



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

ISSN: 2821-0549



Research Article

Effect of Runoff Acidity on the Adhesion Between Bitumen and Aggregates and Mechanical Durability of Hot Mix Asphalt

Hossein Bahrami ^a, Gholamali Shafabakhsh ^{ib}*, Mahdi Akbari ^{ic}^a Ph.D. Candidate, Department of Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran^b Professor, Department of Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran^c Assistant Professor, Department of Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran* Corresponding author: Ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

PAPER INFO

ABSTRACT

Paper history:

Received: 2025-08-21

Revised: 2025-09-06

Accepted: 2025-09-08

Keywords:

Adhesion and cohesion, Low-temperature cracking, Acidic and alkaline environment, Moisture susceptibility, Fatigue damage.

Hot Mix Asphalt (HMA), although widely used in pavement construction due to its favorable mechanical properties, is highly affected by environmental and chemical conditions of surface runoff. The aim of this study is to investigate the effect of runoff pH variations (4, 7, and 9) on the adhesion between bitumen and aggregates and mechanical failure parameters of asphalt mixtures. To this end, a series of laboratory tests, including Indirect Tensile Strength and moisture sensitivity (ITS/TSR), Semi-Circular Bending (SCB) at low temperature, Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT), and contact angle measurements for Surface Free Energy (SFE) analysis were performed. Results indicated that acidification of the environment (pH = 4) significantly increased the contact angle and reduced total surface free energy of bitumen from about 46.14 to 52.12 (ergs/cm²), reflecting a decline in wettability and adhesion. TSR values decreased markedly under acidic conditions, while a relative improvement was observed in alkaline conditions. In addition, the ITS and SCB indices (peak load and fracture energy) were considerably reduced in the acidic environment. For example, maximum load of the samples dropped by more than 20% compared to the neutral condition. Fatigue tests showed that fatigue life decreased sharply in acidic conditions, whereas alkaline conditions provided a relative improvement compared to neutral conditions, although still lower than that of the dry state. Overall, the findings demonstrate that acidic runoff has the most detrimental effect on the adhesion and mechanical durability of HMA, while alkaline conditions may partially compensate for moisture-induced damage. These results highlight the importance of considering environmental chemical conditions in design and maintenance of pavements, particularly in urban and industrial areas with a high probability of acidic runoff.

* Corresponding author.

E-mail address: Ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

How to cite this article: Bahrami, H., Shafabakhsh, G, A., & Akbari, M. (2026). Effect of Runoff Acidity on the Adhesion Between Bitumen and Aggregates and Mechanical Durability of Hot Mix Asphalt. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 12(1), pp.45-67

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.38760.1735>

© 2025 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

تأثیر اسیدپتیه رواناب بر چسبندگی قیر و سنگدانه و دوام مکانیکی مخلوط آسفالتی گرم

حسین بهرامی^۱، غلامعلی شفافبخش^{۲*}، مهدی اکبری^۳

۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲ استاد، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

۳ استادیار، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

چکیده

مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) اگرچه به دلیل خواص مکانیکی مطلوب به طور گسترده در روسازی‌های راه به کار می‌روند، اما عملکرد آن‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی و شیمیایی رواناب‌های سطحی قرار می‌گیرد. هدف این پژوهش، بررسی اثر تغییرات pH رواناب (۷ و ۹) بر چسبندگی قیر و سنگدانه و پارامترهای شکست مکانیکی مخلوط آسفالتی است. بدین منظور، مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی شامل کشش غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی (ITS/TSR)، خمش نیم‌دایره (SCB) در دمای پایین، خستگی کششی غیرمستقیم (ITFT) و اندازه‌گیری زاویه تماس برای تحلیل انرژی آزاد سطحی (SFE) انجام شد. نتایج نشان داد که اسیدی شدن محیط (pH=۴) موجب افزایش قابل توجه زاویه تماس و کاهش انرژی آزاد سطحی کل قیر از حدود ۱۴/۴۶ به ۱۲/۵۲ ergs/cm^2 گردید که بیانگر کاهش قابلیت ترشوندگی و چسبندگی است. مقادیر TSR در شرایط اسیدی افت چشمگیری داشت؛ در حالی که در محیط قلیایی بهبود نسبی مشاهده شد. همچنین، مقاومت کششی غیرمستقیم و شاخص‌های SCB (بار حداکثر و انرژی شکست) در محیط اسیدی به طور محسوس کاهش یافتند. به طور مثال، بار حداکثر نمونه‌ها نسبت به حالت خشی بیش از ۲۰٪ افت کرد. آزمون‌های خستگی نشان داد که عمر خستگی در محیط اسیدی به شدت کاهش یافته، در حالی که در محیط قلیایی نسبت به شرایط خشی بهبود نسبی داشت؛ هرچند همچنان کمتر از حالت خشک بود. به طور کلی، نتایج بیانگر آن است که رواناب‌های اسیدی بیشترین اثر منفی را بر چسبندگی و دوام مکانیکی HMA دارند؛ در حالی که شرایط قلیایی می‌تواند بخشی از افت ناشی از رطوبت را جبران کند. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن شرایط شیمیایی محیطی در طراحی و نگهداری روسازی‌ها، به ویژه در مناطق شهری و صنعتی با احتمال بالای رواناب‌های اسیدی، را نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

واژه‌های کلیدی:

چسبندگی و پیوستگی،
ترک خوردگی دمای پایین،
محیط اسیدی و بازی،
حساسیت رطوبتی، خرابی
خستگی.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

استناد به این مقاله: بهرامی، حسین، شفافبخش، غلامعلی و اکبری، مهدی. (۱۴۰۵). تأثیر اسیدپتیه رواناب بر چسبندگی قیر و سنگدانه و دوام مکانیکی مخلوط آسفالتی گرم. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۱(۱)، ۴۵-۶۷.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.38760.1735>

© 2025 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

در طول عمر خدمت‌دهی روسازی، پیرشدگی قیر و تکرار بارگذاری ترافیکی موجب کاهش رفتار ارتجاعی و مقاومت کششی لایه آسفالتی می‌شود (دینیز و همکاران، ۲۰۲۵). در نتیجه آن، ریزترک‌ها در قسمت پایین لایه آسفالتی آغاز و به سطح رویه گسترش می‌یابند (مهدی نظر و همکاران، ۲۰۲۴). از طرف دیگر، پارامترهای محیطی همچون نفوذ آب و رطوبت به درون لایه‌های روسازی نیز می‌تواند شدت گسترش ترک‌های خستگی را افزایش دهد (عمر و همکاران، ۲۰۲۰). خرابی رطوبتی از جمله مشکلات روسازی‌های آسفالتی در طول دوران بهره‌برداری به‌شمار می‌رود که در اثر شرایط آب‌وهوایی اتفاق افتاده و می‌تواند به شدت مقاومت و عمر روسازی را کاهش دهد (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰). مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) به دلیل خواص مکانیکی مطلوب و دوام زیاد، یکی از پرکاربردترین مصالح در ساخت روسازی‌های راه هستند (انیب و همکاران، ۲۰۲۳؛ جی و همکاران، ۲۰۲۳؛ ساپکوتا و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال، عوامل محیطی مانند رطوبت و رواناب‌های اسیدی، به‌ویژه در مناطق با بارندگی اسیدی یا آلودگی‌های صنعتی، می‌توانند عملکرد این مخلوط‌ها را تحت تأثیر قرار دهند (عمر و همکاران، ۲۰۲۰). این عوامل اغلب با کاهش چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها یا تضعیف پیوستگی داخلی قیر، منجر به خرابی‌هایی نظیر ترک‌خوردگی، شیارشدگی و جدا شدن لایه‌های آسفالت می‌شوند (آقا و همکاران، ۲۰۲۳؛ مهدی‌نظر و همکاران، ۲۰۲۴؛ البیاتی و اسماعیل، ۲۰۲۵). رواناب‌های سطحی، به‌ویژه در مناطق شهری و صنعتی، ممکن است حاوی ترکیبات اسیدی باشند که از طریق بارش‌های جوی یا آلاینده‌های محیطی ایجاد می‌شوند (موسوی راد و همکاران، ۲۰۲۳). این رواناب‌ها با نفوذ به ساختار روسازی، پیوند قیر-سنگدانه را تضعیف کرده و مقاومت در برابر رطوبت را کاهش می‌دهند (میرعبدالعظیمی و

همکاران، ۲۰۲۱؛ منگ و همکاران، ۲۰۲۴). مطالعات نشان داده‌اند که اسیدیته رواناب می‌تواند با تغییر خواص شیمیایی سطح قیر و سنگدانه‌ها، چسبندگی را کاهش داده و احتمال گسیختگی را افزایش دهد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ عمرانیان و همکاران، ۲۰۲۲).

کیان و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر ترکیبی شرایط مرطوب مختلف (اسیدی و بازی) و تابش نور خورشید بر خصوصیات رئولوژی و ریزساختار قیر پرداختند. در این پژوهش، قیرهای پیرشده کوتاه‌مدت به روش لعاب نازک چرخان قیر به وسیله اشعه فرابنفش و شرایط محیطی مرطوب مختلف مورد پیرشدگی بیشتری قرار گرفت تا اثر تابش نور خورشید و باران‌های اسیدی یا شرایط قلیایی را تجربه کند. سپس، آزمایش‌های DSR، FTIR، BBR و SARA روی نمونه‌های قیری انجام شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب شرایط مرطوب مختلف و اشعه فرابنفش باعث تسریع در پیرشدگی قیر می‌شود که این موضوع سبب کاهش مقدار قسمت اشباع‌شده، آروماتیک و رزین قیر می‌شود و مقدار آسفالتن را افزایش می‌دهد. همچنین، باعث می‌شود تا پیک جذب‌شده گروه‌های کربونیل و سولفوکسید تقویت شود. نتایج تابش نور فرابنفش نشان می‌دهد که استفاده از طول موج‌های کوتاه‌تر باعث اثر پیرشدگی بیشتری در نمونه‌های قیری شده است.

هو و همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه آزمایشگاهی، با تهیه انواع باران اسیدی شامل باران سولفوریک، باران نیتریک و باران مخلوط، روش آغشته‌سازی دوره‌ای آسفالت را توسعه دادند. سپس، با تعیین سهم جرمی مؤلفه‌های چهارگانه قیر پس از پیرشدگی، تغییر ویژگی‌های عملکردی بافت قیر را تحلیل و با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز، تغییرات در گروه‌های عاملی آن را بررسی کردند. همچنین، سازوکار پیرشدگی با بهره‌گیری از کالری‌سنجی تفاضلی تبیین گردید. در گام بعد، با استناد به نظریه دینامیک مولکولی، با مدل‌سازی

مولکولی برای باران اسیدی و قیر پیرشده، مدول‌های فشاری و برشی محاسبه شدند و پارامترهایی نظیر ضریب نفوذ، چگالی انرژی چسبندگی و ضریب حلالیت نیز استخراج گردید. نتایج نشان داد که باران اسیدی نوع سولفوریک بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی قیر داشته و بیشترین میزان پیرشدگی آسفالت را سبب می‌شود؛ در مرتبه بعد باران مخلوط و سپس باران نیتریک با تأثیر نسبتاً کمتر قرار دارند.

مینگ و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی، لایه‌ای از آب حاوی یون‌های هیدروژن، سولفات و نیترات را بین آسفالت و سنگدانه قرار دادند تا تأثیر باران اسیدی بر فصل مشترک شبیه‌سازی شود. استحکام چسبندگی فصل مشترک در شرایط خشک، آب خالص و آب اسیدی تحلیل شد و تأثیر یون‌های اسیدی بر آرایش فضایی و حرکت مولکول‌های آسفالت بررسی گردید. نتایج نشان داد که یون‌های اسیدی با تغییر توزیع مولکول‌های آسفالت در فصل مشترک، کاهش غلظت مولکول‌های آسفالت و افزایش تجمع اجزای قطبی، تحرک مولکول‌های آسفالت را کاهش داده و احتمال جدایش آسفالت از سطح سنگدانه را افزایش می‌دهند. همچنین، تحت تأثیر یون‌های اسیدی، انرژی جدایش مورد نیاز برای تخریب چسبندگی فصل مشترک کاهش یافته و میزان تغییر شکل در زمان شکست فصل مشترک کمتر می‌شود، که نشان‌دهنده ضعف قابل توجه چسبندگی در حضور باران اسیدی است.

مینگ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از نظریه انرژی آزاد سطحی و روش قطره نشسته برای تحلیل رفتار ترشوندگی، کار چسبندگی و شاخص انرژی ER را محاسبه کردند. ویژگی‌های چسبندگی فصل مشترک با استفاده از روش جوشاندن آب و آزمایش‌های کشش ارزیابی شد. نتایج نشان داد که باران اسیدی به‌طور قابل توجهی کار چسبندگی فصل مشترک را کاهش می‌دهد،

که این اثر با افزایش تعداد چرخه‌های فرسایش و غلظت اسید تشدید می‌شود. مقدار ER کاهش یافته و با کاهش pH، چسبندگی ضعیف‌تر شده و آسیب شدیدتر می‌شود. محیط اسیدی جدایش فیلم آسفالت را تسریع کرده و نیروهای تعاملی را تضعیف می‌کند. همچنین، افزایش قطبیت بین آسفالت و سنگدانه‌ها توسط باران اسیدی، انرژی چسبندگی را کاهش داده و منجر به شکست می‌شود.

آذرهوش و همکاران (۲۰۲۴) اثر اسیدپتیه رواناب بر ترک خستگی مخلوط آسفالتی گرم (HMA) را بررسی کرده‌اند. برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها تحت شرایط pH مختلف، از آزمایش‌های خستگی چرخه‌ای، تحلیل انرژی سطحی (SFE) و آزمون کشش چسبندگی استفاده شده است. نتایج نشان داد که افزایش اسیدی یا قلیایی بودن رواناب باعث کاهش عمر خستگی و تضعیف پیوند بین اجزای مخلوط می‌شود. همچنین، با استفاده از آزمون آماری t-test کاهش معنادار عملکرد در شرایط غیرخستگی تأیید شده است.

مهدی‌نظر و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی، تأثیر تغییرات ویژگی‌های رواناب (مانند pH) بر عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی دمای کم را بررسی کردند. نمونه‌ها تحت شرایط مختلف رواناب مورد آزمون قرار گرفته و با استفاده از روش‌هایی چون $TSRST^1$ و تحلیل داده آماری آزمایش شدند. نتایج نشان داد که شرایط غیرخستگی رواناب (به‌ویژه اسیدی یا قلیایی شدن) مقاومت آسفالت در برابر ترک‌خوردگی دمای کم را کاهش داده و نرخ ترک‌خوردگی را افزایش می‌دهند، که این اثر با آزمون‌های آماری تأیید گردید.

مینگ و همکاران (۲۰۲۵) در یک پژوهش آزمایشگاهی، اثر باران اسیدی بر قیر ۶۰/۷۰، قیر اصلاح‌شده با SBS و مخلوط‌های آسفالتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که محیط اسیدی موجب تغییر در

¹- Thermal Stress Restrained Specimen Test

اجزای قیر و تضعیف پیوندهای مولکولی آن شده و در نتیجه ساختار اولیه قیر تخریب می‌گردد. این امر باعث افت چشمگیر در عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، از جمله کاهش مقاومت فشاری و پایداری در برابر تغییر شکل شد. در نهایت، این مطالعه نتیجه گرفت که باران اسیدی با تخریب شیمیایی فاز قیری و کاهش چسبندگی، دوام و کارایی روسازی‌های آسفالتی را به طور جدی کاهش می‌دهد.

جیانگ و همکاران (۲۰۲۵) در یک پژوهش، تأثیر لیتولوژی سنگدانه شامل بازالت، گرانیت و دو نوع سنگ آهک بر مقاومت رفتار چسبندگی در مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دوفازی اسیدی و قلیایی را مورد بررسی قرار دادند. برای این کار، آزمون‌هایی برای سنجش تأثیر محلول‌های آب با pH اسیدی و قلیایی بر چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها اجرا شد. نتایج نشان داد که لیتولوژی سنگدانه‌ها نقش حیاتی در تعیین حساسیت این چسبندگی نسبت به تخریب آبی دارد؛ به‌ویژه سنگ‌های آهکی در مقایسه با بازالت و گرانیت در شرایط اسیدی بیشتر در برابر افت چسبندگی آسیب‌پذیرند و بنابراین دوام روسازی آسفالتی در معرض محیط‌های شیمیایی خورنده را کاهش می‌دهند. یافته‌ها یادآور این نکته هستند که انتخاب نوع سنگدانه باید با در نظرگیری شرایط محیطی و پایداری شیمیایی صورت گیرد تا دوام ساختار روسازی تضمین شود.

در این پژوهش، مخلوط آسفالتی تحت تأثیر رواناب‌های مختلف سطحی با درجه اسیدیته مختلف بر پارامترهای عملکردی مهم مانند چسبندگی و شکست مورد بررسی آزمایشگاهی قرار خواهند گرفت که به عنوان پژوهشی نوین و کاربردی در نظر گرفته خواهد شد. از جمله اهداف این پژوهش موارد زیر می‌باشد:

- بررسی تأثیر گرد و غبار و دوده‌های سطح روسازی بر اسیدیته رواناب سطحی
- بررسی تأثیر تغییر در اسیدیته رواناب بر عملکرد

چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی

- بررسی تأثیر تغییر در اسیدیته رواناب بر عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی

۲. مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر از آزمایش‌های حساسیت رطوبتی روش کشش غیرمستقیم (ITS)، مقاومت کشش غیر مستقیم (ITFT)، خمش نیم‌دایره (SCB) جهت بررسی عملکرد شکست و آزمایش مربوط به تئوری انرژی سطح آزاد سطحی جهت بررسی عملکرد چسبندگی مخلوط آسفالتی تحت شرایط محیطی مخرب استفاده شده است.

۱.۲. مصالح سنگی

مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از نوع سنگدانه‌های آهکی می‌باشند. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده حد وسط دانه‌بندی پیوسته پیشنهادی نشریه ۲۳۴ با تیپ شماره (۴) با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلی‌متر برای لایه توپکا می‌باشد. حدود این دانه‌بندی در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس استاندارد ASHTO-T27 و همچنین با روش شستشو برای مصالح سنگی ریزدانه انجام شد.

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی مطابق پیشنهاد نشریه

۲۳۴

اندازه	درصد		
الک	عبوری	حداقل	حداکثر
(میلی-متر)	درصد عبوری		
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۳/۳	۹۰	۱۰۰
۴/۷۵	۶۷/۸	۴۴	۷۴
۲/۳۶	۳۴/۵	۲۸	۵۸
۰/۳	۱۰/۵	۵	۲۱
۰/۰۷۵	۴/۳	۲	۱۰

۲.۲. قیر

قیر در مخلوط آسفالتی به عنوان یک عامل چسباننده عمل می‌کند که مصالح سنگی را به صورت یک حجم پیوسته پیوند می‌دهد. قیر یک ماده با رفتار ویسکوالاستوپلاستیک است که مقاومت و خصوصیات رفتاری فیزیکی آن وابسته به دما می‌باشد (شفابخش و همکاران، ۲۰۱۴). قیر انتخابی جهت مصرف در پژوهش حاضر قیر ۶۰-۷۰ است. دلیل انتخاب آن استفاده زیاد این نوع قیر در ساخت روسازی‌های آسفالتی در مناطق معتدل و گرمسیر می‌باشد. مشخصات قیر در جدول ۲ درج گردیده است.

۳.۲. درصد قیر بهینه

به منظور تعیین درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی، طرح اختلاط مارشال طبق استاندارد ASTM D1559 انتخاب گردید. در روش طرح اختلاط مارشال، درصد قیر بهینه بر اساس میانگین مقادیر درصد قیری که بیشترین استقامت مارشال، بیشترین وزن مخصوص و مناسب‌ترین مقدار فضای خالی را در مخلوط آسفالتی سبب می‌شوند، تعیین می‌گردد (وایت، ۱۹۸۵). این مقدار برای مخلوط آسفالتی حاوی قیر خالص معادل ۵/۰ درصد به دست آمد.

جدول ۲. مشخصات قیر

روشن	مقادیر	خصوصیات
انجام	مربوط	
به قیر	آزمایش	
ASTM D70	۱/۲	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس (کیلوگرم بر متر مربع)
ASTM D5	۶۶/۷	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس (۰/۱ میلی‌متر)
ASTM D36	۵۳/۶	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
ASTM D113	90	قابلیت کشش در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D92	210	درجه اشتعال (سلسیوس)

۴.۲. آزمایش‌های میدانی

در این پژوهش، جهت بررسی میزان اسیدپتیه رواناب سطحی بر آسفالت، نقاط متعددی در شهر تهران به عنوان ایستگاه‌های نمونه‌برداری انتخاب شدند. این نقاط با توجه به حجم ترافیک بالا و همچنین وجود چراغ‌های راهنمایی و رانندگی و پمپ‌بنزین‌ها که در آن‌ها به نظر می‌رسد آلودگی ناشی از ترافیک، به‌خصوص دوده در سطح روسازی‌ها نسبت به مناطق دیگر بیشتر باشد و نقاط خارج شهر با حجم ترافیک کم جهت بررسی آثار گردوغبار، انتخاب شدند. جهت نمونه‌برداری میدانی از تأثیر گردوغبار و دوده سطح بر رواناب حاصل از بارندگی پس از پایان بارندگی، به منظور تجمع آلودگی بر سطح، نمونه‌برداری از ایستگاه‌های انتخاب‌شده توسط سرنگ‌های یک‌بارمصرف و انتقال رواناب به ظرف‌های آزمایشگاهی انجام شد و اندازه‌گیری درجه اسیدپتیه رواناب با استفاده از دستگاه pH سنج صورت گرفت. این کار برای تمام ایستگاه‌های مشخص‌شده به دفعات متعدد، تکرار و نتایج ثبت شد. این پژوهش نشان داد که وجود دوده در سطح روسازی، رواناب سطحی را در حالت اسیدی و گرد و غبار در رواناب محیطی قلیایی ایجاد می‌کند. برای شبیه‌سازی شرایط مختلف محیطی در آزمایشگاه، از محلول‌های اسید سولفوریک (H_2SO_4) و اسید نیتریک (HNO_3) برای ایجاد محیط اسیدی و از محلول سدیم هیدروکسید ($NaOH$) برای ایجاد محیط قلیایی استفاده شد.

۵.۲. شبیه‌سازی آزمایشگاهی شرایط محیطی

مختلف

به منظور در نظر گرفتن سه محیط اسیدی، خنثی و بازی، بر اساس میانگین نتایج حاصله از تحقیقات میدانی، سه مقدار برای pH لحاظ گردید که به ترتیب pH1 برابر ۴، pH2 برابر ۷ و pH3 برابر ۹ همانند شکل‌های ۱ الی ۳ روی نمونه‌ها اعمال گردید. با کمک اسید سولفوریک و

پس از تعیین روش اعمال شرایط محیطی مختلف، این رویکرد روی تمامی نمونه‌های مورد نیاز در این پژوهش که شامل نمونه‌های مارشالی ۴ اینچی و نمونه‌های نیم‌دایره‌ای خمشی است، همانند شکل ۳ در نظر گرفته شد.

اسید نیتریک، با اضافه کردن ۰/۵ گرم به ۱۰۰۰ گرم آب، pH محیط از ۷/۵ به ۴ رسید. همچنین، از ترکیب ۱۰۰۰ گرم آب و ۰/۵ گرم سدیم هیدروکسید (NaOH)، محیطی با pH معادل ۹ به دست آمد. در شکل‌های ۱ الی ۳ نحوه اعمال شرایط مذکور ارائه شده است.

لازم به ذکر است که قبل از اعمال شرایط فوق، از واسنجی بودن PH متر با استفاده از سه مایع استاندارد که در شکل ۲ نشان داده شده است، اطمینان حاصل گردید.



نحوه تعیین شرایط خنثی محیط



نحوه تعیین شرایط بازی محیط



نحوه تعیین شرایط اسیدی محیط



شکل ۱. تعیین نحوه اعمال شرایط با درجه pH مختلف جهت شبیه‌سازی رواناب‌ها



شکل ۲. فرآیند واسنجی pH متر به کمک سه مایع استاندارد

اعمال شرایط
اسیدی و بازی روی
نمونه های SCB



اعمال شرایط
اسیدی و بازی روی
نمونه های
Marshall



شکل ۳. اعمال رویکردهای مشخص شده روی نمونه های مد نظر

بارگذاری باعث ایجاد تنش کششی در راستای قطر آن و در نتیجه ترک خوردن و گسیختگی نمونه در مرطوب و خشک می شود. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت مرطوب به خشک شاخص نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم را به دست می دهد که شاخص حساسیت رطوبتی در مخلوط های آسفالتی است (AASHTO T283). در شکل ۴، آزمایش کشش غیرمستقیم و شرایط آن ارائه گردیده است.



شکل ۴. آزمایش کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده

۶.۲. مراحل انجام تحقیق در محیط آزمایشگاه

در پژوهش حاضر، بر مبنای بررسی عملکردهای شکست و چسبندگی مخلوط آسفالتی، آزمایش های مختلفی مورد نظر می باشند تا تأثیر شرایط محیطی مخرب مانند نفوذ رواناب های سطحی درون مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گیرد.

۱.۶.۲. ارزیابی عملکرد شکست مخلوط آسفالتی

در راستای بررسی عملکرد شکست مخلوط جاذب آلودگی تحت تأثیر رواناب های سطحی، از آزمایش های حساسیت رطوبتی (ITS)، مقاومت کشش غیرمستقیم (ITFT) و خمش نیم دایره (SCB) بهره گرفته شده است، که در ادامه به مشخصات و جزییات روند انجام اشاره شده است.

۱.۱.۶.۲. آزمایش حساسیت رطوبتی (ITS)

این آزمایش رایج ترین روش آزمایشگاهی برای ارزیابی خرابی رطوبتی مخلوط هایی است که در آن یک نمونه استوانه ای افقی تحت بارگذاری قائم قرار می گیرد. این

۲.۱.۶.۲. آزمایش مقاومت خستگی کشش غیرمستقیم (ITFT)

این آزمایش برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. در این آزمایش، یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. نمونه دارای ابعاد $101/6$ میلی‌متر قطر و $63/5$ میلی‌متر ارتفاع می‌باشد. بار به صورت قطری روی نمونه تا شکست آن اعمال می‌گردد (ASTM D8044). با توجه به تجهیزات و محدودیت‌های زمانی آزمایشگاهی، از آزمایش مقاومت خستگی کشش غیرمستقیم به صورت تنش ثابت استفاده شد. نحوه بارگذاری در آزمایش خستگی نیز به صورت خطی و در امتداد محور قطرهای نمونه صورت می‌پذیرد. روابط و پارامترهای مربوط به خستگی، از جمله عمر خستگی و تعداد سیکل‌های لازم برای شکست ناشی از خستگی به وسیله آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم (ITFT) تعیین می‌شود. شکل ۵، آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم را نشان می‌دهد.



شکل ۵. آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

۲-۱-۳. آزمایش خمش نیم‌دایره (SCB)

تست SCB برای مشخص کردن خواص شکست مخلوط آسفالتی انجام می‌شود. آزمایش بارگذاری خمشی نمونه نیم‌دایره‌ای (SCB) یکی از آزمایش‌های رایج

مکانیک شکست می‌باشد که در آن نمونه نیم‌دایره‌ای ترک‌دار در معرض بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای قرار می‌گیرد (ASTM D8044). سپس، نمونه‌های SCB در معرض بار مونوتونیک قرار خواهند گرفت. نمونه‌های آسفالتی SCB از استوانه‌های ۶ اینچی با استفاده از دستگاه برش مطابق با آنچه در شکل ۶ نشان داده شده است ساخته می‌شوند. نتایج آزمایش SCB از طرق مختلف می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد (یوان و همکاران، ۲۰۲۰).

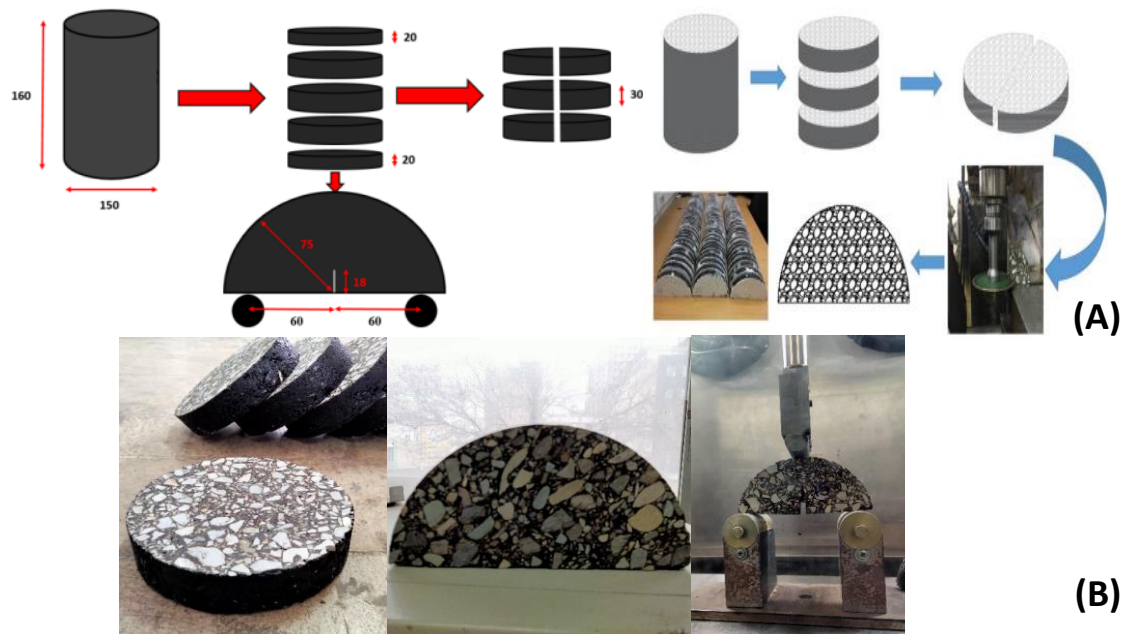
۲.۱.۶.۲. ارزیابی عملکرد چسبندگی مخلوط آسفالتی

در راستای بررسی عملکرد چسبندگی مخلوط جاذب آلودگی تحت تأثیر رواناب‌های سطحی، از آزمایش قطره چسبندگی بر اساس روش انرژی آزاد سطحی بهره گرفته شده است، که در ادامه به مشخصات و جزئیات روند انجام اشاره شده است. در دهه اخیر، مطالعات نسبتاً زیادی در زمینه استفاده از پارامترهای چسبندگی و پیوستگی، براساس روش‌های انرژی آزاد سطحی، جهت ارزیابی خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی صورت پذیرفته است. پیوستگی و چسبندگی در سیستم قیر-سنگدانه مخلوط‌های آسفالتی به طور عمده از نیروهای بین مولکولی لیفشیتز-واندروالس و اسیدی-بازی ناشی می‌شود.

بر اساس تئوری ترمودینامیک، تغییرات ترمودینامیک در انرژی آزاد سطحی چسبندگی و پیوستگی به ترتیب به ایجاد ترک و گسیختگی در سطح تماس قیر و سنگدانه و در قیر مرتبط است. بنابراین جهت محاسبه کار چسبندگی و پیوستگی، تعیین اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه حیاتی می‌باشد. با دانستن مشخصات چسبندگی و پیوستگی یک مخلوط، می‌توان خرابی‌هایی همچون حساسیت رطوبتی، ترک‌های خستگی و خودترمیمی آسفالتی در آن را مورد ارزیابی قرار داد. یکی از روش‌های متداول برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی

است و از آنجایی که در این پژوهش فقط به مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر نیاز می‌باشد، لذا محدودیتی در استفاده از این آزمایش وجود ندارد. شکل ۷، دستگاه آزمایش قطره چسبنده را نشان می‌دهد.

آزاد سطحی مواد جامد، آزمایش قطره چسبنده می‌باشد. این روش، زاویه تماس استاتیک را اندازه‌گیری می‌کند و برای سنگدانه و قیر (در حالت جامد) می‌توان آن را مورد استفاده قرار داد. کاربرد این روش برای سنگدانه مشروط به کوچک بودن مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه



شکل ۶. آزمایش خمش نیم‌دایره (SCB): الف) مراحل آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش SCB و ب) آزمایش SCB روی نمونه‌های آسفالتی



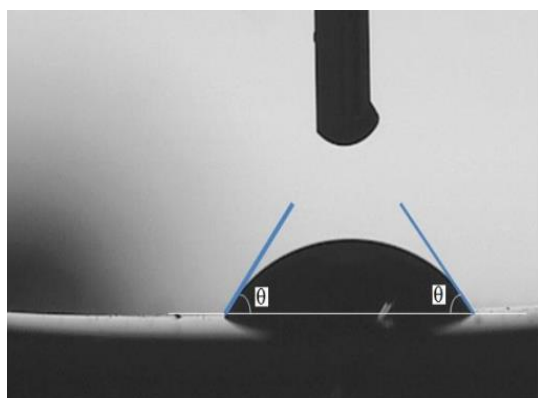
شکل ۷. دستگاه آزمایش قطره چسبنده

هر ماده بر اساس نوع نیروهای مولکول‌های سطحی به سه مؤلفه تقسیم می‌شود که عبارتند از: مؤلفه غیرقطبی یا مؤلفه لیفشیتز-ون در والس (LW) یا مؤلفه پراکنده،

تئوری که به تشریح مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد می‌پردازد، تئوری اسیدی-بازی است (ون اوس و همکاران، ۱۹۸۸) که بر طبق آن، انرژی آزاد سطحی کل

زاویه تماس مورد نظر ثبت می‌گردد.

- پیشنهاد شده است که مایعات آزمایش دارای درجه خلوص بالای ۹۹ درصد باشند و از بین مواد زیر انتخاب شوند: آب، اتیلن گلیکول، متیلن یدید، گلیسرول، فرامید و دی یدیدمتان. در این پژوهش از سه مایع آب، اتیلن گلیکول و دی یدیدمتان استفاده شده است. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی این مواد در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۸. عکس گرفته شده از قطره شکل گرفته مایع آزمایش روی سطح نمونه

جدول ۳. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مایعات آزمایش
روش قطره چسبیده (ergs/cm²)

مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی					مایع آزمایش
کل، Γ_t	غیرقطبی Γ_{LW}	قطبی، Γ_{AB}	بازی، Γ_B	اسیدی، Γ_A	
72.8	21.8	51	25.5	25.5	آب
48.2 9	29	19.2 9	31	3	اتیلن گلیکول
50.8	50.8	0	0	0	دی یدید متان

۷.۲. ارزیابی مقاومت شکست

در این پژوهش، به منظور ارزیابی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده، از پارامترهای مختلف مکانیک شکست شامل حداکثر بار، انرژی شکست و

مؤلفه اسید لوئیس، مؤلفه باز لوئیس، که انرژی آزاد سطحی کل با ترکیب مؤلفه‌های نام برده شده به دست می‌آید:

$$\Gamma = \Gamma^{LW} + \Gamma^{\pm} = \Gamma^{LW} + \frac{2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-}}{\quad} \quad (۱)$$

که در آن: Γ = انرژی آزاد سطحی کل ماده، Γ^{LW} = مؤلفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی، $\Gamma^{\pm}$ = مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی، Γ^+ = مؤلفه اسیدی و Γ^- = مؤلفه بازی می‌باشد.

از دیدگاه ترمودینامیک، انرژی آزاد پیوستگی (ΔG^c) به مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک ترک با سطح واحد در داخل ماده گفته می‌شود. کار پیوستگی یک مایع، به مقدار کار مورد نیاز برای جداسازی یک ستون مایع با سطح مقطع واحد در شرایط خلأ به دو قسمت تعریف می‌شود. این تعریف شامل مواد جامد نیز می‌باشد. با توجه به تعریف انرژی آزاد سطحی، کار پیوستگی برای مواد گوناگون به شرح زیر می‌باشد:

$$W^c = 2\Gamma^a \quad (۲)$$

که در آن Γ^a برابر با انرژی آزاد سطحی کل ماده مورد نظر است.

مراحل انجام این بخش از آزمایش‌ها به شرح زیر است:
- نمونه قیر مابین منبع نور و دوربین قرار داده می‌شود (شکل ۸). محفظه سیستم کنترل، شرایط محیطی را بر اساس دمای مورد نظر تنظیم کرده تا به آن دما برسد.
- میکروسرنگ با مایع آزمایش پر می‌شود و نوک آن ۵ میلی‌متر بالای سطح نمونه قرار داده می‌شود. یک قطره از مایع آزمایش را رها کرده تا روی سطح قیر پخش شود. باید توجه شود که حجم مایع آزمایش رها شده روی سطح قیر زیاد نباشد. پس از گذشت چند ثانیه، قطره شکل ثابتی پیدا می‌کند. در این لحظه با استفاده از دوربین یک عکس از قطره روی سطح گرفته می‌شود.
- برای هر مایع آزمایش حداقل سه نمونه باید آزمایش شده و سه زاویه ثبت شود که میانگین آن‌ها به عنوان

۳. نتایج و بحث

۱.۳. نتایج روش انرژی آزاد سطحی

در این بخش، نتایج مربوط به آزمایش قطره چسبنده برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین، در مورد تأثیر تغییرات PH محیط بر مؤلفه‌های اسیدی، بازی، قطبی، غیرقطبی و انرژی آزاد سطحی کل بحث شده است. مطابق نتایج و داده‌های جدول ۴، اسیدی‌شدن قیر باعث شده تا مقدار زاویه تماس آب روی قیر افزایش یابد که این مطلب می‌تواند نشان‌دهنده کاهش قابلیت پوشش‌پذیری باشد. هر چه میزان اسیدی بودن محیط بیشتر باشد، میزان افزایش زاویه تماس بیشتر خواهد بود که این می‌تواند نشان‌دهنده کاهش قابلیت پوشش‌پذیری قیر است. در مطالعه حاضر، افزایش اسیدپتیه محیط (pH=4) زاویه تماس آب را به طور قابل توجهی افزایش داد، که با نتایج اسدی و همکاران (۲۰۲۵) هم‌راستا است. آنها گزارش کردند که اسیدی شدن رواناب باعث کاهش انرژی آزاد سطحی کل و در نتیجه کاهش چسبندگی قیر-سنگدانه می‌شود.

اتیلن‌گلیکول رفتاری تقریباً غیرقطبی تا نیمه قطبی ضعیف دارد که موجب می‌شود پوشش‌پذیری آن روی قیر بهتر از پوشش‌پذیری آب روی قیر باشد. در نتیجه، زوایای تماس شگل‌گرفته‌ی کوچکتری نسبت به آب ایجاد می‌شود. همان‌طور که از داده‌های زوایای تماس قیرهای ارائه شده در جدول ۵ مشخص است، مقدار زاویه تماس اتیلن‌گلیکول روی سطوح قیری مختلف از زوایای تماس متناظر روی همان قیر اما با مایع آزمایش آب کوچکتر هستند. در واقع قطبیت کم قیر اجازه می‌دهد که یک مایع تقریباً غیرقطبی مانند اتیلن‌گلیکول روی سطح قیر به شکل راحت‌تری پخش شود و زاویه تماس این مایع آزمایش در مقایسه با آب، که یک ماده قطبی

شاخص مقاومت در برابر ترک‌خوردگی^۱ استفاده شده که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

۱.۷.۲. حداکثر بار

این بار به صورت حداکثر نیرویی که مخلوط‌های آسفالتی قبل از ترک‌خوردگی می‌توانند تحمل کنند تعریف می‌شود که با رسیدن بار به مقدار حداکثر خود، نمونه شروع به ترک‌خوردگی از نقطه تجمع تنش می‌کند.

۲.۷.۲. انرژی شکست

انرژی شکست نمونه‌های آسفالت بر طبق استاندارد AASHTO TP 105-13 تعریف می‌شود، که بر اساس این تعریف، انرژی شکست نمونه‌های SCB به کار ناشی از شکست (سطح زیرنمودار نیرو- تغییر مکان تا لحظه گسیختگی) تقسیم بر مساحت ناحیه ترک نخورده قبل از اعمال بارگذاری است که بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} = \frac{\int (P) du}{A} \quad (3)$$

که در فرمول بالا G_f انرژی شکست بر حسب ژول بر متر مربع، W_f کار ناشی از شکست بر حسب ژول و A_{lig} مساحت مقطع شکست بر حسب متر مربع می‌باشد.

۳.۷.۲. شاخص مقاومت در برابر ترک‌خوردگی

هفر (۲۰۰۴) در تحقیقات خود شاخص انعطاف‌پذیری را توسعه داده و شاخص جدیدی با عنوان شاخص مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی در دمای متوسط استفاده کرد.

$$CRI = \frac{G_f}{P_{max}} \quad (4)$$

در رابطه بالا G_f برابر با مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوط آسفالتی بر حسب ژول بر متر مربع و P_{max} حداکثر نیروی وارده بر نمونه بر حسب کیلونیوتن است.

استفاده در این پژوهش، دی یدید متان است. این ماده رفتاری غیرقطبی دارد که باعث می‌شود پوشش‌پذیری آن روی قیر نسبت به آب ساده‌تر باشد و زوایای تماس شکل‌گرفته کوچکتری مشاهده شود. مانند دو مایع آزمایش قبلی، اسیدی شدن محیط قیر، باعث افزایش زاویه تماس قیر و مایع آزمایش شده است. این رفتار با تئوری ترمودینامیک و یافته‌های کادورین و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد، که نشان دادند قیر به دلیل ماهیت غیرقطبی خود، تعامل بهتری با مایعات غیرقطبی دارد. اسیدی شدن محیط، زاویه تماس دی‌یدید متان را افزایش داد.

است، کوچکتر باشد. همانند داده‌های ارائه‌شده در قسمت قبل در مورد مایع آزمایش آب، اسیدی شدن قیر باعث افزایش زاویه تماس بین مایع اتیلن‌گلیکول و قیر شده است. هرچه درجه اسیدی محیط کاهش می‌یابد، مقدار زاویه بین مایع اتیلن‌گلیکول و قیر، با نرخ کمتری کاهش خواهد یافت. این نتایج با مطالعه میرعبدالعظیمی و همکاران (۲۰۲۱) سازگار است، که نشان داد مایعات با قطبیت کمتر، مانند اتیلن‌گلیکول، زوایای تماس کوچک‌تری با قیر ایجاد می‌کنند و قابلیت ترشوندگی بهتری دارند. اسیدی شدن محیط باعث افزایش زاویه تماس اتیلن‌گلیکول شد. سومین مایع آزمایش مورد

جدول ۴. زاویه تماس بین مایعات مورد آزمایش و قیرهای مورد استفاده

مایع آزمایش	نوع قیر	تکرار اول	تکرار دوم	تکرار سوم	میانگین (درجه)	انحراف معیار (درجه)
آب	قیر خالص	103.26	102.58	102.83	102.89	0.34
	خالص - PH1	105.67	106.51	106.28	106.15	0.43
	خالص - PH2	106.11	105.15	105.94	105.73	0.51
	خالص - PH3	101.2	101.33	100.89	101.14	0.23
اتیلن‌گلیکول	قیر خالص	76.61	78.13	77.67	77.47	0.78
	خالص - PH1	82.23	81.93	81.72	81.96	0.26
	خالص - PH2	81.21	82.23	81.93	81.79	0.52
	خالص - PH3	75.67	76.25	76.41	76.11	0.39
دی یدید متان	قیر خالص	90.84	91.28	91.66	91.26	0.41
	خالص - PH1	94.68	95.31	94.16	94.72	0.58
	خالص - PH2	94.12	93.87	94.34	94.11	0.24
	خالص - PH3	89.57	89.24	89.55	89.45	0.19

بر اساس زوایای تماس اندازه‌گیری شده توسط آزمایش قطره چسبیده و معادلات مربوطه، مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر به صورت زیر محاسبه شده‌اند. نتایج اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای خالص و شرایط محیطی با PH مختلف در جدول ۵ آمده است.

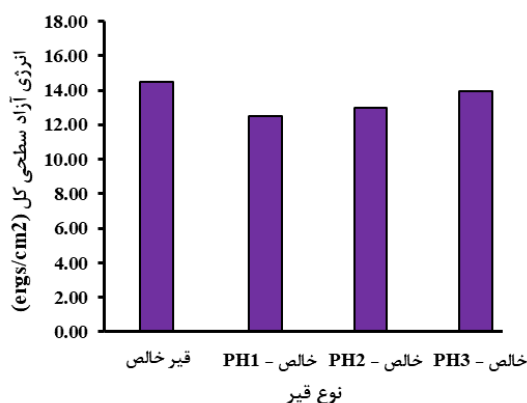
جدول ۵. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده (ergs/cm^2)

مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر					نمونه قیر
کل، Γ_t	غیر قطبی، Γ_{LW}	قطبی، Γ_{AB}	بازی، Γ_B	اسیدی، Γ_A	
14.46	12.14	2.32	0.47	2.86	قیر خالص
12.52	10.69	1.83	0.33	2.55	خالص - PH1
13.01	10.95	2.06	0.40	2.64	خالص - PH2
13.94	11.54	2.40	0.53	2.71	خالص - PH3

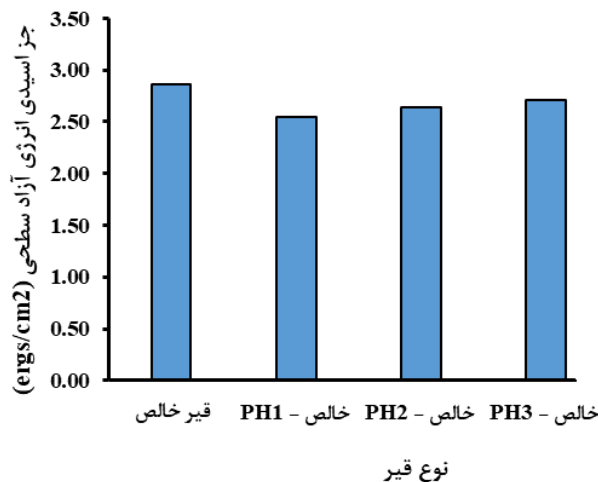
باعث کاهش چسبندگی و افزایش احتمال گسیختگی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، کاهش انرژی آزاد سطحی کل می‌تواند موجب کاهش پوشش‌پذیری سطح سنگدانه‌ها توسط قیر و در نتیجه کاهش مقاومت چسبندگی قیر و سنگدانه شود.

با توجه به پژوهش‌های پیشین، قیر خاصیت اسیدی بیشتری دارد و درصد جرمی اسیدهای قوی موجود در قیر بین ۹/۵۵ - ۳/۹ درصد است؛ در حالی که درصد جرمی بازهای قوی آن ۲/۳ - ۵/۲ درصد است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ مؤلفه‌ی اسیدی انرژی آزاد سطحی قیر بعد از اسیدی‌شدن محیط، کاهش یافته است.

گسیختگی ناشی از ترک در غشای قیر یکی از عوامل اصلی عریان‌شدگی می‌باشد که مهم‌ترین عامل مقاوم در برابر این نوع گسیختگی انرژی آزاد سطحی کل است که این پارامتر طبق رابطه $\Delta G = -2\Gamma_t$ با انرژی پیوستگی رابطه‌ی مستقیمی دارد. نتایج این پژوهش در مورد نتایج کل، Γ_t نشان می‌دهد که اسیدی‌شدن قیر به طور قابل ملاحظه‌ای انرژی آزاد سطحی کل و در نتیجه انرژی پیوستگی را کاهش می‌دهد که این مطلب بیانگر آن است که برای گسیختگی از نوع پیوستگی، انرژی کمتری لازم بوده و احتمال رخداد خرابی رطوبتی بیشتر می‌شود (شکل ۹). این کاهش با یافته‌های آذرهوش و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد، که نشان دادند اسیدپتیه رواناب



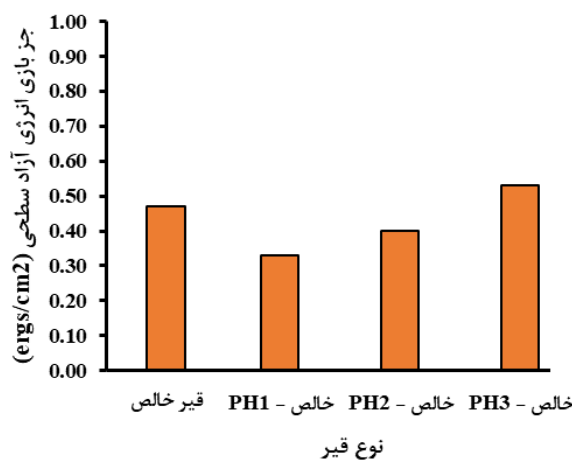
شکل ۹. نمودار انرژی آزاد سطحی کل نمونه قیرهای آزمایش شده (ergs/cm^2)



شکل ۱۰. نمودار مؤلفه اسیدی انرژی آزاد سطحی قیر (ergs/cm²)

PH1) مؤلفه‌های مذکور افزایش یافته‌اند. در مطالعه عمرانیان و همکاران (۲۰۲۲) نیز به بهبود عملکرد رئولوژیک قیر در حضور آلاینده‌ها اشاره شده است.

از طرفی، با توجه به شکل ۱۱، مؤلفه‌ی بازی انرژی آزاد سطحی قیر بعد از اسیدی شدن محیط کاهش می‌یابد. بازی شدن محیط قیر (یعنی در PH3) در نمونه‌های مورد آزمایش باعث افزایش دو مؤلفه بازی و اسیدی قیر می‌شود. اما در حالتی که محیط اسیدی می‌شود (یعنی در



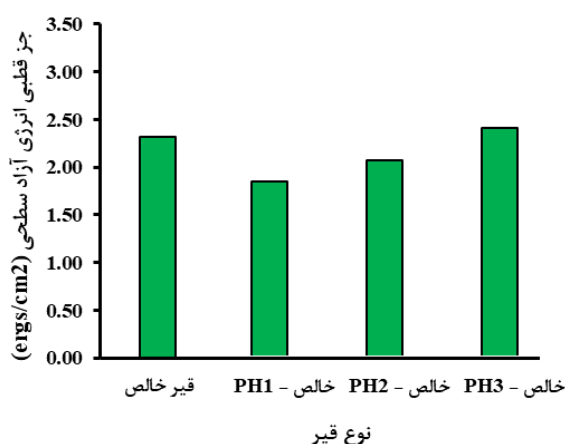
شکل ۱۱. نمودار مؤلفه بازی انرژی آزاد سطحی قیر (ergs/cm²)

داده است. به عبارتی، کاهش میزان مؤلفه بازی در شرایط قلیایی از شدت کمتری برخوردار بوده است. نتیجه کلی این دو مؤلفه در شرایط محیطی مختلف نشان می‌دهد که تداوم پیوند و پیوستگی بین ملکول‌های قیر و قیر-سنگدانه را می‌توان از طریق مؤلفه‌ی غیرقطبی جبران نمود تا مؤلفه اسیدی آن. بخش اصلی و مقاوم در برابر

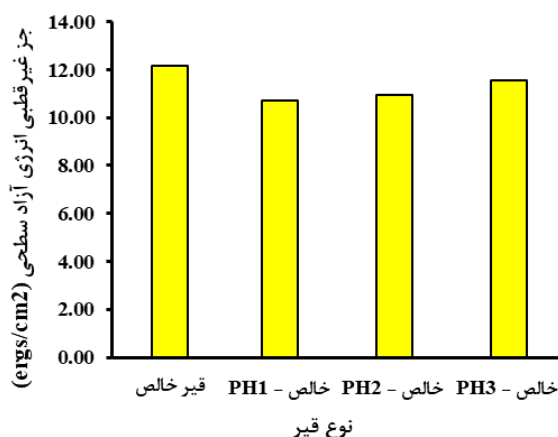
با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳، اسیدی شدن محیط موجب شده تا مؤلفه قطبی و غیرقطبی انرژی آزاد سطحی کاهش یافته اما مقدار این کاهش در مؤلفه قطبی بسیار بیشتر از مؤلفه غیرقطبی است. بازی شدن محیط قیر نیز موجب شده که هر دو مؤلفه‌ی قطبی و غیرقطبی کاهش یابند، اما نه به شدت آن چیزی که در شرایط اسیدی رخ

زیادی از انرژی آزاد سطحی کل قیر را بخش غیرقطبی آن تشکیل می‌دهد.

گسیختگی پیوستگی قیر، مؤلفه غیرقطبی آن است که با توجه به جدول ۶ می‌توان به این نتیجه رسید که قسمت



شکل ۱۲. نمودار مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی (egrs/cm2)



شکل ۱۳. نمودار مؤلفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی (egrs/cm2)

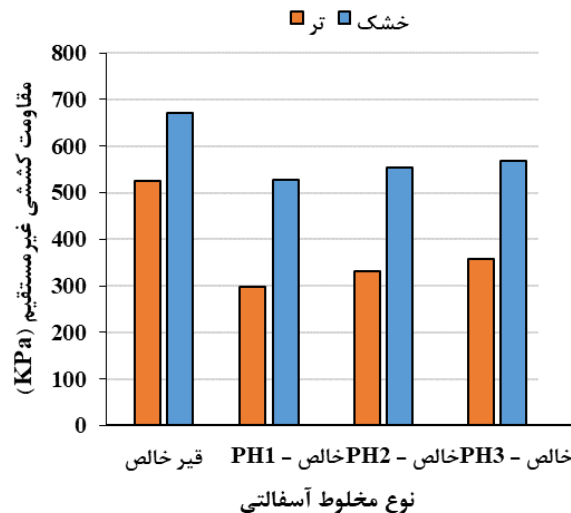
۲.۳. نتایج حساسیت رطوبتی

در این بخش، نتایج مربوط به آزمایش حساسیت رطوبتی برای ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین، در مورد تأثیر تغییرات PH محیط بر پتانسیل مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی بحث شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، این آزمایش طبق استاندارد AASHTO T283 انجام گردیده است. نتایج حاصل از مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب در شکل ۱۴ ارائه شده است. با توجه به این شکل، همان‌طور که انتظار می‌رود، اعمال سیکل ذوب و یخبندان

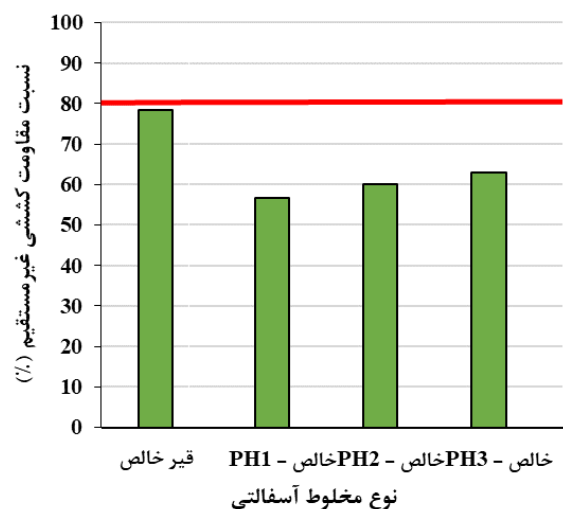
موجب کاهش مقاومت کشش غیرمستقیم در نمونه‌های آسفالتی نسبت به حالت خشک آن می‌شود که با نتایج محمد و عابد (۲۰۲۴) همخوانی دارد. اسیدی شدن محیط باعث کاهش قابل توجه TSR شد، که با یافته‌های آذرهوش و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت دارد. آنها نشان دادند که رواناب‌های اسیدی مقاومت چسبندگی را کاهش می‌دهند. طبق نتایج این شکل، اسیدی شدن محیط، منجر به کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم در تمامی نمونه‌های تر و خشک می‌شود. تغییر شرایط محیطی از اسیدی به خنثی و از خنثی به بازی، باعث شده تا این

TSR آن باید از ۸۰ درصد بیشتر باشد. با توجه به شکل ۱۵، نمونه حاوی قیر خالص، با توجه به کاربرد مصالح آهکی توانسته تا حدود قابل قبولی به حد ۸۰٪ خود را برساند. اسیدی شدن محیط موجب شده تا نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم برای تمامی نمونه‌ها، با کاهش قابل توجهی رو به رو شود. اسیدی شدن محیط در مقایسه با محیط خنثی و بازی، اثرات به مراتب شدیدتری در افت عملکرد مخلوط آسفالتی داشته است. این درحالیست که بازی شدن محیط موجب بهبود در عملکرد مخلوط آسفالتی در مقایسه با حالت خنثی و اسیدی شده است.

مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش یابند. برای تحلیل نتایج حساسیت رطوبتی، تنها به مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم تر و خشک نمی‌توان بسنده کرد و بایستی نسبت این مقادیر در نتایج TSR را ملاحظه کرد. این نتایج برای انواع مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۱۵ ارائه شده است. در شرایط قلیایی، TSR نمونه‌های اصلاح شده به طور قابل توجهی بالاتر بود، که با یافته‌های اسدی و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد. حد رواداری ۸۰٪ طبق استاندارد AASTO-T283 جهت ارزیابی بهتر عملکرد انواع مخلوط‌های آسفالتی به تصویر کشیده شده است. برای استفاده مخلوط در روسازی آسفالتی، پارامتر



شکل ۱۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در دو حالت تر و خشک

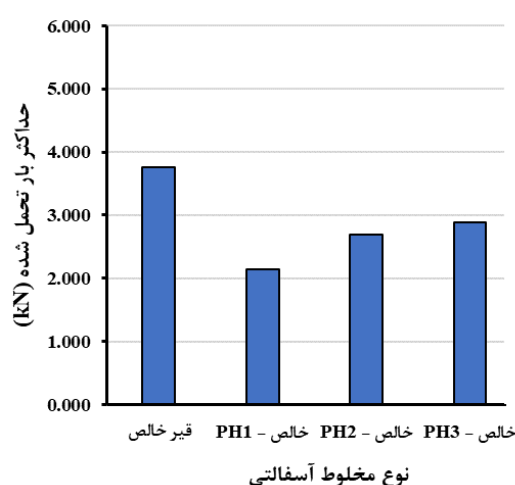


شکل ۱۵. نتایج TSR برای انواع مخلوط‌های آسفالتی در شرایط مختلف محیطی

۳.۳. نتایج پتانسیل ترک خوردگی دمای کم

در این بخش، نتایج مربوط به آزمایش خمشی نیم دایره خمشی (SCB) در دمای کم ارائه می گردد. بر اساس روابط حاکم بر تئوری مکانیک شکست، عملکرد مخلوط های آسفالتی از منظر چند شاخص شامل حداکثر بار، انرژی شکست و شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۱.۳.۳. شاخص حداکثر بار



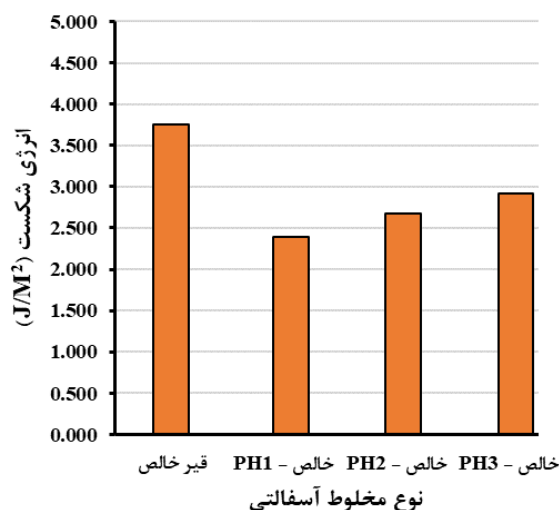
شکل ۱۶. نتایج حداکثر بار تحمل شده برای انواع مخلوط های آسفالتی در شرایط مختلف

۳.۳.۳. شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی

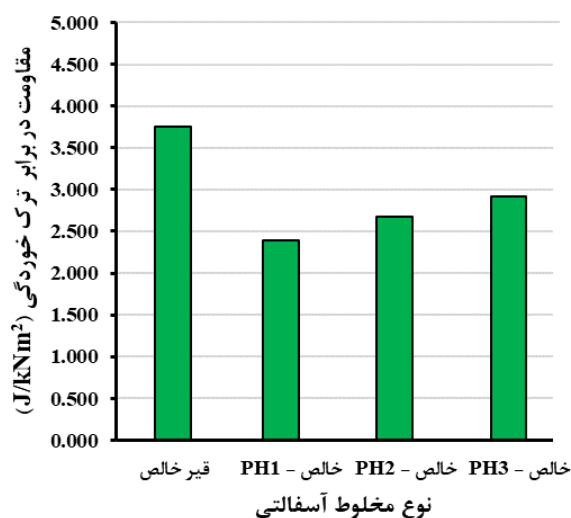
نتایج مربوط به شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی برای انواع مخلوط های این پژوهش در شکل ۱۸ ارائه شده است. اسیدی شدن محیط نشان می دهد که مقاومت آسفالت در برابر ترک خوردگی با افت چشم گیری مواجه می شود. در حالی که بازی شدن محیط در عملکرد ترک خوردگی مخلوط آسفالتی تأثیر مثبتی گذاشته، اما مقاومت به اندازه آنچه در حالت غیر رواناب حاصل شده است، نمی رسد. این یافته با نتایج عیار و همکاران (۲۰۲۴) هم راستا است. در شرایط قلیایی، مقاومت بهبود یافت، اما به سطح حالت خشک نرسید، که با یافته های مهدی نظر و همکاران (۲۰۲۴) سازگار می باشد.

۲.۳.۳. شاخص انرژی شکست

نتایج مربوط به انرژی شکست مخلوط های مختلف در این پژوهش در شکل ۱۷ نشان داده شده است. نتایج شاخص انرژی شکست که دربرگیرنده کل فرآیند تحمل بار توسط نمونه است، روندی مشابه آنچه برای شاخص قبلی، یعنی حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه، را نشان می دهد. نرخ بهبودی که در نتایج این شاخص مشاهده می شود به اندازه شاخص قبلی نیست. در شاخص قبلی، پرش هایی که رخ داده، بسیار چشم گیرتر بوده است. نرخ بهبود انرژی شکست در نمونه ها در شاخص حداکثر بار کمتر بود، که ممکن است به محدودیت های ساختاری قیر در دماهای کم مربوط باشد، همان طور که در مطالعه مهدی نظر و همکاران (۲۰۲۴) نیز اشاره شده است.



شکل ۱۷. نتایج انرژی شکست برای انواع مخلوط‌های آسفالتی در شرایط مختلف



شکل ۱۸. نتایج مقاومت در برابر ترک خوردگی برای انواع مخلوط‌های آسفالتی

۴.۳. نتایج خستگی

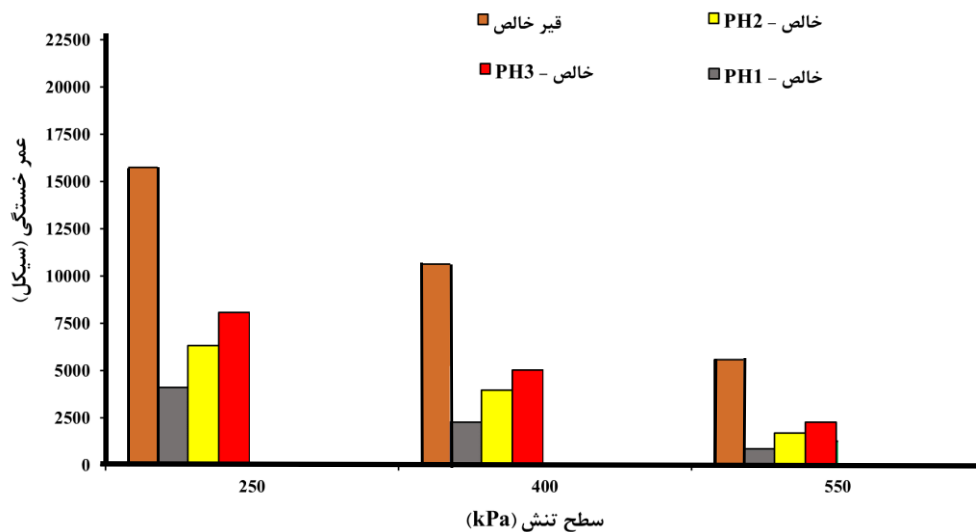
در این بخش، نتایج مربوط به آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم، برای اندازه‌گیری عمر مفید مخلوط-های آسفالتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. سه سطح تنش ۲۵۰، ۴۰۰ و ۵۵۰ کیلوپاسکال جهت انجام این آزمایش به کار گرفته شد. نتایج شکل ۱۹، مقادیر عمر خستگی برحسب سیکل را برای شرایط مختلف محیطی

نمونه‌های آسفالتی نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش سطح تنش در این آزمایش موجب کاهش عمر خستگی برای تمامی انواع مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و این صحتی برای نتایج حاصله می‌باشد که با اصول مکانیک شکست و یافته‌های آذرهوش و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد. با توجه به این نتایج، به طور میانگین، بهبود ۴۵ درصدی در نتایج عمر خستگی مخلوط آسفالتی در حالت خشک (غیراسیدی و غیربازی) حاصل شده است. قرار دادن نمونه‌ها در شرایط محیطی

با PH معمولی آب، موجب کاهش عمر خستگی نمونه‌ی خالص گردیده است. با تغییر PH و کاهش آن برای ایجاد محیط اسیدی، این تخریب عملکرد بسیار چشمگیر شده و موجب افت شدید عمر خستگی برای مخلوط‌های آسفالتی شده است. این درحالیست که افزایش PH برای ایجاد شرایط بازی باعث شده تا این روند کاهش معکوس شود و عملکرد خستگی بهتری در مقایسه با شرایط PH خنثی و PH اسیدی به دست آید. بنابراین، اعمال شرایط محیطی اسیدی، خنثی و بازی می‌تواند در عملکرد تمامی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر معکوس بگذارند اما روند هر کدام و اثر هر یک از آن‌ها متفاوت خواهد بود. نتایج اسدی و همکاران (۲۰۲۵) هم‌راستای تحقیق حاضر است. در شرایط قلیایی، عملکرد خستگی بهبود یافت، اما همچنان کمتر از حالت خشک بود، که با یافته‌های عمر و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. آنها گزارش کردند که شرایط محیطی غیرخنثی می‌تواند عمر خستگی را کاهش دهند.

این پژوهش اگرچه نتایج ارزشمندی در باره تأثیر شرایط شیمیایی رواناب بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ارائه داد، اما دارای چند محدودیت اساسی است. نخست آنکه تنها یک نوع قیر و سنگدانه مورد بررسی قرار گرفت و بنابراین تعمیم نتایج به سایر گریدهای قیر، مصالح و شرایط معدنی نیازمند احتیاط است. علاوه بر این، شرایط آزمایشگاهی تنها سه سطح PH (اسیدی، خنثی و قلیایی) را شبیه‌سازی کرد. در حالی که ترکیب شیمیایی واقعی رواناب‌های شهری و صنعتی می‌تواند بسیار پیچیده‌تر بوده و شامل یون‌های مختلفی همچون سولفات و نیترات باشد. از سوی دیگر، تیمار نمونه‌ها در بازه زمانی کوتاه و تحت شرایط کنترل‌شده انجام شد و اثرات هم‌زمان فرایندهای میدانی نظیر چرخه‌های تر، خشک، یخ‌زدگی،

ذوب و تابش فرابنفش در نظر گرفته نشد. همچنین، روش تحلیل انرژی آزاد سطحی مبتنی بر تعداد محدودی مایع مرجع بود و این موضوع نتایج را به انتخاب مایعات و دقت اندازه‌گیری زاویه تماس حساس می‌سازد. در نهایت، تمرکز مطالعه بیشتر بر هم‌بستگی بین پارامترهای ترمودینامیک و آزمون‌های مکانیکی بود و ارزیابی رئولوژیک دقیق قیر یا بررسی‌های میکروسکوپی برای توضیح ریزسازوکارها صورت نگرفت. با توجه به این محدودیت‌ها، مسیرهای متعددی برای پژوهش‌های آتی قابل ترسیم است. بررسی اثر گریدهای مختلف قیر و قیرهای اصلاح‌شده، به‌ویژه با افزودنی‌های معدنی فعال، می‌تواند دید واضح‌تری از نقش مصالح در کاهش حساسیت به رواناب‌های اسیدی فراهم آورد. شبیه‌سازی محیط‌های شیمیایی واقعی‌تر با در نظر گرفتن ترکیب یونی، سختی آب و هدایت الکتریکی نیز گامی مهم برای نزدیک‌سازی شرایط آزمایشگاهی به واقعیت است. افزون بر این، انجام آزمایش‌های بلندمدت تحت ترکیب چندین عامل محیطی مانند PH، اکسیداسیون، تابش فرابنفش و چرخه‌های یخ‌زدگی می‌تواند تصویر جامع‌تری از رفتار روسازی در شرایط طبیعی ارائه دهد. استفاده از روش‌های پیشرفته شناسایی مانند AFM، SEM یا FTIR برای تحلیل ریزساختار و تغییرات شیمی سطح قیر و سنگدانه نیز درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های جدایش و کاهش چسبندگی به دست خواهد داد. در نهایت، توسعه مدل‌های پیش‌بین که بتوانند پارامترهای ترمودینامیک را به شاخص‌های مکانیکی و دوام درازمدت متصل کنند، همراه با اعتبارسنجی میدانی در مقاطع آزمایشی، می‌تواند نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی را به طراحی و نگهداری عملی روسازی‌ها پیوند دهد.



شکل ۱۹. نتایج عمر خستگی برای انواع مخلوط‌های آسفالتی در شرایط مختلف محیطی

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که تغییر شیمیایی محیط (pH رواناب ۴، ۷ و ۹) پیوند قیر و سنگدانه و دوام مکانیکی مخلوط آسفالتی گرم را به‌صورت معناداری تحت تأثیر قرار می‌دهد. اسیدی شدن محیط ($pH \approx 4$) زاویه تماس آب روی قیر را از $102/9$ درجه به $106/2$ درجه افزایش داد و در محیط بازی ($pH \approx 9$) این زاویه به $10/1$ درجه کاهش یافت. روند مشابهی برای مایعات مرجع دیگر نیز مشاهده شد که دلالت بر افت ترشوندگی و چسبندگی در حالت اسیدی و بهبود نسبی در حالت بازی دارد. بر همین مبنا، انرژی آزاد سطحی کل قیر از $14/46$ به $12/52$ $ergs/cm^2$ در محیط اسیدی (کاهش $13/4\%$)، به $13/01$ در محیط خنثی (10%) و به $13/94$ در محیط بازی ($3/6\%$) تغییر کرد. کاهش‌ها عمدتاً از مؤلفه‌های قطبی ناشی شد و سهم مؤلفه غیرقطبی (Lifshitz-van der Waals) در پایداری پیوستگی غالب بود؛ بنابراین در معرض اسید، افت مؤلفه‌های قطبی، مکانیسم جدایش در سطح قیر و سنگدانه را تسهیل می‌کند. در سطح مخلوط، نتایج ITS و TSR نشان دادند که اسیدی شدن محیط باعث افت محسوس TSR و مقاومت کششی غیرمستقیم

در نمونه‌های خشک و مرطوب می‌شود؛ در حالی که شرایط قلیایی بخشی از افت را جبران می‌کند. آزمون SCB در دمای کم نیز کاهش «بار حداکثر» و «انرژی شکست» را در شرایط اسیدی تأیید کرد. شدت کاهش بار حداکثر بیش از انرژی شکست بود و با قلیایی شدن، بهبود نسبی، نه کامل، رخ داد. در آزمون خستگی (ITFT)، عمر خستگی حالت خشک به‌طور میانگین حدود ۴۵٪ بیشتر از نمونه‌های تیمار شده گزارش شد. تیمار خنثی موجب کاهش عمر شد و اسیدی شدن این کاهش را تشدید کرد؛ در حالی که قلیایی شدن نسبت به خنثی بهبود ایجاد نمود، ولی همچنان به سطح حالت خشک نرسید. در مجموع، اسیدیته رواناب بدترین سناریو برای چسبندگی و دوام مکانیکی HMA است. محیط قلیایی آثار تخریبی رطوبت را تا حدی خنثی می‌کند، اما جایگزین شرایط خشک نیست. پیوند بین شاخص‌های ترمودینامیک (SFE) و پاسخ‌های مکانیکی (SCB، TSR، ITS و ITFT) نشان می‌دهد که افت پارامترهای قطبی (SFE) می‌تواند به‌عنوان هشدار زودهنگام برای کاهش عملکرد مکانیکی تفسیر شود. در مورد نوآوری این پژوهش می‌توان اظهار داشت که طبق نتایج آزمایش SSD، اسیدی شدن قیر باعث

یاری رسان بوده‌اند، ابراز می‌دارند. همچنین از همکاری و همراهی کلیه همکاران پژوهشی که بازخوردهای سازنده‌ای در راستای بهبود کیفیت این مطالعه ارائه نموده‌اند، تشکر می‌گردد.

۷. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان تأیید میکنند که این مقاله حاصل پژوهش اصیل آنها بوده و قبلاً در هیچ مجله یا کنفرانس دیگری منتشر نشده و همچنین برای بررسی همزمان به مجله دیگری ارسال نشده است.

۸. مشارکت‌های نویسندگان

کلیه نویسندگان در تهیه مقاله همکاری داشته‌اند.

۱۰. تعارض منافع

نویسندگان تأیید میکنند که هیچ‌گونه تعارض منافع مرتبط با انتشار این مقاله ندارند.

افزایش زاویه تماس آب روی قیر شده و در نتیجه موجب کاهش قابلیت پوشش‌پذیری آن شده است.

نتایج انرژی آزاد سطحی کل (Γ_T) نشان داد که اسیدی شدن قیر به طور قابل ملاحظه‌ای انرژی آزاد سطحی کل و در نتیجه انرژی پیوستگی را کاهش می‌دهد که این مطلب بیانگر آن است که برای گسیختگی از نوع پیوستگی، انرژی کمتری لازم بوده و احتمال رخداد خرابی رطوبتی بیشتر می‌شود. محیط قلیایی، روند معکوسی نسبت به حالت اسیدی داشته و توانسته انرژی آزاد سطحی (چه انرژی کل، چه مؤلفه‌ی اسیدی، چه مؤلفه‌ی بازی، چه قطبی و چه غیرقطبی) بیشتری نسبت به محیط با PH خشی ایجاد کند. اما اسیدی شدن محیط، نتایج کمتری در مقایسه با محیط خشی ارائه کرده است.

۶. تقدیر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از تمامی پژوهشگران و متخصصانی که در پیشبرد این پژوهش

۱۱. مراجع

- Agha, N., Hussain, A., Ali, A. S., & Qiu, Y. (2023). "Performance evaluation of hot mix asphalt (HMA) containing polyethylene terephthalate (PET) using wet and dry mixing techniques". Polym. (Basel), 15: 1211. <https://doi.org/10.3390/polym15051211>
- Albayati, N., & Ismael, M. Q. (2025). "Moisture damage in asphalt mixtures: A review of the causes, testing, and mitigating methods". Adv. Civ. Archit. Eng., 16: 144–164. <https://doi.org/10.13167/2025.30.9>
- Asadi, A. H., Hamed, G. H., & Azarhoosh, A. (2025). "Evaluating the effects of nanomaterials on thermal cracking of HMA in the presence of moisture with different degrees of acidity". J. Mater. Civ. Eng., 37. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-19310>
- Ayar, P., Ruhi, A., Baibordy, A., et al. (2024). "Toward sustainable roads: A critical review on nano-TiO₂ application in asphalt pavement". Innov. Infrastruct. Solut., 9: 148. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01450-4>
- Azarhoosh, A., Moghaddas Nejad, F., & Khodaii, A. (2018). "Evaluation of the effect of nano-TiO₂ on the adhesion between aggregate and asphalt binder in hot mix asphalt". Eur. J. Environ. Civ. Eng., 22: 946–961. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1229227>
- Azarhoosh, A., Hamed, G. H., & Amiransari, M. (2024). "The effect of runoff acidity on fatigue cracking of hot mix asphalt using thermodynamic concepts". Case Stud. Constr. Mater., 20: e03392. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03392>
- Cadorin, N. D., de Melo, J. V. S., Broering, W. B., et al. (2021). "Asphalt nanocomposite with titanium dioxide: Mechanical, rheological and photoactivity performance". Constr. Build. Mater., 289: 123178.
- Diniz, M. I. L., de Figueiredo Lucena, de Medeiros Melo Neto, O., et al. (2025). "Titanium dioxide as a modifier in asphalt mixtures: Mechanical behavior under aging conditions". Constr. Build. Mater., 461: 139816.
- Enieb, M., Cengizhan, A., Karahancer, S., & Eltwati, A. (2023). "Evaluation of physical-rheological properties of nano titanium dioxide modified asphalt binder and rutting resistance of modified mixture". Int. J. Pavement Res. Technol., 16: 285–303.
- Hu, C., Zhou, Z., Luo, Y., & Yan, X. (2023). "Effect of acid rain on mechanical properties and aging mechanism of asphalt". J. Mater. Civ. Eng., 35: 14741. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-14741>

- Hefer, A. W. (2004). "Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond". Texas A&M University, Texas.
- Ji, T., Hao, P., She, H., et al. (2023). "Durability behavior of asphalt mixtures in regard to material properties and gradation type". *Front. Mater.*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1151479>
- Jiang, H., Zhu, C., Yao, K., et al. (2025). "Interfacial adhesion mechanism between asphalt and aggregate with different lithology in acid-alkaline aqueous solutions". *Can. J. Civ. Eng.* <https://doi.org/10.1139/cjce-2024-0612>
- Lima Jr., O., Afonso, C., Rocha Segundo, I., et al. (2022). "Asphalt binder "Skincare"? aging evaluation of an asphalt binder modified by nano-TiO₂". *Nanomater.*, 12: 1678. <https://doi.org/10.3390/nano12101678>
- Mehdiazar, M., Kordani, A. A. and Arabani, M. (2024). "Effects of changes in runoff characteristics on asphalt mixtures' performance against low-temperature cracking". *Results Eng.*, 24: 103246.
- Meng, Y., Lai, J., Mo, S., et al. (2023). "Investigating the deterioration mechanism of adhesion between asphalt and aggregate interface under acid rain erosion". *Appl. Surf. Sci.*, 39: 158171. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158171>
- Meng, Y., Tan, S., Mo, S., et al. (2024). "Study on the effect of acid rain erosion on the adhesion properties of asphalt-aggregate interface". *Int. J. Pavement Eng.*, 25: 2408623.
- Meng, Y., Yao, Q., Mo, S., et al. (2025). "The influence of acid rain on asphalt and its mixture performance, simulation and micro-mechanism exploration". *Fuel*, 379: 133010. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133010>
- Mirabdolazimi, S. M., Kargari, A. H. and Pakenari, M. M. (2021). "New achievement in moisture sensitivity of nano-silica modified asphalt mixture with a combined effect of bitumen type and traffic condition". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 14: 105-115.
- Mohammed, A. M. and Abed, A. H. (2024). "Effect of nano-TiO₂ on physical and rheological properties of asphalt cement". *Open Eng.*, 14: 20220520.
- Mousavi Rad, S., Kamboozia, N., Ameri, M. and Mirabdolazimi, S. M. (2023). "Feasibility of concurrent improvement of pollutants-absorption ability from surface runoff and mechanical performance of asphalt mixtures by using photocatalytic nanomodified porous asphalt". *J. Mater. Civ. Eng.*, 35: 4023248.
- Omar, H. A., Yusoff, N. I. M., Mubarak, M., & Ceylan, H. (2020). "Effects of moisture damage on asphalt mixtures". *J. Traffic Transport. Eng. (English Ed.)*, 7: 600–628.
- Omranian, S. R., Geluykens, M., Van Hal, M., et al. (2022). "Assessing the potential of application of titanium dioxide for photocatalytic degradation of deposited soot on asphalt pavement surfaces". *Constr. Build. Mater.*, 350: 128859.
- Qian, G., Yu, H., Jin, D., et al. (2021). "Different water environment coupled with ultraviolet radiation on ageing of asphalt binder". *Road Mater. Pavement Design*, 22: 2410–2423.
- Sapkota, K., Yaghoubi, E., Wasantha, P. L. P., et al. (2023). "Mechanical characteristics and durability of HMA made of recycled aggregates". *Sustain.*, 15: 5594. <https://doi.org/10.3390/su15065594>
- Shafabakhsh, Gh., Mirabdolazimi, S. M., & Sadeghnejad, M. (2014). "Evaluation the effect of nano-TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 5: 566-571.
- Van Oss, C. J., Chaudhury, M. K., & Good, R. J. (1988). "Interfacial lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems". *J. Chem. Rev.*, 88(6): 927-941.
- White, T. D. (1985). "Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures". In: Association of asphalt paving technologists proc.
- Yang, Q., Yin, H., He, X., et al. (2020). "Environmental impacts of reclaimed asphalt pavement on leaching of metals into groundwater". *Transport. Res. Part D, Transport. Environ.*, 85: 102415.
- Yuan, F., Cheng, L., Shao, X., et al. (2020). "Full-field measurement and fracture and fatigue characterizations of asphalt concrete based on the SCB test and stereo-DIC". *Eng. Fract. Mech.*, 235: 107127.
- Zhang, X., Hoff, I., & Saba, R. G. (2021). "Response and deterioration mechanism of bitumen under acid rain erosion". *Mater. (Basel)*, 14: 4911.