

ارزیابی تاثیر مواد یخزدا بر حساسیت رطوبتی و مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی در دمای پایین

احمد منصوریان^{*}، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

عقیل قدیم، دانش آموخته کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

رضا قدیم، دانش آموخته کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

مهرا روحانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، واحد تحقیق و توسعه، شرکت سازه‌های یادنگار (سینکو)، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mansourian@bhrc.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۷/۰۴ - پذیرش: ۹۷/۰۱۱/۰۵

صفحه ۲۸۵-۲۹۷

چکیده

انتخاب ماده مناسب برای یخزدایی رویه راه‌ها در فصل زمستان، همواره یکی از موضوعات مورد توجه برای متولیان نگهداری راه‌ها بوده است. تحقیقات انجام شده درخصوص اثر مواد یخزدا/ضد یخ بر روسازی راه‌ها نشان می‌دهد عمده پژوهش‌ها در این حوزه بیشتر مربوط به بررسی اثر این مواد روی بتن بوده و تعداد اندکی از این تحقیقات به موضوع آسفالت پرداخته‌اند و در این تعداد اندک نیز عموماً موضوع معطوف به بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بوده است. در حالی که به نظر می‌رسد مواد یخزدا/ضد یخ می‌توانند سایر عملکردهای مخلوط‌های آسفالتی مانند مقاومت آنها در دماهای پایین را نیز تحت تاثیر قرار دهند. به همین منظور در تحقیق حاضر ابتدا نمونه‌های آسفالتی تهیه شده به روش تراکم چرخشی، به نمونه‌های با مقطع نیم دایره برش داده شدند، سپس این نمونه‌ها تحت تاثیر آب و هر یک محلول‌های سدیم کلراید (NaCl)، کلسیم کلراید (CaCl₂)، کلسیم منیزیم استات (CMA) و پتاسیم استات (KA)، قرار گرفتند. در ادامه با انجام آزمایش خمش روی نمونه‌های نیم دیسکی (SCB)، چقرمگی شکست آنها در سه دمای ۱۰، ۰ و ۲۰- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد، متناسب با دمای بررسی (۱۰، ۰ یا ۲۰- درجه سانتی‌گراد)، اثر مواد یخزدا روی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند متفاوت باشد، به طوری که در دمای صفر درجه سانتی‌گراد، اثر مخرب مواد یخزدا روی چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی مشاهده نگردید. در صورتی که در دماهای ۱۰- درجه سانتی‌گراد یا ۲۰- درجه سانتی‌گراد برخی از این مواد منجر به کاهش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی شدند. همچنین نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان داد مواد مذکور اثر مخربی روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی ندارند.

واژه‌های کلیدی: آسفالت، چقرمگی شکست، دمای پایین، یخزدایی

۱- مقدمه

بهبود اصطکاک سطح و برف رویی به تنهایی (Blackburn, 2004) مواد ضد یخ از پوشیده شدن سطح توسط برف و تبدیل آن به یخ جلوگیری کرده و در واقع یک روش پیشگیرانه در عملیات نگهداری زمستانی رویه راه‌ها محسوب می‌گردد. مواد ضد یخ را می‌توان قبل از شروع بارش یا در اوایل بارش استفاده کرد. در صورتی که استفاده از مواد یخزدا باعث می‌شود به طریق شیمیایی یا مکانیکی یا ترکیبی از آنها،

یخزدگی رویه راه از پدیده‌های طبیعی است که با از بین بردن تماس مورد نیاز بین لاستیک چرخ‌های وسیله نقلیه با رویه راه موجب کاهش شدید اصطکاک شده و کنترل وسیله نقلیه را با مشکل مواجه می‌کند. به طور کلی روش‌های مربوط به نگهداری زمستانی رویه راه‌ها را می‌توان به ۴ گروه کلی تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از: استفاده از مواد ضد یخ^۱ (روش پیشگیرانه)؛ استفاده از مواد یخزدا^۲، برف‌روبی^۳ به همراه بهبود

برف متراکم شده یا یخ که قبلاً به سطح روسازی چسبیده، از سطح روسازی برطرف شود. مواد شیمیایی مورد استفاده در عملیات نگهداری زمستانی رویه راه‌ها (اعم از یخ‌زدا یا ضدیخ) به زیرگروه‌های نمک‌های کلرایدی، مواد ارگانیک و مواد با پایه نیتروژن تقسیم‌بندی می‌شوند (جدول ۱) (NCHRP Report 577, 2007).

جدول ۱. انواع مواد شیمیایی یخ‌زدا/ضدیخ (NCHRP Report 577, 2007)

عناصر اصلی	ماده ضدیخ / یخ‌زدا	گروه
Cl و Na	سدیم کلراید (NaCl)	نمک‌های کلرایدی
Cl و Ca	کلسیم کلراید (CaCl ₂)	
Cl و Mg	منیزیم کلراید (MgCl ₂)	
Ca, Mg, C ₂ H ₃ O ₂	کلسیم منیزیم استات (CMA)	مواد ارگانیک
K, C ₂ H ₃ O ₂	پتاسیم استات (KA)	
مانند قندهای مرکب	فراورده‌های فرعی کشاورزی	
مانند گلیکول و متانول	مواد ارگانیک فرآوری شده	
اوره (CO(NH ₂) ₂) و آمونیاک (NH ₃)	اوره	مواد با پایه نیتروژن

بررسی‌ها نشان می‌دهد، نمک‌های کلرایدی به‌خصوص کلراید سدیم، بیشترین حجم مواد یخ‌زدای مورد استفاده در راه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد که از جمله دلایل مهم این امر، فراوانی و قیمت نسبتاً ارزان این ماده است. در عملیات نگهداری زمستانی روسازی‌های موجود در محوطه فرودگاه‌ها نیز به طور سنتی از اوره یا گلیکول استفاده می‌شود، با این وجود به علت اثرات زیست‌محیطی آنها امروزه کمتر مورد توجه واقع شده‌اند و به جای آنها بیشتر از مواد یخ‌زدایی که معمولاً دارای پتاسیم استات (KAc)، سدیم استات (NaAc)، سدیم فرمیت (NaF) یا پتاسیم فرمیت (KF) است، استفاده می‌گردد (Shi, 2008). نمک‌های با پایه کلراید بیشترین خوردگی را در اجزای وسایل نقلیه موتوری و زیرساخت‌های راه ایجاد می‌کنند، ولی میزان خوردگی آنها متفاوت است. بیشترین پتاسیل خوردگی برای کلرایدهای جاذب رطوبت (منیزیم کلراید و کلسیم کلراید) وجود دارد. علت این موضوع آن است که کلرایدهای جاذب رطوبت شرایط را برای خوردگی در مدت بیشتری فراهم می‌کنند. بررسی‌ها نشان می‌دهد وجود باران‌های اسیدی به همراه نمک‌های کلرایدی، اثر فزاینده در نرخ خوردگی ایجاد می‌کنند (McCrum, 1989). یخ‌زدهای شیمیایی با پایه استات و یخ‌زدهای ارگانیک دیگر، نسبت به یخ‌زدهای شیمیایی با پایه کلراید دارای پتانسیل خوردگی کمتری هستند (NCHRP Report 577, 2007). اثر مخرب مواد ضدیخ و یخ‌زدا روی آسفالت کمتر از بتن است (Shi et

al., 2009). علت این موضوع آن است که قیر مقاومت شیمیایی بیشتری در برابر یخ‌زدهای با پایه کلرایدی از خود نشان می‌دهد. یکی از جامع‌ترین تحقیقات درخصوص اثر مواد ضدیخ و یخ‌زدا روی آسفالت، توسط Christensen و همکارانش (۲۰۱۰) در قالب پروژه 5-3 AAPT انجام شده است. مطابق بررسی انجام شده بیشترین موادی که در نگهداری زمستانی رویه‌های آسفالتی در فرودگاه‌ها استفاده می‌شود، عبارتند از: پتاسیم استات، سدیم استات، اوره، اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول (Christensen et al., 2010). براساس این مطالعات، عواملی مانند نوع سنگ‌دانه، ساختمان شیمیایی قیر، اصلاح قیر، نفوذپذیری مخلوط آسفالتی، نوع یخ‌زدا و دمای روسازی می‌تواند خرابی ناشی از کاربرد ضدیخ و یخ‌زدا در روسازی‌های آسفالتی را تحت تأثیر قرار دهند. تحقیقات انجام گرفته دلالت بر آن دارد که خرابی ناشی از کاربرد مواد ضدیخ و یخ‌زدا فقط در دماهای نسبتاً زیاد (حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر) اتفاق می‌افتد (Christensen et al., 2010). Goh و همکارانش (۲۰۱۱). به منظور بررسی اثر مواد محلول یخ‌زدا روی مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو مواد، مخلوط‌های آسفالتی مورد نظر را در معرض آب و محلول‌های یخ‌زدا از نوع سدیم کلراید، منیزیم کلراید و کلسیم کلراید قرار دادند. آنها پس از انجام آزمایش حساسیت رطوبتی به روش AASHTO T283، نتیجه گرفتند که اضافه کردن نانو رس و الیاف ریز کربنی در بیشتر موارد

بررسی‌ها نشان می‌دهد، نمک‌های کلرایدی به‌خصوص کلراید سدیم، بیشترین حجم مواد یخ‌زدای مورد استفاده در راه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد که از جمله دلایل مهم این امر، فراوانی و قیمت نسبتاً ارزان این ماده است. در عملیات نگهداری زمستانی روسازی‌های موجود در محوطه فرودگاه‌ها نیز به طور سنتی از اوره یا گلیکول استفاده می‌شود، با این وجود به علت اثرات زیست‌محیطی آنها امروزه کمتر مورد توجه واقع شده‌اند و به جای آنها بیشتر از مواد یخ‌زدایی که معمولاً دارای پتاسیم استات (KAc)، سدیم استات (NaAc)، سدیم فرمیت (NaF) یا پتاسیم فرمیت (KF) است، استفاده می‌گردد (Shi, 2008). نمک‌های با پایه کلراید بیشترین خوردگی را در اجزای وسایل نقلیه موتوری و زیرساخت‌های راه ایجاد می‌کنند، ولی میزان خوردگی آنها متفاوت است. بیشترین پتاسیل خوردگی برای کلرایدهای جاذب رطوبت (منیزیم کلراید و کلسیم کلراید) وجود دارد. علت این موضوع آن است که کلرایدهای جاذب رطوبت شرایط را برای خوردگی در مدت بیشتری فراهم می‌کنند. بررسی‌ها نشان می‌دهد وجود باران‌های اسیدی به همراه نمک‌های کلرایدی، اثر فزاینده در نرخ خوردگی ایجاد می‌کنند (McCrum, 1989). یخ‌زدهای شیمیایی با پایه استات و یخ‌زدهای ارگانیک دیگر، نسبت به یخ‌زدهای شیمیایی با پایه کلراید دارای پتانسیل خوردگی کمتری هستند (NCHRP Report 577, 2007). اثر مخرب مواد ضدیخ و یخ‌زدا روی آسفالت کمتر از بتن است (Shi et

یخزدایی با پایه کلراید می‌شوند (Yang et al., 2018). بررسی تحقیقات انجام شده درخصوص اثر مواد یخزدا/ضد یخ بر روسازی راه‌ها نشان می‌دهد تحقیقات در این حوزه بیشتر معطوف به اثر این مواد روی بتن بوده و تعداد اندکی از این تحقیقات به بررسی این مواد روی آسفالت پرداخته‌اند و در این تعداد اندک نیز عموماً بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مد نظر قرار گرفته است. در حالی که به نظر می‌رسد مواد یخزدا/ضد یخ می‌توانند سایر عملکردهای مخلوط‌های آسفالتی مانند مقاومت آنها در دماهای پایین را نیز تحت تاثیر قرار دهند. به همین منظور در تحقیق حاضر علاوه بر بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، مقاومت نمونه‌های آسفالتی در دماهای پایین و در معرض یخزداها با پایه کلراید (سدیم کلراید و کلسیم کلراید) و یخزداها با پایه ارگانیک (کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات) نیز بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- قیر

در این تحقیق به منظور تهیه مخلوط‌های آسفالتی از قیر خالص ۱۰۰-۸۵ (معادل PG58-22) کارخانه قیر آکام استفاده شد. علت استفاده از این نوع قیر آن بود که تحقیقات پیشین نشان می‌داد مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیرهای نرم‌تر حساسیت بیشتری در حضور مواد یخزدا دارند (Christensen et al., 2010; Leahy et al., 2014). برخی از خصوصیات قیر مورد استفاده در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. خصوصیات قیر مورد استفاده برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی

نتیجه آزمایش	روش انجام آزمایش	مشخصه
۹۰	ASTM D5	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)
۳۱۰	ASTM D92	درجه اشتعال (سانتی‌گراد)
>۱۰۰	ASTM D113	قابلیت کشش در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی‌متر)
۱۰۰	ASTM D2042	درجه خلوص با تری کلرواتیلن (درصد)
۴۹/۴	ASTM D36	نقطه نرمی قیر (درجه سانتی‌گراد)
۰/۷۴	ASTM D1754	خصوصیات پس از آزمایش لعاب نازک قیر (۱۶۳ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۵ ساعت): تغییر جرم - درصد
-۰/۶۷	-	شاخص درجه نفوذ (PI)

موجب بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (Goh et al., 2011). در تحقیق دیگری Stark و Lofgren با انجام آزمایش‌های مختلف روی آسفالت در معرض آب و اسید فرمیک، پتاسیم استات و پتاسیم فرمیت نشان دادند که تمام این مواد تا حدودی باعث کاهش سفتی در دمای پایین می‌شوند (Starck and Löfgren, 2007). Hassan و همکارانش (۲۰۰۲) نیز به مقایسه اثرات مخرب پتاسیم استات و سدیم فرمیت با اوره و نمک‌های مورد استفاده برای یخزدایی جاده روی سنگ‌دانه‌ها پرداختند. آنها پس از انجام آزمایش یخبندان-ذوب یخ، آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و آزمایش درجه نفوذ (روی قیر بازیابی شده از آسفالت)، اظهار داشتند که شدت خرابی در سیکل‌های یخبندان-ذوب یخ در آب کمتر از هنگامی است که نمونه‌های آسفالتی در معرض مواد یخزدا قرار بگیرند. با این حال پتاسیم استات، سدیم فرمیت یا حتی نمک‌های مورد استفاده برای یخزدایی جاده‌ها اثر مخرب معنی‌داری روی مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی ندارند (Hassan et al., 2002). Yang و همکارانش (۲۰۱۸) به منظور مطالعه اثرات الیاف ریز کربنی و نانو رس در کاهش اثرات مواد یخزدا (دیپتاسیم ساسینات، پتاسیم فرمیت، پتاسیم پروپیونات و پتاسیم استات) روی آسفالت، آزمایش آب جوشان و آزمایش زاویه تماس را انجام دادند و اظهار داشتند که نانو رس حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی که در معرض محلول‌های یخزدا هستند را بهبود می‌بخشد ولی الیاف ریز کربنی باعث افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند. این نتیجه‌گیری برخلاف تحقیقات قبلی بود که نشان می‌داد الیاف ریز کربنی باعث بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در معرض مواد

۲-۲- سنگدانه‌ها

در این تحقیق برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی، از سنگدانه‌های از نوع آهکی دولومیتی واقع در منطقه اسبچران (شرق تهران) استفاده شد. جدول (۳) خصوصیات این مصالح را نشان می‌دهد. دانه‌بندی سنگدانه‌ها نیز مطابق دانه‌بندی شماره شماره ۴ جدول (۹-۱) آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴) انتخاب گردید. این دانه‌بندی در جدول (۴) نشان داده شده است.

۲-۳- محلول‌های یخزدا/ضد یخ

برای تهیه محلول‌های یخزدا/ضد یخ با غلظت مندرج در جدول (۵)، ابتدا هر یک از این مواد به نسبت مناسب به آب اضافه شد و توسط همزن مکانیکی محلول یکنواخت تهیه گردید. غلظت‌های انتخاب شده برای هر یک از مواد یخزدا/ضد یخ براساس روال‌های موجود در فعالیت‌های مربوط به نگهداری زمستانی راه‌ها می‌باشد.

جدول ۳. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی

مشخصه	روش انجام آزمایش	نتیجه آزمایش
وزن مخصوص	ASTM C-127	۲/۴۱
سایش به روش لوس‌آنجلس (درصد)	AASHTO T-96	۲۳
جذب آب درشت‌دانه (درصد)	AASHTO T-85	۱/۵
جذب آب ریزدانه (درصد)	AASHTO T-84	۱
درصد شکستگی در یک وجه	ASTM D5821	۹۸
درصد شکستگی در دو وجه	ASTM D5821	۹۰

جدول ۴. دانه‌بندی سنگدانه‌های مخلوط‌های آسفالتی

اندازه الک	حدود دانه‌بندی جدول (۹-۱) نشریه شماره ۲۳۴ (درصد عبوری)	دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی (درصد عبوری)
۱۹ میلی‌متر ($\frac{3}{4}$ اینچ)	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵ میلی‌متر ($\frac{1}{2}$ اینچ)	۹۰ - ۱۰۰	۹۵
۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)	۷۴ - ۹۴	۵۸
۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)	۲۸ - ۵۸	۳۵
۰/۳ میلی‌متر (شماره ۵۰)	۵ - ۲۱	۱۰
۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)	۲ - ۱۰	۴/۷

جدول ۵. محلول‌های یخزدا/ضد یخ مورد استفاده در این تحقیق

غلظت (درصد)	نام ماده یخزدا
۲۵	کلسیم منیزیم استات (CMA)
۵۰	پتاسیم استات (KA)
۲۳	سدیم کلراید (NaCl)
۳۲	کلسیم کلراید (CaCl ₂)

ادامه به مدت ۲ ساعت درون حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. در ادامه مقاومت کششی غیر مستقیم آنها اندازه‌گیری و متوسط مقاومت کششی غیر مستقیم سه نمونه به عنوان مقاومت کششی غیر مستقیم عمل‌آوری شده در آن محلول در نظر گرفته شد. براساس مطالعات قبلی (Christensen et al., 2010) در تحقیق حاضر، نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم هر یک از نمونه‌ها در حالت عمل‌آوری در محلول‌های یخ‌زدا به مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در حالت عمل‌آوری در آب، به عنوان معیار ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی متراکم انتخاب شد (رابطه ۱).

$$TSR^* = \frac{IDT_{con}}{IDT_{water}}$$

آب است. به منظور جلوگیری از تبخیر آب موجود در محلول‌های یخ‌زدا/ضدیخ در مدت عمل‌آوری نمونه‌ها، ظروف حاوی نمونه‌ها سلفون پیچ شدند (شکل ۱).



شکل ۱. پوشاندن ظروف پلاستیکی حاوی محلول‌های یخ‌زدا/ضدیخ برای جلوگیری از تبخیر آب

حفظ کرده‌اند، سنجیده می‌شود. در این تحقیق قبل از انجام آزمایش، به منظور عمل‌آوری مخلوط‌های آسفالتی، ابتدا مخلوط‌های آسفالتی غیر متراکم در هر یک از محلول‌های مورد نظر به مدت ۴ روز و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. برای جلوگیری از تبخیر آب موجود در محلول‌های یخ‌زدا، سطح ظرف‌های حاوی مخلوط‌های آسفالتی غیر متراکم با سلفون پوشانده شد. پس از عمل‌آوری مخلوط‌های آسفالتی غیر متراکم، آزمایش آب جوشان مطابق استاندارد ASTM D3625 روی آنها انجام گرفت.

۲-۴- آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های

آسفالتی

با توجه به اینکه مطالعات معتبر قبلی (Christensen et al., 2010) نشان می‌داد ترکیب شرایط در معرض قرارگیری محلول‌های یخ‌زدا/ضدیخ و دمای حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند برای بررسی نحوه اضمحلال مخلوط آسفالتی در برابر مواد یخ‌زدا/ضدیخ مورد استفاده قرار گیرد، در تحقیق حاضر نیز نمونه‌های آسفالتی متراکم شده به روش چرخشی با ۷ درصد فضای خالی و ۴/۵ درصد قیر (درصد قیر بهینه)، به مدت ۴ روز در آب و هر یک از محلول‌های یخ‌زدا/ضدیخ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. سپس این نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و در

(۱)

که در آن TSR^* ، نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم، IDT_{con} مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی عمل‌آوری شده در محلول یخ‌زدا/ضدیخ و IDT_{water} مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده در



در راستای تکمیل بررسی‌های انجام شده درخصوص حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش حساسیت رطوبتی به روش آب جوشان نیز مطابق استاندارد ASTM D3625 انجام شد. این آزمون، یک آزمون بصری است و برای سنجش تأثیر رطوبت بر مخلوط‌های آسفالتی گرم ابداع شده است. در این آزمون، مخلوط‌های آسفالتی گرم متراکم نشده به آب در حال جوشیدن افزوده می‌شوند و برای مدت زمان ده دقیقه در آب جوش باقی می‌مانند. آسیب رطوبتی به وسیله مشاهده بصری مخلوط‌های آسفالتی متراکم نشده و به صورت درصد سطحی از سنگدانه‌ها که پوشش قیری خود را

۲-۵- آزمایش تعیین مقاومت شکست (چقرمگی شکست) نمونه‌های آسفالتی

شدند، سپس با برش نمونه‌های استوانه‌ای، نمونه‌های با مقطع نیم‌دایره (نیم‌دیسکی) به ضخامت ۲۷ میلی‌متر تهیه گردید. در ادامه ترک مصنوعی (شکاف) به طول ۲۰ میلی‌متر در آنها ایجاد شد. برای انجام آزمایش شکست نمونه نیم‌دیسک در بارگذاری خمش سه نقطه‌ای، همانند آزمایش بررسی حساسیت رطوبتی، ابتدا هر یک از نمونه‌ها به مدت ۴ روز در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آب و در هر یک از محلول‌های یخ‌زدا قرار گرفتند، در ادامه ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و سپس برای انجام آزمایش در هر یک از دماهای ۰، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد، به مدت ۲۴ ساعت در دماهای گفته شده قرار داده شدند. این آزمایش با دستگاه UTM و با سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه انجام گرفت (شکل ۲). فرآیند کلی تهیه نمونه‌های SCB و آزمایش تعیین نیروی شکست نمونه‌های آسفالتی در شکل (۳) نشان داده شده است. تهیه نمونه‌های SCB و آزمایش شکست در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی انجام شد. پس از اندازه‌گیری مقدار بار متناظر در لحظه شکست (حداکثر بار تحمل شده)، مقدار حداکثر تنش در لحظه شکست از رابطه (۲) و مقدار چقرمگی شکست^{۱۱} از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$\sigma_{\max} = \frac{4.263 \times F_{\max}}{D \times t} \quad (2)$$

که در آن σ_{\max} حداکثر تنش در لحظه شکست نمونه (N/mm^2) ، F_{\max} نیرو در لحظه شکست (N)، D قطر نمونه (میلی‌متر) و t ضخامت نمونه (میلی‌متر) می‌باشد.

$$K_{Ic} = \sigma_{\max} \times f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3)$$

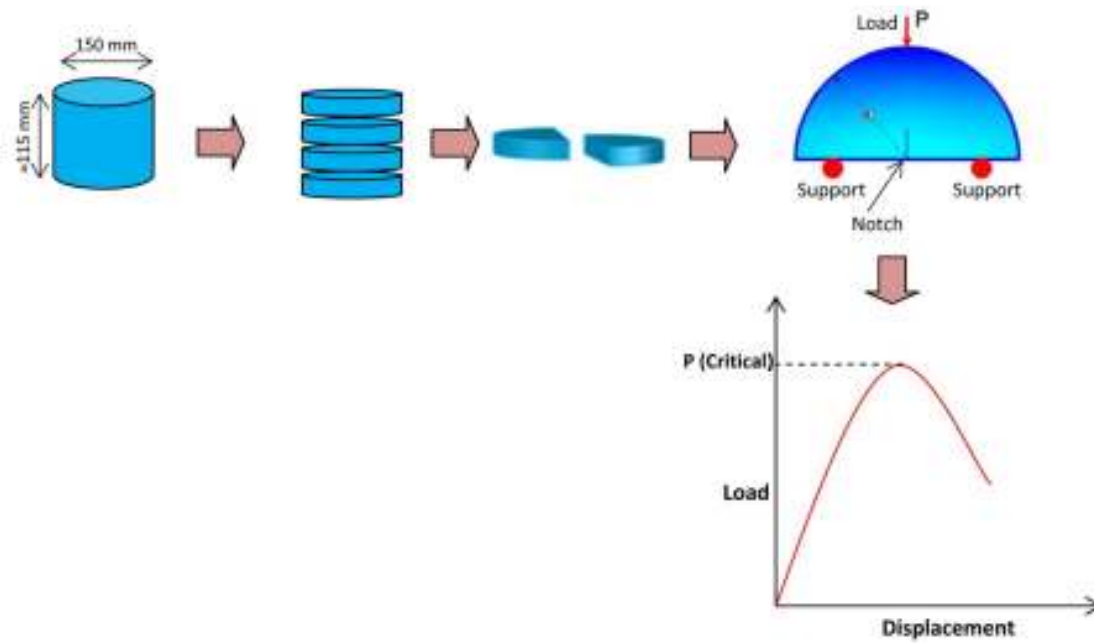
که در آن K_{Ic} چقرمگی شکست $(N/mm^{3/2})$ ، σ_{\max} حداکثر تنش در لحظه شکست نمونه (N/mm^2) ، و $f\left(\frac{a}{W}\right)$ ضریب هندسی^{۱۲} نمونه است که از رابطه (۴) به دست می‌آید.

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

که در آن a ارتفاع ترک ایجاد شده (میلی‌متر) و W ارتفاع نمونه (میلی‌متر) است.



شکل ۲. نمایی از آزمایش تعیین نیروی شکست نمونه دیسکی شکل تحت خمش (SCB)



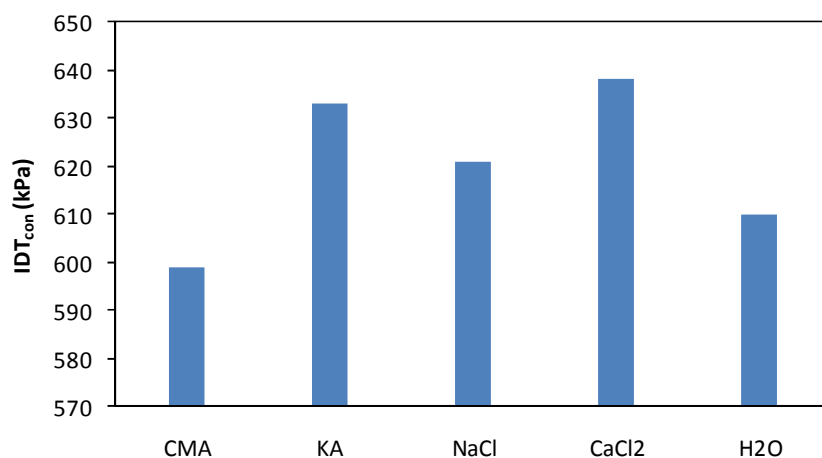
شکل ۳. فرآیند کلی تهیه نمونه‌های SCB و آزمایش تعیین نیروی شکست نمونه‌های آسفالتی

۳- نتایج و بحث

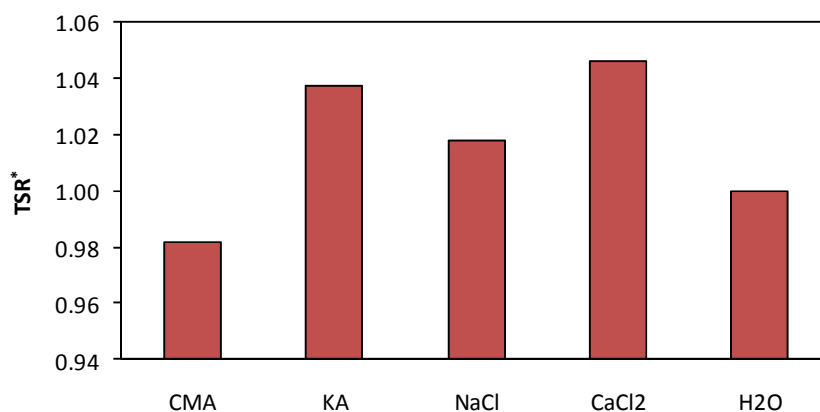
۳-۱- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

آسفالتی در مطالعات سایر محققین نیز اشاره شده است (Christensen et al., 2010; Hassan et al., 2002; Leahy et al., 2014). در این مطالعات اشاره شده است که اضمحلال ناشی از مواد یخزدا بیشتر در مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگ‌دانه‌های سیلیسی نمود پیدا می‌کند. یادآور می‌شود سنگ‌دانه‌های مخلوط آسفالتی در تحقیق حاضر از نوع آهکی-دولومیتی بوده است.

شکل‌های (۴) و (۵) نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی متراکم را نشان می‌دهند. چنانچه معیار ایجاد حساسیت رطوبتی، نسبت TSR^* کمتر از ۰/۸ فرض شود (به تبعیت از مطالعات قبلی)، ملاحظه می‌گردد که هیچ یک از محلول‌های یخزدا پتانسیل ایجاد حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی را نداشته‌اند. اثر غیر قابل ملاحظه مواد یخزدا در افزایش حساسیت رطوبتی برخی از مخلوط‌های



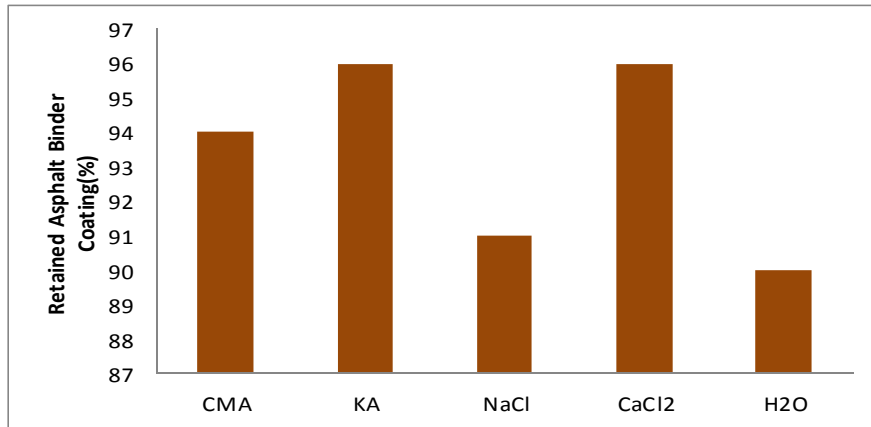
شکل ۴. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی عمل‌آوری شده در محلول‌های یخزدا



شکل ۵. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول‌های یخزدا به مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب

حالتی که مخلوط آسفالتی در آب قرار گرفته، نشان می‌دهد محلول‌های یخزدا اثر مخربی بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نداشته‌اند.

شکل (۶) نیز نتایج آزمایش آب جوشان را نشان می‌دهد. مقایسه درصد باقیمانده اندود قیری مخلوط‌های آسفالتی غیر متراکم عمل‌آوری شده در هر یک از محلول‌های یخزدا با



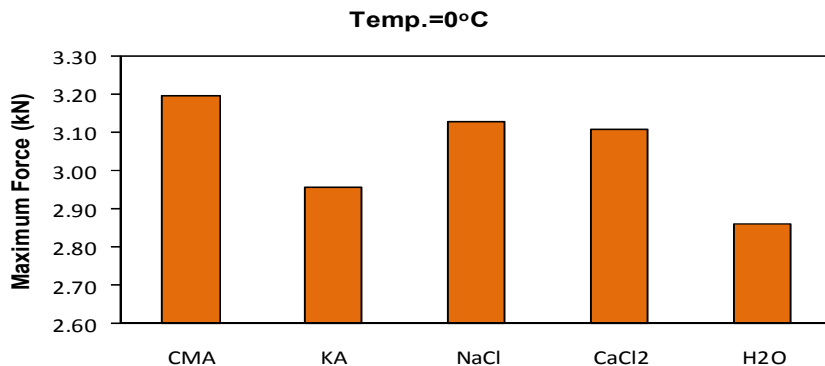
شکل ۶. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی غیر متراکم با استفاده از روش آب جوشان

در مقایسه با آب، اثر مخربی روی حداکثر نیروی قابل تحمل مخلوط‌های آسفالتی و همچنین چقرمگی شکست آنها نداشته‌اند. در بین محلول‌های یخ‌زدا، نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول پتاسیم استات (KA) دارای کمترین نیروی شکست و چقرمگی شکست بوده‌اند.

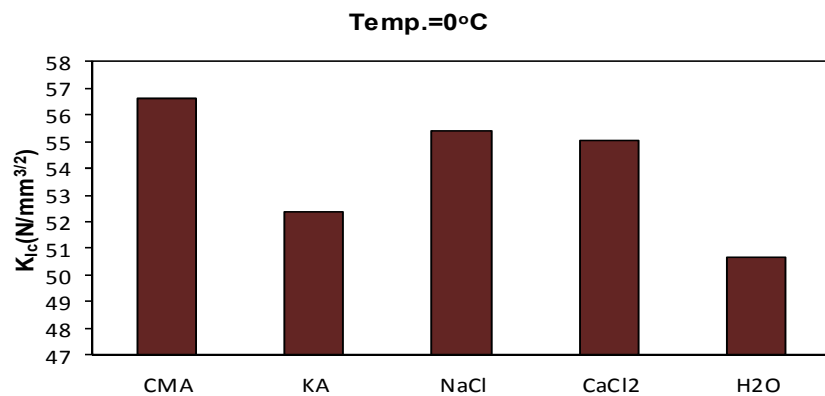
۲-۳- نتایج آزمایش تعیین مقاومت شکست

(چقرمگی شکست) نمونه‌های آسفالتی

شکل‌های (۷) تا (۱۴) نتایج آزمایش شکست نمونه‌های نیم دیسک در دماهای ۰، -۱۰ و -۲۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. همان‌طور که شکل‌های (۷) و (۸) نشان می‌دهند در دمای صفر درجه سانتی‌گراد، محلول‌های یخ‌زدا



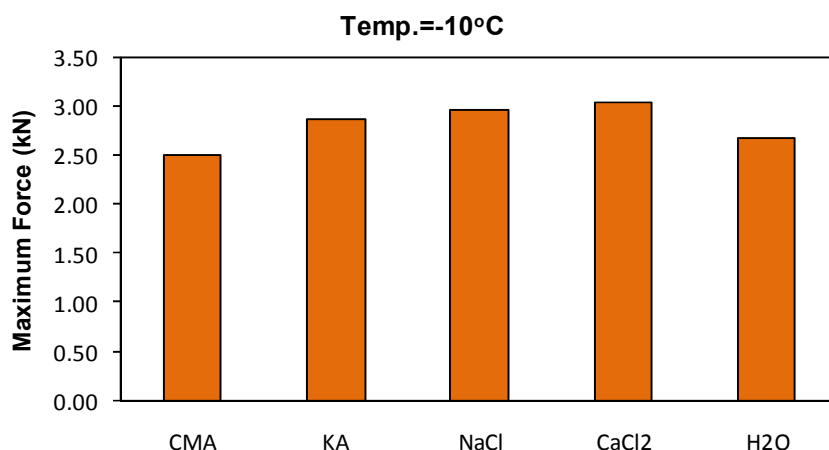
شکل ۷. حداکثر نیروی شکست نمونه‌های SCB در دمای صفر درجه سانتی‌گراد



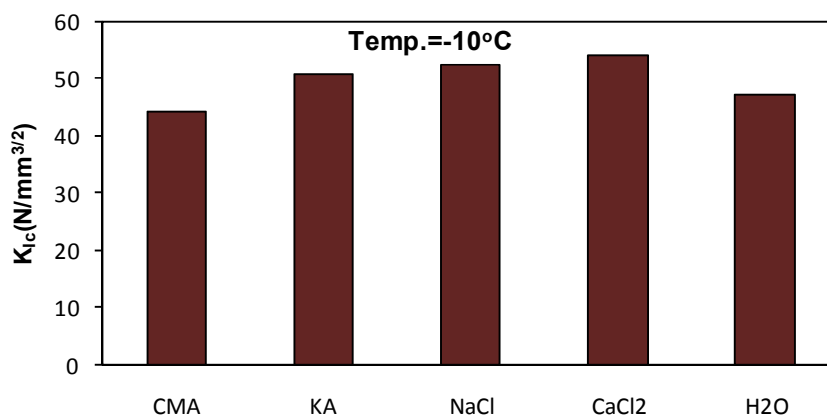
شکل ۸. چقرمگی شکست نمونه‌های SCB در دمای ۰ درجه سانتی‌گراد ($(K_{1c}(N/mm^{3/2})=0.032K_{1c}(MPa.m^{0.5}))$)

نیروی قابل تحمل و چقرمگی شکست مواجه شده‌اند. از جمله دلایل کاهش قابل ملاحظه مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی عمل‌آوری شده در محلول NaCl را می‌توان این‌طور بیان کرد که به دلیل آنکه در این حالت دمای آزمایش چقرمگی شکست (۲۰- درجه سانتیگراد) خیلی نزدیک به دمای یوتکتیک^{۱۱} محلول NaCl (۲۱- درجه سانتیگراد) بوده است، بنابراین انجماد محلول موجود در فضای خالی مخلوط آسفالتی و اضمحلال ناشی از این یخبندان در کاهش قابل ملاحظه حداکثر نیروی شکست و به تبع آن چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی در دمای ۲۰- درجه سانتیگراد محتمل است.

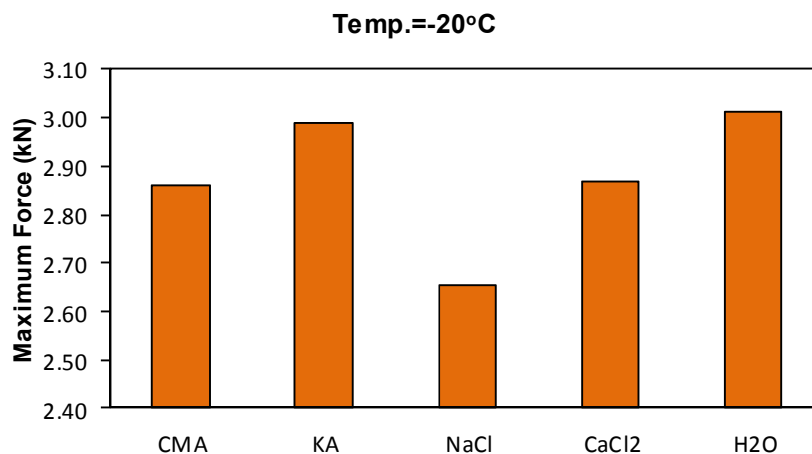
شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد در بین محلول‌های یخزدا در مقایسه با آب، فقط محلول CMA اثر کاهنده جزئی (۶ درصد) روی حداکثر نیروی قابل تحمل مخلوط‌های آسفالتی و همچنین چقرمگی شکست آنها داشته است. در این بین، نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول کلسیم منیزیم استات (CMA) دارای کمترین نیروی شکست و چقرمگی شکست بوده‌اند. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهند در دمای ۲۰- درجه سانتیگراد نمونه‌های آسفالتی عمل‌آوری شده در محلول CMA و CaCl₂ با ۵ درصد کاهش و نمونه‌های عمل‌آوری شده در NaCl با ۱۲ درصد کاهش در حداکثر



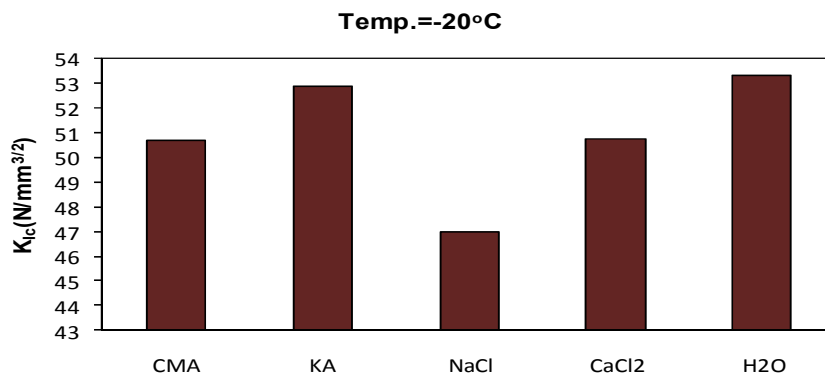
شکل ۹. حداکثر نیروی شکست نمونه‌های SCB در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد



شکل ۱۰. چقرمگی شکست نمونه‌های SCB در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد ($K_{Ic}(N/mm^{3/2})=0.032K_{Ic}(MPa.m^{0.5})$)



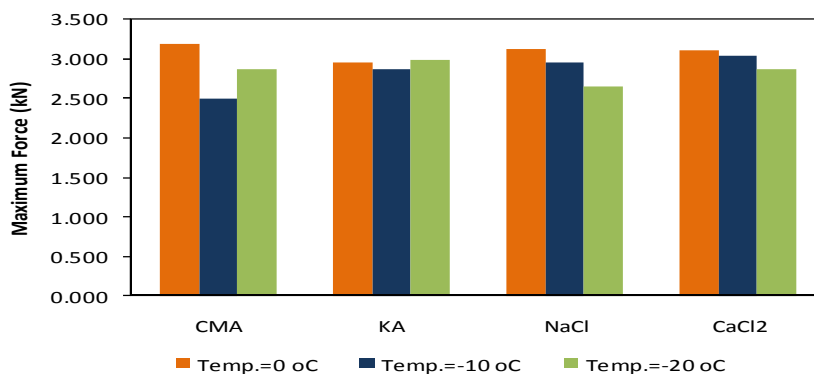
شکل ۱۱. حداکثر نیروی شکست نمونه‌های SCB در دمای -۲۰ درجه سانتی‌گراد



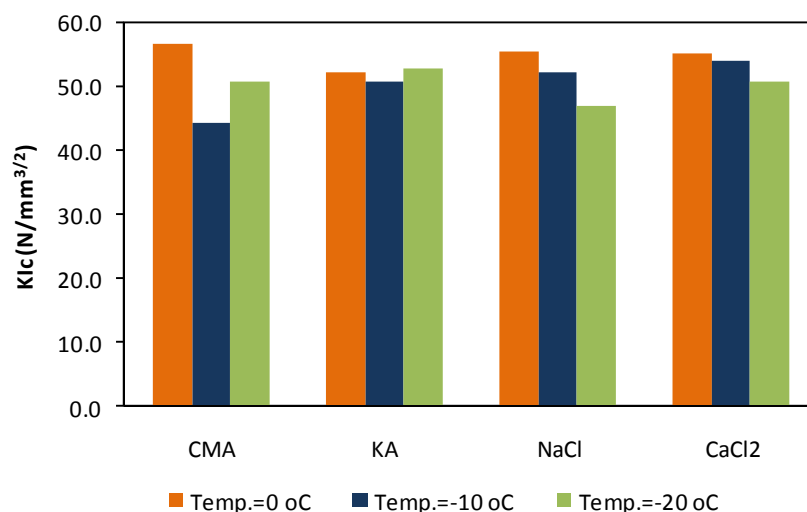
شکل ۱۲. چقرمگی شکست نمونه‌های SCB در دمای -۲۰ درجه سانتی‌گراد ($K_{Ic}(N/mm^{3/2})=0.032K_{Ic}(MPa.m^{0.5})$)

عملکرد مثبت محلول‌های با پایه کلراید (NaCl و CaCl₂)، با کاهش دما کاهش می‌یابد در صورتی که برای محلول‌های با پایه ارگانیک (KA و CMA) نمی‌توان یک حالت کلی بیان کرد.

شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نیز تغییرات حداکثر نیروی قابل تحمل و چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی عمل‌آوری شده در محلول‌های مختلف یخ‌زدا و در دمای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود،



شکل ۱۳. حداکثر نیروی شکست نمونه‌های SCB در دماهای مختلف



شکل ۱۴. چقرمگی شکست نمونه‌های SCB در دماهای مختلف ($(K_{1c}(N/mm^{3/2})=0.032K_{1c}(MPa.m^{0.5}))$)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور ارزیابی تاثیر مواد یخ‌زدا روی عملکرد آسفالت در دماهای پایین، پس از بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در دو حالت غیر متراکم و متراکم، نمونه‌های آسفالتی تهیه شده به روش تراکم چرخشی، به نمونه‌های با مقطع نیم دایره برش داده شدند، سپس این نمونه‌ها تحت تاثیر آب و هر یک محلول‌های NaCl، CaCl₂، CMA و KA، قرار گرفتند. در ادامه با انجام آزمایش خمش روی نمونه‌های نیم دیسکی (SCB)، چقرمگی شکست آنها در سه دمای ۰، -۱۰ و -۲۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. نتایج بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در دو حالت غیر متراکم و متراکم شده نشان داد که هیچ یک از محلول‌های یخ‌زدا مورد بررسی اثر منفی روی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نداشته‌اند که از جمله دلایل این امر استفاده از سنگ‌دانه‌های آهکی اظهار شد. همچنین نتایج آزمایش مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی نشان داد متناسب با دمای بررسی (۰، -۱۰ یا -۲۰ درجه سانتی‌گراد)، اثر مواد یخ‌زدا روی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی در دماهای مختلف، متفاوت است به طوری که در دمای صفر درجه سانتی‌گراد محلول‌های یخ‌زدا اثر منفی روی مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی نداشته‌اند ولی در دمای -۱۰ درجه سانتی‌گراد، محلول CMA منجر به

کاهش ۶ درصدی و در دمای -۲۰ درجه سانتی‌گراد محلول‌های CMA، NaCl و CaCl₂ به ترتیب منجر به کاهش ۵، ۵ و ۱۲ درصد مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی شده‌اند.

۵- سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان مقاله، از شرکت سازه‌های یادنگار (سینکو) که حمایت مالی این پروژه را طی قرارداد شماره ۳۸۷/س/۹۵ با مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی برعهده داشتند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Antiicing
2. Deicing
3. Snow plowing
4. Airfield Asphalt Pavement Technology Program
5. Indirect diametral tension test
6. Direct tension test
7. Tensile creep test
8. Flexural bending test
9. Thermal stress restrained specimen test
10. Semi-circular bending specimen test
11. Fracture toughness
12. Geometric factor

۷-مراجع

- Shi X., (2008), "Impact of airport pavement deicing products on aircraft and airfield infrastructure", ACRP Synthesis 6, Airport Cooperative Research Program, Transportation Research Board, National Academies, Washington, DC.
- Shi, X, Fay, L., Gallaway, C., Volkening, K., Peterson, M.M., Pan, T., Creighton, A., Lawlor, C., Mumma, S., Liu, Y., Nguyen, T.A. (2009), "Evaluation of alternative anti-icing and deicing compounds using sodium chloride and magnesium chloride as baseline deicers-Phase I", Colorado Department of Transportation Dtd Applied Research and Innovation Branch.
- Starck, P. and Löfgren, B., (2007), "Influence of de-icing agents on the viscoelastic properties of asphalt mastics", Journal of materials science, 42(2), pp.676-685.
- Yang, Z., Zhang, Y. and Shi, X., (2018), "Impact of nanoclay and carbon microfiber in combating the deterioration of asphalt concrete by non-chloride deicers", Construction and Building Materials, 160, pp.514-525.
- Hassan, Y., Abd El Halim, A.O., Razaqpur, A.G., Bekheet, W. and Farha, M.H., (2002), "Effects of runway deicers on pavement materials and mixes: comparison with road salt", Journal of Transportation Engineering, 128(4), pp.385-391.
- Blackburn, R.R., (2004), "Snow and ice control: Guidelines for materials and methods", Vol. 526, Transportation Research Board.
- Christensen, D., Mallela, J., Hein, D. Kalberer, E., Farrar, M., Bonaquist, R., (2010), "Effect of deicing and anti-icing chemicals on HMA airfield runways", Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Federal Aviation Administration American Association of Airport Executives.
- Goh, S.W., Akin, M., You, Z. and Shi, X., (2011), "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro-or nano-modified asphalt mixture", Construction and Building Materials, 25(1), pp.195-200.
- Leahy, R., Yang, S.S.S., Vargas, A. and Schmalzer, P., (2014), "Effects of Deicing/Anti Icing Chemicals (DIAICs) on Rubberized Asphalt Pavements", Federal Highway Administration, Report No. FHWA-AZ-14-617.
- McCrum R.L. (1989), "Corrosion evaluation of Calcium Magnesium Acetate (CMA), salt (NaCl), and CMA/Salt solutions", Michigan Department of Transportation.
- National Cooperative Highway Research program (NCHRP). (2007), "Guidelines for the Selection of Snow and Ice Control Materials to Mitigate Environmental Impacts". NCHRP Report 577, Richmond, BC.