بررسی اثر ضایعات تونر کارتریج بر حساسیت رطوبتی آسفالت ماستیک درشت دانه و آسفالت متخلخل

مقاله علمی -پژوهشی

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

* **حسن طاهرخانی (نویسنده مسئول)**، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: **taherkhani.hasan@znu.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵

صفحه ۱۵۶-۱۳۱

چکیده

در این تحقیق، ۰، ٤، ۸، ۱۲ و ۱۶٪ از وزن قیر تونر ضایعاتی به آن اضافه گردیده و خصوصیات درجه نفوذ، نقطه نرمی، درجه انگمی، زاویه تماس و مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین، دو نوع مخلوط آسفالتی متخلخل و ماستیک درشت دانه (SMA) با قیرهای اصلاح شده ساخته شده و حساسیت رطوبتی، ریزش قیر و سایش کانتابرو آنها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که میزان درجه نفوذ و درجه انگمی قیر تا مقدار ۱۲٪ از افزودنی تونر کاهش و بعد از آن افزایش می‌یابد. نقطه نرمی و شاخص نفوذ قیر نیز تا ۱۲٪ ازمقدار تونر افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. ارزیابی انرژی آزاد سطحی قیرها نشان می‌دهد که با افزودن تونر تا ۱۲٪ انرژی سطحی کل افزایش و بعد از آن کاهش می یابد. کار پیوستگی قیر و کار چسبندگی بین قیر و سنگدانه نیز با افزایش تونر تا ۱۲٪ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزودن تونر مقاومت کششی مخلوطهای آسفالت متخلخل و SMA را تا مقدار ۱۲٪ افزایش می‌دهد و بعد از آن روند معکوس می‌شود. تاثیر تونر بر افزایش مقاومت در مخلوط متخلخل بیشتر از مخلوط SMA می‌باشد. همچنین، تاثیر تونر بر بهبود مقاومت کششی در شرایط مرطوب بهتر از شرایط خشک می‌باشد. تونر باعث بهبود مقاومت در برابر آسیب رطوبتی در هر دو مخلوط می‌گردد و این تاثیر در آسفالت متخلخل بیشتر است. همچنین، نتایج بیانگر کاهش افت وزنی کانتابرو مخلوط متخلخل و کاهش ریزش قیر در مخلوط متخلخل و SMA می‌باشد. نسبت مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی نیز تا ۱۲٪ افزودنی تونر افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق همچنین مشخص می‌کند که همبستگی خوبی بین پارامترهای نسبت انرژی به دست آمده از انرژی آزاد سطحی و نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با نسبت مقاومت کششی به دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: قیر، تونر، حساسیت رطوبتی، آسفالت متخلخل، آسفالت ماستیک درشت دانه، انرژی آزاد سطحی

۱-مقدمه

یکی از بحرانی‌ترین چالش‌های عصر حاضر مدیریت پسماندهای جامد می‌باشد، که یکی از آنها پسماندهای الکترونیک می‌باشد. طبق آمار، در سال ۲۰۱۹، میزان پسماند الکترونیک تولید شده در جهان ۵۳,٦ میلیون تن برآورد گردیده است و انتظار می‌رود مقدار آن در سال ۲۰۳۰ به ۷٤,۷ میلیون تن برسد (Forti et al., 2020). پودر تونر، که محصول جانبی کارتریج‌های دور ریز چاپگرهای لیزری می‌باشد یکی از اجزای ضایعات الکترونیک می‌باشد، که غنی از پلیمرهای ترموپلاستیک، کوپلیمرهای استایرن اکریلیت و کربن بلک است (Du et al., 2025; Daniel-Mkpume, 2022). به دلیل وجود فلزات سنگین و

مواد آلی سمی در تونر، عدم مدیریت صحیح این پسماند خطرات زیادی برای سلامت انسان و محیط زیست خواهد داشت. امروزه، غالبا تونرهای ضایعاتی تولید شده در صنعت چاپ یا سوزانده شده و یا در دپوهای ضایعات ریخته می‌شود که، این روشها مناسب نبوده و می‌تواند اثر منفی بر روی خاک، هوا و آبهای زیرزمینی داشته باشند (Fernandez et al., 2022; Choudhary et al., 2024). به همین دلیل، جهت بازیافت آن، محققین مختلفی از این ماده ضایعاتی در تولید انواع مواد استفاده نموده‌اند (Dong et al., 2017; Ruan et al., 2017). با این وجود، در مقایسه با مقدار ضایعات تونر تولید شده، مقدار بازیافت شده با این تکنیکها قابل توجه نیست. استفاده از تونر ضایعاتی برای اصلاح قیر و مخلوطهای آسفالتی در تعدادی از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است. محققین زیادی پیشنهاد داده‌اند که تونر ضایعاتی می‌تواند به مقدار قابل توجهی خصوصیات رئولوژیکی و خودترمیمی قیر را بهبود دهد (Wu et al., 2026). به دلیل وجود گروه‌های عاملی کربونیل، در واکنش ذرات تونر با اجزای سبک قیر ویسکوزیته قیر بالا رفته و باعث بهبود خصوصیات مکانیکی از جمله سختی و مقاومت به تغییر شکل می‌شود (Shah et al., 2024; Ituoa and Sun, 2024). همچنین، تحقیقات نشان داده‌اند که اصلاح قیر تا ۸٪ وزن آن با تونر باعث بالابردن نسبت CH_2/CH_3 می‌گردد که باعث بهتر شدن حرکت مولکولی قیر می‌شود که منجر به بهبود خود ترمیمی می‌شود (Wu et al., 2026). نوتنی و همکارانش (Notani et al., 2020) با افزودن ۱۲٪ وزن قیر از تونر ضایعاتی مشاهده نمودند که مقاومت به شیارشدگی قیر و مخلوطهای آسفالتی بهبود می‌یابد، که این موضوع توسط محققین دیگر نیز تایید گردیده است (Itoua et al. 2023 و Rambaran et al., 2026; Wu et al., 2026). یلدیریم و همکارانش (Yildirim et al., 2004) با افزودن تونر ضایعاتی به قیر دریافتند که سختی قیر افزایش می‌یابد. سلیمانیان و همکارانش با افزودن ۱۰٪ تونر ضایعاتی به قیر PG64-28 مشاهده نمودند که قیر به PG70-22 تغییر یافت (Solaimanian et al., 1998).

ایتوا و همکارانش نیز با افزودن ۸٪ تونر ضایعاتی به قیر PG70-22 آن را به قیر PG76-22 تغییر دادند (Itoua et al., 2023). در تحقیق دیگری، نوتنی و همکارانش دریافتند که افزودن ۸٪ تونر ضایعاتی رفتار قیر در دمای پایین را بهبود می‌دهد، اما در مقادیر بالاتر اثر منفی بر این رفتار دارد (Notani et al., 2019) یلدیریم و کندی نیز نشان دادند که اصلاح قیر با تونر ضایعاتی حساسیت قیر به ترکهای حرارتی را افزایش می‌دهد (Yildirim and Kennedy, 2002). نوتنی و همکارانش نشان دادند که افزودن تونر به قیر رفتار خستگی را بهبود می‌دهد (Notani et al., 2019). رامباران و همکارانش دریافتند که بهترین عملکرد خستگی با افزودن ۵٪ تونر ایجاد می‌شود (Rambaran et al., 2026). اما، شوکت و همکارانش (Showkat et al., 2020) نشان دادند که مقاومت خستگی با افزودن تونر کاهش می‌یابد. هوانگ و همکارانش (Huang et al., 2021)، با افزودن تونر ضایعاتی به قیر دریافتند که کارآیی و حساسیت رطوبتی کاهش و سختی افزایش می‌یابد. لومباردو (Lombardo, 2023) گزارش نموده است که استفاده از تونر در مخلوطهای آسفالتی باعث کاهش مصرف قیر و ریزدانه می‌شود که منجر به کاهش هزینه تولید مخلوط آسفالتی می‌گردد. در استرالیا نیز از تونر در روسازی برای افزایش مقاومت به شیارشدگی و ترک‌خوردگی استفاده گردیده است. صدیق و همکارانش (Siddiq et al., 2025) تونر ضایعاتی را به همراه پلی‌اتیلن سبک ضایعاتی برای اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که افزودن ۲۵٪ تونر و ۸٪ پلی‌اتیلن سبک بهترین عملکرد مکانیکی را نتیجه داده و ردپای کربن را نیز ۲۷٪ کاهش می‌دهد.

یکی از مشکلات اساسی در روسازی‌های آسفالتی آسیب رطوبتی است که منجر به خرابی‌های مختلفی از قبیل عریان شدگی، شن‌زدگی و تشکیل چاله‌ها می‌شود (Rahman et al., 2021). آسیب رطوبتی وقتی رخ می‌دهد که آب به داخل مخلوط نفوذ نموده و باعث تضعیف پیوند بین قیر و سنگدانه می‌شود. همچنین، رطوبت باعث کاهش پیوستگی در قیر شده و مقاومت آن را در برابر گسیختگی کاهش می‌دهد. این فرآیند، که موسوم به عریان شدگی می‌باشد، به مقدار زیادی می‌تواند عمر روسازی را کاهش داده و هزینه نگهداری روسازی را افزایش دهد (Suryawanshi and Kataware, 2026). چسبندگی بین قیر و سنگدانه متاثر از اندرکنش‌های فیزیکی و شیمیایی بین آنها می‌باشد. هنگامی که دو ماده در تماس مولکولی با هم قرار می‌گیرند، یک فرایند چسبندگی بین آن‌ها تشکیل می‌شود که اندازه آن بستگی به نوع تعامل مولکول‌های دو فاز دارد (Shanahan, 1991). چسبندگی قیـر و سنگدانه با

تئوری‌های مختلفی تشریح می‌گردد که شامل تئوری‌های شیمیایی، مکـانیکی، مرز ضعیف و ترمودینامیکی می‌باشند (Kanitpong and Bahia, 2003). در تئوری‌های مکانیکی، ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌ها از قبیل بافت، تخلخل و سطح مخصوص مقاومت پیونـدی را بین قیر و سنگدانه ایجاد می‌کنند. نظریه مرز ضعیف گسـیختگی را همیشه در ضعیف‌ترین پیوند از سـطح مشترک قیر و سنگدانه‌ها می‌داند. تئوری پیوند شیمیایی پیشنهاد می‌کند که چسبندگی از طریق اندرکنشهای اسید–باز رخ می‌دهد که منجر به تشکیل پیوندهای کوالانسی و هیدروژنی می‌گردد (Hossain et al., 2019) و این چسبندگی به pH و گروههای عاملی در قیر و سنگدانه بستگی دارد. در تئوری ترمودینامیک چسبندگی را ناشی از نیروهای بین مولکولی و انرژی آزاد سطحی در تماس قیر و سنگدانه می‌دانند (Asgharzadeh et al., 2015).

نسبت مقاومت کششی (TSR) در آزمایش لاتمن اصلاح شده، مطابق با استانداردAASHTO T283 ، و آزمایش رد چرخ هامبورگ (HWT)، مطابق با استاندارد AASHTO T324، برای ارزیابی آسیب رطوبتی مخلوطهای آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما، گزارش گردیده است که آزمایش نسبت مقاومت کششی، به دلیل تجربی بودن و نداشتن مبنای تحلیلی، ممکن است در ارتباط دادن با مشاهدات میدانی شکست بخورد (Ghabchi et al., 2014; Wang et al., 2025). همچنین، آزمایش رد چرخ هامبورگ مستقیما مکانیزم خرابی عریان شدگی رخ داده در مخلوط آسفالتی را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، استفاده از یک روش تحلیلی برای توصیف آسیب رطوبتی مخلوطهای آسفالتی برای ارزیابی پدیده عریان شدگی ضروری و مهم است. اخیرا، روش انرژی آزاد سطحی به طور موفقیت آمیزی در ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است (Yin et al., 2025; Sandeep et al., 2026; Zhou et al., 2026; Ali et al., 2022; Kataware et al., 2025; Wang et al., 2025). روش انرژی آزاد سطحی یک روش تحلیلی است که مستقیما چسبندگی و جدایش قیر و سنگدانه در حضور آب را مورد توجه قرار می‌دهد. بسیاری از مطالعات از روش انرژی آزاد سطحی در ارزیابی حساسیت رطوبتی قیرهای اصلاح شده با انواع پلیمرها، افزودنی‌های آسفالت گرم، و مواد ضد عریان شدگی استفاده نموده‌اند (Li et al., 2022; Duan et al., 2024; Zhang et al., 2024; Zhang et al., 2025; Liu et al., 2025; Arabani et al., 2025; Hamedi et al., 2025; Suryawanshi and Kataware, 2026; Lou et al., 2025; Caccavo et al., 2025; Fujinaga et al., 2025; Lu et al., 2026; An et al., 2026; Taha et al., 2025).

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 روسازی های دارای مزایای بهبود ایمنی رانندگی، از بین بردن پاشش آب و هیدروپلنینگ و کاهش صدا می باشد (Ren et al., 2021). 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; 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 درشت دانه مخلوطی با دانه بندی منقطع می‌باشد که محبوبیت زیادی 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., 2013).

مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که تحقیقات انجام گرفته بر روی استفاده از تونر ضایعاتی در اصلاح قیر بسیار محدود بوده و در خیلی از موارد نتایج متناقضی در برخی خصوصیات عملکردی مشاهده گردیده است. به ویژه، حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالت متخلخل و ماستیک درشت دانه ساخته شده با قیر اصلاح شده با تونر ضایعاتی با به کارگیری انرژی آزاد سطحی و مقایسه آن با آزمایش رایج حساسیت رطوبتی با استفاده از روشAASHTO T283 در مطالعات قبلی بررسی نگردیده‌اند. بنابراین، اهداف این تحقیق بررسی تاثیر پودر تونر ضایعاتی 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 تونر ضایعاتی بر خصوصیات قیر با استفاده از آزمایشات سنتی نیز مطالعه می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

انرژی آزاد سطحی یک ویژگی بنیادی است که انرژی مربوط به نیروهای بین مولکولی را در سطح تماس مشترک می‌سنجد. با تحلیل انرژی آزاد سطحی درک ارزشمندی از خواص چسبندگی موادی مثل قیر به دست خواهد آمد. تعیین انرژی آزاد سطحی با اندازه‌گیری زاویه تماس مایعات بر روی سطح جامد با استفاده از تکنیکهایی مثل قطره چسبیده (روش SD) و صفحه ویلهلمی قابل انجام است (Singh et al., 2018). در این تحقیق از روش SD استفاده گردیده است. از انرژی آزاد سطحی قیر و مصالح سنگی می‌توان در پیش‌بینی رفتار چسبندگی و جدایش در مخلوطهای آسفالتی استفاده نمود. چسبندگی متاثر از انرژی‌های سطحی قیر و مصالح سنگی در نبود آب می‌باشد، در حالی که جدایش در حضور آب رخ می‌دهد (Habal and Singh, 2022). پدیده عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی متاثر از چسبندگی و جدایش است، از این‌رو، انرژی آزاد سطحی یک پارامتر مهم برای ارزیابی آسیب رطوبتی مخلوطهای آسفالتی می‌تواند باشد (Ghabchi et al., 2014).

انرژی آزاد سطحی انرژی مورد نیاز برای جدا کردن یا ایجاد یک فصل مشترک در داخل یک ماده می‌باشد (Alvarez et al., 2023). چندین مدل برای محاسبه انرژی آزاد سطحی استفاده می‌شود، که شامل مدل گود–ون–اس–چادهاری (GvOC)، مدل فوکس (Fowkes)، مدل تعمیم یافته فوکس، و مدل نیومن می‌باشند (Dong et al., 2024). روش GvOC معمولا در تحلیل مصالح روسازی استفاده می‌شود. بر طبق این روش، کل انرژی آزاد سطحی (Γ^{T})، مطابق رابطه ۱، متشکل از مولفه غیر قطبی پراکنش گرا یا مولفه لیفشیتز–ون در والس (Γ^{LW}) و مولفه قطبی (Γ^{AB}) یا مولفه اسید–باز لوئیس می‌باشد (Van Oss et al., 1988). مولفه قطبی خود به دو بخش اسید لوئیس (Γ^{+}) و باز لوئیس (Γ^{-}) تقسیم می‌شود (رابطه ۲).

$$\Gamma^{T} = \Gamma^{LW} + \Gamma^{AB} \quad (۱)$$

$$\Gamma^{AB} = 2\sqrt{\Gamma^{+}\Gamma^{-}} \quad (۲)$$

به منظور اندازه گیری 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).

با انجام آزمایش ذکر شده برای هر نوع سنگدانه و یا قیر با سه نوع مایع آزمایش مختلف می‌توان سه رابطه مانند رابطه ۳ تشکیل داد که اندیس l 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 آزمایش های مختلف این آزمایش تکرار شود، سه رابطه بدست می‌آید که در آنها سه مجهول مشترک وجود دارد که با حل همزمان این سه رابطه، این سه مجهول به دست می‌آیند (Van Oss et al., 1988).

$$\Gamma_l^{T}(1+cos\theta) = 2\left[\left(\sqrt{\Gamma_S^{LW}\Gamma_l^{LW}} + \sqrt{\Gamma_l^{+}\Gamma_S^{-}} + \sqrt{\Gamma_l^{-}\Gamma_S^{+}}\right)\right] \quad (۳)$$

که در آن، Γ_l^{T} انرژی آزاد سطحی کل مایع پروب، θ زاویه تماس مایع پروب بر روی ماده مورد آزمایش، Γ_S^{LW}، Γ_S^{-} و Γ_S^{+} به ترتیب، مولفه غیر قطبی لیفشیتز–ون در والس، مولفه باز لوئیس و مولفه اسید لوئیس ماده مورد آزمایش (قیر یا سنگدانه) و Γ_l^{LW}، Γ_l^{-} و Γ_l^{+} به ترتیب، مولفه غیر قطبی لیفشیتز–ون در والس، مولفه باز لوئیس و مولفه اسید لوئیس مایع پروب می‌باشد. برای تعیین مولفه‌های Γ_S^{LW}، Γ_S^{+} و Γ_l^{-} ماده مورد آزمایش، سه معادله همزمان با استفاده از ۳ مایع پروب مختلف و اندازه‌گیری زاویه سطح تماس آنها با ماده مورد آزمایش حل

می‌شوند. اگر جذر مولفه لیفشتیز-ون در والس، اسید و باز قیر را با z_1، z_2، z_3 نشان دهیم، معادله ۳ را به صورت معادله ٤ می‌توان نوشت.

(٤)

$$\Gamma_l^T(1+cos\theta) = 2\left[\left(\sqrt{\Gamma_l^{LW}}z_1 + \sqrt{\Gamma_l^{+}}z_2 + \sqrt{\Gamma_l^{-}}z_3\right)\right]$$

با جایگزینی مولفه‌های مایعات پروب و و زاویه تماس آنها با ماده مورد آزمایش، معادله ٥ به دست می‌آید. جذر مولفه‌های انرژی آزاد سطحی ماده مورد آزمایش با حل ماتریس معکوس به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix}\sqrt{\Gamma_{l1}^{LW}} & \sqrt{\Gamma_{l1}^{+}} & \sqrt{\Gamma_{l1}^{-}}\\ \sqrt{\Gamma_{l2}^{LW}} & \sqrt{\Gamma_{l2}^{+}} & \sqrt{\Gamma_{l2}^{-}}\\ \sqrt{\Gamma_{l3}^{LW}} & \sqrt{\Gamma_{l3}^{+}} & \sqrt{\Gamma_{l3}^{-}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_1\\ z_2\\ z_3\end{bmatrix} = 0.5\begin{bmatrix}\Gamma_{l1}(1+cos\theta_1)\\ \Gamma_{l2}(1+cos\theta_2)\\ \Gamma_{l3}(1+cos\theta_3)\end{bmatrix} \quad (٥)$$

که در آن θ_1، θ_2 و θ_2 زاویه تماس سه مایع پروب با سطح ماده مورد آزمایش، و اندیس‌های $l1$، $l2$ و $l3$ نشان هنده مایع پروب ۱، ۲ و ۳ می‌باشند.

۲-۲- پارامترهای ترمودینامیکی

۲-۱-۱-کار پیوستگی

از نظر ترمودینامیکی انرژی مورد نیاز برای تقسیم یک ماده همگن به دو سطح جدید کار پیوستگی نامیده می‌شود (Hefer et al., 2006). شکل ۱شکست پیوستگی را داخل قیر نشان می‌دهد. کار پیوستگی(W_{CN}) دو برابر انرژی آزاد سطحی کل قیر Γ_B^T می‌باشد (معادله6).

$$W_{CN} = 2\Gamma_B^T \quad (٦)$$

۲-۱-۲ -کار چسبندگی

کار چسبندگی به صورت انرژی مورد نیاز برای شکست پیوند فصل مشترک بین دو ماده، مثل قیر و مصالح سنگی، تعریف می‌شود (Good, 1992). شکل ۲ مد شکست چسبندگی سیستم قیر-سنگدانه را نشان می‌دهد. کار چسبندگی قیر-سنگدانهW_{AD} به انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه و انرژی آزاد سطحی فصل مشترک آنها بستگی دارد که در رابطه ۷ نشان داده شده است.

$$W_{AD} = 2\left[\sqrt{(\Gamma_B^{LW}\Gamma_A^{LW})} + \sqrt{(\Gamma_A^{+}\Gamma_B^{-})} + \sqrt{(\Gamma_A^{-}\Gamma_B^{+})}\right] \quad (٧)$$

که در آن، اندیس A و B، به ترتیب، برای مصالح سنگی و قیر می‌باشد. برای یک مخلوط قیر و سنگدانه رابطه ۷ هنگامی به کار می‌رود که مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه مورد نظر اندازه‌گیری شده باشند.

۲-۱-۳ -کار جدایش

منظور از کار جدایش انرژی آزاد شده در هنگام جایگزینی قیر توسط آب در فصل مشترک قیر و سنگدانه است. این انرژی با W_{ABW}^{wet} نشان داده شده و به صورت معادله ۸ بیان می‌شود، که در آن A، B و W، به ترتیب، نشان دهنده قیر، سنگدانه و آب می‌باشند. شکل ۳ شکست جدایش را در سیستم قیر-سنگدانه نشان می‌دهد.

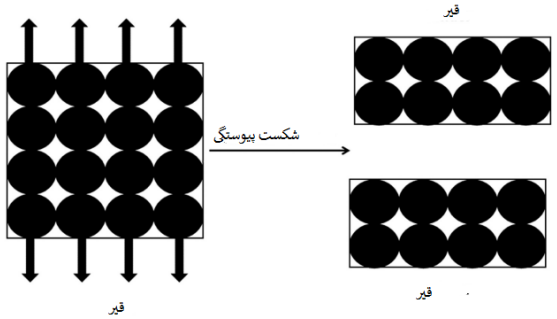
(٨)

$$W_{ABW}^{wet} = \Gamma_{AW} + \Gamma_{BW} + \Gamma_{AB}$$

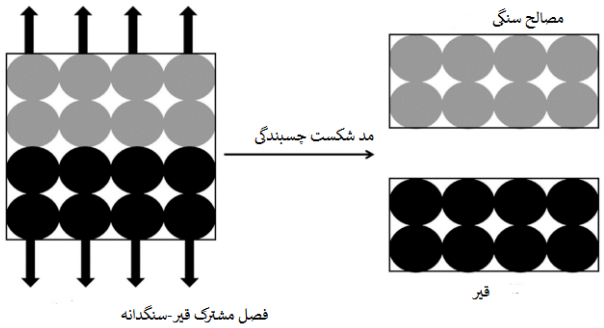
که در آن، Γ_{AW}، Γ_{BW} و Γ_{AB}، به ترتیب، نشان دهنده انرژی فصل مشترک بین سنگدانه و آب، قیر و آب و قیر و سنگدانه می‌باشند. انرژی فصل مشترک هر ماده x وy با رابطه ۹ محاسبه می‌شود. انرژی آزاد سطحی چسبندگی قیر سنگ‌دانه از انرژی آزاد سطحی چسبندگی آب- سنگ‌دانه ضعیف‌تر است. این رابطه بر اساس این حقیقت است 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. هنگامی‌که این تفاوت بیشتر می‌شود تمایل سنگ‌دانه‌ها برای عریان شدگی در حضور آب افزایش می‌یابد.

(۹)

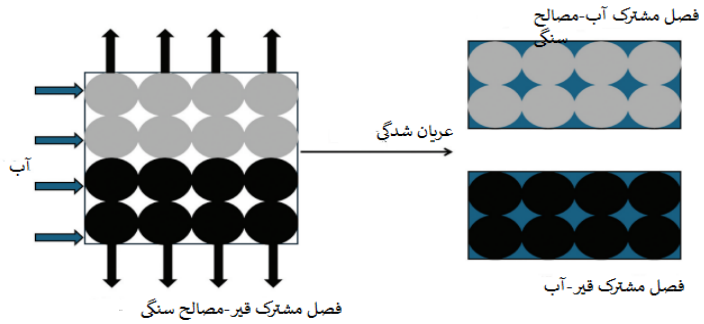
$$\Gamma_{xy} = \Gamma_x + \Gamma_y - 2\left[\sqrt{\left(\Gamma_x^{LW}\Gamma_y^{LW}\right)} + \sqrt{\left(\Gamma_x^{+}\Gamma_y^{-}\right)} + \sqrt{\left(\Gamma_x^{-}\Gamma_y^{+}\right)}\right]$$



شکل ۱. مد شکست پیوستگی (Suryawanshi and Kataware, 2026)



شکل ۲. مد شکست چسبندگی (Suryawanshi and Kataware, 2026)



شکل ۳. شکست جدایش قیر و مصالح سنگی(Suryawanshi and Kataware, 2026)

۲-۱-٤-نسبت انرژی

مقاومت در برابر آسیب رطوبتی رابطه مستقیم با کار چسبندگی داشته و رابطه معکوس با کار جدایش دارد. در نتیجه، باسین و لیتل (Bhasin and Little, 2007) دو نوع پارامتر نسبت انرژی ER_1 و ER_2 را که در معادله ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند معرفی نمودند تا با استفاده از آنها حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی را ارزیابی نمایند. مقدار بیشتر این نسبتها نشان دهنده مقاومت بیشتر در برابر آسیب رطوبتی است. ER_1 نسبت کار چسبنگی قیر و سنگدانه در حالت خشک W_{AD} به کار چسبندگی قیر و سنگدانه در حالت مرطوب W_{ABW}^{wet} است، و $ER2$ نسبت تفاوت کار چسبندگی قیر و سنگدانه در حالت خشک و کار پیوستگی قیر W_{CN} به کار چسبندگی قیر و سنگدانه در حالت مرطوب است.

$$ER_1 = \frac{W_{AD}}{W_{ABW}^{wet}} \quad (۱۰)$$

$$ER_2 = \frac{(W_{AD} - W_{CN})}{W_{ABW}^{wet}} \quad (۱۱)$$

۳- روش تحقیق

۳-۱-مصالح مصرفی

مواد و مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل سنگدانه، قیر و تونر ضایعاتی می‌باشند که هر یک به طور مختصر توضیح داده می‌شوند. از مصالح سنگی دولومیتی، که از شرکت نگین گستران راه زندیگان زنجان تهیه گردید، در ساخت مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و آسفالت ماستیک درشت دانه استفاده شد.

جدول ۱ درصد جذب آب و وزن مخصوص مصالح سنگی مورد استفاده و جدول ۲ مشخصات فنی آنها را نشان می‌دهند. از دانه‌بندی شماره ۱ نشریه ۳۸٤-۲ با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۲,۵ میلیمتر برای مخلوط اسفالت متخلخل و دانه بندی مخلوط آسفالت ماستیک درشت دانه با حداکثر اندازه اسمی ۹,۵ میلیمتر مطابق نشریه NCHRP-425 استفاده گردید. در شکل ٤ محدوده دانه‌بندی مخلوطهای متخلخل و ماستیک درشت دانه و حد وسط آنها نشان داه شده‌اند.

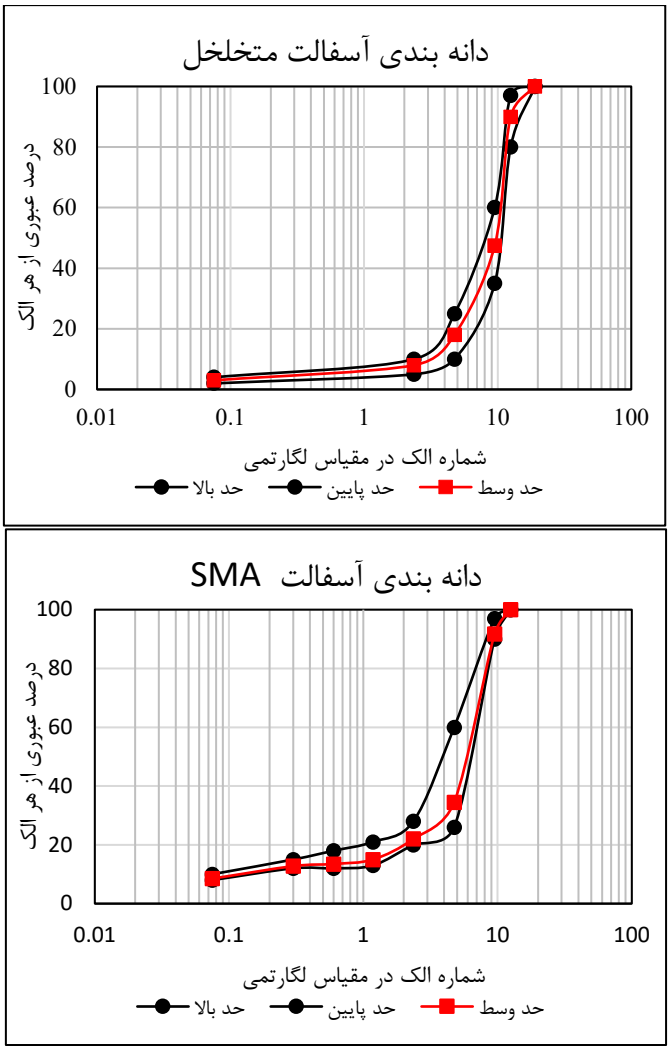
قیر درجه نفوذی ۶۰/۷۰ تولید شده در شرکت نفت پاسارگاد برای ساخت مخلوطها و سایر آزمایش‌ها در این تحقیق استفاده گردید. جدول ۳ مشخصات فنی قیر مورد استفاده را نشان می‌دهد. تونر ضایعاتی مورد استفاده در این تحقیق از کارتریجهای دور ریز چاپگرهای لیزری در دانشگاه زنجان تهیه گردید. آنالیز شیمیایی تونر مورد استفاده در این تحقیق انجام نگرفته است، اما مطابق بررسی تحقیقات قبلی، تونر اصولا متشکل از رزین‌های پلیمری به مقدار ۳۰ تا ۶۰٪، کربن بلک بین ۱۵ تا ۳۰٪، اکسید آهن $Fe3O4$ به مقدار ۵ تا ۲۰٪، اکسید سیلیس SiO_2 به مقدار ۱ تا ۱۰٪، کمتر از ۱٪ انواع فلزات سنگین، مقادیر متغیری از افزودنی‌های پلاستیک و مقدار کمی ترکیبات آلی فرار می‌باشد (Seddiq et al., 2025). شکل ۵ تصویر تونر مورد استفاده از این تحقیق را نشان می‌دهد. به منظور اطمینان از اختلاط مناسب با قیر، تونر ابتدا خشک شده و از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شده و سپس مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

مشخصه	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)		جذب آب (٪)
	ظاهری	حقیقی	
مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸	۲,۷۱	۲,٦۵	۰,۸
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰	۲,۷۳	۲,٦۵	۱,۲
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰	۲,۸٦		-
وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی G_{sb} (گرم بر سانتی متر مکعب)	۲,٦٦۷		

جدول ۲. مشخصات فنی مصالح سنگی

مشخصه	روش آزمایش	نتایج آزمایش		
		درشت‌دانه		ریزدانه
ارزش ماسه‌ای	AASHTO-T176	-		۷۸
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس‌آنجلس	AASHTO-T96	۲۷		-
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ٤	ASTM-D5821	در یک جبهه	۱۰۰	-
		در دو جبهه	۹۸	
درصد سلیس مصالح سنگی (Sio_2)	-	۲۰		
ضریب نرمی ماسه	AASHTO-M6	-		۳
درصد تورق	BS-812	۲۰		-
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	AASHTO-T104	۱,۳		۰,۷
درصد اندود به قیر مصالح سنگی	ASTM-D1664	بیش از ۹۵ درصد		
درصد دانه‌های پهن و دراز	ASTM-D4791	ندارد		-



شکل ٤. دانه‌بندی استفاده شده در این پژوهش

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی در تحقیق

مشخصه	روش آزمایش	نتیجه
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، برحسب ۰/۱ میلی‌متر	ASTM-D5	٦٤
نقطه نرمی، برحسب درجه سانتی‌گراد	ASTM-D36	٥١,١
مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی‌گراد، برحسب سانتی‌متر	ASTM-D113	>١٠٠
درجه اشتعال، برحسب درجه سانتی‌گراد	ASTM-D92	٣٠٥
وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (گرم بر سانتی متر مکعب)	ASTM-D70	١,٠١٨
کندروانی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (سانتی استوکس)	ASTM-D2170	٨٤١
کندروانی در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی استوکس)	ASTM-D2170	٣٥٢
کندروانی در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد (سانتی استوکس)	ASTM-D2170	١٣١
حلالیت قیر (درصد)	ASTM-D2042	٩٩,٩
فرآیند اون لایه‌نازک قیر، تغییر جرم اولیه (درصد)	ASTM-D1754	٠,٠
درجه نفوذ پسماند فرآیند اون لایه‌نازک قیر (۰,۱ میلی‌متر)	ASTM-D5	٣٣
درجه نفوذ قیر پسماند نسبت به قیر اولیه (درصد)	ASTM-D5	٦٦
کشش‌پذیری پسماند فرآیند اون لایه‌نازک قیر (سانتی‌متر)	ASTM-D113	>٥٠



شکل۵. شکل ظاهری تونر مورد استفاده در تحقیق

۳-۲- آماده سازی قیر نمونه‌های قیر و مخلوط‌های آسفالتی

همانطور که قبلا گفته شد، در این پژوهش از افزودنی تونر کارتریج با مقادیر۰، ٤، ۸، ۱۲، ١٦ درصد وزنی قیر استفاده شده است. این قیرها، به ترتیب، با OB+0%T ، OB+4%T، OB+8%T، OB+12%T، OB+16%T نشان داده می‌شوند. برای انجام این کار، قیر خالص تا دمای ١٦٠ درجه گرم شده و سپس مقدار مورد نظر تونر به آن اضافه شده و با تعداد چرخش ۳۰۰۰ دور در دقیقه 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 و اصلاح‌شده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است.

برای ساخت نمونه‌های آسفالتی مقدار درصد قیر بهینه برای درصد افزودنی های 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 ٤,٥ درصد است. در این پژوهش، از مقدار درصد قیر متناسب با درصد فضای خالی ۲۰ درصد استفاده شد که قیر بهینه برای آسفالت متخلخل ٪۵,۲٦ تعیین گردید. همچنین، طرح اختلاط برای مخلوط‌های آسفالتی SMA از روش مارشال انجام گردیده و درصد قیر ٪٦,٤ تعیین گردید. طرح اختلاط برای قیر بدون افزودنی انجام گردید و برای مخلوط های 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 ٤ درصد تونر ٤ 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 ٢٤ ساعت در دمای۱۷۰ درجه سانتیگراد و در داخل گرمخانه قرارداده شدند. قیر مصرفی نیز به مدت ۱/۵ ساعت در دمای اختلاط قرارداده 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 قرار داده شد. قابل‌ذکر است که قالب‌های مارشال نیز در داخل گرمخانه و در دمای تراکم قرارداده شدند. در این تحقیق جهت تراکم از چکش مارشال استفاده شد. تعداد ضربات وارده برای تراکم نمونه‌های آسفالت متخلخل۵۰ ضربه به هر طرف نمونه بود. پس از تراکم، نمونه‌های آسفالتی به مدت ٢٤ 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 ٢٤ ساعت در داخل اون با دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، قرار گرفت. قیر به طور 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 ازآن، 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.

۳-۳-آزمایش‌های انجام گرفته بر روی قیر و مخلوط‌های آسفالتی

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 تونر، آزمایش زاویه سطح تماس بر روی مصالح سنگی و قیرها، و آزمایش حساسیت رطوبتی، ریزش قیر و افت وزنی کانتابرو بر روی مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و SMA می‌باشند که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

۳-۳-۱ -آزمایش‌های رایج بر روی قیر

آزمایش درجه نفوذ، نقطه نرمی و درجه انگمی بر روی قیرهای مختلف، به ترتیب، مطابق با استانداردهای ASTM D5، ASTM D36 و ASTM D113 انجام گرفت. با استفاده از نقطه نرمی(SP) و درجه نفوذ (pen25) قیرها، شاخص نفوذ قیرها با استفاده از رابطه ۱۲ تعیین گردید.

$$PI=\frac{1952-500\log(Pen25)-20SP}{50\log(Pen25)-SP-120} \qquad (۱۲)$$

۳-۳-۲ – آزمایش زاویه سطح تماس

در این تحقیق از روش زاویه سطح تماس برای اندازه گیری انرژی آزاد سطحی استفاده شد (شکل٦). 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 اندازه‌گیری زاویه سطح تماس یک نوع مایع با خصوصیات مشخص انرژی آزاد سطحی بر روی سطح ماده مورد نظر 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 ٤ 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 رابطه ۵ بدست آورد.

5

جدول٤. مؤلفه انرژی آزاد سطحی مایع‌های استفاده‌شده در این پژوهش(erg / Cm^2)

نوع مایع	انرژی آزاد سطحی کل (Γ)	مؤلفه غیر قطبی (Γ^{LW})	مؤلفه قطبی (Γ^{AB})	مؤلفه اسیدی (Γ^{+})	مؤلفه بازی (Γ^{-})
آب	۷۲.۸	۲۱.۸	۵۱	۲۵.۵	۲۵.۵
فرمامید	۵۸	۳۹	۱۹	۲/۲۸	۳۹,٦
گلیسرول	٦٤	۳٤	۳۰	۳/۹۲	۵۷,٤



شکل ٦. چگونگی تعیین زاویه تماس درروش SD

۳-۳-۳- آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی

به منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی متخلخل و ماستیک درشت دانه از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم براساس استاندارد AASHTO T283 استفاده شده است (AASHTO, 2007). برای انجام آزمایش، برای هر مخلوط سه نمونه عمل‌آوری شده در شرایط مرطوب مطابق استاندارد و سه نمونه در شرایط خشک مورد آزمایش کشش غیر مستقیم قرار گرفتند. نمونه‌ها باید به نحوی متراکم شوند که درصد هوای آنها بین 0.5 ±7درصد 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 برای رسیدن به این درصد از تراکم مشخص شود. پس از متراکم کردن نمونه، قطر و ارتفاع آنها اندازه‌گیری شد. سپس، وزن مخصوص حقیقی و حداکثر نظری اندازه‌گیری شده و بر اساس آنها حجم و میزان حجم حفرات هوا اندازه‌گیری گردید. بارگذاری آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم با نرخ بارگذاری۵,۰۸ سانتی متر (۲ اینچ) بر دقیقه انجام شده تا لحظه‌ای که نمونه گسیخته شود. مقدار بار در لحظه گسیختگی ثبت می‌شود. با استفاده از رابطه ۱۳ مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم هر شش نمونه بدست می‌آید.

$$ITS = (2P)/(\pi Dt) \qquad (۱۳)$$

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. میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های خشک (سه نمونه) و مرطوب (سه نمونه) تعیین شده و با استفاده از آنها حساسیت رطوبتی تعیین گردید. حساسیت رطوبتی یا پتانسیل عریان‌شدگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با نسبت میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب به خشک (برحسب درصد) با استفاده از رابطه ١٤ تعیین گزدید.

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \qquad (١٤)$$

که در آن TSR نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم(٪)، ITS_{wet} میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب (kPa)، و ITS_{dry} میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های خشک(kPa) است.

۳-۳-۳-آزمایش افت وزنی کانتابرو

دوام مخلوطهای آسفالتی متخلخل از اهمیت زیادی برخوردار است. منظور از دوام، توانایی آسفالت متخلخل در تحمل آسیب‌های ناشی از بار ترافیکی و عوامل محیطی ضمن حفظ عملکرد در طول زمان می‌باشد.

یکی از موثرترین روشها برای ارزیابی دوام آسفالت متخلخل آزمایش کانتابرو می‌باشد (Wu et al., 2020). این آزمایش افت وزنی نمونه‌ها را برای ارزیابی دوام آنها اندازه‌گیری می‌کند. فرایند عمل‌آوری نمونه‌ها، شامل غوطه‌وری نمونه‌ها در آب ٦٠ درجه سانتیگراد به مدت ٤٨ ساعت، برای شبیه‌سازی شرایط میدانی مثل قرار گرفتن در معرض رطوبت و تغییرات دما می‌باشد (Huang et al., 2021). سپس، نمونه‌ها از آب خارج شده و به مدت ٢٤ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند. بعد از آن، نمونه‌ها در داخل دستگاه آزمایش لس آنجلس بدون استفاده از گلوله‌های فولادی قرار گرفته و با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور در دقیقه به تعداد ۳۰۰ دور تحت چرخش قرار گرفتند. سپس، نمونه‌ها از دستگاه خارج شده و وزن گردیدند.

درصد افت وزنی بعد از ۳۰۰ چرخش با استفاده از رابطه ۱۵ محاسبه گردید(Amanda et al., 2025). برای هر نوع قیر

سه نمونه مورد استفاده قرار گرفته و میانگین افت وزنی آنها مورد استفاده قرار گرفت.

$$CL = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \qquad (۱۵)$$

که در آن، CL، درصد افت وزنی کانتابرو، M_1، وزن اولیه نمونه و$M2$ وزن نمونه بعد از ۳۰۰ چرخش می‌باشد. مطابق استاندارد انجمن روسازی آسفالتی استرالیا، حداکثر افت وزنی به ۳۰٪ محدود شده است(AAPA, 1997).

۴-۳-۳ – آزمایش ریزش قیر

ریزش قیر، به جدا شدن ملات قیری از مخلوط آسفالتی گفته می‌شود. آزمایش پتانسیل ریزش قیر معمولاً بر روی مخلوط‌هایی مثل مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و مخلوط‌های SMA، که شامل درصد بالایی از مصالح سنگی درشت‌دانه هستند، انجام می‌شود. پدیده ریزش قیر، عمده‌ترین عیب مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای می‌باشد. این آزمایش طبق استاندارد AASHTO T305 انجام گرفت. برای انجام این آزمایش، از یک سبد سیمی استوانه‌ای استاندارد دارای ارتفاع ۱۶٫۵±۱۶۵ میلی‌متر و قطر ۱۰٫۸±۱۰۸ میلی‌متر، صفحه فلزی که زیر آن قرار می‌گیرد و یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰٫۱ گرم، استفاده گردید. ابتدا وزن سبد سیمی (A) و صفحه فلزی زیر آن (B)، اندازه‌گیری می‌شود. یک نمونه مخلوط آسفالتی متراکم نشده، در سبد سیمی که روی صفحه قرار دارد، ریخته می‌شود. سپس وزن سبد سیمی حاوی نمونه به‌تنهایی و بدون صفحه زیرین آن (C)، اندازه‌گیری می‌شود. دمای اون، در حدود دمای اختلاط مخلوط آسفالتی تنظیم شده و سبد سیمی حاوی نمونه به همراه صفحه زیرین آن، داخل اون قرار داده می‌شود. پس از گذشت ۱ ساعت، سبد سیمی به همراه صفحه زیرین آن، از اون خارج‌شده و وزن صفحه زیر سبد که شامل ملات قیری ریخته شده از مخلوط می‌باشد (D)، اندازه‌گیری می‌شود. نسبت وزن ملات قیری ریخته شده به وزن مخلوط اولیه، به‌عنوان درصد ریزش قیر (DD) گزارش می‌شود که از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود.

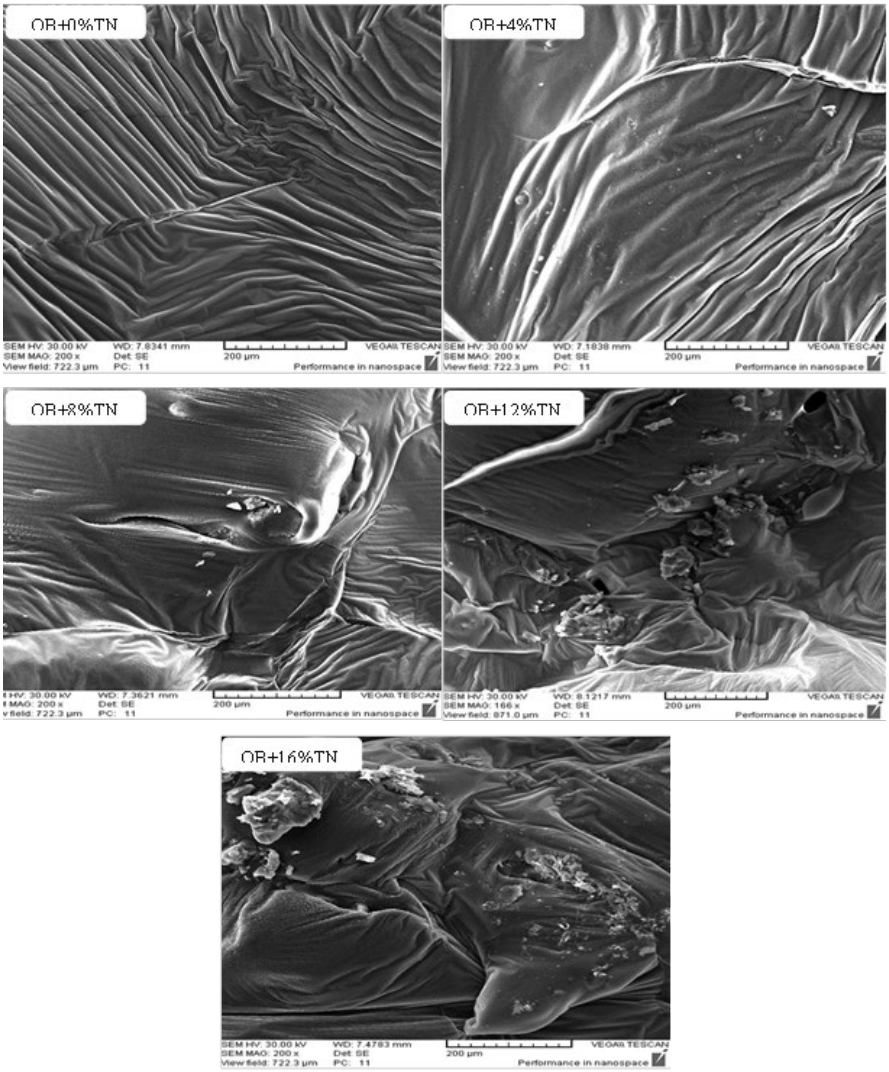
$$DD = \frac{D-B}{C-A} \times 100 \qquad (۱۶)$$

۴- نتایج و بحث

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

۴-۱-نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبش SEM

جهت بررسی نحوه اختلاط قیر با افزودنی تونر کارتریج، از عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM استفاده شد. عکس‌های مورد نظر بعد از ۲۴ ساعت از سطح قیرهای اصلاح شده با تونر گرفته شد. شکل۷ تصاویر SEM گرفته شده از قیرهای اصلاح شده با تونر را نشان می‌دهند. با توجه به عکس‌های SEM گرفته شده از سطح قیرهای اصلاح شده با تونر می‌توان نتیجه گرفت که مقدار سازگاری بین قیر و ماده افزودنی تا ۱۲ درصد افزایش پیدا می‌کند و بعد از آن احتمالا به دلیل افزایش بیش از حد مواد تونر و کاهش یکپارچگی مخلوط کاهش سازگاری مشاهده می‌گردد.

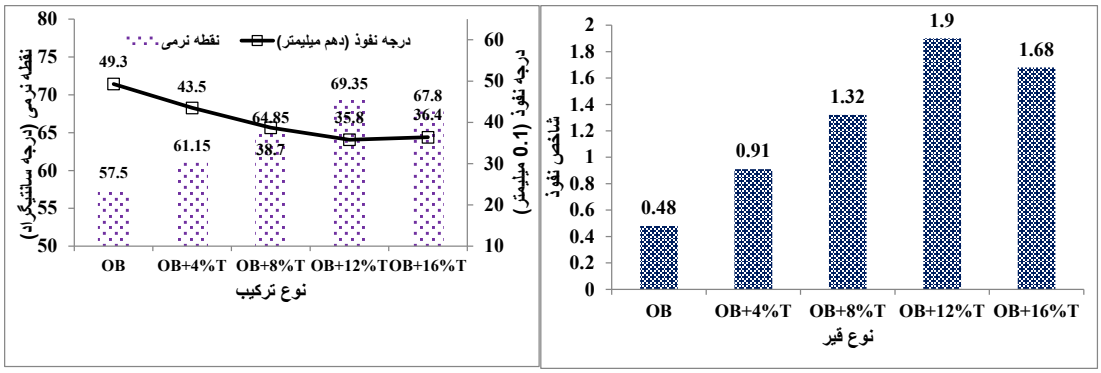


شکل ۷. تصاویر SEM گرفته شده از مخلوط‌های اصلاح شده با تونر

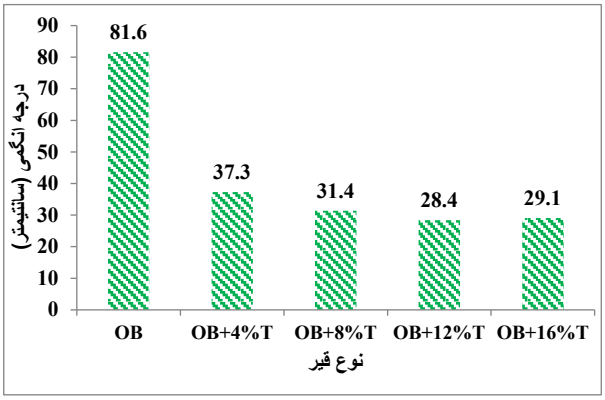
٤-۲-نتایج آزمایش‌های رایج بر روی قیرها

در شکل ۸ نتایج جه نفوذ، نقطه نرمی و شاخص درجه نفوذ قیر پایه و اصلاح شده با درصدهای مختلف از تونر مشاهده می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد تونر تا ۱۲٪ مقدار درجه نفوذ نسبت به قیر بدون افزودنی کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این نتیجه بیانگر این است که افزودن تونر 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 تونر مشاهده گردید که مقدار سازگاری بین قیر و ماده افزودنی تا ۱۲ درصد افزایش و بعد از آن احتمالا به دلیل افزایش مقدار تونر و کاهش یکپارچگی مخلوط کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش نقطه نرمی نیز نشان می‌دهد با افزایش درصد تونر تا ۱۲ درصد نقطه نرمی افزایش پیدا کرده و بعد از آن کاهش می‌یابد. افزایش نقطه نرمی منجر به کاهش حساسیت حرارتی قیرهای اصلاح‌شده می‌شود. افزایش نقطه نرمی بدین معناست که رفتار ویسکوز قیر با افزایش دما به تأخیر می‌افتد. شاخص نفوذ قیر بیانگر حساسیت دمایی قیر است. هر چقدر شاخص نفوذ قیر بالاتر باشد حساسیت قیر به دما پایین‌تر است. یک قیر با حساسیت دمایی پایین در دماهای پایین انعطاف پذیری بیشتر داشته و در دماهای بالای سرویس دهی سختی بیشتری داشته و در مقابل تغییر شکل مقاومت بیشتری خواهند داشت (Ibeagia et al., 2012). همانگونه که ملاحظه می‌گردد، افزودن تونر باعث افزایش شاخص نفوذ شده و حساسیت دمایی آن را کاهش می‌دهد، و بالاترین شاخص ننفوذ با افزودن ۱۲٪ از تونر ضایعاتی به دست می‌آید. نتایج درجه انگمی قیرها در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌گردد، افزودن تونر تا مقدار ۱۲٪ درجه انگمی را کاهش و

سپس به مقدار جزیی افزایش می‌یابد. 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.



شکل ۸. درجه نفوذ، نقطه نرمی و شاخص نفوذ قیرها



شکل ۹. درجه انگمی قیرها

٤-۳- نتایج انرژی آزاد سطحی

نتایج اندازه‌گیری زاویه سطح تماس ۳ مایع مشخصه و سطح سنگدانه‌های برش داده شده و قیرها، به ترتیب، در جدول ۵ و ٦ نشان داده شده‌اند. مقدار زاویه ارائه شده برای هر قطره به دو صورت زاویه سمت چپ و سمت راست بود که مقدار زاویه ارائه شده در جداول۵ و ٦ نشان دهنده میانگین دو زاویه سمت چپ و راست می‌باشد. مقدار هر یک از زوایای به دست آمده در روابط ٤ و ۵ قرار داده شده و مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی(مؤلفه لیفشیتز وندروالز، مؤلفه اسیدی و بازی) برای مصالح سنگی و قیرها به دست آمدند، که به ترتیب در جداول ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. نتایج اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش بیانگر این است که با افزایش مقدار افزودنی تا ١٦٪ به قیر مولفه لیفشیتز–وندروالس، و مولفه اسیدی افزایش می‌یابد، اما، مولفه بازی، تا ۱۲٪ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. مقدار انرژی آزاد سطحی کل قیرها در شکل ۱۰ ارائه گردیده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مقدار انرژی آزاد سطحی با افزایش مقدار تونر تا ۱۲٪ افزایش و بعد از آن باعث کاهش مقدار انرژی آزاد سطحی می‌گردد. افزودن ۱۲٪ از تونر به قیر انرژی آزاد سطحی کل را نسبت به قیر فاقد افزودنی حدود ۳۲٪ بهبود می‌دهد. افزایش انرژی سطحی کل باعث می‌شود تا با افزایش افزودنی، قیر مقاومت بیشتری در مقابل گسیختگی در مقایسه با قیر در حالت بدون افزودنی تجربه کند. همچنین، همان طور که از داده‌های ارائه شده در جدول ۸ برای قیرهای اصلاح شده با تونر مشخص است، مؤلفه قطبی قیرها 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. 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. مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها نیز نشان می‌دهد که مولفه غیر قطبی نسبت به مولفه قطبی کمتر است و جزء بازی در مولفه قطبی بیشترین سهم را دارد.

پس از تعیین مقدار مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی برای مصالح سنگی، قیر خالص و قیر اصلاح‌شده، مقدار کار پیوستگی W_{CN}، کار چسبندگی، W_{AD} کار چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در حضور آب W_{ABW}^{wet} و میزان چسبندگی بین آب و مصالح سنگی بر اساس رابطه‌های ٦ تا ٩ به دست آمد که نتایج آن در جدول 9 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 می‌شود و دو برابر مقدار انرژی آزاد سطحی کل می‌باشد. با توجه به جدول ۹ مشاهده می‌شود که با افزودن تونر از ۰ به ۱۲ درصد مقدار کار پیوستگی از ۲۵,۵٦ تا ۳۳,٤۰٤ افزایش می‌یابد، که نشان دهنده افزایش مقاومت پیوستگی قیر است. در نتیجه، با افزایش مقدار تونر تا ۱۲ درصد در برابر خرابی‌هایی که با ظهور ترک (خرابی خستگی) خود را نشان می‌دهند بهبود قابل توجهی را خواهیم دید (Hamedi et al., 2025). با افزایش مقدار تونر از ۱۲ تا ١٦ درصد مقدار کار پیوستگی کاهش پیدا کرده، اما، باز هم نسبت به قیر خالص مقاومت بهتری را از خود در برابر خرابی‌های خستگی نشان می‌دهد. کار چسبندگی مقدار نیروی خارجی است که برای جدایی دو ماده در سطح تماسشان در شرایط خلأ موردنیاز است. با توجه به جدول ۹ مشاهده می‌شود که افزایش مقدار تونر از ۰ به ۱۲ درصد باعث افزایش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی از ۳۹,۹۸ تا ٤٨,٢٩٤ در حالت خشک می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که کار چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در حضورآب با افزایش ۱۲٪ تونر، از مقدار۲۷,۱۰۵- به مقدار ۲٤,٤۱۳ – و با افزایش ١٦ درصد، به مقدار ۲٤,۳۳- می‌رسد. هنگام جدایش قیر از سنگدانه در حضور آب، ابتدا، قسمتی از فصل مشترک مصالح سنگی و قیر از دست می‌رود. بر مبنای تعریف انرژی فصل مشترک، کار خارجی مورد نیاز Γ_{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 Γ_{WB} و Γ_{WA} می‌باشد. بنابراین، کل کار انجام شده برای جابجایی قیر از سطح مصالح سنگی $\Gamma_{WA}+\Gamma_{WB}-\Gamma_{AB}$ 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 به‌صورت خود به خودی و در حضور آب انجام می‌شود و سیستم در رخداد این فرآیند انرژی آزاد می‌کند.

همان‌گونه که در جدول ۹ مشاهده می‌شود چسبندگی ایجادشده 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.

جدول ۵. نتایج زوایای به‌دست‌آمده از آزمایش زاویه سطح تماس برای مصالح سنگی

مایع های مشخصه	زاویه تماس شماره ۱	زاویه تماس شماره ۲	زاویه تماس شماره ۳	انحراف معیار	میانگین
آب	70	68	68.5	1.040833	68.83
گلیسرول	59	60.6	59.6	0.80829	59.73
فرمامید	26.3	25.5	24.6	0.85049	25.47

جدول ٦. نتایج زوایای به‌دست‌آمده از آزمایش زاویه سطح تماس برای قیرهای خالص و اصلاح‌شده

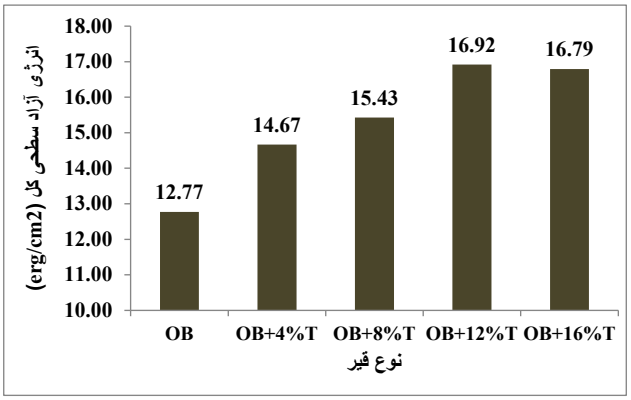
قیرها	مایع های مشخصه استفاده شده در این پژوهش								
	فرمامید			گلیسرول			آب		
OB+0%T	57.6	56.2	58.1	104.1	105.7	103.6	112.5	109.2	108.4
OB+4%T	61.4	61.6	62	112.4	110.4	113.9	114.9	115.8	115.6
OB+8%T	61.2	61.4	60.4	103.4	103.5	104.1	119.8	117.4	115.9
OB+12%T	60	60	62.3	109.5	112.3	111.9	122.4	123.2	124.3
OB+16%T	53.8	53.9	52.6	104.1	102.4	105.8	117.3	119	118.2

جدول۷. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی برای مصالح سنگی(erg / Cm^2)

مولفه لیفشتز وندروالز	18.53
مولفه اسیدی	4.42
مولفه بازی	23.88

جدول ۸. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی برای قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده(erg / Cm^2)

OB+0%T	مولفه لیفشتز- وندروالز	12.09
	مولفه بازی	0.16
	مولفه اسیدی	0.73
OB+4%T	مولفه لیفشتز- وندروالز	۱۳,۳۰۸
	مولفه بازی	.۰628
	مولفه اسیدی	.۰737
OB+8%T	مولفه لیفشتز- وندروالز	۱۳,۸۹۳
	مولفه بازی	۰,۷۵
	مولفه اسیدی	۰,۷۸٤
OB+12%T	مولفه لیفشتز- وندروالز	۱۵,۲۰۳
	مولفه بازی	۰,۸۲
	مولفه اسیدی	۰,۸۹۹
OB+16%T	مولفه لیفشتز- وندروالز	۱۵,۲۵۵
	مولفه بازی	۰,٦٤٦
	مولفه اسیدی	۰,۹۱۵



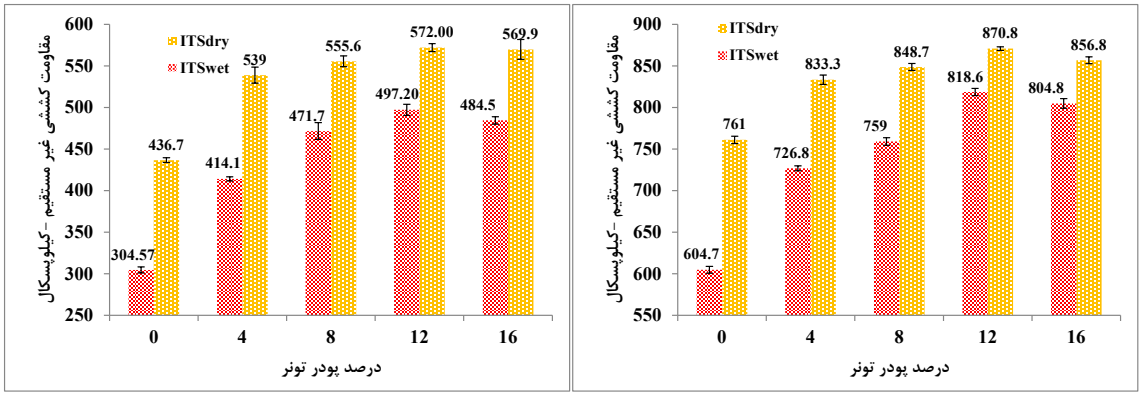
شکل ۱۰. انرژی آزاد سطحی کل

جدول۹. نتایج پارامترهای به‌دست‌آمده با استفاده از روش‌های انرژی آزاد سطحی(erg / Cm^2)

متغیر	کارپیوستگی W_{CN}	کار چسبندگی W_{AD}	کار چسبندگی در حضور آب W_{ABW}^{wet}	چسبندگی بین آب و مصالح سنگی
OB+0%CB	25.559	39.986	-27.105	110.784
OB+4%T	28.384	42.918	-26.158	110.784
OB+8%T	30.029	46.869	-25.532	110.784
OB+12%T	33.404	48.294	-24.418	110.784
OB+16%T	32.571	48.069	-24.33	110.784

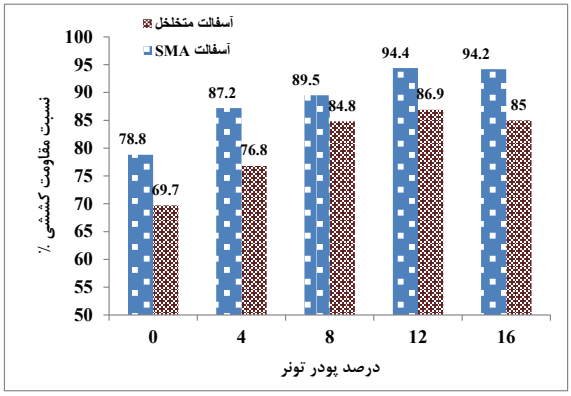
٤-٤ نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در شکل‌های ۱۲، نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و SMA، در برابر تغییرات افزودنی مقدار تونر نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب آسفالت متخلخل و SMA با افزایش تونر تا مقدار ۱۲٪ تونر افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. این افزایش مقاومت کششی می‌تواند ناشی افزایش سختی قیر و همچنین انرژی پیوستگی قیر در اثر افزودن تونر باشد. مقایسه نتایج برای دو مخلوط نشان می‌دهد که تاثیر افزودن تونر در افزایش مقاومت کششی برای مخلوط آسفالت متخلخل بیشتر از آسفالت SMA می‌باشد. مقاومت کششی مخلوط آسفالت متخلخل حاوی ۱۲٪ تونر در حالت خشک و مرطوب، به مقدار، به ترتیب، ۳۱ و ٦۳٪ نسبت به مخلوط فاقد تونر در آن شرایط افزایش یافته است، در حالی که این مقادیر برای آسفالت SMA، به ترتیب، ۱٤,۵ و ۳۵٪ می‌باشد. شکل ۱۳ 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، نسبت مقاومت کششی با افزایش تونر در هر دو مخلوط افزایش می‌یابد. برای مخلوط آسفالت متخلخل روند افزایش بعد از ۱۲٪ افزودنی معکوس می‌گردد. همچنین، نتایج بیانگر این است که آسفالت SMA در همه مقادیر افزودنی مقدار TSR بیشتری از آسفالت متخلخل دارد. در حالی که مخلوطهای آسفالت متخلخل و SMA فاقد افزودنی تونر دارای نسبت مقاومت کششی کمتر از ۸۰٪، که معمولا به عنوان حداقل نسبت مورد قبول است، هستند ، آسفالت SMA در هر مقدار افزودنی تونر بیش از ٤٪ و آسفالت متخلخل در هر مقدار بالاتر از ۸٪ نسبت مقاومت کششی را به بالاتر از ۸۰٪ می‌رساند.



(الف) (ب)

شکل۱۲. نتایج مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب الف. آسفالت SMA ب. مخلوط آسفالتی متخلخل



شکل۱۳. نسبت مقاومت کششی مرطوب به خشک برای مخلوطهای آسفالتی متخلخل و SMA

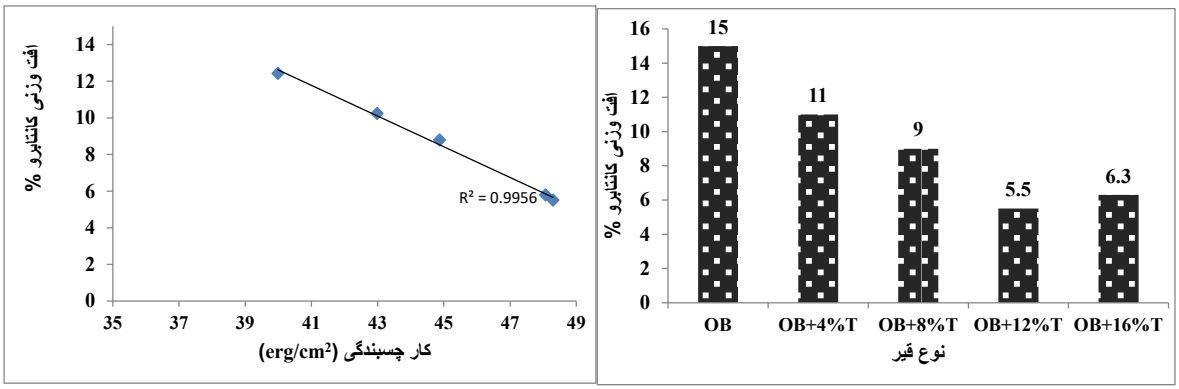
٤-٥-نتایج آزمایش کانتابرو

شکل ١٤ نتایج افت وزنی کانتابرو مخلوط آسفالت متخلخل ساخته شده با قیرهای حاوی درصدهای مختلفی از تونر را نشان می‌دهد. افت وزنی کانتابرو نشان دهنده مقاومت مخلوط در مقابل بارگذاری ترافیک و عوامل محیطی است. معمولا، حداکثر مقدار مجازی توسط آیین نامه‌ها برای مخلوطهای آسفالتی تعریف می‌گردد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، افت وزنی کانتابرو با افزایش مقدار تونر تا ١٢٪ کاهش می‌یابد، و بعد از آن مجددا شروع به افزایش می‌کند. با افزودن ١٢٪ تونر حدود ٦٧٪ افت وزنی کاهش می‌یابد. شکل ١٦ ارتباط بین کار چسبندگی بین قیر و سنگدانه و افت زونی کانتابرو نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، ارتباط بسیار خوبی بین پارامتر کار چسبندگی و سایش کانتابرو وجود دارد و با افزایش کار چسبندگی سایش کانتابرو کاهش می‌یابد.

٤-٦-نتایج ریزش قیر

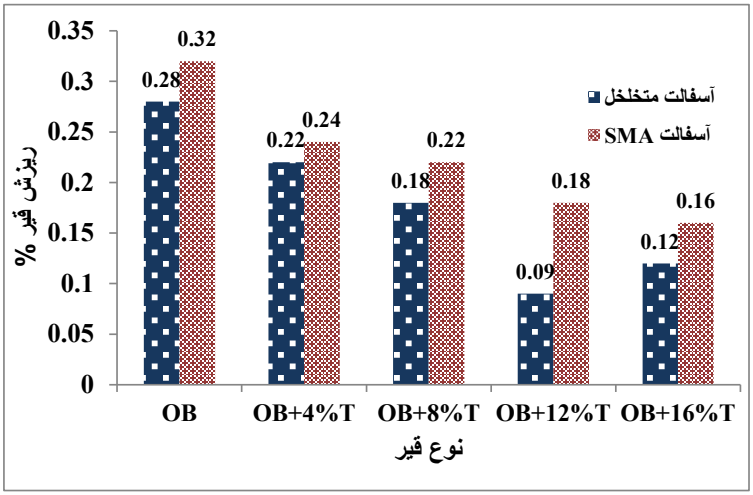
در مخلوط اسفالتی متخلخل و SMA به دلیل داشتن استخوان‌بندی درشت سنگدانه با ریزدانه کم، قیر با ضخامت بیشتری دور سنگدانه‌ها قرار گرفته و پتانسیل جاری شدن آن در دماهای ساخت و اجرای انها افزایش می‌یابد. بنابراین، کاهش ریزش قیر مشکلات مربوط به آن را در حمل و پخش این مخلوطها کاهش می‌دهد. ریزش قیر ممکن است در دماهای بالای بهره‌برداری از روسازی نیز اتفاق بیفتد، اگر جلوی آن گرفته نشود. در این حالت، در دماهای بالای بهره‌برداری از روسازی، قیر نرم شده و شروع به حرکت به قسمتهای پایین که سردتر است می‌کند و در آن قسمت جریان متوقف می‌گردد. این موضوع باعث کاهش نفوذپذیری در آسفالت متخلخل می‌گردد. طبق استاندارد انجمن روسازی آسفالتی، حداکثر ریزش قیر در مخلوط آسفالتی متخلخل و SMA به ٠,٣٪ محدود شده است (Kandhal, 2002). شکل ١٥ نتایج آزمایش ریزش قیر مخلوط اسفالتی متخلخل و ماستیک درشت دانه SMA را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، مقادیر ریزش قیر در آسفالت متخلخل کمتر از مخلوط آسفالت ماستیک درشت دانه است. همچنین، افزودن تونر باعث کاهش ریزش قیر در هر دو مخلوط می‌گردد. تونر با افزایش ویسکوزیته مقاومت آن را در برابر جاری شدن افزایش داده و ریزش قیر را کاهش می‌دهد.

تمام مخلوط های آسفالت متخلخل مقدار ریزش قیر کمتر از حد مجاز ٠,٣٪ دارند، اما، در مخلوط آسفالت SMA ساخته شده با قیر فاقد افزودنی، مقدار ریزش بیشتر از مقدار مجاز ٠,٣٪ بوده و برای تثبیت قیر نیاز به الیاف دارد. اما، با افزودن تونر مقدار آن به کمتر از حد مجاز رسیده است. بنابراین، با استفاده از این افزودنی در قیر دیگر نیازی به استفاده از الیاف برای جلوگیری از ریزش قیر نخواهد بود. در مخلوط آسفالت متخلخل مقدار کاهش ریزش تا ١٢٪ تونر افزایش و بعد از آن روند معکوس می‌گردد، اما، در مخلوط آسفالت ماستیک درشت دانه مقدار کاهش تا ١٦٪ افزودنی افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج بیانگر این است که تاثیر تونر در جلوگیری از ریزش قیر در آسفالت متخلخل بیشتر از آسفالت SMA است. در حالی که با افزودن ١٢٪ تونر مقدار ریزش قیر نسبت به مخلوط بدون افزودنی تونر حدود ٦٧٪ کاهش می‌یابد، این مقدار برای مخلوط SMA با ١٦٪ افزودنی تونر حدود ٥٠٪ است.



(ب) (الف)

شکل ۱۴. نتایج آزمایش کانتابرو الف. درصد سایش بر حسب نوع قیر ب. رابطه افت وزنی و کار چسبندگی



شکل ۱۵. نتایج ریزش قیر مخلوط‌ها

٤-٧-نتایج نسبتهای انرژی و ارتباط با نتایج آزمایش AASHTO T283

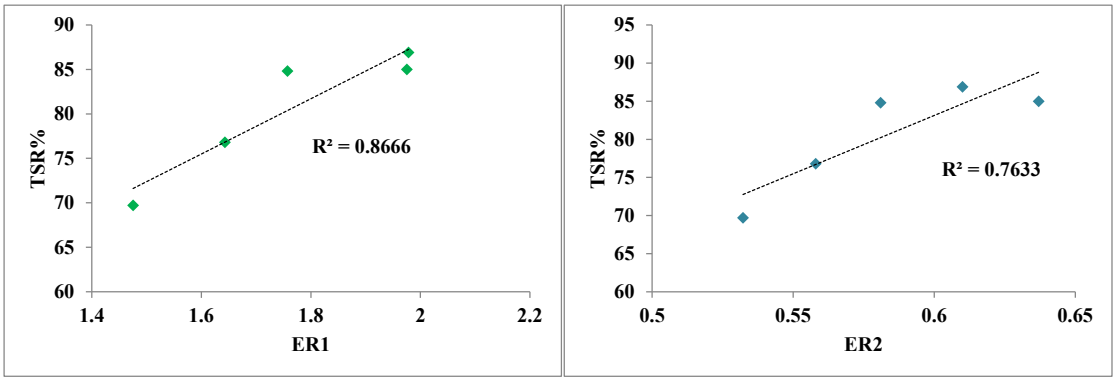
همانگونه که قبلا ذکر گردید، آسیب رطوبتی در مخلوطهای آسفالتی ناشی از جدایی پیوند بین قیر و مصالح سنگی در اثر حضور آب است. مقاومت در برابر آسیب‌های رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و SMA می‌تواند نقش به سزایی در دوام این مخلوطها در مناطق با بارندگی داشته باشد. مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آسیب رطوبتی به چسبندگی قیر و سنگدانه و پیوستگی قیر بستگی زیادی دارد (Behiry, 2013). وجود رطوبت در مخلوط آسفالتی باعث از دست رفتن چسبندگی قیر و سنگ‌دانه‌ها و یا از بین رفتن پیوستگی در قیر شده و نتیجه آن عریان شدگی مخلوط می‌باشد (Xiao et al., 2010). پتانسیل مخلوطهای اسفالتی در برابر این خرابی به طور رایج با آزمایش لاتمن اصلاح شده مطابق با استاندارد AASHTO T283 ارزیابی می‌گردد. این آزمایش به دلیل استفاده از ٦ نمونه مخلوط آسفالتی برای هر ترکیب و زمان‌بر بودن فرآیند سیکل ذوب و یخبندان، یکی از آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. همچنین، گزارش گردیده است که ارتباط خوبی بین نتایج این آزمایش و مشاهدات میدانی وجود ندارد. علاوه بر این، این روش مبتنی بر تجربه بوده و مبنای تحلیلی ندارد.

بنابراین، استفاده از روش‌های تحلیلی می‌تواند مبنای مناسبی برای ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی از نظر حساسیت رطوبتی باشد. همانگونه که در بخش ٤-١-٢ توضیح داده شد، دو پارامتر نسبت انرژی ER_1 و ER2 مبتنی بر انرژی آزاد سطحی توسط باسین و لیتل برای ارزیابی حساسیت رطوبتی ارائه گردیده است. این نسبتها در مقایسه با روش AASHTO T283 کم هزینه‌تر و سریع‌تر می‌باشند، و می‌توانند به جای روش پرهزینه‌تر

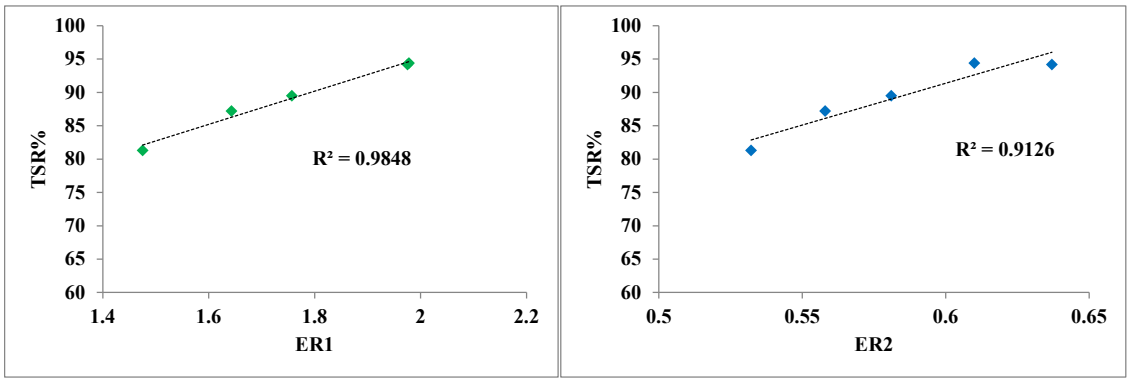
AASHTO T283 استفاده شوند. مقدار این نسبتها بر اساس نتایج انرژی آزاد سطحی بر اساس روابط ۱۰ و ۱۱ برای دو نوع مخلوط ساخته شده با قیرهای مختلف محاسبه گردیده و نتایج آن در جدول ۱۲ برای نسبت ER1 وER2 ارائه گردیده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مقدار ER_1 با افزایش مقدار تونر تا ۱۲٪ افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد، اما، مقدار ER_2 با افزایش مقدار وتنر تا ۱۶٪ افزایش می‌یابد. به منظور بررسی ارتباط بین این پارامترهای نسبت انرژی با نتایج TSR در مخلوطهای آسفالتی مورد مطالعه همبستگی بین آنها با محاسبه R^2 تعیین گردید. در شکل ۱۶ همبستگی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوطهای اصلاح شده با تونر، با هر یک از پارامترهای حساسیت رطوبتی انرژی آزاد سطحی در آسفالت متخلخل نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود نسبت ER_1 همبستگی مناسبی با نتایج خرابی حساسیت رطوبتی دارد. مقدار R^2=0.86 تاییدکننده این همبستگی است. همچنین، در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که نسبت ER_2 (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 تونر، که مقدار R^2=0.77 تأییدکننده این همبستگی است. در شکل ۱۷، همبستگی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوطهای اصلاح شده با تونر، با هر یک از پارامترهای حساسیت رطوبتی انرژی آزاد سطحی در آسفالت SMA نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که نسبت ER_1 (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 =98% تأییدکننده این همبستگی است. همچنین، با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که نسبت ER_2 همبستگی مناسبی با نتایج خرابی حساسیت رطوبتی مخلوطهای اصلاح شده با تونر دارد، که مقدار R^2=91% تأییدکننده این همبستگی است. بنابراین، می‌توان از روش انرژی آزاد سطحی به خوبی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی این مخلوطها استفاده نمود.

جدول۱۲. پارامترهای انرژی آزاد سطحی تعریف‌شده جهت بررسی خرابی حساسیت رطوبتی پودر تونر

نوع قیر	ER_1	ER_2
OB+0%T	1.475	0.532
OB+4%T	1.643	0.558
OB+8%T	1.757	0.581
OB+12%T	1.978	0.61
OB+16%T	1.975	0.637



شکل ۱۶. همبستگی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوطهای اصلاح شده با پودر تونر، با هر یک از پارامترهای حساسیت رطوبتی انرژی آزاد سطحی در آسفالت متخلخل



شکل ۱۷. همبستگی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوطهای اصلاح شده با پودر تونر، با هر یک از پارامترهای حساسیت رطوبتی انرژی آزاد سطحی در آسفالت SMA

۵-نتیجه گیری

در این پژوهش، به یک قیر درجه نفوذی درصدهای مختلفی از تونر ضایعاتی افزوده شده و خصوصیات مختلف قیرها و مخلوطهای آسفالت متخلخل و SMA ساخته شده با آنها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مهمترین نتایج این پژوهش موارد زیر می‌باشند:

-درجه نفوذ و درجه انگمی قیر با افزایش تونر ضایعاتی تا ۱۲٪ از وزن قیر کاهش یافته و بعد از آن روند معکوس گردید.

-نقطه نرمی و شاخص نفوذ قیر با افزودن تونر تا ۱۲٪ افزایش و سپس کاهش می‌یابند. این موضوع بیانگر این است که افزودن تونر حساسیت دمایی را کاهش داده و باعث افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل در دمای بالا شود.

-انرژی سطحی کل قیر، کار پیوستگی قیر، کار چسبندگی بین قیر و سنگدانه در حالت خشک و در حضور آب با افزایش تونر ضایعاتی تا مقدار ۱۲٪ افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابند.

-افزودن تونر ضایعاتی مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی متخلخل و SMA را در حالت خشک و مرطوب تا مقدار ۱۲٪ افزایش داده و سپس کاهش می‌دهد. این تاثیر بر روی مخلوط متخلخل بیشتر از آسفالت SMA است. همچنین، حساسیت رطوبتی مخلوطها نیز کاهش می‌یابد و این کاهش برای مخلوط آسفالت متخلخل بیشتر از مخلوط SMA است.

-افزودن تونر ضایعاتی باعث کاهش ریزش قیر در مخلوط متخلخل و SMA می‌گردد و این تاثیر در آسفالت متخلخل بیشتر است. در آسفالت متخلخل تا مقدار ۱۲٪ تونر ریزش کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد، اما، در مخلوط SMA مقدار ریزش تا ۱۶٪ کاهش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود ریزش قیر کمتر از حد مجاز شده و نیازی به استفاده از الیاف در مخلوطها نخواهد بود.

-افزودن تونر به قیر باعث کاهش افت وزنی کانتابرو، که نشان دهنده دوام آسفالت متخلخل در برابر عوامل محیطی و بار ترافیکی است، می‌شود. افزودن ۱۲٪ تونر به قیر افت وزنی را نسبت به حالت بدون افزودنی ۶۷٪ کاهش می‌دهد. ارتباط بسیار خوبی بین افت وزنی کانتابرو و کار چسبندگی قیر و سنگدانه در حالت خشک مشاهده گردید.

-ارتباط خوبی بین نسبت مقاومت کششی در آزمایش AASHTO T283 و نسبتهای انرژی شامل نسبت کار چسبندگی قیر و مصالح سنگی در حالت خشک و کار چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در حضور آب (ER_1) و نسبت تفاضل کار چسبندگی بین قیر و سنگدانه در حالت خشک و کار پیوستگی قیر به کار چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در حضور آب (ER_2) برای هر دو مخلوط متخلخل و SMA مشاهده گردید.

۷-مراجع

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

Amanda, M. T., Mauliana, R., Rahman, T., & Suparma, L. B. (2025). Evaluating the performance of porous asphalt mixtures with polymer-modified and unmodified bitumen. *Discover Civil Engineering*, *2*(1), 31.

-AAPA, Open Graded Asphalt Design Guide, Ali, S. A., Zaman, M., Ghabchi, R., Rahman, M. A., Ghos, S., & Rani, S. (1997).Effect of additives and aging on moisture-induced damage potential of asphalt mixes using surface free energy and laboratory-based performance tests. *International Journal of Pavement Engineering*, *23*(2), 285-296.

-Alvarez, A. E., Diaz, E. J., Mejía, R. A., Arámbula-Mercado, E., & Reyes-Ortiz, O. J. (2023). Optimizing the dose of warm-mix asphalt additives by maximizing the asphalt-aggregate adhesion measured via surface-free energy. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *35*(2), 04022410.

-An, J., Song, Y., Wu, S., Xu, H., Yang, X., Gong, Z., & Hao, H. (2026). Investigation on the moisture resistance and mechanism of asphalt concrete using metallurgical solid waste as anti-stripping agent. *Construction and Building Materials*, *518*, 145792.

-Arabani, M., Hamedi, G. H., Majd Rahimabadi, M., & Mazhari Pakenari, M. (2025). Effect of NMH and DA Additives and Bitumen Aging on Cohesion and Adhesion Failures Using Surface Free Energy and Pull-Off Methods. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *37*(4), 04025066.

-Asgharzadeh, S. M., Tabatabaee, N., Naderi, K., & Partl, M. N. (2015). Evaluation of rheological master curve models for bituminous binders. *Materials and Structures*, *48*(1), 393-406.

-Bhasin, A., & Little, D. N. (2007). Characterization of aggregate surface energy using the universal sorption device. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(8), 634-641.

-Caccavo, Diego, Marco Iannone, Isidoro Russo, Anna Maria Petrucci, Raffaele Petrucci, Gianluca Genovese, Ciro Caliendo, and Gaetano Lamberti. (2026). Evaluation of binder and mixture performance in crumb rubber asphalt modified with Sasobit. *Construction and Building Materials* 516 145674.

-Choudhary, D., Kaithwas, S., Sharma, R. K., Mishra, A., Singhai, S., Powar, S., & Singh, A. (2024). Recycling of waste toner derived from exhausted printer cartridges as adsorbent for defluoridation of water. *Environmental Technology & Innovation*, *34*, 103572.

-Daniel-Mkpume, C. C., Ahaiwe, R. C., Ifenatuorah, C. L., Ike-Eze, I. C. E., Aigbodion, V. S., Egoigwe, S. V., & Okonkwo, E. G. (2022). Potential end of life application of African star apple shell and waste toner powder as composite filler materials. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *24*(2), 680-691.

-Dong, L., Huang, Z., Ruan, J., Zhu, J., Huang, J., Huang, M., & Zhang, T. (2017). Pyrolysis routine of organics and parameter optimization of vacuum gasification for recovering hazardous waste toner. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *5*(11), 10038-10045.

-Du, X., Hu, K., Zhang, F., Liu, J., & Gillani, S. T. A. (2025). Characteristics of waste toner powder and its interaction effect on the physicochemical properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, *458*, 139484.

-Duan, S., Cui, J., Hu, J., Han, T., Chen, Y., Wang, H., & Ma, T. (2024). Research on the adhesion mechanism and compatibility of acrylate composite polyurethane binder− aggregate based on surface free energy theory. *Construction and Building Materials*, *438*, 137236.

-Fernández, B., Ayala, J., Del Valle, E., Martínez-Blanco, D., Castañón, A. M., & Menéndez-Aguado, J. M. (2022). Recycling of waste toner powder as adsorbent to remove aqueous heavy metals. *Materials*, *15*(12), 4150.

-Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The global e-waste monitor 2020. *United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam*, *120*, 14.

-Fujinaga, T., Miyasaka, T., Kanou, Y., & Akiba, S. (2025). Design and Evaluation of Modified Asphalt with Enhanced Stripping Resistance Based on Surface Free Energy. *Construction Materials*, *5*(3), 64.

-Ghabchi, R., Singh, D., & Zaman, M. (2014). Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixes containing RAP and different types of aggregates and asphalt binders using the surface free energy method. *Construction and Building Materials*, *73*, 479-489.

-Good, R. J. (1992). Contact angle, wetting, and adhesion: a critical review. *Journal of adhesion Science and Technology*, *6*(12), 1269-1302.

-Habal, A., & Singh, D. (2022). Establishing threshold value of surface free energy and binder bond strength parameters for basaltic asphalt mixes. *Road Materials and Pavement Design*, *23*(8), 1877-1899.

-Huang, J., Li, X., Kumar, G. S., Deng, Y., Gong, M., & Dong, N. (2021). Rheological properties of bituminous binder modified with recycled waste toner. *Journal of Cleaner Production*, *317*, 128415.

-Hamedi, G. H., Sakanlou, F., Rahmani, H., Sohrabi, M., & Hofko, B. (2025). Effects of short-term aging of base and nano-modified bitumens on surface free

energy and their relationship with moisture sensitivity in warm-mix asphalt. *Scientific Reports*, *16*(1), 3641.
-Hossain, K., Karakas, A., & Hossain, Z. (2019). Effects of aging and rejuvenation on surface-free energy measurements and adhesion of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *31*(7), 04019125.
-Huang, J., Kumar, G. S., & Sun, Y. (2021). Evaluation of workability and mechanical properties of asphalt binder and mixture modified with waste toner. *Construction and Building Materials*, *276*, 122230.
-Huang, J., Zhang, J., & Gao, Y. (2021). Evaluating the clogging behavior of pervious concrete (PC) using the machine learning techniques. *CMES-Computer Modeling in Engineering and Sciences*, *130*(2), 805-821.
-Ibeagia, U. M., Okereke, S. O. E., Okpareke, O. C., & Ukoha, P. O. (2012). Studies on The Modifications of Asphalt Binder Using Some Selected Polymers.
-Itoua, P. I., Sun, D., Li, P., & Shen, S. (2023). Influence of waste toner on asphalt binder: Chemical and rheological characterization. *Molecules*, *28*(6), 2794.
-Itoua, P. I., & Sun, D. (2024). Evaluation of waste toner asphalt containing crude palm oil from Congo: Rheological properties, compatibility, self-healing and aging characteristic. *Case Studies in Construction Materials*, *20*, e03082.
-Kandhal, P. S. (2002). *Design, construction, and maintenance of open-graded asphalt friction courses*. National Asphalt Pavement Association.
-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.
Kataware, A. V., Shantharam, A., & Suryawanshi, S. (2025). Evaluation of moisture resistance of cold mix asphalt and binder using Tensile strength ratio and Surface Free energy approach. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *39*(22), 3375-3404.
-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.
Li, N., Wang, J., Si, W., & Hu, D. (2022). Quantitative analysis of adhesion characteristics between crumb rubber modified asphalt and aggregate using surface free energy theory. *Materials*, *15*(16), 5735.
Liu, H., Zhang, Y., Hao, J., Chen, C., Ma, T., & Pei, Y. (2025). Study on the interfacial adhesion mechanism and microscopic characteristics between modified emulsified asphalt and refined processing RAP material based on surface free energy theory. *Construction and Building Materials*, *493*, 143326.
-Lombardo, J. Asphalt Is Getting New Life from Recycled Printer Ink. 2015.
-Luo, Y., Guo, P., Cheng, S., Gao, J., Shi, C., Chen, Y., & Shang, Y. (2025). Gray correlation entropy and factor analysis between adhesion characteristics and micro characteristics of warm mix recycled asphalt. *Journal of Cleaner Production*, *526*, 146620.
-Lu, J., Yang, W., Sun, D., Zhang, S., Li, C., Fu, C., & Kou, J. (2026). Laboratory investigation of anti-stripping agents for improving the interfacial interaction between PE wax modified asphalt binder and aggregate. *Construction and Building Materials*, *519*, 145907.
-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.
Notani, M. A., Moghadas Nejad, F., Fini, E. H., & Hajikarimi, P. (2019). Low-temperature performance of toner-modified asphalt binder. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, *145*(3), 04019022.
-Notani, M. A., Moghadas Nejad, F., Khodaii, A., & Hajikarimi, P. (2019). Evaluating fatigue resistance of toner-modified asphalt binders using the linear amplitude sweep test. *Road Materials and Pavement Design*, *20*(8), 1927-1940.
-Notani, M. A., Hajikarimi, P., Nejad, F. M., & Khodaii, A. (2020). Rutting resistance of toner-modified asphalt binder and mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *13*(1), 1-9.
-Rahman, M. A., Ghabchi, R., Zaman, M., & Ali, S. A. (2021). Rutting and moisture-induced damage potential of foamed warm mix asphalt (WMA) containing RAP. *Innovative Infrastructure Solutions*, *6*(3), 158.
-Rambarran, S., Clark, A., Mohammed, S., Sangster, N., & Maharaj, R. (2026). Rutting and fatigue cracking characteristics of toner-modified asphaltic blends. *Journal of Smart Science and Technology*, *6*(1), 37-47.
-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.
-Ruan, J., Dong, L., Huang, J., Huang, Z., Huang, K., Dong, H., & Qiu, R. (2017). Vacuum-gasification-condensation of waste toner to produce industrial chemicals and nanomaterials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *5*(6), 4923-4929.

-Sandeep, K., Singh, B., & Kathuria, A. (2026). Surface modified aggregates for enhanced moisture resistance in cold mix asphalt. *Construction and Building Materials*, *508*, 145114.
-Shah, S. A. R., Hussan, S., Ben Kahla, N., Anwar, M. K., Baluch, M. A., & Nawaz, A. (2024). Performance evaluation and optimization of binder-toner and mixing efficiency ratios in an e-waste toner-modified composite mixture using response surface ethodology. *Infrastructures*, *9*(11), 200-201.
-Shanahan, M. (1991). Adhesion and wetting: similarities and differences. *Rubber World;(United States),* Vol. 205.
-Showkat, B., Suresha, S. N., & Akhandappagol, N. (2020). Study of rheological and creep recovery properties of asphalt binder modified with waste toner. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *32*(11), 04020331.
-Siddiq, M. U., Anwar, M. K., Almansour, F. H., Javed, J., & Qurashi, M. A. (2025). Performance evaluation of waste toner and recycled LDPE-Modified asphalt pavement: A mechanical and carbon assessment-based optimization approach towards sustainability. *Sustainability*, *17*(15), 7003.
-Singh, D., Habal, A., Ashish, P. K., & Kataware, A. (2018). Evaluating suitability of energy efficient and anti-stripping additives for polymer and Polyphosphoric acid modified asphalt binder using surface free energy approach. *Construction and Building Materials*, *158*, 949-960.
-Solaimanian, M., Kennedy, T. W., & Tripathi, R. (1998). Performance characteristics of asphalt binders and mixtures modified by waste toner. *Transportation Research Record*, *1638*(1), 120-128.
-Suryawanshi, S., & Kataware, A. (2026). Investigating moisture susceptibility of lignin modified asphalt binders with natural aggregates using surface free energy analysis. *Nondestructive Testing and Evaluation*, *41*(7), 4135-4159.
-Suryawanshi, S., & Kataware, A. (2026). Adhesion characteristics of natural aggregate or slag with water based warm mix asphalt modified binder using surface free energy method. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *40*(4), 766-790.
-Taha, B. A., Rasheed, S. K., Al-Saffar, Z. H., Radeef, H. R., & Dulaimi, A. (2025). Enhancing moisture resistance in hot mix asphalt: evaluating the effectiveness of amine-free anti-stripping agents. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, *10*(2), 146.
-Van Oss, C. J., Chaudhury, M. K., & Good, R. J. (1988). Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems. *Chemical reviews*, *88*(6), 927-941.
-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.
Wang, T., Liang, G., & Liu, Y. (2025). Analysis of the adhesion failure mechanism of the asphalt-aggregate interface under the action of moisture. *Construction and Building Materials*, *485*, 141968.
-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.
Wu, H., Yu, J., Song, W., Zou, J., Song, Q., & Zhou, L. (2020). A critical state-of-the-art review of durability and functionality of open-graded friction course mixtures. *Construction and Building Materials*, *237*, 117759.
Wu, Z., Javed, J., Siddiq, M. U., Qurashi, M. A., & Lyu, P. (2026). Utilization of Waste Toner as a Sustainable Modifier in Asphalt Binder: Experimental Investigation and ANN-Based Performance Evaluation. *Infrastructures*, *11*(6), 206-207.
Xiao, F.; Zhao, W.; Gandhi, T. and Amirkhanian, S. N. (2010) Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering,* Vol. 22, 1047-1055.
-Yildirim, Y., & Kennedy, T. W. (2002). Binder designs for the toner modified asphalt demonstration projects.
-Yildirim, Y., Hazlett, D., Davio, R., on Waste, T. R. B. C., & At, T. R. M. R. C. (2004). Toner-modified asphalt demonstration projects. *Resources, conservation and recycling*, *42*(3), 295-308.
-Yin, H., Cao, S., Guo, F., & Wu, X. (2025). Adhesion properties between rubber asphalt mastic and aggregate: Verification from surface free energy theory and molecular dynamics. *Materials*, *18*(13), 3115.
-Zhang, M. X., Wang, Y. M., Zhang, W. K., Du, W., Li, X., Wang, X. N., & Liu, X. C. (2024). Adhesion characteristics of montmorillonite modified asphalt unveiled by surface free energy and AFM. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *132*, 103699.
-Zhang, Z., Ji, J., Li, X., Shi, Z., & Wang, J. (2025). Study of interface adhesion between polyurethane and aggregate based on surface free energy theory and molecular dynamics simulation. *Applied Sciences*, *15*(2), 606.
-Zhou, T., Wan, S., Dong, Z., Xie, S., You, L., & Jin, C. (2026). Physicochemical mechanisms of asphalt–aggregate interface adhesion: Effects of mineral composition and surface energy. *Construction and Building Materials*, *513*, 145469.

Investigating the effects of Waste Toner on the Moisture Damage Susceptibility of Porous Asphalt and Stone Mastic Asphalt (SMA)

Mehdi Faraji, M.Sc., Graduate, Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
***Hassan Taherkhani,** Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.*

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

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT
In this research, in order to evaluate the feasibility of using waste cartridge toner, as a hazardous waste material, in asphalt mixtures, different dosages of binder weight have been replaced with waste toner, and the properties of asphalt binder and asphalt mixtures have been evaluated. To this end, 0, 4, 8, 12 and 16% of asphalt binder has been replaced with waste toner powder and the properties such as penetration grade, softening point, ductility, Contact angle and free surface energy components of the binders have been evaluated. Furthermore, porous asphalt and stone matrix asphalt (SMA) mixtures made by asphalt binders containing different dosages of toner have been made and the moisture damage resistance, binder drain-down and Cantabro loss have been evaluated. Also, the energy ratios obtained from free surface energy results of the binders and aggregates have been computed and their correlation with tensile strength ratio (TSR) results has been investigated. Results reveal that penetration grade and ductility of asphalt binder decrease with increasing toner content, up to 12%, beyond which the trend reverses. Evaluation of free surface energy of the binders shows that the total free surface energy increases up to 12% of toner content, beyond which, it decreases with increasing toner content. Cohesion work and adhesion work of asphalt binder and aggregates increase with increasing toner content up to 12%, beyond which they decrease with increasing toner content. Results reveal that tensile strength of asphalt mixtures increases with increasing toner content up to 12%. The effects of toner on the enhancement of porous asphalt tensile strength is more than that of the SMA mixture. Furthermore, the effect of toner on the tensile strength in wet conditioned mixtures is more than that in dry condition. Results reveal that toner addition into asphalt binder enhances the moisture damage resistance of the mixtures with more enhancement for the porous asphalt than the SMA Mixture. Toner addition decreases asphalt drain down in both mixtures and Cantabro loss in porous asphalt. Good correlation was found between the energy ratio parameters and the TSR results for the asphalt mixtures.

Keywords: Asphalt Binder, Waste Toner, Moisture Damage, Porous Asphalt, Stone Matrix Asphalt, Free Surface Energy