

بررسی تأثیر زایکوترم بر رفتار شکست مخلوط آسفالتی تحت تأثیر رطوبت و مواد یخزدا

پیمان میرزابابائی^۱، فریدون مقدس نژاد^{۲*}، پوریا حاجی کریمی^۳

- ۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- ۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

moghadas@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴

چکیده

نگهداری زمستانی راه‌ها و بررسی تأثیر آثار یخزدها بر روسازی آسفالتی، همواره مورد توجه پژوهشگران حوزه راه و حمل و نقل بوده است. پژوهش حاضر به منظور ارزیابی تأثیر زایکوترم بر رفتار شکست مخلوط آسفالتی تحت تأثیر رطوبت و مواد یخزدا انجام گرفته است. به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، از قیر PG58-22 و مصالح سیلیسی برای تهیه مخلوط آسفالتی و همچنین از زایکوترم برای اصلاح چسباننده قیری استفاده شد. جمع‌آوری داده‌ها از طریق انجام آزمون روی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. نمونه‌های مخلوط آسفالتی در مجاورت آب مقطر و محلول‌های آب نمک، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات در غلظت نرمال به مدت ۹۶ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد شبیه‌سازی رطوبتی شدند. سپس چقرمگی شکست نمونه‌ها در دمای پایین (K_{Ic}) و نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی (J_c) در دمای میانه به کمک انجام آزمایش خمش روی نمونه‌های نیم دیسک (SCB) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی شرایط محیطی در دمای پایین در مجاورت آب مقطر و تمامی یخزدها باعث کاهش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی نسبت به نمونه خشک می‌شود. در بین تمام یخزدها محلول آب نمک بیشترین اثر منفی را دارد و باعث کاهش ۳۰ درصدی پارامتر K_{Ic} می‌شود. از طرفی، زایکوترم چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی در دمای پایین را در مجاورت آب مقطر و یخزدها تقریباً به میزان ثابتی حفظ می‌کند و حدود ۷۰ درصد از مقاومت شکست از دست رفته نمونه‌ی فرآوری شده در محلول آب نمک را بازیابی می‌کند. تأثیر زایکوترم در دمای میانه متفاوت بوده و باعث نرم‌شدگی چسباننده قیری و همچنین کاهش نیروی بحرانی شکست و کاهش پارامتر J_c می‌شود. این کاهش برای نمونه خشک و در مجاورت آب نمک به ترتیب ۳۴ و ۳۲ درصد و برای نمونه‌های در مجاورت محلول کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات به ترتیب ۲۳ و ۱۲ درصد نسبت به نمونه‌ی ساخته شده با قیر خالص است. همچنین قرار گرفتن نمونه‌ها در مجاورت آب مقطر و محلول پتاسیم استات، تقریباً تأثیری روی J_c آن‌ها نسبت به نمونه‌های در شرایط خشک ندارد. در یک جمع‌بندی کلی و بر اساس نتایج به دست آمده، زایکوترم بر مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در دمای پایین تأثیر مثبت دارد ولی در دمای میانه باعث کاهش پارامتر J_c می‌شود. تمامی نمونه‌ها، حداقل مقاومت شکست توصیه شده توسط استاندارد ASTM D-8044 در دمای میانه را دارند. پتاسیم استات تأثیری روی مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در دمای پایین و میانه ندارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای سایر یخزدها در نگهداری زمستانی راه‌ها باشد.

واژگان کلیدی: مواد یخزدا، خمش نیم‌دیسک، چقرمگی شکست، نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی، زایکوترم.

۱- مقدمه

روسازی راه‌ها از مهمترین سرمایه‌های هر کشور است که سالانه مبالغ هنگفتی برای تعمیر و نگهداری آن‌ها اختصاص داده می‌شود. خرابی‌های پیش‌بینی نشده در روسازی آسفالتی سبب تحمیل زیان‌های مالی قابل توجه به دولت‌ها می‌شود. شناسایی علل بروز خرابی‌ها، به ویژه آن دسته از خرابی‌هایی که ممکن است در روند طراحی دیده نشده باشند یا اهمیت آن‌ها به درستی درک نشده باشد، و اتخاذ تدابیری که منجر به عدم بروز یا تکرار آنها شود، از مهمترین موضوعات مورد توجه در تعمیر و نگهداری روسازی راه‌ها است. در روش‌های نوین طرح مخلوط‌های آسفالتی اعم از مکانیستیک-تجربی^۱ و سوپرپیو^۲، توجه اصلی معطوف به خرابی‌های اصلی در روسازی آسفالتی شامل خستگی، خزش و ترک‌های حرارتی دمای پایین بوده است. عوامل محیطی و پیامدهای آن از قبیل پیرشدگی و همچنین حضور رطوبت (به صورت خالص یا همراه با ضدیخ-ها و یخ‌زداها) اگرچه به خودی خود جزء ساز و کارهای خرابی روسازی طبقه‌بندی نمی‌شوند، لیکن سبب تشدید خرابی‌های نامبرده می‌شوند. همچنین در راستای بهبود عملکرد، اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی به کمک افزودنی‌های گوناگون اعم از پودر لاستیک، انواع پلیمر و نانومواد همواره مورد توجه کارفرمایان، پیمانکاران، متولیان تعمیر و نگهداری، مهندسین و محققین بوده است.

۱-۱- مطالعات پیشین

نگهداری زمستانی راه‌ها با دو استراتژی انجام می‌گیرد: استراتژی ضدیخ و استراتژی یخ‌زدا. از ضدیخ‌ها به منظور جلوگیری از شکل‌گیری و گسترش برف و یخ‌زدگی استفاده می‌شود، در حالی که از یخ‌زداها به منظور شکستن توده‌ی برف و یخ شکل گرفته و از بین بردن آن‌ها از سطوح راه‌ها استفاده می‌شود. پژوهش‌های فراوانی به منظور بررسی تأثیر ضدیخ‌ها و یخ‌زداها روی مشخصات فنی و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. عمده تمرکز این پژوهش‌ها بر بررسی تأثیر

این مواد بر حساسیت رطوبتی قیر و مخلوط آسفالتی بوده است. برخی پژوهشگران نیز تلاش نموده‌اند تا با استفاده از پلیمرها و نانومواد مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر آسیب‌های ناشی از حضور رطوبت و مواد یخ‌زدا بهبود ببخشند.

شاهی و همکاران [1] تلاش کردند تا با معرفی جایگزین‌های مناسب و افزودنی‌های نوین برای کاهش استفاده از مخلوط شن و نمک، علاوه بر ارتقای ایمنی جاده‌ها، آثار مخرب نمک را کاهش دهند.

ایمنی و حضرتی [2] به بررسی آثار مخرب محلول آب-نمک بر روسازی آسفالتی پرداختند و با معرفی کلسیم منیزیم استات به عنوان ماده‌ی جایگزین، سعی در افزایش ایمنی جاده‌ها در شرایط برف و یخبندان داشتند.

در تحقیقات حسن^۳ و همکاران [3] آثار پتاسیم استات و سدیم فرمات روی دوام سنگ‌دانه‌های قرار گرفته شده در معرض سیکل ذوب و یخبندان، با آثار اوره و نمک در شرایط مشابه مقایسه شد. نتایج آزمایش نشان داد که غلظت بحرانی که بیشترین آسیب را به سنگدانه‌ها وارد کرده در محدوده یک تا دو درصد قرار داشته و سنگدانه‌های کوارتزی بیشتر از سنگدانه‌های آهکی در مجاورت مواد یخ‌زدا آسیب دیده‌اند. نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ و مقاومت کششی غیرمستقیم روی نمونه‌های در معرض مواد یخ‌زدا نشان داد که مقاومت کششی غیرمستقیم و درجه نفوذ به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش‌ها حاکی از خسارت حداکثری نمونه‌هایی بود که در مجاورت اوره قرار داشتند.

در پژوهش دیگری که توسط گوه^۴ و همکاران [4] انجام شد، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو رس و الیاف ریز کربن^۵ تحت تأثیر سه ماده یخ‌زدای سدیم کلراید، منیزیم کلراید و کلسیم کلراید مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش حساسیت رطوبتی به روش AASTHO-T283 [5] روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی انجام شد و نتایج نشان داد که

1. Mechanistic- Empirical

2. Super-pave

3. Hassan

4. Goh

5. Micro-Carbon Fiber

نانو رس و الیاف ریز کربن موجب بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در مجاورت مواد یخ‌زدا می‌شوند.

در تحقیق یانگ^۱ و همکاران تأثیر الیاف ریز کربنی و نانو رس در کاهش آثار مواد یخ‌زدا روی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه با استفاده از آزمایش‌های آب جوشان، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی^۲ (EIS) و همچنین محاسبه زاویه تماس به کمک سیستم ویدئویی تحلیل زاویه تماس^۳ (VCA) تأثیر چهار ماده‌ی یخ‌زدای دی‌پتاسیم سوسینات^۴، پتاسیم فرمات^۵، پتاسیم پروپیونات^۶ و پتاسیم استات بررسی شد و مشاهدات نشان داد که استفاده از نانورس موجب کاهش حساسیت رطوبتی و بهبود شرایط عریان‌شدگی می‌شود. این در حالی است که الیاف ریز کربن موجب افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی شده است.

رحیمی [7] به تأثیر استفاده از مواد یخ‌زدا مانند کلسیم کلراید، منیزیم کلراید، سدیم کلراید و اوره بر بعضی مشخصات فنی و مکانیکی مخلوط آسفالتی پرداخت. در این تحقیق ابتدا نمونه‌های ساخته‌شده طبق استاندارد AASHTO-T283 [5] عمل‌آوری شده، سپس تحت آزمایش‌های استقامت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی قرار گرفتند. مطابق نتایج این پژوهش، یخ‌زدایی با محلول کلسیم-کلراید در آزمایش استقامت مارشال، محلول کلسیم کلراید و اوره در آزمایش مقاومت کششی و اوره در آزمایش مدول برجهندگی کمترین اثر منفی را دارند.

اسدی آزادگله و همکاران [8] اثر دو یخ‌زدای کلسیم کلراید و کلسیم منیزیم استات را بر دوام مخلوط آسفالت بازیافتی پلیمری بررسی کردند. نتایج نشان داد که کلسیم منیزیم استات، تأثیر بیشتری در کاهش اثر مخرب چرخه‌های ذوب-یخ نسبت به کلسیم کلراید دارد.

بعضی از پژوهشگران گزارش نموده‌اند که استفاده از یخ‌زداها تأثیر منفی کمی روی عملکرد مخلوط آسفالتی دارد [9]. تفاوت گزارش‌های میدانی کارفرمایان با نتایج به دست

آمده از تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شاید روش [5] AASHTO-T283 که برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود، به خوبی نمی‌تواند تأثیر یخ‌زداها را بر مخلوط آسفالتی تفسیر کند و پژوهشگران این حوزه می‌بایست به دنبال روش‌های کامل‌تری برای این مسئله باشند.

از طرف دیگر، تاکنون تلاش‌های بسیاری توسط پژوهشگران انجام گرفته است تا به کمک اصلاح فیلر و یا استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی، مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر آسیب‌های ناشی از حضور رطوبت بالا ببرند. در این میان، مواد شیمیایی بر پایه سیلان (که در اتصال با قیر، پیوندهای بسیار قوی Si-O-Si ایجاد می‌کنند) به عنوان افزودنی‌های بسیار موثر برای بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها در مقابل آسیب‌های ناشی از رطوبت معرفی شدند [10]. زایکوترم یک نانوماده بر پایه سیلان است که علاوه بر خاصیت ضد عریان‌شدگی، به دلیل سهولت مصرف و همچنین تأثیر مثبتی که روی مقاومت شیارشدگی و خستگی قیر و مخلوط آسفالتی دارد، مورد توجه کارفرمایان و پژوهشگران این حوزه قرار گرفته است. [11, 12, 13]

در راستای همین مسئله، مقدس‌نژاد و همکاران [14] به بررسی تأثیر استفاده از زایکوترم^۷ به عنوان افزودنی ضد عریان‌شدگی روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی پرداختند. در این تحقیق از زایکوترم به‌اندازه دو دهم درصد وزن قیر استفاده شد و آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی بر روی قیر و آزمایش لاتمن^۸ اصلاح‌شده روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از زایکوترم موجب کاهش جزء اسیدی و افزایش جزء بازی انرژی آزاد سطحی قیر شده، در نتیجه چسبندگی قیر با سنگدانه‌های دارای اجزای اسیدی زیاد (مستعد خرابی رطوبتی) بیشتر می‌شود. مطابق با نتایج به دست آمده از آزمایش لاتمن اصلاح‌شده، استفاده از

5. Potassium formate
6. Potassium propionate
7. Zycotherm
8. Lottman

1. Yang
2. Electrochemical Impedance Spectroscopy
3. Video Contact Angle analysis system
4. Dipotassium succinate

از زایکوترم به میزان ۰/۱ درصد وزن قیر و دو نوع مصالح سنگی آهکی و سیلیسی استفاده شد. به کمک آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی و آب جوشان تگزاس، نتیجه‌گیری شد که استفاده از زایکوترم باعث افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم و گرم می‌شود و تأثیر این نانوماده روی مخلوط آسفالتی نیمه گرم بیشتر است.

به تازگی کردانی و همکاران [17] به بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با زایکوترم در یک، دو و سه دهم درصد وزن قیر تحت تأثیر سه ماده یخزدا سدییم کلراید، منیزیم کلراید و پتاسیم استات پرداختند. برای بررسی حساسیت رطوبتی از آزمایش کشش غیرمستقیم همراه با سیکل‌های ذوب و یخبندان استفاده شد. نتایج نشان دادند که فرآوری رطوبتی نمونه‌های آسفالتی با محلول‌های یخزدا مطابق با روش AASHTO T-283 [5] تأثیر ناچیزی روی مقادیر کشش غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی دارد به شکلی که سدییم کلراید و پتاسیم استات باعث کاهش اندک این مقادیر می‌شوند.

نتایج این پژوهش، با گزارش بعضی پژوهشگران دیگر در خصوص تأثیر یخزداهای مختلف بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی همخوانی ندارد و پژوهشگران این حوزه را تشویق می‌کند تا علاوه بر بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، پژوهش‌های کامل‌تری برای بررسی سایر مشخصات عملکردی آن انجام دهند.

در راستای پاسخگویی به این نیاز، منصوریان و همکاران [13] نمونه‌های آسفالتی را تحت تأثیر آب و هر یک از محلول‌های سدییم کلراید^۷، کلسیم کلراید^۸، کلسیم منیزیم استات^۹ و پتاسیم استات^{۱۰} قرار دادند، سپس با انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای روی نمونه‌های نیم دیسک^{۱۱} (SCB) چقرمگی شکست را در سه دمای صفر، ۱۰- و ۲۰- اندازه‌گیری کردند. مطابق نتایج این پژوهش، در دمای صفر درجه سانتی‌گراد

زایکوترم موجب بهبود مقاومت در برابر خرابی رطوبتی نیز می‌شود.

در پژوهش ابراهیم و مهان^۱ [15] مقدار بهینه زایکوترم مورد استفاده در مخلوط آسفالتی تعیین شد. آزمایش مقاومت کششی برای تعیین نسبت مقاومت کششی (TSR^۲) و مقاومت مخلوط در حضور آب و نیز آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، رئومتر تیرچه خمشی (BBR^۳) و رئومتر برش دینامیکی (DSR^۴) به منظور تعیین اثر استفاده از زایکوترم در برابر ترک‌های حرارتی دمای پایین، شیارشدگی و خستگی مخلوط آسفالتی به کار گرفته شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از زایکوترم مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر آسیب و خرابی‌های ناشی از حضور رطوبت و نیز شیارشدگی، خستگی و ترک‌های حرارتی دمای پایین افزایش می‌دهد.

عامری و همکاران [16] به مقایسه اثر زایکوترم و ایوانیک^۵ بر بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر پدیده خرابی رطوبتی و عریان‌شدگی پرداختند. در این تحقیق از مصالح سنگی آهکی و افزودنی‌های زایکوترم و ایوانیک به مقدار ۰/۱ و ۰/۳ وزن قیر مصرفی به عنوان نانو مواد ضد عریان‌شدگی استفاده شد. آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم (لاتمن اصلاح‌شده) و آب جوشان تگزاس برای ارزیابی میزان مقاومت در برابر رطوبت و آزمایش‌های مارشال، مدول برجهندگی و خزش دینامیکی برای بررسی سایر ویژگی‌های عملکردی مخلوط آسفالتی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که زایکوترم و ایوانیک به ترتیب باعث افزایش ۱۵ و ۹ درصدی مقاومت رطوبتی و افزایش ۳۷ و ۷ درصدی مقاومت شیارشدگی نسبت به نمونه شاهد شدند. در نتیجه، زایکوترم موجب بهبود بیشتر ویژگی‌های مرتبط با حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نسبت به ایوانیک می‌شود.

میرزابابائی [13] تأثیر زایکوترم بر حساسیت رطوبتی آسفالت گرم و نیمه‌گرم را مورد ارزیابی قرار داد. در این تحقیق

6. Sodium chloride
7. Calcium chloride
8. Calcium Magnesium Acetate
9. Potassium acetate
10. Semi-Circular Bending (SCB) test

1. Ibrahim & Mehan
2. Tensile Strength Ratio
3. Bending Bean Rheometer
4. Dynamic Shear Rheometer
5. Evonik

مجموعه‌ای از آزمایش‌های مورد نیاز برای تعیین مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی قیر و مخلوط آسفالتی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند به اختصار معرفی شده است.

۳-۱- مواد و مصالح

۳-۱-۱- قیر

قیر مورد استفاده در این تحقیق از نوع قیر PG58-22 است که از شرکت قیران پخش ستاره ایرانیان تهیه شده است. جدول (۱)، مشخصات فنی قیر استفاده شده را نشان می‌دهد.

۳-۱-۲- یخ‌زداها

در این پژوهش سه یخ‌زدای سدیم کلراید، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات برای شبیه‌سازی شرایط محیطی استفاده از یخ-زداها به کار گرفته شدند که شکل ظاهری آن‌ها در شکل (۱) قابل ملاحظه است. همچنین نمونه‌ها در مجاورت آب مقطر نیز نگهداری شدند تا نشان دهد که اگر برف و یخ بدون حضور یخ‌زداها ذوب شوند، چه تأثیری روی قیر و مخلوط آسفالتی دارد. سدیم کلراید به عنوان پر مصرف‌ترین و قدیمی‌ترین ماده‌ی یخ‌زدا شناخته می‌شود. کلسیم منیزیم استات به دلیل عدم آلودگی زیست محیطی، ماده مناسبی برای ذوب یخ است و توسط موسسات تحقیقاتی بسیاری به جای سدیم کلراید معرفی شده است. پتاسیم استات ماده‌ای است سفیدرنگ، کریستالی و پودری شکل که دارای طعم نمک است. این ماده در آب و الکل حل می‌شود و محلول‌های حاصل از آن دارای خاصیت قلیایی هستند. پتاسیم استات به دلیل دمای یونکتیک^۱ (پایین-ترین دمای ذوب ماده که در آن کریستال‌های منجمد و فاز مایع در حالت تعادل با هم وجود دارند) بسیار پایین (۶۰- درجه سانتیگراد)، در مناطق بسیار سرد و همچنین فرودگاه‌ها کاربرد زیادی دارد. جدول (۲) مشخصات یخ‌زداهای استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

۳-۱-۳- مصالح سنگی

مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش از معدن پنج‌کوه واقع در کیلومتر ۵۵ جاده دامغان- اصفهان تهیه شده است و

محلول‌های یخ‌زدا اثر منفی روی شکست مخلوط‌های آسفالتی ندارند ولی در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد، محلول کلسیم منیزیم استات منجر به کاهش ۶ درصدی و در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد محلول‌های کلسیم منیزیم استات، کلسیم کلراید و سدیم کلراید به ترتیب منجر به کاهش ۵، ۵ و ۱۲ درصدی مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی شدند.

یکی از مهمترین خلأهایی که در این پژوهش دیده می‌شود، استفاده از سنگدانه‌های آهکی برای ساخت نمونه‌ها است. برای تایید نتایج به دست آمده از این پژوهش، به نظر می‌رسد با توجه به حساسیت بیشتر سنگدانه‌های سیلیسی، انجام آزمایش‌های مشابه روی مخلوط آسفالتی ساخته شده با این نوع مصالح ضروری است و پژوهش پیش رو، سعی در رفع این خلأ تحقیقاتی دارد.

همچنین، تفسیر رفتار مکانیک شکست مخلوط آسفالتی در مجاورت محلول‌های یخ‌زدا، نیازمند انجام آزمایش‌های تکمیلی در سایر دماها نیز هست که نویسندگان، انجام آزمایش در دمای میانه را نیز در دستور کار خود قرار داده‌اند.

۲- اهداف و چشم انداز

هدف از انجام این پژوهش، ارائه چارچوب عملی و مشخص برای در نظر گرفتن اثر رطوبت و حضور یخ‌زداها بر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو ماده بر پایه سیلان (زایکوترم) در دماهای پایین و میانی است. حضور رطوبت در مخلوط آسفالتی بایستی طوری تعریف شود که بیانگر شرایط واقعی مخلوط در محل باشد. به همین دلیل، از روشی استفاده شده است که بتواند این مسئله را به خوبی شبیه‌سازی کند.

۳- برنامه‌ی آزمایشگاهی

در این بخش به معرفی قیر، سنگدانه، نوع دانه‌بندی، ماده افزودنی مورد استفاده، انواع یخ‌زداها، چگونگی ساخت و شبیه‌سازی محیطی نمونه‌ها پرداخته شده است. همچنین،

طبقه‌بندی کلی آن در دسته‌ی مصالح سیلیسی (آبدوست) قرار می‌گیرد.

| | | | |
|---------------------------|-------|--------|-------|
| Eutectic temperature (°C) | -21 | -27.5 | -60 |
| Effective temperature | -9 | -7 | -26 |
| Boiling temperature | - | 117.1 | - |
| Melting temperature | 801 | - | 292 |
| Concentration (%) | 23.3 | 32.5 | 49 |
| Molecular weight (g/mol) | ۵۸/۴۴ | 123.43 | 98.14 |

Table2. Properties of deicers

۲-۳-۲- تهیه نمونه‌ها و آزمایش‌ها

در این قسمت به معرفی آزمایش‌های انجام گرفته روی قیر و مصالح سنگی، محاسبه درصد قیر بهینه، روش تهیه نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای نیم‌دیسک، روش شبیه‌سازی شرایط محیطی در حضور مواد یخ‌زدا و همچنین آزمایش‌های انجام گرفته روی مخلوط آسفالتی پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱- آزمایش‌های قیر

با توجه به ضرورت تعیین مشخصات رئولوژیکی قیر و مشخص نمودن دمای عملکردی بالا و پایین آن، آزمایش‌های مرتبط با رده بندی عملکردی شامل ویسکومتر چرخشی (RV) آزمایش رئومتر برش دینامیکی (DSR) و رئومتر تیر خمشی (BBR) برای تعیین مشخصات عملکردی قیر توسط تولید کننده انجام گرفته است که نتایج آن در جدول (۳) نشان داده شده است.

۲-۳-۲- آزمایش‌های مصالح سنگی

مجموعه‌ای از آزمایش‌های فنی برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگی انجام شد که نتایج آن در جدول (۴) قابل مشاهده است.

۲-۳-۳- تهیه قیر اصلاح شده با زایکوترم

بر اساس توصیه تولیدکننده و مطالعات پیشین [16, 18] مقدار ۰/۱ درصد وزنی قیر از زایکوترم برای اصلاح قیر استفاده شد. با توجه به پروتکل میکس شرکت سازنده، از یک همزن برقی با سرعت بالا (حدوداً ۳ هزار دور بر دقیقه) برای اختلاط در دمای ۱۶۰°C استفاده شد و سرعت آن به شکلی تنظیم شد که در قیر گردابی به عمق ۲ الی ۳ سانتیمتر ایجاد کند. سپس زایکوترم با یک سرنگ با دقت تزریق ۰,۰۱ سی‌سی به آرامی با نرخ ۱۰ قطره بر دقیقه به قیر اضافه شد.

۲-۳-۴- تعیین درصد قیر بهینه و ساخت نمونه‌های نیم دیسک

جدول ۵ **Error! Reference source not found.** در این **found.**دانه‌بندی مصالح سنگی مصرفی را نشان می‌دهد. در این جدول که بر اساس دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه فنی شماره ۲۳۴) است، حدود بالا و پایین

شکل ۱. شکل ظاهری یخ‌زداها



Fig. 1. The visual appearance of deicers

جدول ۱. مشخصات قیر خالص

| Test | Test temperature (°C) | Standard test | Result | Limits | Unit |
|---------------------------------|-----------------------|---------------|--------|--------|--------------------|
| Penetration | 25 | ASTM D5 | 70 | - | (0.1)mm |
| Ductility | 25 | ASTM D113 | > 100 | >100 | cm |
| Specific gravity | 25 | ASTM D70 | 1.03 | - | gr/cm ³ |
| Solubility in trichloroethylene | - | ASTM D2042 | 99.2 | >99 | % |
| Loss of heating | - | ASTM D1754 | 0.75 | 0-0.8 | % |
| Flash point (Cleveland) | - | ASTM D92 | 310 | >232 | °C |
| Softening point | - | ASTM D36 | 49 | - | °C |
| Penetration index (PI) | - | - | 0.14 | - | - |

Table1. Properties of base bitumen

جدول ۲. مشخصات یخ‌زداها

| Specification | Sodium chloride | Calcium magnesium acetate (CMA) | Potassium acetate (KAc) |
|--|-----------------|--|-------------------------|
| Chemical formula | NaCl | CaMg ₂ (CH ₃ COO) ₆ | KCH ₃ COO |
| Specific gravity @ 25 °C (gr/cm ³) | 2.16 | 0.7-1 | 1.57 |
| PH | 6.5-7 | 8-10 | 10-11.5 |

موجود و شبیه‌سازی شرایط محیطی برای نمونه‌ها در شرایط مختلف در مجاورت آب خالص و انواع یخزدها و با اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان و همچنین چرخه‌های رطوبت و خشکی دهی سعی در یافتن روش مناسب فرآوری و پیدا کردن علت دقیق خرابی مخلوط آسفالتی دارند.

نتایج ضد و نقیض بسیاری که از مطالعات پیشین به دست آمد، پژوهشگران را بر آن داشت تا به کمک انجام آزمایش‌های جدید با بهره‌گیری از بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی و همچنین با اصلاح فرآوری رطوبتی معرفی شده در استاندارد AASHTO T283 [5] سعی در بررسی دقیق‌تر خرابی‌های مخلوط آسفالتی در مجاورت مواد یخزدا نمایند.

بر اساس مطالعات میدانی، آلاتیپو^۳ و همکاران [5] نتیجه گرفتند که ساختمان شیمیایی قیر قرار گرفته در مجاورت یخزدها دچار تغییرات شیمیایی قابل توجهی می‌شود. در بسیاری از مناطق که دارای ماه‌های گرمی در سال می‌باشند، خرابی‌های روسازی‌هایی که در مجاورت مواد یخزدا قرار گرفتند، بسیار بیشتر گزارش شده است. این مسئله در مطالعات گسترده‌ی کینگ لو^۴ و همکاران [23] نیز اشاره شده است. کریستنسن^۵ و همکاران [24] در سال ۲۰۱۰ روشی را برای فرآوری بهتر و موثرتر نمونه‌های آسفالتی پیشنهاد دادند که در آن مشابه روش AASHTO-T283 [5] نمونه‌ها فرآوری رطوبتی می‌شوند ولی به جای استفاده از پمپ خلأ و اشباع‌سازی، نمونه‌ها به مدت ۴ روز در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد مستغرق می‌شوند. همچنین به پیشنهاد همین پژوهشگران و با استناد به پژوهش‌های قبلی، سیکل ذوب و یخبندان به کار گرفته نشد زیرا این دماهای بالا هستند که در خرابی‌های مربوط به یخزدها حالت بحرانی ایجاد می‌کنند. بر همین اساس، نمونه‌ها در محلول آب مقطر، سدیم کلراید، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات فرآوری شدند. یک نمونه هم به صورت خشک و بدون شبیه‌سازی شرایط محیطی در نظر گرفته شد.

مشخص شده است. برای ساخت نمونه‌ها، از حد وسط دانه‌بندی مذکور استفاده شد. از آنجایی که در مطالعات پیشین، مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیسی در مقایسه با نمونه‌های مشابه ساخته شده با مصالح آهکی، آسیب بیشتری از مجاورت در برابر رطوبت و یا مواد یخزدا متحمل شدند [3, 18]، مصالح سنگی و فیلر به کار رفته در این پژوهش از نوع مصالح سیلیسی انتخاب شدند.

برای تعیین درصد قیر بهینه، از روش طرح اختلاط مارشال [19] استفاده شد. بر اساس مطالعات پیشین [18, 11] زایکوترم تأثیر ناچیزی روی درصد قیر بهینه دارد، بنابراین فرض شده است که مخلوط‌های تولید شده با قیر خالص و اصلاح شده، درصد‌های قیر بهینه‌ی یکسانی دارند. سه گروه مخلوط آسفالتی با درصد‌های قیر ۴ تا ۶/۵ درصد با افزایش پله‌ای نیم درصدی ساخته شدند. در مجموع ۱۸ نمونه ساخته و زیر جک مارشال شکسته شد. درصد قیر بهینه به کمک منحنی‌های به دست آمده از آزمایش مارشال ۶ درصد تعیین شد.

در این تحقیق به منظور ساخت نمونه‌های اصلی از متراکم‌کننده ژیراتوری (SGC) متناسب با استاندارد سوپریو استفاده شد. پس از اختلاط در دمای مورد نظر متناسب با اعداد به دست آمده از آزمایش ویسکومتر چرخشی (RV)، نمونه‌ها به جهت تراکم داخل قالب ژیراتوری ریخته شدند. تعداد دوران دستگاه ۱۰۰ دور تنظیم شد که متناسب با ترافیک سنگین است. زاویه دوران دستگاه نیز ۱/۲۵ درجه تنظیم شد که متناسب با دستورالعمل سوپریو می‌باشد. نمونه‌ها طبق تنظیمات وارد شده متراکم شده و مطابق استانداردهای BS-EN 12697-44 [20] و ASTM-D8044 [21] برش زده شدند و شیار^۲ مورد نظر روی آن‌ها ایجاد شد.

۳-۲-۵- شبیه‌سازی شرایط محیطی برای نمونه‌ها

از جمله مهمترین وظایف پژوهشگران حوزه راهسازی، یافتن بهترین ساز و کار بررسی علت خرابی مخلوط‌های آسفالتی در مجاورت یخزدها است که در آن پژوهشگران به کمک ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و همچنین با مغزه‌گیری از روسازی‌های

4. Qing lu
5. Christensen

1. Superpave Gytratory Compactor
2. Notch
3. Alatypö

جدول ۳. نتایج رئولوژی قیر خالص

| No. | Test | Test method | Limits | Result | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|------------------|------------|-----------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| 1 | Flash point | ASTM D92 | ≥230 °C | 304 | | | | | | | | | | | |
| 2 | Viscosity @ 135°C | ASTM D4402 | ≤3 Pa.s | 0.31 | | | | | | | | | | | |
| 3 | DSR | Test temperature | | 52 | 58 | 64 | 70 | 76 | 82 | | | | | | |
| | | G*/sin δ | ASTM D7175 | ≥1 kPa | 2.4 | | | | | | | | | | |
| Rolling Thin Film oven aged (ASTM 2872) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Maximum initial mass change | ASTM D2872 | ≤1 % | 0.1 | | | | | | | | | | | |
| 5 | DSR | Test temperature | | 52 | 58 | 64 | 70 | 76 | 82 | | | | | | |
| | | G*/sin δ | ASTM D7175 | ≥2.2 kPa | 2.2 | | | | | | | | | | |
| Pressure Aging Vessel aged (ASTM D6521- 100°C) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | DSR | Test temperature | | 4 | 7 | 10 | 13 | 16 | 19 | 22 | 25 | 28 | 31 | 34 | 37 |
| | | G*×sin δ | ASTM D7175 | ≤5000 kPa | 3690 | | | | | | | | | | |
| 7 | BBR | Test temperature | | 0 | -6 | -12 | -18 | -24 | -30 | -36 | | | | | |
| | | Stiffness (S) | ASTM D6648 | ≤300 MPa | 101 | | | | | | | | | | |
| | | m-value | ASTM D6648 | ≥0.3 | 0.31 | | | | | | | | | | |

Table 3. Rheological properties of base bitumen

جدول ۴. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح مصرفی

| Test | Los angles (%) | Coarse aggregate water absorption (%) | Bulk specific gravity (Coarse aggregates) (gr/cm ³) | Apparent specific gravity (Coarse aggregates) (gr/cm ³) | Bulk specific gravity (Fine aggregates) (gr/cm ³) | Apparent specific gravity (Fine aggregates) (gr/cm ³) | Uniaxial compressive strength (Dry) (kg/cm ²) | Uniaxial compressive strength (Wet)- (kg/cm ²) | Modulus of elasticity (E)(GPa) | Shear modulus (G) (GPa) | Poisson ratio (ν) |
|----------|----------------|---------------------------------------|---|---|---|---|---|--|----------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Standard | AASHTO T96 | AASHTO T85 | AASHTO T85 | AASHTO T85 | AASHTO T84 | AASHTO T84 | ASTM C170 | ASTM C170 | Ultrasonic test | Ultrasonic test | Ultrasonic test |
| Result | 23 | 0.83 | 2.7265 | 2.8175 | 2.794 | 2.934 | 933.8 | 813.4 | 60.97 | 22.65 | 0.346 |

Table 4. Physical and mechanical properties of aggregates



Fig. 4. Sample submerged in distilled water



Fig. 5. Sample submerged in NaCl

شکل ۶. نمونه‌های فرآوری شده در مجاورت کلسیم منیزیم استات



Fig. 6. Samples submerged in CMA

شکل ۷. نمونه فرآوری شده در مجاورت پتاسیم استات



Fig. 7. Sample submerged in KAc

۳-۲-۶- آزمایش‌های مخلوط آسفالتی

۳-۲-۶-۱- آزمایش خمش نیم دیسک در دمای پایین

آزمایش خمش نیم دیسک در دمای پایین مطابق با استاندارد BS-EN 12697-44 [24] انجام شده است. به این منظور نمونه‌های آسفالتی پس از ساخته شدن به کمک روش ژیراتوری، بریده شده و به دیسک‌های کوچکتر با ضخامت

جدول ۵. دانه بندی مصالح مصرفی

| Sieve (mm) | 19 | 12.5 | 4.75 | 2.36 | 0.3 | 0.075 |
|--------------------------------|-----|------|------|------|-----|-------|
| Percent passing (lower limit) | 100 | 90 | 44 | 28 | 5 | 2 |
| Percent passing (upper limit) | 100 | 100 | 74 | 58 | 21 | 10 |
| Percent passing (Middle limit) | 100 | 95 | 59 | 43 | 13 | 6 |

Table 5. Gradation properties of aggregates

شکل (۲) شبیه‌سازی شرایط محیطی برای نمونه‌ها و اشکال (۳ تا ۷) نمای ظاهری نمونه‌ها را پس از شبیه‌سازی رطوبتی نشان می‌دهند. پس از شبیه‌سازی رطوبتی، نمونه‌ها مورد بررسی چشمی قرار گرفتند. در نمونه‌های فرآوری شده با کلسیم منیزیم استات آثار برآمدگی و ترک‌خوردگی به وضوح قابل دیدن بودند و در نمونه‌های فرآوری شده با پتاسیم استات نیز آثار ریز ترک‌ها مشهود بود که نواحی خرابی در اشکال (۶ و ۷) با کادر قرمز مشخص شده است.

شکل ۲. فرآوری نمونه‌های آسفالتی در مجاورت کلسیم منیزیم استات



Fig. 2. Asphalt mixture conditioning in CMA

شکل ۳. نمونه خشک



Fig. 3. Dry sample

و برای سایر مقادیر a_i یا W_i می‌توان از رابطه‌ی (۴) زیر استفاده کرد:

$$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right) = -4.9965 + 155.58\left(\frac{a_i}{W_i}\right) - 799.94\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^2 + 2141.9\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^3 - 2709.1\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^4 + 1398.6\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^5 \quad (۴)$$

شکل ۸. قاب بارگذاری و مشخصات نمونه در آزمایش SCB در دمای پایین

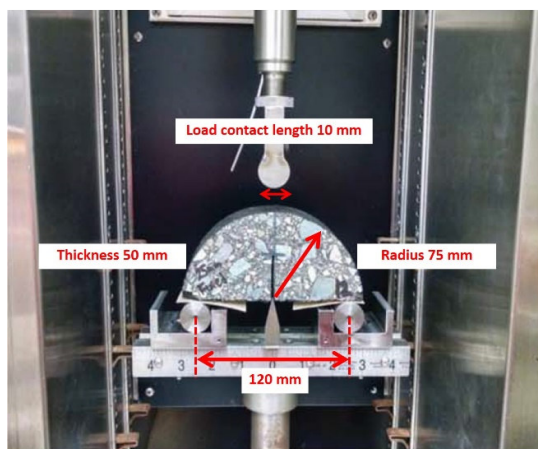


Fig. 8. Loading frame and sample properties of SCB test at low temperatures

۳-۲-۶-۲-۳- آزمایش خمش نیم دیسک در دمای میانه

آزمایش خمش نیم دیسک در دمای میانه مطابق با استاندارد ASTM-D8044 [21] انجام شد. به این منظور نمونه‌های آسفالتی پس از ساخته شدن به کمک روش ژیراتوری، بریده شده و به دیسک‌های کوچکتر با ضخامت 57 ± 1 میلیمتر تبدیل شدند. سپس دیسک‌ها به دو نیم دیسک قرینه بریده شدند و دقیقاً در وسط آن‌ها شیارهایی به عرض کمتر از ۳٫۵ میلی‌متر و با عمق‌های 25 ± 1 ، 32 ± 1 ، و 38 ± 1 میلیمتر ایجاد شد. برای هر نوع مخلوط آسفالتی و هر نوع فرآوری رطوبتی، ۴ نمونه‌ی مشابه به همین روش ساخته شد. مطابق با استاندارد نامبرده، دمای انجام آزمایش با توجه به آن‌جام آزمایش جاروب دما و تعیین حدود عملکردی قیر مورد استفاده که

۱±۵۰ میلی‌متر تبدیل شدند. تمامی نمونه‌ها باید دارای سر و ته بریده شده و صاف و بدون پیچیدگی باشند. سپس دیسک‌ها از طریق برش به دو نیم دیسک تقسیم شده و در وسط آن‌ها شیارهای به عرض 0.35 ± 0.10 میلی‌متر و با عمق 1.0 ± 0.10 میلی‌متر ایجاد شد. برای هر نوع مخلوط آسفالتی و هر نوع فرآوری رطوبتی، ۴ نمونه‌ی مشابه به همین روش ساخته شد. مطابق با استاندارد، دمای انجام آزمایش صفر درجه سانتیگراد تنظیم شد و پیش از انجام آزمایش، نمونه‌ها حداقل به مدت ۴ ساعت درون محفظه‌ی دستگاه^۱ UTM قرار گرفتند. قاب بارگذاری نمونه‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. سرعت بارگذاری 0.2 ± 0.5 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد و بیشترین نیروی وارد شده به نمونه‌ها ثبت شد. همچنین، تنش بیشینه تحمل شده توسط نمونه‌ها به کمک رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\sigma = \frac{4.263 * F_{max.i}}{D_i * t_i} \quad (۱)$$

که در آن، ضرایب به شرح زیر است:

D_i قطر نمونه‌ی i ام ($i=1,2,3,4$)، میلی‌متر

t_i ضخامت نمونه‌ی i ام ($i=1,2,3,4$)، میلی‌متر

F_{max} بیشینه نیروی وارد شده به نمونه‌ها تا لحظه‌ی شکست، نیوتن

در پایان، مقدار چقرمگی شکست در دمای پایین (K_{1c}) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$K_{1c.i} = \sigma_{max.i} * f\left(\frac{a_i}{W_i}\right) N / mm^{3/2} \quad (۲)$$

که در آن، ضرایب به شرح زیر است:

W_i ارتفاع نمونه‌ی i ام ($i=1,2,3,4$)، میلی‌متر

a_i ارتفاع نمونه‌ی i ام ($i=1,2,3,4$)، میلی‌متر

$\sigma_{max.i}$ بیشینه تنش در لحظه‌ی شکست برای نمونه i ام ($i=1,2,3,4$) نیوتن بر میلی‌متر مربع

$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right)$ ضریب شکل برای نمونه i ام ($i=1,2,3,4$) است. مطابق با روابط (۳) و (۴) برای $9 < a_i < 11$ mm and $70 < W_i < 75$ mm داریم:

$$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right) = 5.956 \quad (۳)$$

^۱ Universal Testing Machine

شکل ۹. مقدار بیشینه نیرو در آزمایش خمش نیم دیسک در دمای پایین

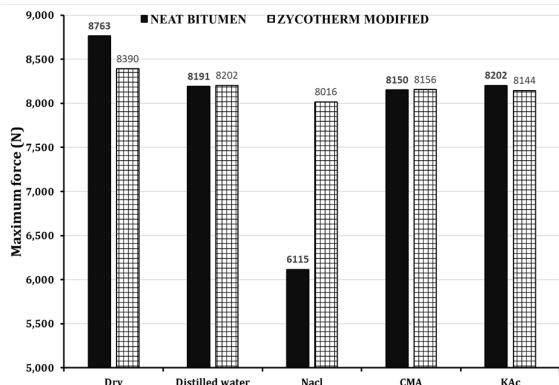


Fig. 9. Maximum force at SCB test at low temperature

شکل ۱۰. چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی در دمای پایین

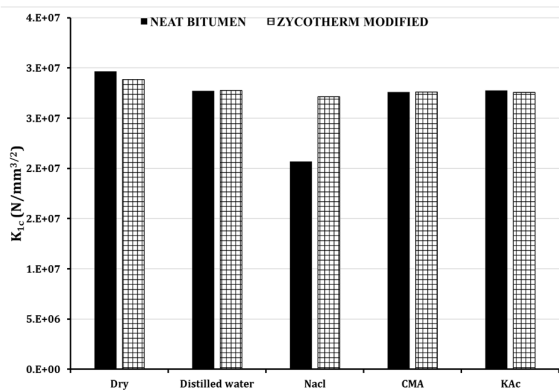


Fig. 10. Fracture toughness of asphalt mixtures at low temperature

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شبیه‌سازی شرایط محیطی در دمای پایین در مجاورت آب مقطر و تمامی یخ‌زدها باعث کاهش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی نسبت به نمونه‌ی خشک می‌شود. این کاهش در مخلوط‌های شبیه‌سازی شده در مجاورت محلول آب نمک بسیار بیشتر است به شکلی که چقرمگی شکست این مخلوط نسبت به نمونه‌ی خشک کاهش ۳۰ درصدی را تجربه کرده است. اصلاح قیر خالص با زایکوترم به خوبی توانسته است حدود ۷۰ درصد از مقاومت از دست رفته مخلوط آسفالتی در مجاورت آب نمک را بازیابی کند. مخلوط‌های آسفالتی در مجاورت آب مقطر، کلسیم نیزیم استات و پتاسیم استات، همگی در حدود ۷ درصد افت چقرمگی شکست داشتند. همچنین، قیر اصلاح شده با زایکوترم تنها باعث ایجاد کمتر از ۵ درصد تغییر در میزان چقرمگی

PG58-22 به دست آمد، ۲۲ درجه سانتی‌گراد $([58-22]/2+4=22)$ تنظیم شد و پیش از انجام آزمایش، نمونه‌ها حداقل به مدت ۲،۵ ساعت درون محفظه دستگاه UTM قرار گرفتند. پس از ثبت داده‌ها و محاسبه انرژی کرنشی تا شکست برای تمامی نمونه‌ها و به ازای تمامی طول شیارها، مقادیر انرژی کرنشی به دست آمده در برابر طول ترک ترسیم شدند و شیب منحنی که نشان‌دهنده‌ی تغییرات انرژی کرنشی در برابر طول ترک است، استخراج شد. مقدار J_c به کمک رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$J_c = \frac{-1}{b} \left(\frac{dU}{da} \right) \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن، ضرایب به شرح زیر است:

J_c نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی (کیلو ژول بر متر مربع)

b ضخامت نمونه (متر)

a عمق شیار (متر)

U انرژی کرنشی تا لحظه‌ی شکست (کیلو ژول)

$\frac{dU}{da}$ تغییرات انرژی کرنشی با توجه به تغییرات عمق شیار (کیلو ژول بر متر)

۴- نتایج و بحث

در این قسمت به بررسی و تحلیل نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های نیم دیسکی در دمای پایین و میانه پرداخته شده است. به این منظور، مقدار چقرمگی شکست در دمای پایین (K_{1c}) و پارامتر نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی (J_c) برای نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با زایکوترم و همچنین در حالت خشک و شبیه‌سازی شده در شرایط محیطی استفاده از انواع یخ‌زدها، محاسبه شده و مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۴-۱- نتایج آزمایش شکست خمش نیم دیسک در دمای پایین

شکل (۹) مقادیر بیشینه نیروی قابل تحمل توسط نمونه‌ها در دمای پایین را نشان می‌دهد. به همین ترتیب، شکل (۱۰) مقادیر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای صفر درجه سانتیگراد را به تصویر می‌کشد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد زایکوترم باعث کاهش پارامتر J_c در تمامی نمونه‌ها اعم از نمونه شاهد و همچنین در مجاورت آب مقطر و یخزداها شده است که این موضوع عموماً به دو دلیل ممکن است رخ داده باشد. دلیل اول می‌تواند ضعف در پیوستگی بین قیر و سنگدانه‌ها باشد که بررسی ادبیات فنی موضوع این موضوع را تایید نمی‌کند [12]. عامل دیگر می‌تواند نرم‌شدگی چسباننده قیری باشد. با بررسی نمودارهای نیرو-جابجایی که از انجام آزمایش بدست آمد، زایکوترم در تمامی نمونه‌ها و با طول شیارهای مختلف باعث شده است که بار بحرانی شکست در دمای میانه کمتر شده و میزان جابه‌جایی متناظر با آن نسبت به نمونه‌های شاهد بیشتر شود که نشان‌دهنده شکل‌پذیری بیشتر نمونه‌ها است. همچنین پایین‌تر بودن مقدار نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی به نوعی نمایانگر شکل‌پذیرتر بودن شکست نمونه‌هاست که دوباره فرضیه اشاره شده را تایید می‌کند. بنابراین و با توجه به ماهیت زایکوترم که حالت روغنی دارد، فرضیه دوم که زایکوترم باعث نرم‌شدگی مخلوط آسفالتی می‌شود احتمال قوی‌تری پیدا می‌کند.

بررسی شکل ظاهری نمونه‌های فرآوری نشده و فرآوری شده در آب مقطر و یخزداها نشان می‌دهد فرآوری در آب مقطر و نمک تأثیری روی ظاهر نمونه‌ها ندارد ولی فرآوری نمونه‌ها در محلول‌های استاتی سپس بروز تنش اضافی و ایجاد ترک در نمونه‌ها می‌شود. این موضوع پیش‌تر توسط بعضی از کارفرمایان و دپارتمان‌هایی که در زمستان از این نوع یخزداها استفاده کرده بودند نیز در گزارش‌های میدانی مشاهده شده است و نتایج این پژوهش را تایید می‌کند [25, 26]. این تغییرات در نمونه‌های فرآوری شده در محلول کلسیم منیزیم استات بسیار مخرب‌تر است به شکلی که در بسیاری از نواحی، علاوه بر گسست پیوند بین قیر و سنگدانه، بروز ترک و ریز ترک روی سطح نمونه‌ها با چشم غیرمسلح به وضوح قابل رویت است (اشکال ۶ و ۷). در نمونه‌های فرآوری شده در محلول پتاسیم استات مقادیر بسیار کمی قیرزدگی مشاهده شد و همچنین روی محلول پتاسیم استات پس از طی فرآیند ۴

شکست نمونه‌های خشک و شبیه‌سازی شده در مجاورت آب مقطر، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات شده است. در یک نتیجه‌گیری کلی، در خصوص تأثیر زایکوترم می‌توان عنوان کرد که این ماده چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی را در مجاورت آب مقطر و یخزداها تقریباً به میزان ثابتی حفظ می‌کند. با توجه به میزان مصرف پایین این افزودنی (۰٫۱ درصد قیر مصرفی) و با توجه به قیمت مناسب آن، در حدود ۱۰ درصد به قیمت تمام شده‌ی هر تن آسفالت گرم اضافه می‌کند که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌ها مد نظر خوانندگان و کارفرمایان قرار گیرد.

علاوه بر آن، می‌توان فهمید که تفاوت فاحشی بین چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی در دمای پایین که در مجاورت آب مقطر و کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات شبیه‌سازی رطوبتی شده‌اند وجود ندارد.

۴-۲- نتایج آزمایش شکست خمش نیم دیسک در دمای میانه
اگر چه آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی نیم دیسک در دمای پایین نتایج بسیار خوبی در خصوص مقاومت مخلوط آسفالتی در لحظه شکست ارائه می‌دهد، لیکن برای بررسی بهتر و کامل‌تر رفتار مخلوط آسفالتی در برابر رشد ترک، آزمایش خمش نیم دیسک در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد به منظور استخراج پارامتر نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی (J_c) انجام گرفت. مقادیر پارامتر نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی (J_c) در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

شکل ۱۱. مقادیر نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی (J_c)

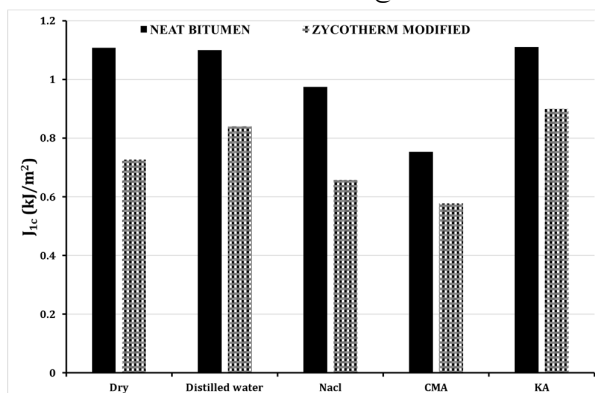


Fig. 11. Critical energy release rate (J_c) values

روزه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در حمام بن ماری، مقادیر کمی ذرات معلق قیر به صورت شناور وجود داشت که می‌تواند حاکی از امولسیون‌شدگی خود به خودی^۱ قیر در مجاورت این ماده یخ‌زدا باشد.

تحلیل نتایج J_c نشان می‌دهد، شبیه‌سازی شرایط محیطی در مجاورت آب نمک و کلسیم منیزیم استات به ترتیب باعث کاهش ۱۲ و ۳۲ درصدی این پارامتر نسبت به نمونه‌ی مشابه بدون طی فرآیند شبیه‌سازی محیطی (در شرایط خشک) شده است. همچنین قرار گرفتن نمونه‌ها در مجاورت آب مقطر و محلول پتاسیم استات، تقریباً تاثیری روی J_c آن‌ها ندارد.

علاوه بر آن، تحلیل نتایج J_c نشان می‌دهد زایکوترم باعث کاهش نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی در تمامی نمونه‌ها می‌شود. این کاهش در نمونه‌های خشک (بدون فرآوری) و همچنین شبیه‌سازی شده در مجاورت آب نمک بیشتر از سایر نمونه‌ها و به ترتیب برابر ۳۴ و ۳۲ درصد نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده با قیر خالص است. همچنین، نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده با زایکوترم و در مجاورت کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات نیز به ترتیب ۲۳ و ۱۹ درصد کاهش در مقدار J_c را نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده با قیر خالص تجربه کردند.

مطابق با توصیه استاندارد ASTM-D8044 [21]، حداقل مقدار J_c برای تضمین کفایت مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی بین ۰,۵ تا ۰,۶۵ kJ/m^2 توصیه شده است که تمامی نمونه‌های آسفالتی اعم از تهیه شده با قیر خالص و اصلاح شده با زایکوترم، و همچنین فرآوری شده در مجاورت تمامی یخ‌زداها، مقدار توصیه شده توسط این استاندارد را برآورده می‌کنند.

- شبیه‌سازی شرایط محیطی در دمای پایین در مجاورت آب مقطر و تمامی یخ‌زداها باعث کاهش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی نسبت به نمونه خشک می‌شود. اگرچه تفاوت معناداری بین چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی در دمای پایین که در مجاورت آب مقطر و کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات شبیه‌سازی رطوبتی شده‌اند وجود ندارد، اما این کاهش در مخلوط‌های شبیه‌سازی شده در مجاورت محلول آب نمک بسیار بیشتر است به شکلی که چقرمگی شکست این مخلوط نسبت به نمونه خشک کاهش ۳۰ درصدی را تجربه کرده است.
- زایکوترم چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی در دمای پایین را در مجاورت آب مقطر و یخ‌زداها تقریباً به میزان ثابتی حفظ می‌کند و حدود ۷۰ درصد از مقاومت از دست رفته آن را به دلیل مجاورت در محلول آب نمک بازیابی می‌کند.
- زایکوترم باعث نرم‌شدگی چسباننده قیری و همچنین کاهش نیروی بحرانی شکست در دمای میانه می‌شود.
- زایکوترم باعث کاهش پارامتر J_c در تمامی نمونه‌ها اعم از نمونه‌های فرآوری رطوبتی نشده و فرآوری شده در آب مقطر و یخ‌زداها می‌شود.
- کلسیم منیزیم استات باعث ایجاد تنش اضافی و ترک خوردگی در نمونه‌های آسفالتی شده و مقاومت آن‌ها

تحلیل نتایج J_c نشان می‌دهد، شبیه‌سازی شرایط محیطی در مجاورت آب نمک و کلسیم منیزیم استات به ترتیب باعث کاهش ۱۲ و ۳۲ درصدی این پارامتر نسبت به نمونه‌ی مشابه بدون طی فرآیند شبیه‌سازی محیطی (در شرایط خشک) شده است. همچنین قرار گرفتن نمونه‌ها در مجاورت آب مقطر و محلول پتاسیم استات، تقریباً تاثیری روی J_c آن‌ها ندارد.

علاوه بر آن، تحلیل نتایج J_c نشان می‌دهد زایکوترم باعث کاهش نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی در تمامی نمونه‌ها می‌شود. این کاهش در نمونه‌های خشک (بدون فرآوری) و همچنین شبیه‌سازی شده در مجاورت آب نمک بیشتر از سایر نمونه‌ها و به ترتیب برابر ۳۴ و ۳۲ درصد نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده با قیر خالص است. همچنین، نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده با زایکوترم و در مجاورت کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات نیز به ترتیب ۲۳ و ۱۹ درصد کاهش در مقدار J_c را نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده با قیر خالص تجربه کردند.

مطابق با توصیه استاندارد ASTM-D8044 [21]، حداقل مقدار J_c برای تضمین کفایت مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی بین ۰,۵ تا ۰,۶۵ kJ/m^2 توصیه شده است که تمامی نمونه‌های آسفالتی اعم از تهیه شده با قیر خالص و اصلاح شده با زایکوترم، و همچنین فرآوری شده در مجاورت تمامی یخ‌زداها، مقدار توصیه شده توسط این استاندارد را برآورده می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

برای بررسی تاثیر زایکوترم بر رفتار شکست مخلوط آسفالتی تحت تاثیر رطوبت و مواد یخ‌زدا، پس از تعیین درصد قیر بهینه به کمک روش مارشال [19]، نمونه‌های مورد نظر به کمک

- Ontario, ON, Canada, 2000.
- [4] S. W. Goh, M. Akin, Z. You, X. %J C. Shi, and B. Materials, "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro-or nano-modified asphalt mixture," vol. 25, no. 1, pp. 195–200, 2011.
- [5] STANDARD by American Association of State and Highway Transportation Officials, *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. 2021.
- [6] Z. Yang, Y. Zhang, and X. Shi, "Impact of nanoclay and carbon microfiber in combating the deterioration of asphalt concrete by non-chloride deicers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, pp. 514–525, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.059.
- [7] A. Rahimi Pardanjanani, "Effect of anti-icers and deicers on asphalt pavement," Shahid Chamran Ahvaz, 1394. (In Persian)
- [8] M. A. Azadgoleh, A. Modarres, and P. Ayar, "Effect of polymer modified bitumen emulsion production method on the durability of recycled asphalt mixture in the presence of deicing agents," *Constr. Build. Mater.*, vol. 307, p. 124958, 2021.
- [9] M. Mansourian, Ahmad. Ghadim, Aghil. Ghadim, Reza. Rouhani, "Investigation on the effect of deicers on moisture susceptibility and fracture resistance of asphalt mixtures at low temperature," *J. Transp. Res.*, vol. 15, no. 57, pp. 285–297, 1397. (In Persian)
- [10] J. A. DiVito and G. R. Morris, *Silane pretreatment of mineral aggregate to prevent stripping in flexible pavements*, no. 843. 1982.
- [11] H. Ziari, P. Mirzababaei, and R. Babagoli, "Properties of bituminous mixtures modified with a nano-organosilane additive," *Pet. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 4, 2016, doi: 10.1080/10916466.2015.1136948.
- [12] P. Mirzababaei, F. Moghadas Nejad, and K. Naderi, "Effect of liquid silane-based anti-stripping additives on rheological properties of asphalt binder and hot mix asphalt moisture sensitivity," *Road Mater. Pavement Des.*, 2018, doi: 10.1080/14680629.2018.1507920.
- [13] P. Mirzababaei, "Effect of zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations," *Constr. Build. Mater.*, vol. 116, pp. 403–412, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.143.
- [14] F. M. Nejad, A. R. Azarhoosh, G. H. Hamedi, and M. J. Azarhoosh, "Influence of using
- را در برابر شکست در دمای میانه کاهش می دهد.
- همچنین بار بحرانی شکست نمونه های فرآوری شده در این یخزدا، به ازای تمامی طول ترک ها کمتر از سایر نمونه های مشابه در مجاورت سایر یخزداها است.
- شبیه سازی شرایط محیطی در محلول آب نمک، باعث کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای پایین و میانه می شود.
- پتاسیم استات تاثیری روی مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در دمای پایین و میانه ندارد.
- بر اساس نتایج به دست آمده، می توان اظهار داشت که یخزداها، تاثیر قابل ملاحظه ای بر عملکرد مکانیک شکست مخلوط آسفالتی دارند و انتخاب نوع یخزدا و یا نوع افزودنی مصرفی برای اصلاح قیر، می بایست با دقت بیشتری انجام گیرد. همچنین مقایسه نتایج نشان می دهد که نتایج به دست آمده از این پژوهش در خصوص تاثیر مخرب نمک و کلسیم منیزیم استات بر رفتار عملکردی مخلوط آسفالتی با پژوهش های مشابه دیگر همخوانی دارد.

۶- تشکر و قدردانی

از همکاری شرکت های قیران پخش، دژپا، مهندسین مشاور ساخت آزما، اکسیر شرق مشهد، و سینکو پلاس که در این کار پژوهشی همراهی نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می شود.

۷- منابع و مراجع

- [1] F. Shahi, B. Kazemi, and H. Afrand, "Investigating the effects of salt and sand use on the surface of roads, highways and road safety factors," *Reinf. Rehabil. Ind.*, vol. 2, no. 6, pp. 51–57, 1392. (In Persian)
- [2] B. Amini and R. Hazrati, "Functional comparison of Calcium Magnesium Acetate with sand and salt as a deicer in winter," 1388. (In Persian)
- [3] Y. Hassan, A. O. Abd El Halim, and A. G. Razaqpur, "Laboratory Evaluation and Assessment of the Effect of Runway Deicers on the Mechanical Properties of Asphalt Concrete Mixes Subjected to Freeze-Thaw Cycles," *Saf. Secur. Civ. Aviat. Aerodr. Safety, Tech. Eval. Eng. Div. Transp. Canada*,

icing agents deteriorating airfield asphalt concrete," *Asph. Paving Technol.*, vol. 77, p. 773, 2008.

nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 384–388, 2012.

- [15] I. Ibrahim, H. Nur, and A. Mehan, "The Effect of Nano-Materials on Hot Mixture," *Open J. Civ. Eng.*, vol. 5, no. December, pp. 419–427, 2015.
- [16] M. Ameri, M. Vamegh, S. F. Chavoshian Naeni, and M. Molayem, "Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik, Zycotherm and hydrated lime," *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 958–965, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.113.
- [17] A. A. Kordani, S. H. Seifi, H. G. Tehrani, and B. Shirini, "The effect of different deicing solutions on the moisture susceptibility of asphalt mixture," *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 6, pp. 1–14, 2021.
- [18] P. Mirzababaei, "Effect of zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations," *Constr. Build. Mater.*, vol. 116, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.143.
- [19] A. institue, *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*. .
- [20] "BS EN 12697-44 : 2010 BSI Standards Publication Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt Part 44 : Crack propagation by semi-circular bending test," 2010.
- [21] ASTM D8044, "Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures." .
- [22] V. Alatyppö and J. Valtonen, "Experiences on the effects of de-icing chemicals on bituminous airfield runways in Finland," 2007.
- [23] C. L. M. Qing Lu, John T. Harvey, "Investigation of Conditions for Moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods: Summary Report," 2007. doi: 10.1525/curh.2007.106.702.352.
- [24] D. Christensen, J. Mallela, D. Hein, E. Kalberer, M. Farrar, and R. Bonaquist, "Effect of deicing and anti-icing chemicals on HMA airfield runways," 2010.
- [25] F. Nilsson, "Durability problems on Nordic airfields-the influence of deicing agents on asphalt concrete," 2003.
- [26] T. Pan, X. He, and X. Shi, "Laboratory investigation of acetate-based deicing/anti-

Investigation on the effect of Zycotherm on fracture behavior of asphalt mixtures in the presence of moisture and deicers

Peyman Mirzababaei¹, Fereidoon Moghadas Nejad^{2*}, and Pouria Hajikarimi³

1. Ph.D. candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology
2. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran
3. Assistant professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran,

moghadas@aut.ac.ir

Abstract

Road pavements are one of the most important assets of any country, and tremendous amounts of budgets are allocated for their maintenance every year. Unexpected distresses in asphalt pavement cause many financial losses. Winter maintenance of roads and infrastructures and the study of the effects of anti-icers and deicers on the asphalt pavements have always been of interest to researchers, departments, and agencies in the field of roads and transportation. As a contribution to this task, the present study was conducted to evaluate the effect of Zycotherm on the fracture behavior of asphalt mixtures in the presence of moisture and deicers. In order to achieve the research objectives, PG58-22 bitumen and siliceous materials were used to prepare the asphalt mixture and also Zycotherm was used to modify the asphalt binder. Data were collected by testing on laboratory samples. The asphalt mixture samples were conditioned in the presence of distilled water and solutions of brine, calcium magnesium acetate, and potassium acetate in their normal concentration for 96 hours at 60°C. Then, the fracture toughness of the specimens at low temperatures (K_{Ic}) and the critical strain energy release rate (J_c) at intermediate temperatures were measured by performing a semi-circular bending test (SCB). The results showed that simulation of low-temperature environmental conditions in the vicinity of distilled water and all the deicers reduces the fracture toughness of asphalt mixtures compared to the dry sample. Brine solution has the most negative effect among all the deicers and reduces the K_{Ic} parameter by approximately 30%. On the other hand, Zycotherm maintains the fracture toughness of the asphalt mixture at low temperatures in the vicinity of distilled water and deicers at an almost constant level and recovers about 70% of the lost fracture strength of the sample conditioned in the brine solution. The effect of Zycotherm at intermediate temperature is different and causes the softening of bitumen and the reduction of the critical fracture force and the reduction of the critical strain energy release rate. This reduction is 34% and 32% for the dry sample and the specimen in the presence of brine solution, and 23% and 12% for the samples in the presence of calcium magnesium acetate and potassium acetate, respectively, compared to the sample made of neat bitumen. Also, samples in the vicinity of distilled water and potassium acetate solution showed no significant change in their critical strain energy release rate compared to samples in dry conditions. Visual inspection also revealed that calcium magnesium acetate causes additional stress and cracking in the samples. In a general summary and based on the obtained results, Zycotherm has a positive effect on the fracture toughness of the asphalt mixture at low temperatures but reduces the J_c parameter at intermediate temperatures. All specimens have the minimum critical strain energy release rate recommended by ASTM D-8044 at intermediate temperatures. Potassium acetate has no effect on the fracture toughness of asphalt mixtures at low and medium temperatures and can be an appropriate alternative in comparison with other deicers in winter road maintenance.

Key words: Deicer, SCB, Fracture toughness, Critical strain energy release rate, Zycotherm