقدار هر یک از زوایای به دست آمده در رابطه ۶ قرار داده شده و مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی (مؤلفه لیفشیتز و ندروالز، مؤلفه اسیدی و بازی) برای مصالح سنگی و قیرها به دست آمدند، که به ترتیب در جداول ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. نتایج اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش (درحالت استفاده از افزودنی کربن بلک) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار افزودنی تا ۸٪ به قیر مؤلفه لیفشیتز-وندروالز، و مؤلفه اسیدی و انرژی آزاد سطحی کل افزایش می‌یابد و بعد از آن کاهش می‌یابد. افزایش انرژی سطحی کل باعث می‌شود تا با افزایش افزودنی، قیر گسیختگی پیوستگی کمتری را در مقایسه با قیر در حالت بدون افزودنی تجربه کند. اما، مؤلفه بازی با افزایش مقدار افزودنی تا

جدول ۷. نتایج زوایای به دست آمده از آزمایش زاویه تماس برای مصالح سنگی

میانگین	انحراف معیار	زاویه تماس		مایع های مشخصه
		شماره ۳	شماره ۲	
68.83	1.040833	68.5	68	آب
59.73	0.80829	59.6	60.6	گلیسرول
25.47	0.85049	24.6	25.5	فرمامید

جدول ۸. نتایج زوایای به دست آمده از آزمایش زاویه تماس برای قیرهای خالص و اصلاح شده

مایع های مشخصه استفاده شده در این پژوهش									
آب		گلیسرول			فرماید			قیرها	
108.4	109.2	112.5	103.6	105.7	104.1	58.1	56.2	57.6	OB+0%CB
117.1	114.4	114.4	113.8	111.2	110.7	57.7	59.5	58.6	OB+4%CB
124.8	121.7	123.9	95	94.5	95.4	56.1	54.5	53	OB+8%CB
110.7	112.6	109.1	104.4	107.5	105.4	61.9	60	59.2	OB+12%CB
116.6	116.7	118.6	104.8	102.5	103.3	54.6	55.5	57.5	OB+16%CB

جدول ۹. مؤلفه های انرژی آزاد سطحی برای مصالح سنگی ( $\text{erg / Cm}^2$ )

18.53	مؤلفه لیفتنر و ندروالز
4.42	مؤلفه اسیدی
23.88	مؤلفه بازی

جدول ۱۰. مؤلفه های انرژی آزاد سطحی برای قیر خالص و قیرهای اصلاح شده ( $\text{erg / Cm}^2$ )

12.09	مؤلفه لیفتنر - و ندروالز	
0.16	مؤلفه بازی	OB+0%CB
0.73	مؤلفه اسیدی	
13.735	مؤلفه لیفتنر - و ندروالز	
0.316	مؤلفه بازی	OB+4%CB
0.958	مؤلفه اسیدی	
15.800	مؤلفه لیفتنر - و ندروالز	
0.387	مؤلفه بازی	OB+8%CB
1.255	مؤلفه اسیدی	
14.023	مؤلفه لیفتنر - و ندروالز	
0.438	مؤلفه بازی	OB+12%CB
1.195	مؤلفه اسیدی	
13.116	مؤلفه لیفتنر - و ندروالز	
0.467	مؤلفه بازی	OB+16%CB
1.149	مؤلفه اسیدی	

گسیختگی پیوستگی کمتری است و احتمالاً با افزایش مقدار کربن بلک تا ۸ درصد در برابر خرابی هایی که با ظهور ترک (خرابی خستگی) خود را نشان می دهند بهبود قابل توجهی را خواهیم دید. با افزایش مقدار کربن بلک از ۸ تا ۱۶ درصد مقدار کار پیوستگی کاهش پیدا کرده ولی باز هم نسبت به قیر خالص مقاومت بهتری را از خود در برابر خرابی های خستگی نشان می دهد. کار چسبندگی مقدار نیروی خارجی است که برای جدایی دو ماده در سطح تماسشان در شرایط خلأ مورد نیاز است. با توجه به جدول ۱۱ مشاهده می شود که افزایش مقدار کربن بلک از ۰ به ۸ درصد باعث افزایش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی از ۳۹،۹۸ تا ۴۷،۷۸ در حالت خشک می شود.

پس از تعیین مقدار مؤلفه های انرژی آزاد سطحی برای مصالح سنگی، قیر خالص و قیر اصلاح شده، مقدار کار پیوستگی، کار چسبندگی، کار چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در حضور آب و میزان چسبندگی بین آب و مصالح سنگی بر اساس رابطه های ۲ تا ۵ به دست آمد که نتایج آن در جدول ۱۱ نشان داده شده است. کار پیوستگی یک مایع، کار مورد نیاز برای جداسازی یک ستون مایع با مساحت سطح مقطع واحد در شرایط خلأ تعریف می شود و دو برابر مقدار انرژی آزاد سطحی کل می باشد. با توجه به جدول ۱۱ مشاهده می شود که با افزودن کربن بلک از ۰ به ۸ درصد مقدار کار پیوستگی از ۲۵،۵۶ تا ۳۴،۳۸ افزایش می یابد و قیر متحمل

می‌باشد. اگر فرآیند جابجایی از نظر ترمودینامیکی مطلوب باشد باید همراه با کاهش کلی انرژی آزاد سیستم باشد. به عبارت دیگر، کار کلی انجام شده بر سیستم در هنگام فرآیند جابجایی باید منفی باشد. نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که انرژی برای تمام ترکیبات قیر - سنگدانه - آب منفی است و نشان دهنده این است که جداسازی قیر - سنگدانه به صورت خود به خودی و در حضور آب انجام می‌شود و سیستم در رخداد این فرآیند انرژی آزاد می‌کند.

همان‌گونه که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود چسبندگی ایجاد شده بین قیر و مصالح سنگی بسیار ضعیف‌تر از چسبندگی بین آب و مصالح سنگی است که قابل انتظار نیز بود. این مطلب بیان می‌دارد که میزان انرژی آزاد سطحی آب بسیار بیشتر از انرژی آزاد سطحی قیر است.

همچنین، نتایج نشان می‌دهند که کار چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در حضور آب با افزایش ۸ درصد کربن‌بلک، از مقدار ۲۷,۱۰۵- به مقدار ۲۵,۱۱- و با افزایش ۱۶ درصد، به مقدار ۲۵,۶۳۵- می‌رسد. وقتی که آب (W) قیر (B) را از فصل مشترک قیر و سنگدانه (A) جدا می‌کند فرایندهای زیر رخ می‌دهد. ابتدا، قسمتی از فصل مشترک مصالح سنگی و قیر قیر از دست می‌رود. بر مبنای تعریف انرژی فصل مشترک، کار خارجی مورد نیاز  $\gamma_{AB}$  می‌باشد. به طور مشابه، دو فصل مشترک جدید بین آب و قیر و بین آب و مصالح سنگی به وجود می‌آید. کار انجام شده برای تشکیل این دو فصل مشترک جدید  $\gamma_{WA}$  و  $\gamma_{WB}$  می‌باشد. بنابراین، کل کار انجام شده برای جابجایی قیر از سطح مصالح سنگی  $\gamma_{WA} + \gamma_{WB} - \gamma_{AB}$

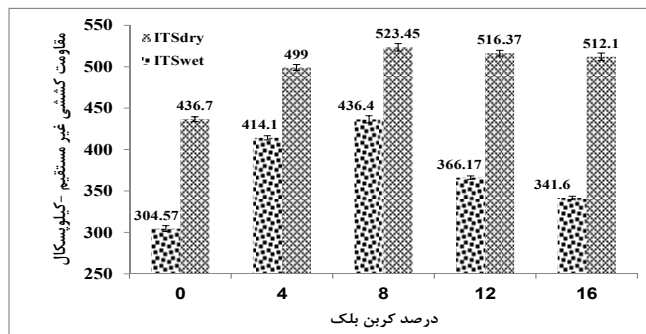
جدول ۱۱. نتایج پارامترهای به دست آمده با استفاده از روش‌های انرژی آزاد سطحی ( $\text{erg / Cm}^2$ )

متغیر	کار پیوستگی (WBB)	کار چسبندگی	کار چسبندگی در حضور آب	چسبندگی بین آب و مصالح سنگی
OB+0%CB	25.559	39.986	-27.105	110.784
OB+4%CB	29.671	43.835	-26.161	110.784
OB+8%CB	34.387	47.785	-25.110	110.784
OB+12%CB	30.940	45.706	-25.426	110.784
OB+16%CB	29.162	44.527	-25.635	110.784

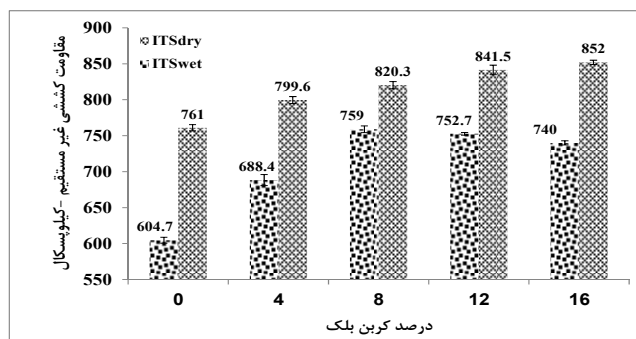
### نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب، نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و SMA، در برابر تغییرات افزودنی کربن‌بلک نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب آسفالت متخلخل و مقاومت کششی در حالت مرطوب آسفالت SMA با افزایش کربن‌بلک تا ۸٪ افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. این افزایش مقاومت کششی می‌تواند ناشی از افزایش سختی قیر و همچنین انرژی پیوستگی قیر در اثر افزودن کربن‌بلک باشد. اما، در مخلوط SMA مقاومت کششی با افزایش مقدار افزودنی تا ۱۶٪ افزایش می‌یابد. مقایسه شکل ۶ و ۷ نشان می‌دهد که تاثیر کربن‌بلک در افزایش مقاومت کششی برای مخلوط آسفالت متخلخل بیشتر از آسفالت SMA

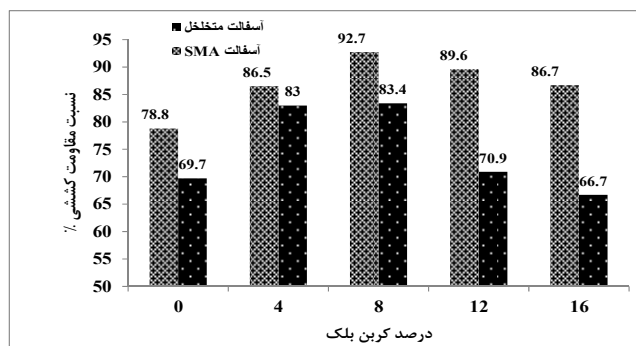
می‌باشد. شکل ۸ نتایج نسبت مقاومت کششی مرطوب به خشک (TSR) را برای مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و SMA نشان می‌دهد که به عنوان شاخصی برای ارزیابی مقاومت در برابر آسیب رطوبتی استفاده می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، به استثناء آسفالت متخلخل ساخته شده با قیر حاوی ۱۶٪ از کربن‌بلک، نسبت مقاومت کششی مخلوط‌های حاوی افزودنی بیشتر از مخلوط‌های ساخته شده با قیر بدون کربن‌بلک است. همچنین، این نسبت برای هر دو مخلوط با افزایش کربن‌بلک تا ۸٪ افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. شکل ۸ همچنین بیانگر این است که مقدار افزایش مقاومت به آسیب رطوبتی با افزودن کربن‌بلک برای مخلوط آسفالتی متخلخل بیشتر از آسفالت SMA می‌باشد.



شکل ۶. نتایج مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب در مخلوط آسفالتی متخلخل



شکل ۷. نتایج مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب در مخلوط آسفالتی SMA



شکل ۸. نسبت مقاومت کششی مرطوب به خشک برای مخلوطهای آسفالتی متخلخل و SMA

### بررسی نتایج آزمایش انرژی آزاد سطحی با نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

چسبندگی بین سنگدانه‌ها و قیر و یا از بین رفتن پیوستگی در قیر شده و خرابی حساسیت رطوبتی نمایان می‌شود (Xiao et al., 2010). عمدتاً این خرابی‌ها با استفاده از روش AASHTO T283 مورد بررسی قرار می‌گیرند. این آزمایش به دلیل استفاده از ۶ نمونه مخلوط آسفالتی برای هر ترکیب و زمان‌بر بودن فرآیند سیکل ذوب و یخبندان، یکی از آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد.

در این پژوهش با توجه به رابطه ۷ و ۸، پارامترهایی برای تحلیل و پیش‌بینی خرابی رطوبتی در مخلوطهای آسفالتی با

حساسیت رطوبتی یکی از خرابی‌های مهم روسازی‌های آسفالتی است. این خرابی ناشی از جدایی پیوند بین قیر و مصالح سنگی در محل اتصال آن‌ها توسط اثر آب است. مقاومت در برابر خرابی حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی متخلخل به دلیل قرارگیری در شرایط آب و هوایی مرطوب، می‌تواند نقش به‌سزایی در افزایش عمر این روسازی‌ها داشته باشد. مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر این خرابی، به چسبندگی و پیوستگی سیستم سنگدانه - قیر بستگی دارد (Behiry, 2013). رطوبت در آسفالت باعث از دست رفتن

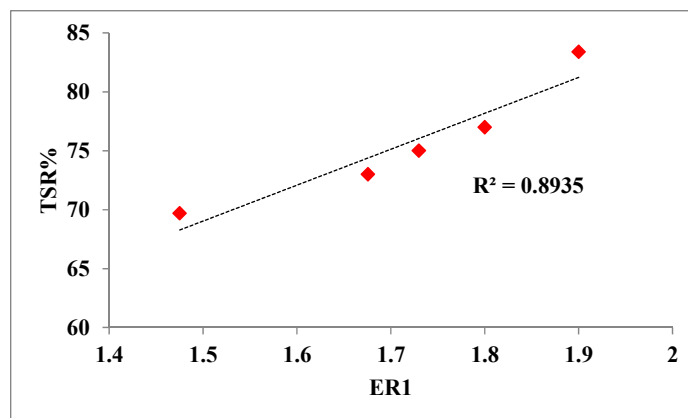
مخلوط‌های اصلاح شده با کربن بلک دارد، که مقدار  $R^2=0/77$  تأییدکننده این همبستگی است.

در شکل ۱۰ همبستگی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های اصلاح شده با کربن بلک، با هر یک از پارامترهای حساسیت رطوبتی انرژی آزاد سطحی در آسفالت SMA نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که نسبت کار چسبندگی قیر-سنگ‌دانه در حالت خشک به کار چسبندگی بین قیر-سنگ‌دانه در حالت مرطوب همبستگی مناسبی با نتایج خرابی حساسیت رطوبتی دارد. مقدار  $R^2=0/92$  تأییدکننده این همبستگی است. همچنین، با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که نسبت تفاوت کار چسبندگی قیر-سنگ‌دانه در حالت خشک و کار پیوستگی قیر، به کار چسبندگی بین قیر-سنگ‌دانه در حالت مرطوب همبستگی مناسبی با نتایج خرابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های اصلاح شده با کربن بلک دارد، که مقدار  $R^2=0/83$  تأییدکننده این همبستگی است.

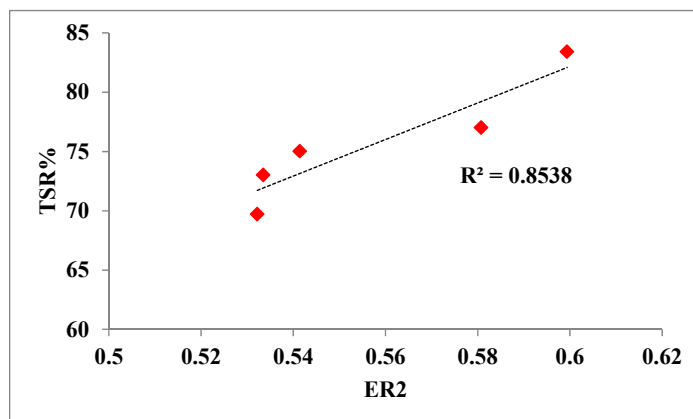
استفاده از روش‌های انرژی آزاد سطحی (به دلیل کم‌هزینه بودن و صرف زمان کمتر) ارائه شده است (AASHTO, 2007). هر یک از ۲ پارامتر ارائه شده محاسبه شده در جدول ۱۲ نشان داده شده‌اند. به منظور بررسی ارتباط بین این پارامترها با نتایج TSR در مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه همبستگی بین آنها با محاسبه  $R^2$  تعیین گردید. در شکل ۹ همبستگی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های اصلاح شده با کربن بلک، با هر یک از پارامترهای حساسیت رطوبتی انرژی آزاد سطحی در آسفالت متخلخل نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که نسبت کار چسبندگی قیر-سنگ‌دانه در حالت خشک به کار چسبندگی بین قیر-سنگ‌دانه در حالت مرطوب همبستگی مناسبی با نتایج خرابی حساسیت رطوبتی دارد. مقدار  $R^2=0/89$  تأییدکننده این همبستگی است. همچنین، در شکل ۹ مشاهده می‌شود که نسبت تفاوت کار چسبندگی قیر-سنگ‌دانه در حالت خشک و کار پیوستگی قیر، به کار چسبندگی بین قیر-سنگ‌دانه در حالت مرطوب همبستگی مناسبی با نتایج خرابی حساسیت رطوبتی

جدول ۱۲. پارامترهای انرژی آزاد سطحی تعریف شده جهت بررسی خرابی حساسیت رطوبتی کربن بلک

متغیر	ER1	ER2
OB+0%CB	1.475	0.532
OB+4%CB	1.676	0.541
OB+8%CB	1.903	0.534
OB+12%CB	1.798	0.581
OB+16%CB	1.737	0.599

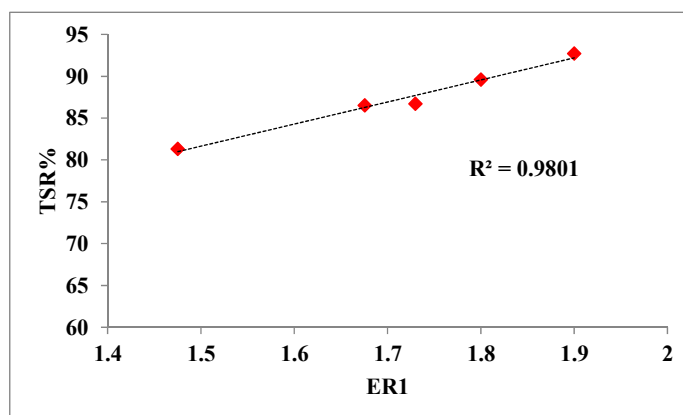


الف

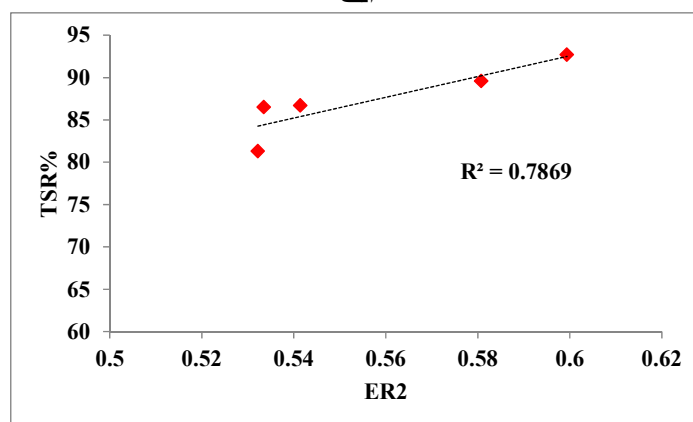


ب

شکل ۹. همبستگی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های اصلاح شده با کربن بلک، با هر یک از پارامترهای حساسیت رطوبتی انرژی آزاد سطحی در آسفالت متخلخل



الف



ب

شکل ۱۰. همبستگی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های اصلاح شده با کربن بلک، با هر یک از پارامترهای حساسیت رطوبتی انرژی آزاد سطحی در آسفالت SMA

## ۶- نتیجه گیری

bituminous road binders. in *Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 1st, Canberra*.

-Arabani, M. and Hamedi, G. H. (2014). Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistripping additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 15, 66-78.

-Astana, D. (2009). The Effect of Epoxy Bitumen Modification on Hot Mix Asphalt Properties and Rut Resistance. *Universiti Teknologi Malaysia*.

-Behiry, A. E. M. (2013). Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 4, 351-363.

-Cheng, D. Little, D., Lytton, R. and J. Holste, J. (2002). Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 44-53.

-Ibrahim, H. Wahhab, A. A. and Hasnain, J. (1998). Laboratory study of asphalt concrete durability in Jeddah. *Building and Environment*, Vol. 33, 219-230.

-Kanitpong, K. and Bahia, H. U. (2003). Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 72.

-Khalid, K. (2013). The Physical and Engineering Properties of 60/70 Bitumen with Carbon Black Additives.

-Khodaii, A., Haghshenas, H. F., Kazemi Tehrani, H., & Khedmati, M. (2013). Application of response surface methodology to evaluate stone matrix asphalt stripping potential. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(1), 117-121.

-Lee, K., & Kim, S. (2022). Performance Improvement Effect of Asphalt Binder Using Pyrolysis Carbon Black. *Materials*, 15(12), 4158.

-Little, D. N. and A. Bhasin, A. (2006). Final Report for NCHRP RRD 316: Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement. *Transportation Research Board of the National Academies*.

-Livingston, J. (1989). Carbon black additive in asphalt. experimental project No. 3, WA-84-04.

-نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و درجه انگمی نشان می‌دهد که با افزودن کربن‌بلک تا ۸ درصد، درجه نفوذ و درجه انگمی کاهش و نقطه نرمی افزایش می‌یابد و بعد از آن با افزایش میزان افزودنی روند معکوس می‌گردد.

- نتایج اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر در حالت استفاده از افزودنی کربن‌بلک نشان داد که با افزایش مقدار افزودنی به قیر انرژی آزاد سطحی کل تا ۸ درصد افزایش می‌یابد و باعث می‌شود تا با افزایش افزودنی، قیر گسیختگی پیوستگی کمتری را در مقایسه با قیر در حالت خالص تجربه کند.

- افزایش مقدار کربن‌بلک تا مقدار ۸ درصد، باعث افزایش کار پیوستگی قیر و کار چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در حالت خشک می‌شود و بعد از آن کاهش می‌یابد.

-افزایش کربن‌بلک تا ۸ درصد، باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و مرطوب در مخلوط آسفالت متخلخل شده و بعد از آن روند معکوس می‌گردد. برای مخلوط SMA مقدار مقاومت کششی در حالت خشک تا ۱۶٪ افزایش ماده افزودنی افزایش یافت اما در حالت مرطوب تا ۸٪ کربن‌بلک مقاومت کششی افزایش و بعد از آن کاهش یافت -افزایش کربن‌بلک تا ۸٪ مقاومت در برابر آسیب رطوبتی مخلوطها را افزایش داده و بعد از آن باعث کاهش مقاومت به آسیب رطوبتی می‌گردد.

-همبستگی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های اصلاح شده با کربن‌بلک، با هر یک از پارامترهای حساسیت رطوبتی انرژی آزاد سطحی در آسفالت متخلخل و SMA نشان داد که همبستگی خوبی بین کار چسبندگی قیر-سنگ‌دانه در حالت خشک به کار چسبندگی بین قیر-سنگ‌دانه در حالت مرطوب، و نسبت تفاوت کار چسبندگی قیر-سنگ‌دانه در حالت خشک و کار پیوستگی قیر، به کار چسبندگی بین قیر-سنگ‌دانه در حالت مرطوب با نتایج نسبت TSR دارد.

## ۸- مراجع

-AASHTO, (2007). Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. *AASHTO Provisional Standards: Washington, DC, USA*.

-Aliotti, A.(1962). Carbon black-its nature and possible effects on the characteristics of

- and modification prior to publication. Prepared for presentation at the ASTM Symposium in San Diego, California on December.
- Van Oss, C. J. Chaudhury, M. K. and Good, R. J. (1998). Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems. *Chemical reviews*, vol. 88, pp. 927-941.
- Wang, F., Zhu, H., Li, Y., Gu, D., Gao, Y., Feng, J., & Xu, Z. (2022). Microwave heating mechanism and Self-healing performance of scrap tire pyrolysis carbon black modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 341, 127873.
- Wang, X. W., Ren, J. X., Gu, X. Y., Li, N., Tian, Z. Y.; Chen, H. Q. (2021). Investigation of the adhesive and cohesive properties of asphalt, mastic, and mortar in porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 276, 122255.
- Wei, J. and Zhang, Y. (2012). Application of sessile drop method to determine surface free energy of asphalt and aggregate. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 40, 807-813.
- Wen, S. and Chung, D. (2004). Effects of carbon black on the thermal, mechanical and electrical properties of pitch-matrix composites. *Carbon*, Vol. 42, 2393-2397.
- Xiao, F. Zhao, W.; Gandhi, G. and Amirhanian, S. N. (2010). Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, pp. 1047-1055.
- Yao, Z. and Monismith, C. (1986). Behaviour of asphalt mixtures with carbon black reinforcement (with discussion). in *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, 1986.
- Yu, B., Jiao, L., Ni, F., Yang, J. (2015). Long-term field performance of porous asphalt pavement in China. *Road Materials and Pavement Design*, 16, 214-226.
- Zhang, P., Ouyang, L., Yang, L., Yang, Y., Lu, G., & Huang, T. (2021). Laboratory Investigation of Carbon Black/Bio-Oil Composite Modified Asphalt. *Materials*, 14(17), 4910.
- Zhang, Y., Leng, Z. (2017). Quantification of bituminous mortar ageing and its application in ravelling evaluation of porous asphalt wearing courses. *Materials and Design*, 119, 1-11.
- Zhong, K., Li, Z., Fan, J., Xu, G., & Huang, X. (2021). Effect of carbon black on rutting and fatigue performance of asphalt. *Materials*, 14(9), 2383.
- Post-Construction/Annual Report.
- Mo, L., Huurman, M., Wu, S., Molenaar, A.A.A. (2009) "Raveling investigation of porous asphalt concrete based on fatigue characteristics of bitumen-stone adhesion and mortar" *Mater. Des.* 30, 170-179.
- Moghadas Nejad, F. Hamed, G. H. and Azarhoosh, A. (2012). Use of surface free energy method to evaluate effect of hydrate lime on moisture damage in hot-mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, 1119-1126.
- Moghaddas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamed, G. H. and Azarhoosh, M. (2012). "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, Vol. 31, 384-388.
- Packham, D. (1996). Work of adhesion: contact angles and contact mechanics. *International journal of adhesion and adhesives*, Vol. 16, 121-128.
- Pell, P. and Taylor, I. (1969). Asphaltic road materials in fatigue. in *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*.
- Ren, J. L., Xu, Y. S., Huang, J. D., Wang, Y., Jia, Z. R. (2021). Gradation optimization and strength mechanism of aggregate structure considering macroscopic and mesoscopic aggregate mechanical behaviour in porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 300, 124262.
- Shanahan, M. (1991). Adhesion and wetting: similarities and differences. *Rubber World;(United States)*, Vol. 205.
- Sasaki, I., & Nitta, H. (2021). Asphalt Surface Deterioration Properties of Test Pavement with Carbon Black Additive during Six Years' Service. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, 77(2).
- Tanzadeh, R., & Shafabakhsh, G. (2020). Surface free energy and adhesion energy evaluation of modified bitumen with recycled carbon black (micro-nano) from gases and petrochemical waste. *Construction and Building Materials*, 245, 118361.
- Vallerga B. and Gridley, P. (1980). Carbon black reinforcement of asphalts in paving mixtures. in *Asphalt Pavement Construction: New Materials and Techniques*, ed: ASTM International.
- Vallerga, B. and Gridley, P. (1979). Carbon Black Reinforcement of Asphalts in Paving Mixtures. in *Advance copy subject to revision*

# Investigating the Effects of Carbon Black on Asphalt Binder and Moisture Damage Resistance of Porous and Stone Mastic Asphalt Using Free Surface Energy Parameters

*Mehdi Fraji, Ph.D. Student, Civil Engineering Department,  
University of Zanjan, Zanjan, Iran.*

*Hasan Taherkhani, Associate Professor, Civil Engineering Department,  
University of Zanjan, Zanjan, Iran.*

*E-mail: taherkhani.hasan@znu.ac.ir*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

Moisture damage is one of the major distresses of asphalt pavements, which occurs due to debonding aggregate and asphalt binder at their interface due to moisture. One of the existing solutions for enhancing the resistance against moisture damage is using additives, known as anti-stripping additives. In this study, the effects of adding carbon black to an asphalt cement and porous asphalt and stone mastic asphalt (SMA) made by the modified binder have been investigated. 0, 4, 8, 12 and 16% (by the weight of asphalt) of carbon black has been added to the asphalt binder and the samples were subjected to penetration grade, softening point, ductility and Sessile drop test for determining the surface free energy components. The indirect tensile strength (ITS) in dry and wet condition of the mixtures were also measured and compared with the parameters determined from free surface energy method. Results show that penetration grade and ductility decreases up to 8% of carbon black and beyond that the trend reverses. Softening point increases up to 8% of carbon black and beyond that decreases with increase of carbon black content. Free surface energy components of asphalt show that the total surface free energy increases up to 8% and decreases beyond that level. The wet and dry indirect tensile strength of the porous asphalt and the wet indirect tensile strength of SMA mixture increases with increasing carbon black content up to 8%, and beyond that the trend reverses. The ratio of dry to wet ITS, known as tensile strength ratio (TSR), increase with increasing carbon black up to 8% and decreases after that. The effect of carbon black on porous asphalt is more significant than that on the SMA. Good correlation is found between the TSR results and the parameters obtained by surface free energy.

**Keywords:** Carbon Black, Asphalt Binder, Free Surface Energy, Moisture Damage