

ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر آلودگی های سطح روسازی در مجاورت رواناب بر ترک خوردگی خستگی مخلوط آسفالت داغ

مقاله علمی - پژوهشی

مهدی مهدی نظر، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران

علی عبدی کردانی^{*}، استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران

مهیار عربانی، استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: aliabdi@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۲۵۴-۲۳۳

چکیده

یکی از خرابی های اصلی مخلوط آسفالتی، ترک خوردگی خستگی است که در نتیجه ضعف در خصوصیات قیر و یا چسبندگی قیر-سنگدانه در دمای میانی رخ می دهد. رطوبت از عوامل مهمی است که می تواند باعث تغییر در عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی شود. این موضوع هنگامی که سطح روسازی در معرض گرد و غبار یا دوده های ناشی از خروجی اگزوز خودرو قرار داشته باشد، اهمیت بیش تری دارد. بر این اساس در این پژوهش به بررسی تاثیر رواناب با درجه اسیدیته مختلف بر عملکرد مخلوط آسفالتی در دمای میانی پرداخته شده است. ۱۲ نوع مخلوط آسفالتی با استفاده از دو نوع سنگدانه (سیلیسی و آهکی)، دو نوع قیر (PG 64- و 16 و PG 58-22) و افزودنی جاذب آلودگی آب به نام ژئولیت در ۲ درصد وزنی قیر ساخته شده است که تحت شرایط محیطی با درجه اسیدیته های ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ قرار گرفته اند. آزمایش های مکانیکی رئومتر برش دینامیکی بر روی قیر و خمش نیم دایره بر روی مخلوط آسفالتی انجام شده است. همچنین مؤلفه های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه به ترتیب با روش های صفحه ویلهلمی و دستگاه جذب همگانی اندازه گیری شده اند. نتایج نشان می دهند که اعمال شرایط رطوبتی، مخصوصا شرایط اسیدی، از طریق افزایش انرژی جاذب باعث کاهش چسبندگی قیر-سنگدانه و در نتیجه افزایش احتمال ترک خوردگی خستگی می شود. شرایط محیطی اسیدی و بازی باعث افزایش سختی قیر، زاویه فاز، پارامتر خستگی و در نتیجه افزایش احتمال رخداد ترک خوردگی خستگی می شود. شرایط اسیدی و بازی، انرژی و چقرمگی شکست مخلوط را افزایش می دهند که به تبع آن قابلیت جذب تنش و مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رشد ترک کاهش می یابد. ژئولیت باعث بهبود مؤلفه غیر قطبی قیر می شود که بر روی مقاومت پیوستگی و چسبندگی مخلوط اثر مثبت دارد. براساس نتایج تحلیل آماری استفاده از ۱ و ۲ درصد ژئولیت باعث افزایش معنادار پارامتر خستگی قیر، انرژی شکست و چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی می شود.

واژه های کلیدی: ترک خوردگی خستگی، درجه اسیدیته رواناب، روش انرژی آزاد سطحی، ژئولیت، مخلوط آسفالتی داغ

۱- مقدمه

مخلوط های آسفالتی گرم در دمای میانه و کم است. این خرابی در اثر اعمال تنش های مکرر که پایین تر از حد مقاومت کششی

ترک های خستگی از مهم ترین خرابی های مخلوط آسفالتی هستند. خرابی خستگی، شکل اصلی خرابی ساختاری

لایه‌های روسازی و عملکرد این لایه‌ها در برابر ترک‌خوردگی خستگی بسیار مؤثر باشد.

۱-۱- مطالعات پیشین

در این قسمت ابتدا به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر رطوبت بر عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی خستگی پرداخته شده است و سپس تأثیر تغییر در خصوصیات رواناب بر عملکرد مخلوط آسفالتی پرداخته شده است.

ابراهیم و همکاران (Ibrahim et al., 1998) به ارزیابی تأثیر رطوبت روی ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی مانند مدول برجهندگی، مقاومت کششی، عمر خستگی و تغییر شکل دائم پرداختند. آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه‌های خشک و با درجه اشباع ۵۰ و ۱۰۰ درصد در دمای ۲۵ درجه انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش درجه اشباع، عمر خستگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و نمونه‌های خشک نسبت به نمونه‌هایی با درجه اشباع ۵۰ و ۱۰۰ درصد دارای عمر خستگی بیشتری هستند. کیم و همکاران (Kim et al., 2004) به ارزیابی تأثیر رطوبت روی مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی پرداختند. تأثیر رطوبت بر سطح خرابی خستگی چسباننده‌های قیری و ماستیک به وسیله‌ی ویژگی‌های مواد ویسکوالاستیک بنیادی و اجرای آزمایش خستگی با آنالیز دینامیکی مکانیکی ارزیابی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در صورت اعمال کرنش بالا به نمونه‌های مرطوب، کاهش سختی، افزایش می‌یابد و افزایش رطوبت سبب کاهش عمر خستگی می‌شود. ویوار و هادوک (Vivar & Haddock, 2006) در پژوهش خود مشاهده کرده‌اند که رطوبت می‌تواند ۷۵ درصد از عمر خستگی نمونه‌ها در شرایط مرطوب و تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای را کاهش دهد. همچنین، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد اثر تخریبی آب بر مخلوط آسفالتی با افزایش دما از ۱۰ تا ۶۰ درجه بیشتر می‌شود.

جاسکولا و همکاران (Jaskula & Judycki, 2014) به بیان تأثیر آب و سرما روی عمر خستگی بتن آسفالتی پرداختند. برای شبیه سازی عمل ذوب و انجماد از دو روش استفاده شده است: (۱) روش AASHTO T283 با یک سیکل ذوب و انجماد همراه با پیرشدگی کوتاه مدت شارپ؛ (۲) روش AASHTO T283 اصلاح شده با ۵۰ و ۱۵۰ سیکل. نتایج نشان می‌دهد که آب و سرما باعث کاهش عمر

مخلوط آسفالتی است، عبورهای تکراری خودروها و ضخامت ناکافی روسازی در اثر طراحی نادرست یا کنترل ضعیف کیفیت در حین ساخت به وجود می‌آید (Roberts et al., 1991). مکانیزم اصلی ترک‌خوردگی خستگی ناشی از بار چرخ وسایل نقلیه بر روی روسازی است که باعث می‌شود حالت تنش قسمت‌های بالا و پایین لایه رویه روسازی بسرعت از حالت کشش به فشار و بالعکس تغییر نماید، درواقع لایه آسفالتی تمایل بازگشت به نقطه قبلی را دارد، که تکرار این روند منجر به ترک‌های خستگی می‌گردد (Prowell, 2013). مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر جواب خستگی در آزمایشگاه شامل موارد زیر است:

۱. متغیرهای مخلوط مانند نوع و منبع قیر، دانه‌بندی، نوع و منبع سنگدانه، شاخص فضای خالی و شاخص قیر
۲. متغیرهای محیط زیستی مانند دما، گرادیان حرارتی، رطوبت
۳. مقدار بار، نوع بارگذاری (کنترل تنش یا کنترل کرنش)، فرکانس، زمان استراحت
۴. ساخت نمونه، فرآیند آماده‌سازی و روش تراکم
۵. شرایط آزمایش مانند شکل و ضخامت نمونه، وضعیت بار و
۶. شرایط محیطی (Prowell, 2013).

شرایط محیطی یکی از مهم‌ترین عواملی است که می‌تواند باعث تشدید بر رخداد ترک خوردگی خستگی شود. نفوذ آب و هوا به داخل ترک‌های ریز در روسازی در نتیجه ترک‌خوردگی دمایی سبب تشدید روسازی می‌شود، زیرا رطوبت وارد شده می‌تواند باعث عریان‌شدگی شود و هوای گرم وارد شده به روسازی می‌تواند روند پیرشدگی را تشدید کند (Sowah-Kuma, 2014). اثر رطوبت بر روسازی یک پدیده پیچیده است که شامل فرآیندهای ترمودینامیکی، شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی است که به خرابی روسازی کمک می‌کند. رطوبت تأثیر مستقیمی بر روی خواص شیمیایی قیر و چسبانندگی بین قیر و سنگدانه دارد. مهم‌ترین منبع ورود رطوبت به لایه‌های رویین روسازی، رواناب جاری شده در سطح آن است (Tong et al., 2013). درجه اسیدیته رواناب نفوذی به داخل روسازی با حرکت در سطح آن به حالت‌های اسیدی و بازی تغییر می‌کند. در نتیجه، دو عامل آلودگی‌های سطح روسازی و حرکت رواناب ناشی از بارندگی روی سطح روسازی، می‌تواند در تغییر درجه اسیدیته آب نفوذی به

کاهش داده و حساسیت رطوبتی را افزایش می‌دهد. همچنین، تفاوت‌های بیشتری را می‌توان در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در pH خنثی و مقادیر بالاتر و پایین‌تر pH در طول چرخه‌های انجماد-ذوب بالاتر مشاهده کرد، که می‌تواند در مناطقی با چرخه‌های بارندگی بیشتر بسیار مهم باشد.

۲-۱- ضرورت پژوهش و اهداف

در بررسی خرابی‌هایی مانند ترک‌خوردگی خستگی و خرابی رطوبتی که وابسته به خصوصیات ماستیک و چسبندگی قیر-سنگدانه هستند، رطوبت یکی از مهم‌ترین عواملی است که می‌تواند کیفیت مخلوط آسفالتی در برابر آن خرابی را مورد تأثیر قرار دهد. همانطور که در قسمت مطالعات پیشین مشاهده می‌شود، عمده‌ی پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینه تأثیر رطوبت بر روی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی انجام شده‌اند، نسبت به تأثیر خصوصیات رواناب که وابسته به شرایط آلودگی سطح روسازی می‌باشد، توجه کمی داشته‌اند. بر این اساس، در این پژوهش سعی شده است تا به بررسی تأثیر خصوصیات رواناب بر عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر خرابی خستگی با استفاده از روش‌های مکانیکی و ترمودینامیکی پرداخته شود. مهم‌ترین اهداف این پژوهش عبارتند از:

- بررسی تأثیر تغییر در درجه اسیدیته رواناب بر خصوصیات پیوستگی، چسبندگی و جداشدگی ترکیب‌های مختلف قیر-سنگدانه

- بررسی تأثیر تغییر در درجه اسیدیته رواناب بر خصوصیات رئولوژیکی و پارامتر خستگی قیر در دمای میانی

- بررسی تأثیر تغییر در درجه اسیدیته رواناب بر پتانسیل ترک‌خوردگی خستگی در ترکیب‌های مختلف مخلوط آسفالتی

- بررسی تأثیر ژئولیت بر پارامترهای انرژی آزاد سطحی شامل انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی و انرژی جداشدگی

- بررسی تأثیر ژئولیت بر پارامتر خستگی قیرهای اصلاح شده قبل و پس از اعمال شرایط محیطی مختلف

- بررسی تأثیر ژئولیت نتایج آزمایش‌های مکانیکی خستگی به روش خمش نیم‌دایره در شرایط خشک و محیطی مختلف

- مقایسه بین نتایج پارامترهای ترمودینامیکی مکانیسم‌های گسیختگی در روش انرژی آزاد سطحی با نتایج مکانیکی خستگی مخلوط‌های آسفالتی.

خستگی مخلوط بتن آسفالتی می‌شود. لاموته (Lamothe et al., 2019) تأثیرات درجه اشباع و آب را روی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی گرم بررسی کرده است. براساس نتایج، مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی گرم با اشباع نسبی نسبت به مخلوط آسفالتی گرم با شرایط خشک، کمتر است. چائوهان و همکاران (Chauhan & Narayan, 2019) تغییرات عملکرد خستگی بعد از تحت شرایط قراردادن مخلوط آسفالتی را بررسی نمودند. این مطالعه بیان می‌کند که رطوبت عمر خستگی را به دلیل شکست زود هنگام ناشی از ضعف پیوستگی در قیر و چسبندگی آن با سنگدانه کاهش می‌دهد.

یون و تارر (Yoon & Tarrer, 1988) نشان دادند که اگر پودرهای مختلف به آب اضافه شوند و اجازه دهند تا حدود سی دقیقه با آب واکنش دهند، pH این ترکیب افزایش می‌یابد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2020) به بررسی اثر تخریبی محلول آب بر خصوصیات رئولوژیکی، پیوستگی و چسبندگی قیر پرداختند. در این مطالعه، چهار محلول مختلف آب، محلول اسید با pH=3 محلول قلیایی با pH=11، دو نوع محلول نمک ۱۰ درصد وزنی (H₂SO₄, NaCl) برای انجام آزمایش اثر تخریبی آب انتخاب شدند. در طی بررسی واکنش بین قیر و محلول اسیدی، بازی و نمک در طول فرآیند غوطه‌وری طولانی‌تر، ترکیب و ساختار قیر تغییر پیدا کرد و در نهایت خاصیت الاستیسیته تحت تأثیر قرار گرفت. به نظر می‌رسید که وجود محلول اسیدی، بازی یا نمک در محلول آب تمایل به افزایش عنصر الاستیک قیر را کاهش می‌دهد. همچنین وجود محلول اسیدی، بازی یا نمک در محلول آب، با طولانی شدن زمان غوطه‌وری، باعث سخت شدن قیر می‌شود. این ممکن است نتیجه این باشد که افزودن ترکیبات املاح آبی باعث حل شدن و یونیزاسیون برخی از گروه‌های شیمیایی قطبی یا یونی آسفالتین‌ها و رزین‌های سطح قیر در محلول‌های آب می‌شود. عربانی و همکاران (Arabani et al., 2020) به بررسی تأثیر خصوصیات رواناب بر عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داده است که pH بارندگی-رواناب در مناطق با ترافیک سنگین که تجمع دوده در آن غالب بود اسیدی است و در مناطق با ترافیک سبک که تجمع ذرات گرد و غبار در آن‌ها احتمال بیشتری داشت، بازی است. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که نوسانات pH مقاومت مخلوط آسفالتی را در شرایط مرطوب

۲- روش تحقیق

۲-۱- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش از دو نوع سنگدانه، دو نوع قیر و زئولیت در دو درصد وزنی قیر استفاده شده است. ۶ شرایط محیطی مختلف شامل شرایط خشک، شرایط $pH=5$ ، $pH=6$ ، $pH=7$ ، $pH=8$ ، $pH=9$ جهت بررسی خصوصیات روانآب مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایش‌های صورت گرفته بر روی مصالح شامل آزمایش رئومتر برش دینامیکی جهت تعیین خواص رئولوژیکی قیر و آزمایش‌های دستگاه جذب همگانی و صفحه ویلهلمی جهت تعیین پارامترهای ترمودینامیکی سنگدانه‌ها و قیرها بوده است. آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط‌های آسفالتی نیز شامل طرح اختلاط به روش مارشال جهت تعیین درصد بهینه قیر و آزمایش خمش نیم دایره به منظور تعیین پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. شکل ۱ الگوریتم برنامه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

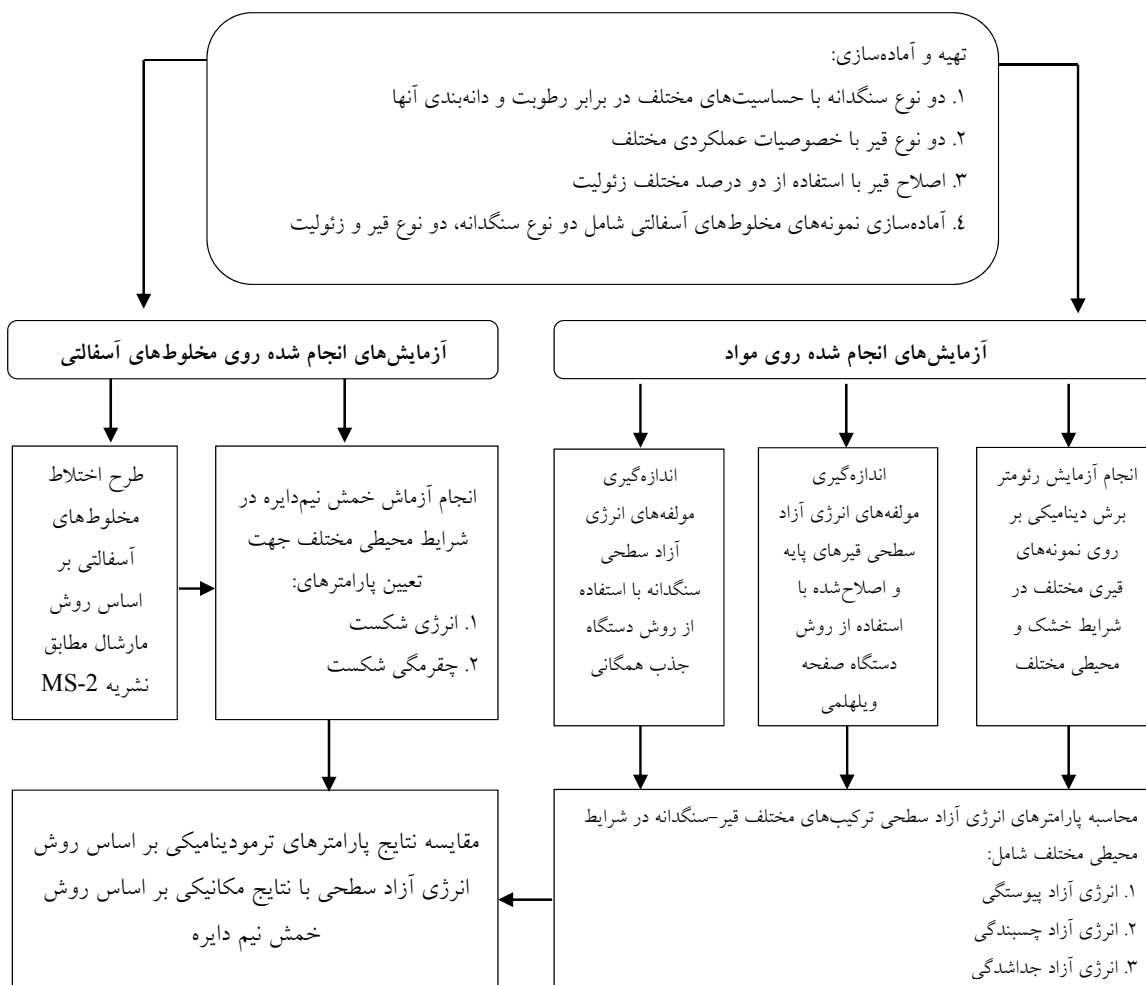
۲-۲- مواد

۲-۲-۱- مصالح سنگی

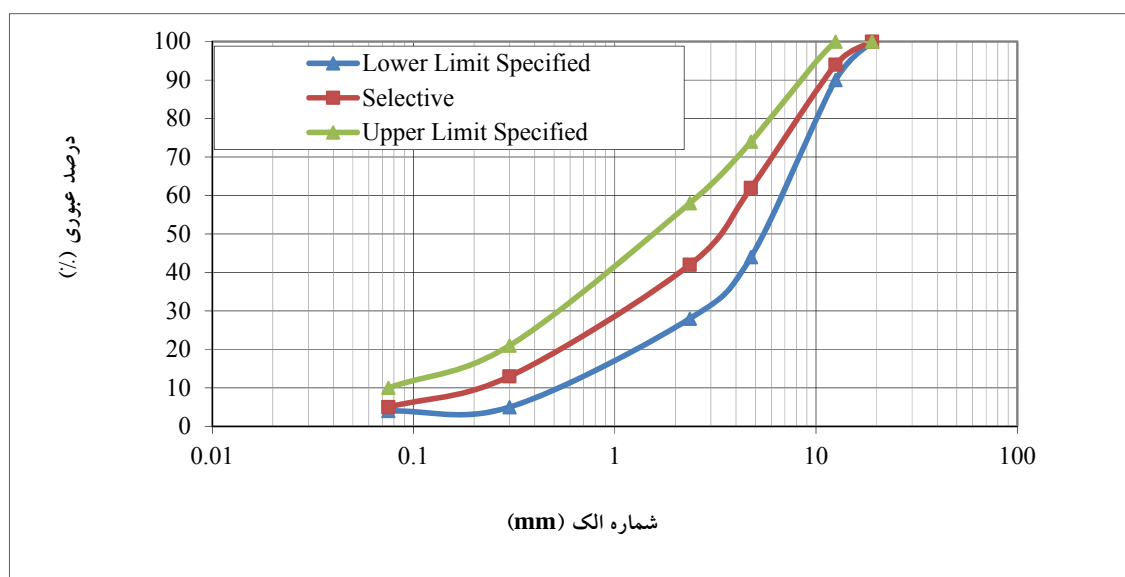
در این پژوهش از دو نوع سنگدانه آهکی و گرانیت استفاده شده است. سنگدانه آهکی به دلیل داشتن درصد بالای CaO به عنوان سنگدانه بازی و سنگدانه گرانیت به علت داشتن درصد بالای SiO_2 به عنوان سنگدانه اسیدی شناخته می‌شود. دلیل استفاده از این دو نوع سنگدانه عملکرد متفاوت آنها در برابر شرایط محیطی مرطوب است. خصوصیات کانی‌شناسی این دو سنگدانه با استفاده از روش $X-ray fluorescence$ اندازه‌گیری و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. در این پژوهش از دانه‌بندی میانی استاندارد $ASTM D3515$ با اندازه بزرگترین و اندازه بزرگترین دانه اسمی به ترتیب ۱۹ و ۱۲/۵ میلیمتر ($ASTM, 2001$) استفاده شده است. حدود دانه‌بندی انتخاب‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، خصوصیات فیزیکی دو نوع سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات کانی‌شناسی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

سنگدانه	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
آهکی	۴/۸	۰/۹	۰/۳	۱/۸	۷۲/۶	۰/۳	۰/۶
گرانیت	۵۴/۱	۱۳/۳	۲/۷	۰/۸	۴/۷	۱/۲	۳/۳



شکل ۱. برنامه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش



شکل ۲. دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

آزمایش	استاندارد	سنگ آهک	گرانیتی	حد مجاز استاندارد
وزن مخصوص حجمی	ASTM C 127	۲/۵۱	۲/۵۶	-----
وزن مخصوص موثر		۲/۵۵	۲/۶۰	-----
وزن مخصوص ظاهری		۲/۵۷	۲/۶۲	-----
حداکثر سایش لس آنجلس	ASTM C 131	۲۱	۲۳	حداکثر ۲۵
حداکثر افت وزنی در برابر سولفات سدیم	ASTM C 88	۵	۳	حداکثر ۸
حداکثر جذب آب	ASTM C 127	۱/۹	۱/۶	حداکثر ۲/۵
ذرات سوزنی و پولکی	ASTM D 4791	۹	۷	حداکثر ۱۵
مشخصات شکستگی مصالح سنگی	ASTM D 5821	۱۰۰	۱۰۰	براساس ترافیک
حجمی	ASTM C 128	۲/۵۵	۲/۶۱	-----
موثر		۲/۵۱	۲/۵۸	-----
ظاهری		۲/۵۳	۲/۶۱	-----
حداکثر دامنه‌ی خمیری	ASTM D 4318	غیر خمیری	غیر خمیری	غیر خمیری
حداکثر افت وزنی در برابر سولفات سدیم	ASTM C 88	۴	۲	حداکثر ۱۲
حداکثر جذب آب	ASTM C 127	۱/۲	۱/۲	حداکثر ۲/۵
حداقل ارزش ماسه	ASTM D 2419	۷۱	۶۴	حداقل ۵۰
مشخصات گوشه‌داری مصالح سنگی	ASTM D 5821	۵۴	۵۲	براساس ترافیک
دوام در برابر سولفات سدیم	ASTM C 88	۴	۲	حداکثر ۸
وزن مخصوص حجمی فیلر	ASTM D 242	۲/۴۲	۲/۴۸	-----

۲-۲-۲- قیر

در این پژوهش از دو نوع قیر PG 58-22 و PG 64-16 استفاده شده است که هر کدام از آن‌ها با ۲ درصد مختلف زئولیت اصلاح شده‌اند. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی قیرها عملکردی در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است.

۲-۲-۳- زئولیت

با توجه به هدف این پژوهش که در راستای کاهش آثار مخرب تغییرات pH بوده است، از یکی از مواد خانواده زئولیت به نام هیولاندیت (Heulandite)، به صورت اصلاح‌کننده قیر پایه مورد استفاده قرار گرفته است. زئولیت ماده‌ای معدنی است که عمدتاً از آلومینوسیلیکات تشکیل شده است. این کمپلکس کریستالی سیلیکاته زنجیره‌های گسترده و پیوسته‌ای را بوجود می‌آورد که با توجه به نحوه اتصال و قرارگیری آن‌ها در کنار یکدیگر شبکه‌ای از فضاهای خالی و حفره‌های قفسه‌مانندی را تشکیل می‌دهد. وجود پرشمار این قفسه‌های کوچک خالی به همراه حضور برخی کاتیون‌های فلزی قلبایی و قلبایی خاکی با اتصال ضعیف ویژگی‌های منحصر بفرد جذب،

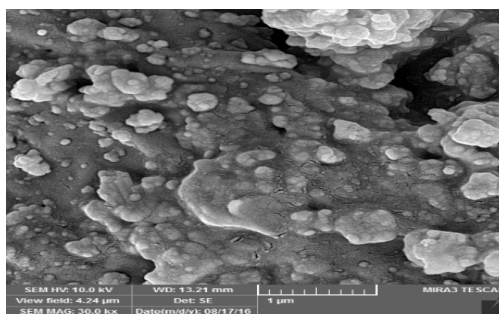
تعویض کاتیونی، غربال مولکولی و خواص کاتالیستی را بوجود می‌آورد (Lechert, 2001).

۲-۳- اصلاح قیر با زئولیت

بر اساس پژوهش‌های پیشین انجام‌شده، مشاهده شده است که درصد ماده افزودنی‌های معدنی به منظور بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در حدود ۰/۵ تا ۸ درصد است. در این پژوهش از مقدار ۱ و ۲ درصد زئولیت به منظور اصلاح قیر استفاده شده است. به این منظور قیر را تا دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد گرم کرده و زئولیت به آرامی و به تدریج به آن اضافه شده است. این اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه ادامه داشته است تا ذرات زئولیت به صورت همگن در فضای قیر پخش شوند. به منظور شبیه‌سازی شرایط مشابه و عدم تأثیر پیرشدگی، در نمونه‌های بدون افزودنی نیز این شرایط اعمال شده است. برای نشان‌دادن توزیع ذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. در شکل ۳ می‌توان توزیع ذرات زئولیت در فضای قیر را مشاهده کرد. این تصویر نشان می‌دهد که ماده افزودنی به نحو مناسبی در فضای قیر پخش شده است.

جدول ۳. خصوصیات رئولوژیکی قیرهای پایه مورد استفاده در این پژوهش

آزمایش	پارامتر	حدود آیین نامه	PG 64-16	PG 58-22
نقطه اشتعال	دمای اشتعال ($^{\circ}\text{C}$)	حداقل ۲۳۰	۳۰۴	۲۹۵
ویسکوزیته دورانی	کندروانی (Pa.s)	حداکثر ۳	۰/۳۳	۰/۳۲
رئومتر برشی دینامیکی (قیر پیرنشده)	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	حداقل ۱	۱/۷۸	۳/۱
رئومتر برشی دینامیکی (قیر پیرشده به روش RTFO)	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	حداقل ۲/۲	۴/۴۵	۳/۹۶
رئومتر برشی دینامیکی (قیر پیرشده به روش PAV)	$G^*.\sin\delta$ (kPa)	حداکثر ۵۰۰۰	۲۶۵۰	۲۵۵۰
رئومتر تیر خمشی	سختی خزشی (MPa)	حداکثر ۳۰۰	۱۰۹	۱۰۱
	m-value	حداقل ۰/۳	۰/۳۲۱	۰/۳۴۱



شکل ۳. توزیع ذرات زئولیت در فضای قیر

۲-۴-۱- تئوری و آزمایش‌ها

۲-۴-۱-۱- طرح اختلاط

طرح اختلاط جهت تعیین درصد قیر بهینه اساس دستورالعمل MS-2 انستیتو آسفالت انجام شده است که در ادامه گام‌های آن آورده شده است:

۱. پس از رسم نمودارهای مارشال، درصد قیر متناظر با حداکثر استقامت مارشال، حداکثر وزن مخصوص انبوهی و متوسط درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی (۴ درصد) تعیین می‌شود.
۲. میانگین سه درصد قیر ذکر شده به دست می‌آید.
۳. برای مقدار قیر میانگین مرحله قبل، مقادیر درصد فضای خالی مصالح سنگی، درصد فضای خالی پرشده با قیر، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، وزن مخصوص انبوهی، استقامت مارشال و روانی مطابق مقادیر آیین‌نامه‌ای کنترل می‌شوند.

۲-۴-۲- آزمایش خمش نیم‌دایره

مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای نمونه‌های آسفالتی در دمای پایین با استفاده از آزمایش SCB طبق استاندارد ASTM D8044 اندازه‌گیری خواهد شد. بدین منظور نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت قبل از انجام آزمایش، در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد قرار

خواهند گرفت. بارگذاری تا لحظه گسیختگی نمونه (دونیم شدن) ادامه پیدا کرد و تغییر شکل عمودی و نیروی خمشی در طول آزمایش ثبت گردید. با توجه به نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده، از معادلات ۱ تا ۲ برای محاسبه انرژی شکست نمونه‌ها می‌توان استفاده کرد:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1)$$

که در آن، G_f انرژی شکست نمونه (J/m^2)، W_f کار نیروی شکست (J) و A_{lig} مساحت ناحیه‌ی شکست (m^2) است.

برای محاسبه‌ی W_f ، طبق رابطه‌ی (۲) باید مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی از ابتدا تا نقطه اوج نمودار محاسبه شود.

$$W_f = \int P du \quad (2)$$

که در آن، P نیروی اعمالی (N) و u جابجایی نیرو (m) است. همچنین A_{lig} از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$A_{lig} = (r - a)t \quad (3)$$

که در آن، r شعاع نمونه (m)، a طول بریدگی نمونه (m) و t ضخامت نمونه (m) است.

چقرمگی شکست (K_{IC})، به عنوان ضریب شدت تنش (K_I) در بار بحرانی (P_c) به دست می‌آید. بار بحرانی حداکثر بار

نمونه‌های اشباع‌شده درون کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و ۱۰ میلی‌لیتر محلول با درجه اسیدیته مورد نظر به آن‌ها افزوده می‌شود. نمونه‌ها درون فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت نگهداری می‌شوند. سپس، نمونه‌ها را در حمام گرم محلول با درجه اسیدیته مورد نظر با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده، پلاستیک‌ها را برداشته و به آن‌ها اجازه داده می‌شود که ۲۴ ساعت در این دما باقی بمانند. در ادامه، نمونه‌ها به دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) آورده می‌شوند و ۲۴ ساعت در این دما باقی می‌مانند.

۲-۴-۳- آزمایش رئومتر برش دینامیکی

آزمایش رئومتر برش دینامیکی برای مشخص کردن رفتار کندروان و الاستیک چسبانه‌های قیری در دماهای بالا و میانه‌ی بهره‌برداری بر اساس استاندارد ASTM D7175 به کار می‌رود. رابطه‌ی بین تنش اعمال‌شده و کرنش حاصل از آن بر روی نمونه‌های قیری، برای محاسبه‌ی G^* به کار می‌رود. G^* نسبت تنش برشی حداکثر (τ_{max}) به کرنش برشی حداکثر (γ_{max}) است. تأخیر زمانی بین تنش اعمال‌شده و کرنش حاصل زاویه فاز δ است (D7175, 2015).

معادله‌های ۶ و ۷ به ترتیب برای محاسبه‌ی τ_{max} و γ_{max} توسط نرم‌افزار دستگاه DSR مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$\tau_{max} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (۶)$$

$$\gamma_{max} = \frac{\theta r}{h} \quad (۷)$$

که در این معادلات، T گشتاور اعمال‌شده حداکثر، r شعاع صفحه‌ی بالایی، θ زوایای چرخش و h ارتفاع نمونه است.

برای تعیین مقاومت در برابر ترک‌خوردگی خستگی، نمونه‌ها بایستی ابتدا تحت شرایط پیرشدگی کوتاه مدت و پس از آن تحت شرایط پیرشدگی بلندمدت قرار گیرند. برای تعیین پارامتر خستگی با هدف درج در مشخصات، ترک‌خوردگی خستگی پدیده‌ای با کرنش کنترل‌شده در نظر گرفته شد. پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ در مشخصات روسازی ممتاز برای محدود ساختن مقدار کلی انرژی تلف‌شده و در نتیجه به حداقل رساندن ترک‌خوردگی خستگی انتخاب شد (D7175, 2015).

نکته قابل ذکر این است که نمونه‌های قیری که باید تحت شرایط مرطوب قرار گیرند، به مدت یک ساعت در آب با درجه اسیدیته‌های مختلف قرار داده می‌شوند و سپس مورد آزمایش قرار می‌گیرند.

ثبت‌شده در طول آزمایش در نظر گرفته می‌شود. از رابطه‌های ۴ و ۵ برای محاسبه‌ی ضریب شدت تنش استفاده می‌شود:

$$k_{1c} = \frac{P}{2rt} \sqrt{\pi a} Y_{I(0.8)} \quad (۴)$$

که در آن، K ضریب شدت تنش ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)، P نیروی اعمالی (MN)، r شعاع نمونه (m)، t ضخامت نمونه (m)، a طول بریدگی نمونه (m) و Y_I عامل شدت تنش نرمال‌شده (بدون بعد) است.

عامل شدت تنش نرمال‌شده از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$Y_{I(0.8)} = 4.782 - 1.219 \left(\frac{a}{r} \right) + 0.063 e^{(7.045 \left(\frac{a}{r} \right))} \quad (۵)$$

برای بررسی تأثیر درجه اسیدیته آب بر روی نمونه‌ها، تحت شرایط قرار دادن این نمونه‌ها نیز باید در آب‌های با pHهای مورد نظر انجام گیرد. برای این منظور برای رساندن pH آب به عدد مورد نظر از آب مقطر به همراه اسید و باز ضعیف (اسیدکلریک و سدیم هیروکسید یا سود) استفاده گردید؛ به این صورت که جهت بررسی pHهای اسیدی، اسیدکلریک تا رسیدن به pH مورد نظر به وسیله قطره چکان به آب مقطر اضافه گردید. همین روند در رابطه با pHهای بازی توسط سود (NaOH) انجام شد.

تحت شرایط قراردادن نمونه‌های مرطوب این آزمایش مطابق با استاندارد AASHTO T283 انجام شده است. نمونه‌های مورد نیاز طبق این استاندارد باید به نحوی متراکم شوند که درصد هوای آن‌ها بین 7 ± 0.5 درصد باشد. برای تحت شرایط مرطوب قرار دادن نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها به وسیله شرایط خلأ نسبی (فشار مطلق ۶۷-۱۳ کیلوپاسکال) به مدت پنج دقیقه در محلول با درجه اسیدیته مورد نظر اشباع می‌شوند. سپس، به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه در حالت مستغرق و بدون شرایط خلأ نگهداری می‌شوند. در ادامه، نمونه‌ها را بیرون آورده و جرم آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از جرم آب جذب‌شده و میزان حجم هوا، درصد اشباع نمونه‌ها به دست می‌آید. اگر درصد اشباع کمتر از ۷۰ درصد باشد، باید نمونه‌ها را دوباره تحت شرایط خلأ قرار داد. اگر درصد اشباع نمونه‌ها بیش از ۸۰ درصد باشد، نمونه آسیب‌دیده محسوب می‌شود و باید یک نمونه جدید به جای آن ساخته شود. برای نمونه جدید، زمان شرایط خلأ کمتری در نظر گرفته می‌شود تا درصد اشباع آن بین ۷۰ تا ۸۰ درصد شود.

۲-۴-۴- تئوری انرژی آزاد سطحی

چندین تئوری، انرژی آزاد سطحی مواد را بر اساس ساختار مولکولی آن بیان می کنند. از مهمترین تئوری هایی که به طور گسترده برای تشریح مولفه های انرژی آزاد سطحی مواد مختلف به کار رفته است، می توان به تئوری اسیدی-بازی اشاره نمود. بر اساس تئوری اسید-بازی، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده بر اساس نوع نیروهای مولکولی سطحی به سه جزء شامل؛ الف) جزء غیر قطبی که به آن جزء لیفشیتز-وندروالز (LW) یا جزء پراکنده، ب) جزء اسیدی لوئیس و ج) جزء بازی لوئیس تقسیم می شوند. انرژی آزاد سطحی طبق این تئوری برای همه مواد با استفاده از رابطه ۸ تعیین می شود:

$$\Gamma^{Total} = \Gamma^{LW} + \Gamma^{AB} = \Gamma^{LW} + 2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-} \quad (8)$$

که در آن، Γ^{Total} انرژی آزاد سطحی کل، Γ^{LW} مولفه غیر قطبی، Γ^{AB} مولفه اسیدی-بازی، Γ^+ مولفه اسیدی لوئیس و Γ^- مولفه بازی لوئیس می باشد.

از دیدگاه ترمودینامیکی، کار پیوستگی (W^c)، کار کل انجام شده بر واحد سطح برای تشکیل دو سطح جدید، که انرژی آن با مجموع انرژی های سطحی دو سطح ایجاد شده جدید برابر می باشد. همچنین، کار چسبندگی (W^a)، عبارت است از کاری که برای جدا کردن دو ماده متصل به هم مورد نیاز است. (Bhasin et al., 2006) به همین ترتیب انرژی آزاد پیوستگی و چسبندگی را می توان به ترتیب از طریق روابط ۹ و ۱۰ بر حسب مولفه های قطبی و غیر قطبی بیان نمود.

$$\Delta G_i^c = 2\Gamma^{Total} = 2\Gamma_b^{LW} + 4\sqrt{\Gamma_b^+ \Gamma_b^-} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_i^a &= \Delta G_i^{aLW} + \Delta G_i^{aAB} \\ &= 2\left[\sqrt{\Gamma_s^{LW} \times \Gamma_b^{LW}} + \sqrt{\Gamma_s^+ \times \Gamma_b^-} + \sqrt{\Gamma_b^+ \times \Gamma_s^-}\right] \end{aligned} \quad (10)$$

برای محاسبه چسبندگی بین دو ماده ۱ و ۲ در حضور ماده ۳، رابطه ی گود و ون اوس (Good & van Oss, 1992) ارائه شده است که اندیس های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر قیر، سنگدانه و آب است.

$$\Delta G_{123}^a = \Gamma_{12} - \Gamma_{13} - \Gamma_{23} \quad (11)$$

۲-۴-۵- آزمایش تعیین انرژی آزاد سطحی قیر

برای اندازه گیری مؤلفه های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح شده و محلول های آبی از آزمایش صفحه و پلهلمی مطابق اصول ارائه شده توسط چنگ (Cheng, 2002) استفاده شده است. در این روش زاویه تماس دینامیکی بین قیر و یک مایع که مؤلفه های انرژی آزاد سطحی آن مشخص باشد (مایع شاخص)، اندازه گیری می شود. رابطه ی پانگ-دوپری ارتباط میان زاویه تماس دینامیکی و مؤلفه های انرژی آزاد سطحی قیر و مایع شاخص را مشخص می نماید:

$$\begin{aligned} \Gamma_L^{Total}(1 + \cos \theta) \\ = 2(\sqrt{\Gamma_b^{LW} \Gamma_L^{LW}} + \sqrt{\Gamma_b^+ \Gamma_L^-} + \sqrt{\Gamma_b^- \Gamma_L^+}) \end{aligned} \quad (12)$$

زاویه تماس اندازه گیری شده مایع تحقیق با قیر و اجزای انرژی آزاد سطحی مایعات تحقیق که معلوم هستند، تشکیل یک معادله و سه مجهول را می دهند. اگر سه مایع تحقیق متفاوت را با یک قیر مشخص مورد بررسی قرار داده شوند، سه معادله و سه مجهول تشکیل می شود که می توان سه مجهول مورد نظر که اجزای انرژی آزاد سطحی قیر هستند را بدست آورد.

۲-۴-۶- آزمایش تعیین انرژی آزاد سطحی سنگدانه

در این پژوهش جهت تعیین مؤلفه های انرژی آزاد سطحی سنگدانه ها، از دستگاه جذب همگانی که بر پایه روش جذب گاز توسط بی حسین (Bhasin, 2007) توسعه داده شده، استفاده گردیده است. چسبندگی بین سنگدانه و بخار یک ماده شاخص را می توان از طریق یک جذب سطحی همدمایی بدست آورد. فشار توزیعی تعادلی بخار ماده تحقیق بر روی سطح سنگدانه از طریق جذب سطحی همدمایی با استفاده از معادله ۱۳ بدست می آید:

$$\pi_e = \frac{RT}{MA} \int_0^{p_n} \frac{n}{p} dp \quad (13)$$

که در آن، R ثابت جهانی گاز، T دمای آزمایش، M وزن مولکولی بخار ماده تحقیق، n جرم بخار جذب شده در واحد جرم سنگدانه در فشار بخار p، و A مساحت سطح ویژه سنگدانه می باشد.

مساحت سطح ویژه سنگدانه از طریق رابطه کلاسیک BET با استفاده از رابطه ۱۴ بدست می آید.

مقایسه با مولفه غیرقطبی هستند. کانی های فعال سطح سنگدانه باعث فعالیت سطحی آنها شده و عمده چسبندگی بین قیر-سنگدانه از طریق کانی های قطبی ایجاد می شود. ذکر این نکته ضروری است که علیرغم اینکه مولفه های انرژی آزاد سطحی غیرقطبی سنگدانه ها در مقایسه با مولفه قطبی کوچکتر است، این مولفه ها باعث ایجاد چسبندگی های پایدارتری نسبت به مولفه قطبی می شود که در حضور آب نیز به راحتی دچار گسیختگی نمی شود. نتایج مولفه های اسیدی و بازی نشان می دهد که در هر دو سنگدانه، مولفه بازی از مولفه اسیدی آنها بیشتر است اما نسبت مولفه بازی به اسیدی در سنگدانه سنگ آهک به مراتب از سنگدانه گرانیتی بیشتر است که باعث ایجاد خصوصیات بازی قوی در سنگدانه سنگ آهک در مقایسه با سنگدانه گرانیتی می شود.

۳-۱-۲- مؤلفه های انرژی آزاد سطحی قیرها

نتایج مربوط به اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح شده در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج مولفه های انرژی آزاد سطحی اسیدی و بازی قیر نشان می دهد، قیرهای پایه خصوصیات اسیدی دارند و مولفه اسیدی آنها از مولفه بازی آنها بیشتر است. استفاده از ژئولیت باعث شده است تا مولفه اسیدی قیر کاهش و مولفه بازی آن افزایش یابد. این موضوع باعث می شود تا چسبندگی قیر یا سنگدانه های اسیدی که مستعد آسیب در برابر رطوبت هستند، بهبود یابد. مقایسه ستون مولفه های قطبی و غیرقطبی نشان می دهد مولفه غیرقطبی قیر از مولفه قطبی آن به مراتب بیشتر است که این موضوع سبب پیوندهای پایدار در شرایط مرطوب می شود. استفاده از ژئولیت باعث شده است تا مولفه قطبی قیر به میزان قابل ملاحظه ای افزایش یابد. این موضوع اولاً سبب می شود تا پیوندهای چسبندگی بهتری بین قیر-سنگدانه برقرار شود و احتمال رخداد ترک خوردگی در نتیجه ضعف چسبندگی قیر-سنگدانه کاهش یابد و از سویی دیگر باعث می شود تا انرژی آزاد سطحی کل نیز به میزان قابل ملاحظه ای افزایش یابد که این موضوع بهبود مقاومت در برابر گسیختگی پیوستگی را در قیر ایجاد می کند. مقایسه بین مولفه های انرژی آزاد سطحی قیرهای PG 58-22 و PG 64-16 نشان می دهد قیر PG 58-22 دارای مولفه های قطبی و غیرقطبی بزرگتری در مقایسه با قیر PG 64-16 است. این موضوع باعث شده است

$$A = \left(\frac{N_m \times N_0}{M} \right) \times \alpha \quad (14)$$

که در آن، N_0 عدد آوگادرو، α سطح تصویر شده یک مولکول، N_m ظرفیت تک لایه ای قابل جذب بر روی سطح سنگدانه می باشد. تعداد مولکول های مورد نیاز برای پوشاندن سطح سنگدانه در یک لایه را ظرفیت تک لایه ای قابل جذب بر روی سطح سنگدانه می گویند. این فاکتور را می توان از طریق معادله ۱۵ بدست آورد.

$$N_m = \frac{1}{S + I} \quad (15)$$

که S و I به ترتیب شیب و طول از مبدا نموداری است که p/n (p_0-p) را در برابر p/p_0 نشان می دهد که در آن p_0, p و n به ترتیب فشار بخار جزئی، حداکثر فشار بخار اشباع و جرم بخار جذب شده بر روی جرم واحد سنگدانه می باشند. رابطه بین فشار بخار یک بخار ماده شاخص و اجزای انرژی آزاد سطحی (معادله ۱۶) خطی است. بنابراین، برای ایجاد یک مجموعه از سه معادله و سه مجهول (سه جزء انرژی آزاد سطحی ماده جامد) نیاز به سه معادله می باشد که برای هر معادله یک ماده تحقیق مورد نیاز است. پس می توان گفت برای بدست آوردن اجزای انرژی آزادی سطحی یک جسم جامد نیاز به سه ماده تحقیق است که اجزای انرژی آزاد سطحی این سه ماده مشخص باشد.

$$2\Gamma_L^{Total} + \pi_e = 2 \left(\sqrt{\Gamma_S^{LW} \Gamma_L^{LW}} \right) + 2 \left(\sqrt{\Gamma_S^{+} \Gamma_L^{-}} \right) + 2 \left(\sqrt{\Gamma_S^{-} \Gamma_L^{+}} \right) \quad (16)$$

که در آن، $W_{s,v}^a$ کار چسبندگی بین سطح سنگدانه (S) و بخار (v)، Γ_v^{total} انرژی آزاد سطحی کل بخار ماده تحقیق و π_e فشار توزیعی تعادلی مربوط به بخار ماده تحقیق بر روی سطح سنگدانه می باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۳- آزمایش انرژی آزاد سطحی

۳-۱-۱- مؤلفه های انرژی آزاد سطحی سنگدانه ها

نتایج انرژی آزاد سطحی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود سنگدانه ها به واسطه خصوصیات سطحی فعالی که دارند، دارای مولفه های انرژی آزاد سطحی قطبی بزرگتری در

تا انرژی آزاد سطحی کل در قیر PG 58-22 از قیر PG 64-16 بزرگتر باشد. این تفاوت نشان می دهد برای گسیختگی پیوستگی در قیر PG 58-22 به انرژی بیشتری نیاز است و این قیر مقاومت بیشتر در برابر گسیختگی در ماستیک دارد.

جدول ۴. اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه ها

نوع سنگدانه	مؤلفه های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm^2)				
	بازی	اسیدی	قطبی	غیرقطبی	کل
آهکی	۴۸۷/۳	۳۵/۲	۲۶۱/۹۴	۵۷/۷	۳۱۹/۶۴
سیلیسی	۵۸۳/۲	۶۲/۱	۳۲۶/۷	۶۷/۸	۴۳۰/۵

جدول ۵. اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح شده

نوع قیر	مؤلفه های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm^2)				
	بازی	اسیدی	قطبی	غیرقطبی	کل
PG 58-22	۰/۶۲	۱/۷۳	۲/۰۷	۱۳/۵۶	۱۵/۶۳
PG 58-22+ 1% Zeolite	۱/۱۹	۱/۶۷	۲/۸۲	۲۲/۶۵	۲۵/۴۷
PG 58-22+ 2% Zeolite	۲/۳۳	۱/۶۱	۳/۸۷	۲۶/۳۱	۳۰/۱۸
PG 64-16	۰/۵۴	۰/۹۳	۱/۴۲	۱۱/۱۹	۱۲/۶۱
PG 64-16 + 1% Zeolite	۰/۹۹	۰/۸۹	۱/۸۸	۲۳/۱۱	۲۴/۹۹
PG 64-16 + 2% Zeolite	۱/۱۲	۰/۹۱	۲/۰۲	۲۶/۸۸	۲۸/۹۰

۳-۱-۳- انرژی آزاد سطحی چسبندگی قیر-سنگدانه

نتایج انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه در شرایط خشک در شکل ۴ ارائه شده است. مقدار چسبندگی قیر-سنگدانه در ترکیب هایی که با سنگدانه آهکی ساخته شده اند، در مقایسه با گرانیته به میزان مشهودی بیشتر است. دلیل اصلی این امر را می توان در بالاتر بودن مؤلفه های غیرقطبی در سنگدانه آهکی دانست. از سویی دیگر، قیرهای کنترل خصوصیات اسیدی دارند و چسبندگی بهتری با سنگدانه آهکی که خصوصیات بازی دارند، ایجاد می کنند. مقایسه در نوع قیر مورد استفاده نشان می دهد که قیر PG 58-22 با داشتن مؤلفه های قطبی و غیرقطبی بیشتر در مقایسه با قیر PG 64-16 توانسته است چسبندگی بهتری با هر دو نوع سنگدانه داشته باشد. استفاده از زئولیت باعث شده است تا چسبندگی بین قیر-سنگدانه بهبود یابد. زئولیت از سویی باعث می شود تا مؤلفه غیرقطبی هر دو نوع قیر افزایش یابد که منجر به افزایش پیوندهای غیرقطبی می شود و از سویی دیگر باعث می شود تا از خصوصیات اسیدی قیر کاسته شود که مورد دوم در چسبندگی قیرهای اصلاح شده با سنگدانه های اسیدی بسیار مورد توجه است.

افزایش چسبندگی بین قیر-سنگدانه در سنگدانه های اسیدی باعث می شود تا احتمال ترک خوردگی در اثر بارگذاری های تکراری و رخداد ترک خوردگی خستگی کاهش یابد.

۳-۱-۴- انرژی جداسازی

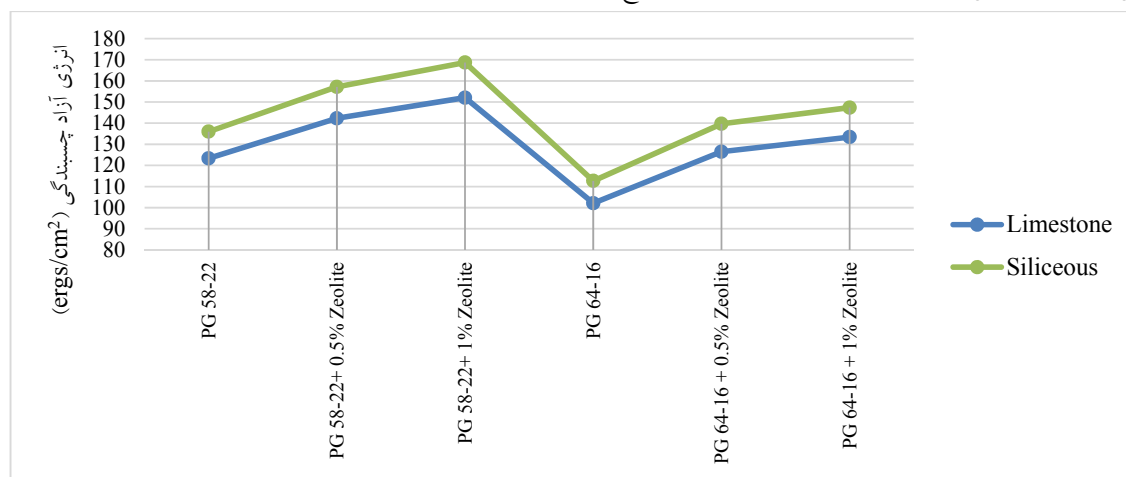
نتایج مربوط به انرژی آزاد جداسازی یا همان انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه در حضور آب در نمونه های با سنگدانه های سنگ آهک و سیلیسی به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد استفاده از زئولیت باعث شده است مقدار انرژی جداسازی در نمونه های اصلاح شده نسبت به نمونه های کنترل کاهش یابد. این موضوع باعث می شود تا سیستم مخلوط های آسفالتی از نظر ترمودینامیکی در حالت پایدارتری قرار گیرد و احتمال رخداد جداسازی قیر از روی سطح سنگدانه که منجر به کاهش چسبندگی قیر-سنگدانه و احتمال ترک خوردگی می شود، کاهش یابد. با مقایسه نتایج در قیرهای PG 58-22 و PG 64-16 می توان گفت استفاده از ۱ درصد زئولیت باعث کاهش مشهودتری در مقدار انرژی جداسازی در قیرهای PG 58-22 شده است و استفاده

باعث می‌شود تا سختی مخلوط آسفالتی کاهش یابد و تحت تنش‌های اعمالی کرنش بیشتری در مخلوط آسفالتی ایجاد شود و عمر خستگی را کاهش می‌دهد. از سویی دیگر، انطاف پذیری مخلوط آسفالتی نیز به واسطه اتصال کمتر فضای ماستیک بین سنگدانه‌ها کاهش می‌یابد و این موضوع نیز به کاهش عمر خستگی منجر می‌شود.

مقایسه بین نتایج انرژی جداشدگی در ترکیب‌های قیر-سنگدانه با در نظر گرفتن دو نوع سنگدانه نشان می‌دهد سنگدانه‌های سنگ آهک دارای مقادیر انرژی جداشدگی کمتری در مقایسه با سنگدانه‌های سیلیسی هستند. این موضوع سبب می‌شود تا میل به جداشدن قیر از روی سطح سنگدانه‌ها در ترکیب‌های با سنگدانه سیلیسی بیشتر باشد. بر این اساس می‌توان گفت استفاده از مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با سنگدانه‌های اسیدی در محیط‌های مرطوب (با خصوصیات رواناب مختلف) می‌تواند منجر به افزایش تمایل جداشدگی قیر-سنگدانه شود که این موضوع احتمال رخداد خرابی‌هایی مانند ترک خوردگی خستگی که وابسته به خصوصیات چسبندگی قیر-سنگدانه است را تشدید می‌کند.

از ۲ درصد از ژئولیت تفاوت چندانی با ۱ درصد ژئولیت ایجاد نکرده است. این موضوع در مورد قیرهای PG 64-16 به نحو متفاوتی است. در ترکیب‌های قیر-سنگدانه با قیر PG 64-16 استفاده از ۱ درصد ژئولیت باعث کاهش مشهود در انرژی جداشدگی نشده است اما استفاده از ۲ درصد از این افزودنی باعث تغییر بهتری در انرژی جداشدگی شده است.

مقایسه نتایج انرژی جداشدگی در pHهای مختلف نشان می‌دهد کمترین مقدار انرژی جداشدگی در محیط‌های مرطوب با pH برابر با ۷ ایجاد شده است. هنگامی که مقدار pH کمتر از ۷ می‌شود و محیط مرطوب دارای خصوصیات اسیدی می‌شود، مقدار انرژی جداشدگی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد عریان شدگی قیر-سنگدانه در محیط‌های اسیدی باعث آزاد شدن انرژی بیشتری می‌شود که احتمال رخداد ترک خوردگی را نیز افزایش می‌دهد. از سویی دیگر، افزایش در مقدار pH نیز باعث می‌شود تا مقدار انرژی جداشدگی افزایش یابد اما شدت این افزایش نسبت به محیط‌های اسیدی کمتر است. بر این اساس، می‌توان گفت اسیدی یا بازی شدن محیط مرطوب سبب می‌شود تا چسبندگی بین قیر-سنگدانه کاهش یابد. این موضوع



شکل ۴. انرژی آزاد چسبندگی در ترکیب‌های مختلف قیر-سنگدانه

جداشدگی در نمونه‌های کنترل و اصلاح شده در اثر استفاده از ژئولیت می‌باشد.

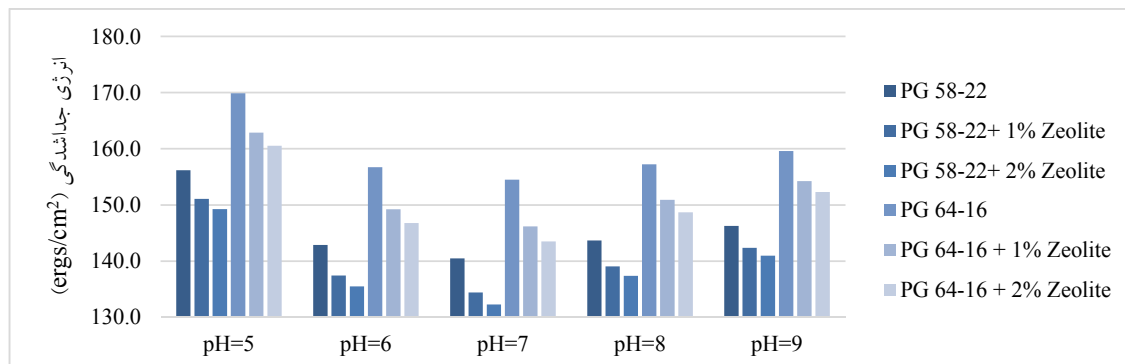
۲-۳- آزمایش رئومتر برش دینامیکی

نتایج پارامتر خستگی ($G^* \sin \delta$) برای قیرهای کنترل و اصلاح شده پس از قرار گرفتن در شرایط محیطی مختلف

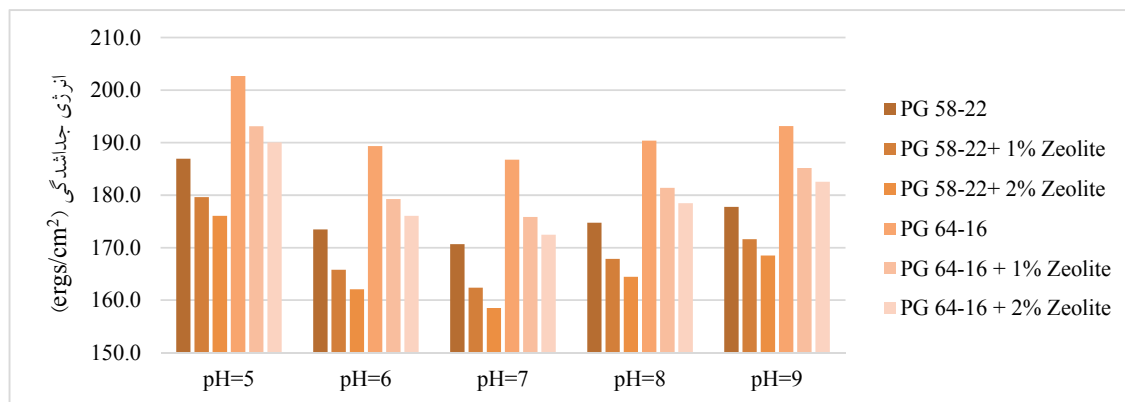
به منظور بررسی تاثیر ژئولیت بر نتایج پارامتر انرژی جداشدگی در ترکیب‌های کنترل و اصلاح شده از آزمون t استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج این آنالیز نشان می‌دهد مقادیر sig. در مقایسه بین همه‌ی ترکیب‌های کنترل با نمونه‌های اصلاح شده، فرض صفر این آزمون را رد می‌کند که نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین نتایج پارامتر انرژی

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد استفاده از ژئولیت باعث شده است تا پارامتر خستگی نمونه‌های قیری اصلاح شده نسبت به نمونه‌های کنترل کاهش یابد. در واقع ژئولیت با قابلیت جذب بالا سبب می‌شود تا ناخالصی‌های موجود در آب جذب شود و اثر آنها بر افزایش سختی و زاویه فاز کاهش یابد. استفاده از ۱ درصد ژئولیت باعث کاهش قابل ملاحظه در مقدار پارامتر خستگی در همه نمونه‌های قیری شده است. افزایش در مقدار ژئولیت از ۱ به ۱ نیز باعث کاهش مقدار پارامتر خستگی شده است، هر چند اثر بهبودی از ۰ تا ۱ درصد ژئولیت از ۲ درصد چشمگیرتر است. مقایسه نتایج پارامتر خستگی روی قیرهای PG 58-22 و PG 64-16 نیز نشان می‌دهد همانطور که مورد انتظار است، قیر PG 58-22 دارای انعطاف پذیری بیشتری است و دارای عملکرد بهتری در دمای میانی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از ژئولیت در قیرهای PG 64-16 مخصوصاً در شرایط محیطی مرطوب باعث کاهش قابل توجه در مقدار پارامتر خستگی شده است.

محاسبه و در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که از داده‌های ارائه‌شده روی این شکل مشخص است نمونه‌های قیری در شرایط خشک کمترین مقدار پارامتر خستگی را از خود نشان می‌دهد که نشانگر این است که نمونه‌های قیری در شرایط خشک بهترین عملکرد را در برابر ترک خوردگی خستگی از خود نشان می‌دهند. قرار گرفتن نمونه‌های قیری در شرایط مرطوب با pH برابر ۷ باعث می‌شود تا سختی نمونه‌های قیری کاهش یابد و از سویی دیگر، مقدار زاویه فاز کاهش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود تا رطوبت باعث کاهش مقاومت قیر در برابر ترک خوردگی خستگی شود. قرارگیری نمونه‌های قیری در شرایط اسیدی و یا بازی باعث می‌شود تا مقدار سختی نمونه‌های قیری پس از خشک شدن کاهش یابد. از سویی دیگر محیط‌های اسیدی و بازی سبب می‌شود تا از خصوصیات الاستیک نمونه‌های قیری کاسته شود و مقدار زاویه فاز افزایش یابد. نتیجه افزایش در سختی و زاویه فاز باعث می‌شود تا پارامتر خستگی در نمونه‌های قیری که در معرض شرایط اسیدی یا بازی قرار گرفته اند، افزایش یابد و مقاومت این نمونه‌های قیری در برابر ترک خوردگی خستگی کاهش یابد.



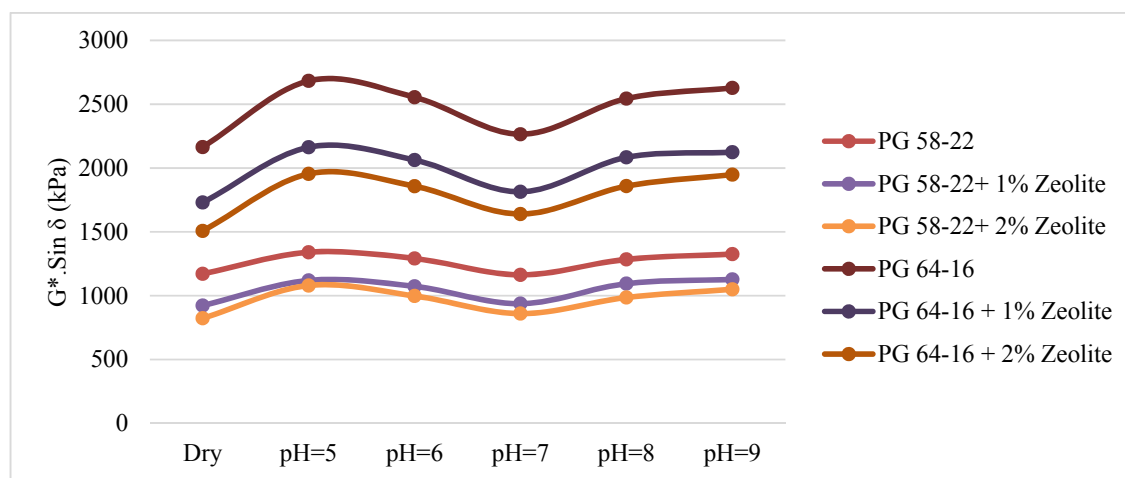
شکل ۵. انرژی جداشدگی تحت شرایط محیطی مختلف در نمونه‌های با سنگدانه سنگ آهک



شکل ۶. انرژی جداشدگی تحت شرایط محیطی مختلف در نمونه‌های با سنگدانه گرانیتی

جدول ۶. آنالیز آماری بررسی تاثیر زئولیت بر انرژی جذاشدگی ترکیب‌های مختلف قیر-سنگدانه

نوع سنگدانه	گروه مورد مقایسه	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
آهکی	PG 58-22 PG 58-22 + 1% Zeolite	-۵/۳۲	۰/۸۳	۰/۳۷	-۶/۳۵	-۴/۲۹	-۱۴/۳۵	۴	۰/۰۰
	PG 58-22 + 1% Zeolite PG 58-22 + 2% Zeolite	-۱/۵۰	۰/۲۷	۰/۱۲	-۱/۸۴	-۱/۱۶	-۱۲/۲۵	۴	۰/۰۰
	PG 64-16 PG 64-16 + 1% Zeolite	-۶/۹۰	۱/۱۳	۰/۵۱	-۸/۳۱	-۵/۴۹	-۱۳/۶۱	۴	۰/۰۰
	PG 64-16 + 1% Zeolite PG 64-16 + 2% Zeolite	-۲/۳۲	۰/۲۹	۰/۱۳	-۲/۶۹	-۱/۹۵	-۱۷/۵۹	۴	۰/۰۰
سیلیسی	PG 58-22 PG 58-22 + 1% Zeolite	-۲/۰۶	۰/۸۱	۰/۳۶	-۳/۰۶	-۱/۰۶	-۵/۷۰	۴	۰/۰۰
	PG 58-22 + 1% Zeolite PG 58-22 + 2% Zeolite	-۰/۴۶	۰/۳۰	۰/۱۳	-۰/۸۳	-۰/۰۹	-۳/۴۷	۴	۰/۰۳
	PG 64-16 PG 64-16 + 1% Zeolite	-۲/۱۲	۱/۱۰	۰/۴۹	-۳/۴۸	-۰/۷۶	-۴/۳۲	۴	۰/۰۱
	PG 64-16 + 1% Zeolite PG 64-16 + 2% Zeolite	-۱/۱۸	۰/۲۶	۰/۱۲	-۱/۵۰	-۰/۸۶	-۱۰/۱۹	۴	۰/۰۰



شکل ۷. پارامتر خستگی نمونه‌های قیری کنترل و اصلاح‌شده تحت شرایط محیطی مختلف

نمونه‌های کنترل و نمونه‌های اصلاح‌شده به شکل معناداری تفاوت داشته است. در واقع، استفاده از زئولیت باعث شده است تا پارامتر خستگی در اثر استفاده از زئولیت کاهش یافته و مقاومت قیر در برابر ترک‌خوردگی خستگی بهبود یافته است.

به منظور بررسی اثر زئولیت بر مقدار پارامتر خستگی آزمون t بر روی نمونه‌های کنترل و اصلاح‌شده انجام شده است که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، زئولیت باعث شده است تا مقدار پارامتر خستگی در

جدول ۷. آنالیز آماری بررسی تاثیر ژئولیت بر پارامتر خستگی در نمونه‌های کنترل و اصلاح‌شده

گروه مورد مقایسه	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
PG 58-22 PG 58-22 + 1% Zeolite	۰/۰۲	۲۰/۹۲	۸/۵۴	۱۹۴/۷۲	۲۳۸/۶۲	۲۵/۳۷	۵	۰/۰۰
PG 58-22 + 1% Zeolite PG 58-22 + 2% Zeolite	۰/۸۰	۲۳/۸۱	۹/۷۲	۵۴/۸۵	۱۰۴/۸۲	۸/۲۱	۵	۰/۰۰
PG 64-16 PG 64-16 + 1% Zeolite	۰/۰۵	۳۳/۲۷	۱۳/۵۸	۴۴۱/۲۶	۵۱۱/۰۸	۳۵/۰۶	۵	۰/۰۰
PG 64-16 + 1% Zeolite PG 64-16 + 2% Zeolite	۰/۰۲	۲۲/۷۵	۹/۲۹	۱۷۸/۱۲	۲۲۵/۸۶	۲۱/۷۵	۵	۰/۰۰

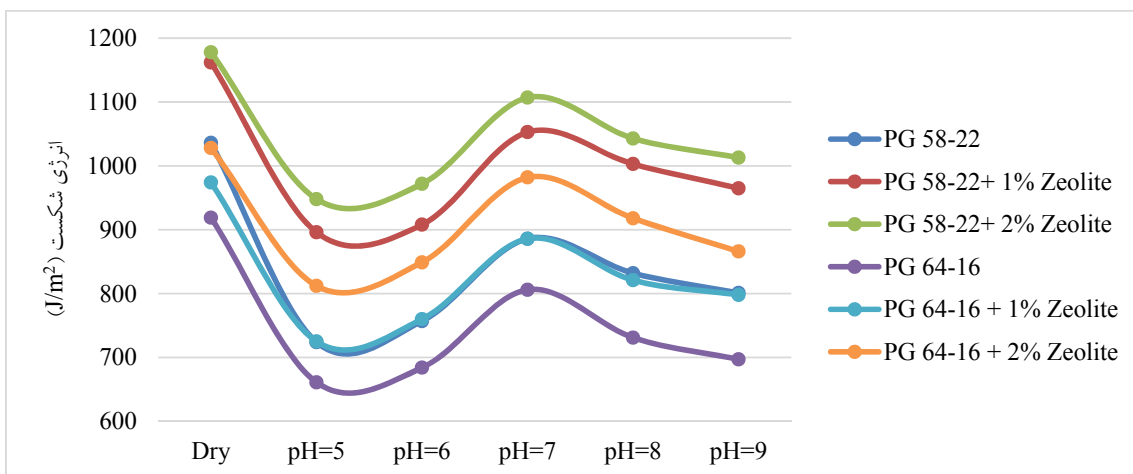
۳-۳- آزمایش خمش نیم‌دایره

۳-۳-۱- انرژی شکست

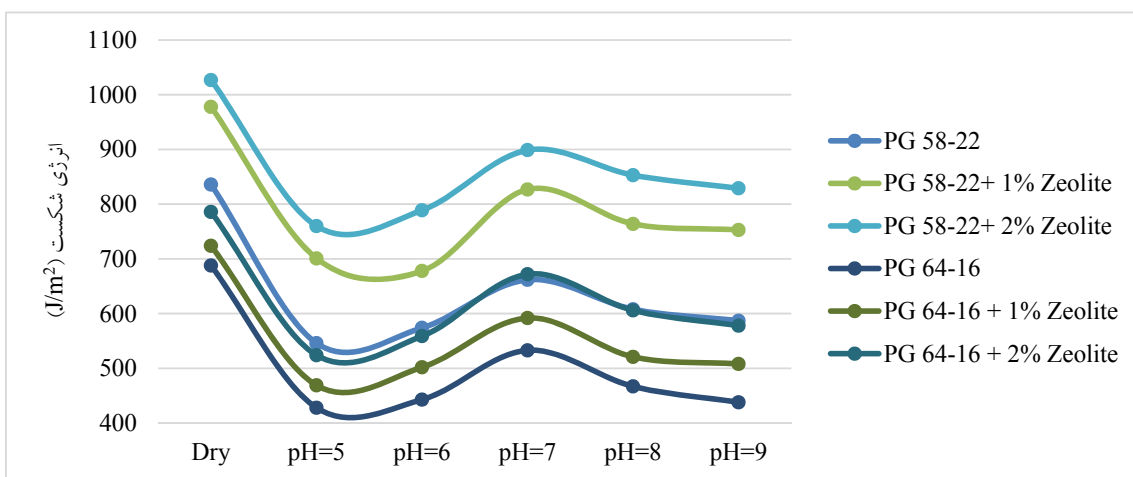
مطابق تعریف انرژی شکست میزان انرژی مورد نیاز برای تغییر یک واحد سطح از حالت اولیه بدون بارگذاری به حالتی که کاملاً گسیختگی اتفاق افتاده، تعریف می‌شود. از تعریف این پارامتر مشخص است که پارامترهای انرژی آزاد پیوستگی و انرژی آزاد چسبندگی در شرایط خشک بر روی میزان انرژی شکست موثر هستند. از سویی دیگر، در شرایط مرطوب نیز می‌توان تاثیر قابل توجه انرژی آزاد پیوستگی و انرژی جداشدگی بر انرژی شکست را منطقی دانست. شکل های ۸-۹ مربوط به پارامتر انرژی شکست در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک و گرانیتی است.

نتایج پارامتر انرژی شکست نشان می‌دهد استفاده از ژئولیت در حالت خشک باعث شده است تا مقدار انرژی شکست افزایش یابد. در واقع، استفاده از ژئولیت باعث کاهش سختی قیر می‌شود و قابلیت جذب انرژی این قیر از لحظه بارگذاری تا لحظه شکست را بیشتر می‌کند. در حالت خشک، نمونه‌های ساخته شده با قیر PG 58-22 در مقایسه با قیر PG 64-16 دارای مقادیر انرژی شکست بزرگتری هستند که دلیل اصلی این موضوع را می‌توان به کاهش سختی مخلوط آسفالتی در این بارگذاری و افزایش توان جذب انرژی دانست.

قرار گرفتن نمونه‌های مخلوط آسفالتی در شرایط مرطوب باعث شده است تا مقدار انرژی شکست به میزان قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت خشک کاهش یابد. این مطلب بدین معناست که نمونه‌ها در زمان کمتری دچار شکست می‌شوند و تا آن لحظه انرژی کمتری را جذب کرده‌اند. هنگامی که نمونه‌های مخلوط آسفالتی در شرایط اشباع با آب با pH برابر با ۷ قرار گرفته‌اند، بیشتری انرژی شکست را در مقایسه با نمونه‌های قرار گرفته تحت شرایط محیطی اسیدی و بازی دارا هستند. با مقایسه نتایج انرژی شکست در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ آهک و سیلیسی می‌توان گفت نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ آهک به دلیل اینکه درصد بالای از کانی CaO در ساختار خود دارند، چسبندگی بهتری با قیر که خصوصیات اسیدی دارد، ایجاد کرده‌اند و این موضوع باعث بهبود انرژی شکست در نمونه‌های ساخته شده با این سنگدانه شده است. از طرفی کانی CaO موجود در سطح سنگدانه‌های سنگ آهک باعث ایجاد خصوصیات آبگریزی در نمونه‌های ساخته شده با این سنگدانه می‌شود. این موضوع باعث می‌شود نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک عملکرد بهتری در شرایط محیطی مرطوب داشته باشند.



شکل ۸. انرژی شکست تحت شرایط محیطی مختلف در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه سنگ آهک



شکل ۹. انرژی شکست تحت شرایط محیطی مختلف در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه گرانیتی

از ۲ درصد ژئولیت در مقایسه با ۱ درصد ژئولیت باعث ایجاد تفاوت معنادار در نتایج انرژی شکست شده است. این موضوع نشان می‌دهد استفاده از ۲ درصد ژئولیت بهترین نتیجه را در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی خستگی در شرایط محیطی مختلف را ایجاد کرده است.

به منظور بررسی تاثیر استفاده از ژئولیت بر مقدار انرژی شکست در شرایط محیطی مختلف در نمونه‌های کنترل و اصلاح شده آزمون t انجام شده است که نتایج این آزمون در جدول ۸ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از ۱ درصد ژئولیت در مقایسه با نمونه کنترل و استفاده

جدول ۸. آنالیز آماری بررسی تاثیر ژئولیت بر انرژي شکست در نمونه‌های کنترل و اصلاح‌شده

نوع سنگدانه	گروه مورد مقایسه	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
آهک	PG 58-22 PG 58-22 + 1% Zeolite	-۰/۰۲	۱۷/۶۳	۷/۲۰	-۱۷۷/۰۰	-۱۴۰/۰۰	-۲۲/۰۳	۵	۰/۰۰
	PG 58-22 + 1% Zeolite PG 58-22 + 2% Zeolite	-۰/۴۶	۱۶/۵۱	۶/۷۴	-۶۳/۰۰	-۲۸/۳۴	-۶/۷۷	۵	۰/۰۰
	PG 64-16 PG 64-16 + 1% Zeolite	-۰/۷۸	۱۶/۷۷	۶/۸۴	-۹۵/۲۶	-۶۰/۰۷	-۱۱/۳۵	۵	۰/۰۰
	PG 64-16 + 1% Zeolite PG 64-16 + 2% Zeolite	-۰/۸۱	۱۷/۱۷	۷/۰۱	-۹۹/۸۶	-۶۳/۸۱	-۱۱/۶۷	۵	۰/۰۰
سیلیسی	PG 58-22 PG 58-22 + 1% Zeolite	-۰/۰۱	۲۳/۲۳	۹/۴۸	-۱۷۲/۳۸	-۱۲۳/۶۲	-۱۵/۶۱	۵	۰/۰۰
	PG 58-22 + 1% Zeolite PG 58-22 + 2% Zeolite	-۰/۷۶	۲۲/۰۴	۹/۰۰	-۹۹/۱۳	-۵۲/۸۷	-۸/۴۵	۵	۰/۰۰
	PG 64-16 PG 64-16 + 1% Zeolite	-۰/۵۳	۱۲/۶۱	۵/۱۵	-۶۶/۴	-۳۹/۹۴	-۱۰/۳۳	۵	۰/۰۰
	PG 64-16 + 1% Zeolite PG 64-16 + 2% Zeolite	-۰/۶۸	۱۲/۳۵	۵/۰۴	-۸۱/۱۳	-۵۵/۲۰	-۱۳/۵۲	۵	۰/۰۰

۳-۲- چقرمگی شکست

در علوم مهندسی، چقرمگی شکست به خاصیتی اطلاق می شود که توانایی یک ماده حاوی ترک را برای مقاومت در برابر شکست بیشتر توصیف می کند. همانطور که مشاهده می شود این تعریف بسیار مشابه انرژی جداشدگی می باشد و تمایل سیستم برای گسیختگی را نشان می دهند. بر این اساس، می توان انرژی جداشدگی را معیاری برای چقرمگی شکست در نظر گرفت. نتایج مربوط به پارامتر چقرمگی شکست در نمونه های ساخته شده با سنگدانه های سنگ آهک و سیلیسی به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

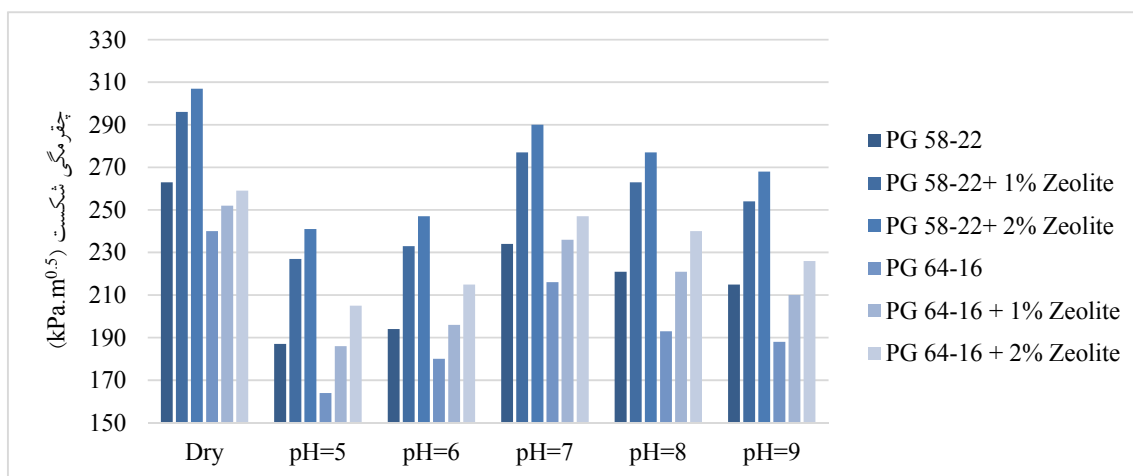
نتایج پارامتر چقرمگی شکست در مخلوط های آسفالتی مختلف نشان می دهد قرار گرفتن نمونه های آسفالتی تحت شرایط مرطوب باعث شده است تا مقاومت آنها در لحظه بحرانی شکست افزایش یابد. در واقع، شرایط مرطوب باعث می شود میل به جداشدن قیر از سنگدانه ایجاد شود و هر چه این میل بیشتر باشد، مقاومت در لحظه بحرانی جهت جلوگیری از رشد یکباره ترک کمتر می شود. نتایج نشان می دهد در بین

نمونه های قرار گرفته در شرایط مرطوب بیشتری چقرمگی شکست مربوط به نمونه های قرار گرفته در آب مقطر است و هر چه محیط اسیدی یا بازی تر می شود مقدار چقرمگی شکست کاهش می یابد.

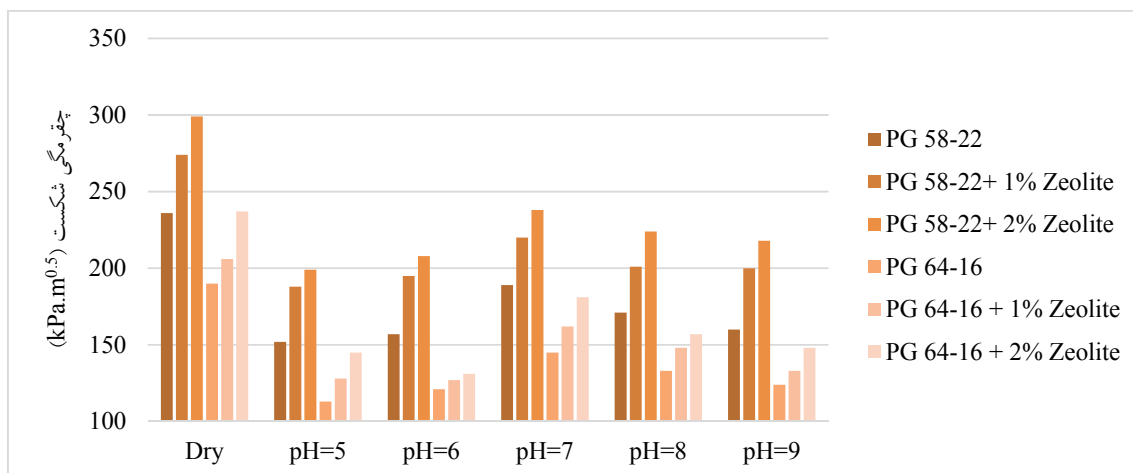
در نمونه های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک و قیر اصلاح شده با ژئولیت، در صورت استفاده از آب های با pH مختلف برای تحت شرایط قرار دادن نمونه ها، مشاهده می شود که عملکرد نمونه در آب های بازی نسبت به آب اسیدی بهتر بوده است. این موضوع به دلیل استفاده از ژئولیت که باعث افزایش پیوندهای غیرقطبی قیر و سنگدانه می شود، می باشد. همچنین استفاده از ژئولیت باعث افزایش خواص بازی قیر و کاهش واکنش با آب بازی شده است. در آب های اسیدی نیز استفاده از ژئولیت به دلیل افزایش خواص غیرقطبی و در نتیجه بهبود پیوندهای غیرقطبی، مانند حالت بازی، باعث افزایش چقرمگی شکست نسبت به حالت پایه خود شده است اما این افزایش به دلیل واکنش پذیری بیشتر آب اسیدی با ترکیب بازی قیر-سنگدانه، نسبت به حالت استفاده از آب بازی کمتر است.

سطح سنگدانه و تحمل تنش برای ایجاد یک گسیختگی ناگهانی کاهش یابد. هر چه زمان قرارگیری محیط مرطوب اسیدی یا بازی در مجاورت دهانه ترک شکل گرفته بیشتر باشد، آسیب ناشی از رطوبت بیشتر بوده و مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی نیز کاهش می یابد.

همانطور که پیشتر اشاره شد مقدار پارامتر چقرمگی شکست ارتباط نزدیکی با مفهوم انرژی جداشدگی دارد. مطابق شکل های ۵-۶، قرارگرفتن نمونه های مخلوط آسفالتی در شرایط محیطی اسیدی و بازی سبب می شود انرژی آزاد جداشدگی آنها به میزان مشهودی کاهش یابد. کاهش در انرژی جداشدگی سبب می شود تا تمایل به جداشدن قیر از روی



شکل ۱۰. چقرمگی شکست تحت شرایط محیطی مختلف در نمونه های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک



شکل ۱۱. چقرمگی شکست تحت شرایط محیطی مختلف در نمونه های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی

با ۱ درصد ژئولیت نسبت به نمونه‌های کنترل و نمونه‌های اصلاح شده با ۲ درصد ژئولیت نسبت به نمونه‌های حاوی ۱ درصد ژئولیت بهبود یابد. این مطلب نشان‌دهنده تأثیر معنادار ژئولیت در افزایش مقاومت در ترک‌خوردگی خستگی مخلوط آسفالتی در برابر شرایط محیطی مختلف می‌باشد.

به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج استفاده از ژئولیت بر پارامتر انرژی شکست از آزمون t در نمونه‌های کنترل و اصلاح شده با ۱ و ۲ درصد ژئولیت انجام شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۹ نشان می‌دهد ژئولیت باعث شده است تا مقدار چقرمگی شکست به نحو معناداری در نمونه‌های اصلاح شده

جدول ۹. آنالیز آماری بررسی تأثیر ژئولیت بر چقرمگی شکست در نمونه‌های کنترل و اصلاح شده

نوع سنگدانه	گروه مورد مقایسه	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
آهکی	PG 58-22 PG 58-22 + 1% Zeolite	-۰/۳۹	۳/۵۰	۱/۴۳	-۴۳/۰۰	-۳۵/۶۶	-۲۷/۵۱	۵	۰/۰۰
	PG 58-22 + 1% Zeolite PG 58-22 + 2% Zeolite	-۰/۱۳	۱/۲۱	۰/۴۹	-۱۴/۶۰	-۱۲/۰۶	-۲۶/۹۷	۵	۰/۰۰
	PG 64-16 PG 64-16 + 1% Zeolite	-۰/۲۰	۵/۵۱	۲/۲۵	-۲۵/۷۹	-۱۴/۲۱	-۸/۸۶	۵	۰/۰۰
	PG 64-16 + 1% Zeolite PG 64-16 + 2% Zeolite	-۰/۱۵	۵/۰۸	۲/۰۷	-۲۰/۴۹	-۹/۸۴	-۷/۳۲	۵	۰/۰۰
سیلیسی	PG 58-22 PG 58-22 + 1% Zeolite	-۰/۳۶	۴/۰۹	۱/۶۷	-۳۹/۷۹	-۳۱/۲۱	-۲۱/۲۸	۵	۰/۰۰
	PG 58-22 + 1% Zeolite PG 58-22 + 2% Zeolite	-۰/۱۸	۵/۴۴	۲/۲۲	-۲۳/۷۱	-۱۲/۲۹	-۸/۱۰	۵	۰/۰۰
	PG 64-16 PG 64-16 + 1% Zeolite	-۰/۱۳	۴/۴۳	۱/۸۱	-۱۷/۶۵	-۸/۳۵	-۷/۱۹	۵	۰/۰۰
	PG 64-16 + 1% Zeolite PG 64-16 + 2% Zeolite	-۰/۱۶	۹/۲۶	۳/۷۸	-۲۵/۵۵	-۶/۱۱	-۴/۱۹	۵	۰/۰۱

۴- بحث

تأثیر روان‌آب با خصوصیات مختلف بر عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی خستگی از دیدگاه ترمودینامیکی و مکانیکی پرداخته شود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

- استفاده از ژئولیت باعث افزایش خصوصیات بازی و مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیرهای اصلاح شده می‌شود. این موضوع باعث می‌شود تا پیوندهای قطبی بهتری با سنگدانه‌های اسیدی ایجاد شود و از سویی دیگر پیوندهای غیرقطبی با پایداری بهتری در شرایط مرطوب شکل می‌گیرد.

ترک خوردگی خستگی یک نوع ترک خوردگی ناشی از بارگذاری در دمای میانی در مخلوط‌های آسفالتی تعریف می‌شود. عوامل مختلفی بر شدت ترک خوردگی خستگی موثر هستند که خصوصیات پیوستگی قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه از مهم‌ترین آنهاست. رطوبتی که در اثر ضعف زهکشی یا ایجاد ترک قبلی به داخل ساختار لایه روسازی آسفالتی نفوذ می‌کند، می‌تواند باعث تغییر در خصوصیات پیوستگی قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه شود. این موضوع هنگامی که رطوبت با آلودگی سطح روسازی ترکیب شده باشد، پیچیده‌تر نیز می‌شود. بر این اساس، در این پژوهش سعی شده تا به بررسی

افزایش یافته و میل ترک خوردگی در آنها بیشتر شده است. استفاده از زئولیت علاوه بر کاهش سختی قیر، باعث جذب آلودگی‌های رواناب شده که این موضوع باعث می‌شود در قیرهای اصلاح شده مقادیر کمتر از پارامتر خستگی مشاهده شود.

۵. نتایج پارامتر انرژی شکست نشان می‌دهد هنگامی که مخلوط‌های آسفالتی تحت شرایط مرطوب قرار گیرند، قابلیت جذب انرژی مخلوط‌های آسفالتی پیش از پیدایش ترک کاهش می‌یابد. این موضوع هنگامی که شرایط محیطی اسیدی به نمونه‌ها اعمال می‌شود، تأثیرات منفی بیشتری به همراه دارد. ۶. مخلوط آسفالتی تحت شرایط اسیدی و بازی میزان تنش کمتری را برای رشد ناگهانی ترک می‌تواند تحمل کنند. دلیل اصلی این رخداد را می‌توان به افزایش انرژی جداسازی ترکیب‌های قیر-سنگدانه در شرایط محیطی مختلف نسبت داد. این موضوع هنگامی که سنگدانه‌های اسیدی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود یا نمونه مخلوط آسفالتی در شرایط محیطی اسیدی قرار می‌گیرد، اثر تخریبی بیشتری دارد و احتمال ترک خوردگی خستگی افزایش می‌یابد.

۷. نتایج آنالیز آماری نشان می‌دهد استفاده از ۱ درصد زئولیت در مقایسه با نمونه‌های کنترل و استفاده از ۲ درصد زئولیت نسبت به نمونه‌های حاوی ۱ درصد از این ماده باعث شده است پارامترهای انرژی شکست و چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی و فاکتور خستگی قیر در شرایط مختلف محیطی به نحو معناداری تغییر یابد. در واقع، استفاده از زئولیت را می‌توان برای شرایط محیطی مختلف به منظور افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی خستگی و کاهش اثرات منفی رواناب‌های اسیدی و بازی پیشنهاد کرد.

همچنین، استفاده از زئولیت انرژی آزاد سطحی کل را افزایش می‌دهد که احتمال گسیختگی پیوستگی کاهش می‌یابد.

-زئولیت از سویی باعث می‌شود تا مولفه غیرقطبی هر دو نوع قیر افزایش یابد که منجر به افزایش پیوندهای غیرقطبی می‌شود و از سویی دیگر باعث می‌شود تا از خصوصیات اسیدی قیر کاسته شود که مورد دوم در چسبندگی قیرهای اصلاح شده با سنگدانه‌های اسیدی بسیار مورد توجه است. افزایش چسبندگی بین قیر-سنگدانه در سنگدانه‌های اسیدی باعث می‌شود تا احتمال ترک خوردگی در اثر بارگذاری‌های تکراری و رخداد ترک خوردگی خستگی کاهش یابد. بر این اساس، استفاده از زئولیت باعث کاهش انرژی آزاد جداسازی می‌شود که سیستم را در حالت پایداری از نظر ترمودینامیک قرار می‌دهد و زمان مورد نیاز برای عریان شدن سطح سنگدانه از قیر افزایش می‌یابد و احتمال ترک خوردگی خستگی ناشی از ضف کششی مخلوط آسفالتی نیز کاهش یابد.

-چسبندگی بین قیر-سنگدانه در هر دو محیط اسیدی و بازی نسبت به حالت خنثی کمتر است. این موضوع باعث می‌شود تحت تنش ایجادشده مقدار کرنش کششی بیشتری در مخلوط آسفالتی ایجاد شود و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی کاهش یابد. اتصال ضعیف بین سنگدانه‌ها نیز به علت عریان‌شدگی، کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی و احتمال بالاتر ترک خوردگی خستگی را ایجاد می‌کند.

۴. شرایط مرطوب اسیدی و بازی سبب افزایش سختی قیر می‌شود. از سویی دیگر اختلاف فاز بین تنش و کرنش در قیرهای تحت شرایط برده شده بیشتر از قیرهای کنترل است. برآیند این دو عامل باعث می‌شود که مقدار پارامتر خستگی در قیرهایی که تحت شرایط اسیدی یا بازی قرار گرفته‌اند، نسبت به قیرهای با حالت شرایط مرطوب با آب مقطر و خشک

۶- مراجع

Bhasin, A. (2007). *Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water* Texas A&M University].
Bhasin, A., Masad, E., Little, D., & Lytton, R. (2006). Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1970), 3-13.

-Arabani, M., Ranjbar Pirbasti, Z., & Hamed, G. H. (2020). Evaluation of the effect of dust and soot on runoff acidity and moisture sensitivity of asphalt mixtures using thermodynamic and mechanical methods. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(11), 04020313.
ASTM. (2001). Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures. In D 3515. Washington D.C: ASTM D3515.

Fracture of Engineering Materials & Structures.

.Lechert, H. (2001). The pH-value and its importance for the crystallization of zeolites. In *Verified Syntheses of Zeolitic Materials*, Elsevier, 33-38.

.Prowell, B. D. (2013). *Validating The Fatigue Endurance Limit For Hot Mix Asphalt*, Vol. 646. *Transportation Research Board*.

.Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y., & Kennedy, T. W. (1991). Hot mix asphalt materials, *Mixture Design And Construction*.

.Sowah-Kuma, D. (2014). Assessment of low temperature cracking in asphalt pavement mixes and rheological performance of asphalt binders.

.Tong, Y., Luo, R., & Lytton, R. L. (2013). Modeling water vapor diffusion in pavement and its influence on fatigue crack growth of fine aggregate mixture. *Transportation Research Record*, 2373(1), 71-80.

.Vivar, E. D. P., & Haddock, J. E. (2006). *HMA Pavement Performance and Durability*.

.Yang, H., Pang, L., Zou, Y., Liu, Q., & Xie, J. (2020). The effect of water solution erosion on rheological, cohesion and adhesion properties of asphalt. *Construction and Building Materials*, 246, 118465.

.Yoon, H. H., & Tarrer, A. R. (1988). Effect of aggregate properties on stripping.

.Chauhan, M., & Narayan, A. (2019). Effect of Moisture on Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete Mixtures. *International Symposium on Asphalt Pavement & Environment*

.Cheng, D. (2002). Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of Asphalt concrete based on surface free energy. Texas A&M University.

.D7175, A. (2015). Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. *American Society for Testing and*, 8.

.Good, R. J., & van Oss, C. J. (1992). The modern theory of contact angles and the hydrogen bond components of surface energies. In *Modern Approaches to Wettability*, Springer, 1-27.

.Ibrahim, H., Wahhab, A.-A., & Hasnain, J. (1998). Laboratory study of asphalt concrete durability in Jeddah. *Building and Environment*, 33(4), 219-230.

.Jaskula, P., & Judycki, J. (2014). The effect of water and frost on fatigue life of asphalt concrete. In *Advanced Characterization of Asphalt and Concrete Materials*, 76-83.

.Kim, Y.-R., Little, D. N., & Lytton, R. L. (2004). Effect of moisture damage on material properties and fatigue resistance of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1891(1), 48-54.

.Lamothe, S., Perraton, D., & Di Benedetto, H. (2019). Fatigue behaviour of dry or partially saturated hot mix asphalt (HMA). *Fatigue &*

Laboratory Investigation of the Effect of Pavement Surface Contamination in the Vicinity of Runoff on Fatigue of HMA

Mehdi Mehdi Nazar, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Ali Abdi Kordani, Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Mahyar Arabani, Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran.

E-mail: aliabdi@eng.ikiu.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

One of the main failures of hot mix asphalt (HMA) is fatigue cracking, which occurs due to weaknesses in the bitumen or bitumen-aggregate adhesion properties at medium temperatures. Moisture is a critical factor that can influence the fatigue performance of HMA, and this becomes even more significant when the pavement surface is exposed to contaminants such as dust or soot from vehicle exhaust. In this research, the effect of runoff with different pH levels on the performance of HMA at medium temperatures has been evaluated. Twelve types of HMA were prepared using two types of aggregate (granite and limestone), two types of bitumen (PG 64-16 and PG 58-22), and a water contamination-absorbing additive called zeolite at 2% by weight of bitumen. These mixtures were exposed to environmental conditions with pH levels of 5, 6, 7, 8, and 9. Mechanical tests, including dynamic shear rheometer on bitumen and semi-circular bending on HMA, were conducted. Additionally, the surface free energy components of bitumen and aggregate were measured using Wilhelmy plate and universal sorption device methods, respectively. The results indicate that moisture conditions, especially acidic conditions, increase the debonding energy, which reduces bitumen-aggregate adhesion and, consequently, increases the likelihood of fatigue cracking. Acidic and alkaline environmental conditions increase the bitumen's stiffness, phase angle, and fatigue parameter, thereby elevating the probability of fatigue cracking. Moreover, these conditions increase the fracture energy and toughness of the mixture, which reduces its ability to absorb stress and resist crack growth. Zeolite improves the non-polar component of bitumen, positively affecting the cohesion and adhesion resistance of the mixture. According to statistical analysis, the use of 1% and 2% zeolite significantly increases the bitumen's fatigue parameter, fracture energy, and fracture toughness of the asphalt mixture.

Keywords: Fatigue Cracking, Runoff pH, Surface Free Energy Method, Zeolite, Hot Mix Asphalt