

تأثیر مواد یخ‌زدا و ضدیخ بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی گرم

محسن ابوطالبی اصفهانی*، استادیار دانشکده حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

احمد گلی، استادیار دانشکده حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

امین رحیمی پردنجانی، کارشناس ارشد راه و ترابری

Email: m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۶/۲۶ - پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۰

چکیده

مسیرهای در معرض بارش برف و باران با احتمال یخ‌زدگی، به دلیل امکان بهره‌برداری از مسیر و عدم آسیب دیدگی سازه‌ای، لازم است یخ‌زدایی شوند. عدم نگهداری و یخ‌زدایی منجر به تورم رویه، ترک‌های انقباضی، گسترش ترک‌های موجود، جدا شدن لایه‌های روسازی از یکدیگر و در برخی موارد جدایی دانه‌ها می‌شود. از مواد یخ‌زدا و ضدیخ مایع قابل استفاده می‌توان کلرید کلسیم، کلرید منیزیم، کلرید سدیم و اوره را نام برد. در مصرف مواد فوق، علاوه بر جنبه‌های زیستی و اقتصادی، جنبه‌های آسیب‌دیدگی رویه آسفالتی ناشی از در مجاورت قرار گرفتن با این مواد را نیز باید ارزیابی کرد. هدف این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از مواد فوق بر مقاومت مخلوط آسفالتی است. بدین منظور، نمونه‌های ساخته شده طبق استاندارد AASHTO T283 عمل‌آوری شده و تحت آزمایش‌های استقامت مارشال، مقاومت کششی و مدول برجهندگی قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که یخ‌زدایی با محلول کلرید کلسیم در آزمایش استقامت مارشال، محلول کلرید کلسیم و اوره در آزمایش مقاومت کششی و اوره در آزمایش مدول برجهندگی کمترین اثر منفی را دارد. همچنین، قرار داشتن مخلوط در مجاورت آب خالص و سیکل ذوب-یخ، بیشترین اثر منفی را بر نمونه‌های آزمایشگاهی دارد که لزوم نگهداری صحیح و استفاده از مواد ضدیخ و یخ‌زدا را تأیید و تأکید می‌کند. بنابراین، با توجه به تأثیرات منفی زیست‌محیطی، دمای مؤثر، قیمت مواد و نتایج آزمایش‌های این پژوهش، در مناطقی که دما بین صفر تا ۱۰- و یا بین ۱۰- تا ۲۰- و یا کمتر از ۲۰- درجه سلسیوس می‌باشد می‌توان به ترتیب از اوره، کلرید منیزیم و کلرید کلسیم به‌عنوان ماده یخ‌زدا استفاده کرد تا کمترین خسارت به رویه آسفالتی وارد شود.

واژه‌های کلیدی: استحکام مارشال، مقاومت کششی، مدول برجهندگی، آسفالت گرم

۱. مقدمه

روسازی را نمی‌توان نادیده گرفت (مؤسسه نمک، ۲۰۰۵؛ اداره فدرال بزرگراه‌ها، ۲۰۰۵). مسیرهای ساخته شده در مناطق سردسیر با بارش برف و باران با دو مسئله اساسی روبرو هستند. اول اینکه در صورت عدم

مصرف سالانه میلیون‌ها تن مواد ضدیخ و یخ‌زدا با هزینه قابل تأمل، و تأثیر این مواد بر ساختار سازه‌ای

یخزدایی و جلوگیری از یخ‌زدن و نگهداری زمستانی، عبور و مرور و بهره‌برداری در چنین شرایطی دشوار بوده و منجر به مسائلی نظیر تأخیرها، تصادفات، مسدود شدن مسیرها و گرفتار شدن وسایل نقلیه در مسیر می‌شود. از طرف دیگر، سطح رویه مسیری که تحت نگهداری زمستانی قرار نگیرد و در طول فصل بارش مرتباً در معرض یخ‌زدن و آب شدن قرار بگیرد، دچار اضمحلال می‌شود. اضمحلال ناشی از نفوذ آب به لایه رویه و سپس یخ‌زدن و همچنین تأثیر آب بر قیر و مصالح و چسبندگی میان آنها می‌باشد. تکرار این فرایند باعث انبساط و بازشدگی بیشتر منافذ شده و نهایتاً موجب خرابی زودرس روسازی خواهد شد (مهندسیین مشاور لولتون، ۲۰۰۷؛ پن و همکاران، ۲۰۰۶).

همانطور که ذکر گردید، نگهداری زمستانی راه‌ها بسیار ضروری و امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. نگهداری شامل برف‌روبی و سپس استفاده از موادی است که علاوه بر یخ‌زدایی، به آب شدن یخ‌ها کمک کرده و همچنین از یخ‌زدن جلوگیری کنند. مواد شیمیایی قابل استفاده به دو دسته ضدیخ و یخزدا تقسیم‌بندی می‌شوند. ضدیخ‌ها مانع از تشکیل برف و یخ روی سطح خیابان می‌شوند و یخ‌زداها، یخ تشکیل شده روی سطح خیابان را ذوب می‌کنند (کلین-پیست و واهلین، ۲۰۱۳؛ فیشر، ۲۰۰۱). نگهداری زمستانی باعث می‌شود روسازی در معرض یخ و آب شدن‌های متوالی و تأثیرات ناشی از آن قرار نگیرد. بدین ترتیب، پایداری، دوام روسازی و عمر بهره‌برداری افزایش می‌یابد.

وقتی به یک محلول خالص مقداری ناخالصی اضافه می‌شود، در بعضی از خواص آن مانند نقطه انجماد که خواص کولیگاتیو نامیده می‌شوند، تغییر ایجاد می‌شود. افزودن یک حل‌شونده غیرفرار، نقطه انجماد محلول را کاهش می‌دهد و مقدار این کاهش به عواملی نظیر نوع حلال و مقدار غلظت مولال حل‌شونده بستگی دارد. به عنوان مثال، دمای ذوب استات پتاسیم 60°C -

است. یعنی استفاده از آن در سطح جاده باعث می‌شود تا دمای 60°C - هیچگونه یخ‌زدگی در سطح مسیر مشاهده نشود. افزودن ضدیخ‌ها و یخ‌زداها باعث پایین آمدن نقطه انجماد آب یا در واقع کاهش نقطه ذوب یخ می‌شود. قدیمی‌ترین روش در نگهداری معابر، پاشیدن نمک برای یخ‌زدایی و شن و ماسه برای ایجاد اصطکاک می‌باشد. در استفاده از این شیوه، معایبی نظیر عدم توزیع یکنواخت و رانده شدن مواد به حاشیه معبر، خطر صدمه به خودروها و عابرین با پرتاب دانه‌های شن، مسدود شدن زهکش‌ها، خرابی سطح روسازی به-علت پخش غیر یکنواخت نمک، تحمیل هزینه‌های مضاعف پاک‌سازی، ضایعات زیست‌محیطی و تسریع در خوردگی خودروها و بتن وجود دارد. این معایب در روش‌های جدید و استفاده از روش‌های پیشگیری و ماشین‌آلات و تجهیزات مخصوص برف‌روبی تا حدود زیادی تقلیل یافته و هزینه‌های کلی نیز به تبع آن کاهش یافته‌اند. در روش‌های جدید از موادی نظیر کلرید کلسیم، کلرید منیزیم، کلرید سدیم و اوره به صورت مایع استفاده می‌شود (پژوهشکده حمل و نقل ایالت ویسکانسین، ۱۹۹۶؛ اوکیف و شی، ۲۰۰۵؛ کمیته برنامه ملی تحقیقات بزرگراه‌ها، ۲۰۰۷).

هر کدام از مواد فوق با توجه به دمای حداقل منطقه و دستورالعمل‌های تولیدکنندگان قابل استفاده هستند. مسئله مهم این است که در شرایطی که هیچگونه محدودیت نوع مصرف وجود نداشته باشد صرف‌نظر از جنبه اقتصادی و زیست‌محیطی، کدامیک از مواد مذکور تأثیر مخرب کمتری بر ساختار سازه‌ای روسازی دارد. لذا، بررسی عملکرد مواد ضدیخ و یخزدا روی روسازی آسفالتی در مناطق سردسیر و تعیین بهترین ماده از لحاظ فنی می‌تواند از صرف هزینه بسیار در این مناطق جلوگیری نماید.

هدف و پرسش اصلی این پژوهش تعیین مقدار تأثیر منفی مواد ضدیخ و یخزدا بر مقاومت روسازی

برای جلوگیری از سُر خوردن وسایل نقلیه بسیار مؤثر است.

ایمینی و حضرتی (۱۳۸۸) در مطالعه خود به مقایسه عملکردی استات کلسیم منیزیم با ماسه و نمک به عنوان ماده یخزدا در فصل سرما پرداختند. آنها به بررسی عملکرد مخرب یخبندان و خرابی‌های رطوبتی پرداخته و نهایتاً با توجه به عملکرد نمک- مایه و استات کلسیم منیزیم به عنوان ماده یخزدا، توانایی افزایش ایمنی جاده با به‌کارگیری ماده استات کلسیم منیزیم را بررسی کردند.

بررسی عوارض زیست‌محیطی شن و مواد شیمیایی یخزدا در شهر تهران و ارائه راهکارهایی جهت کاهش این عوارض توسط نجفی شالمائی و همکاران (۱۳۸۸) انجام شده است. آنها اظهار داشتند که متأسفانه در حال حاضر روش سنتی یخزدایی و ریختن مخلوط شن و نمک با استفاده از ماشین و بیل، تنها روشی است که در تمام شهرها و جاده‌های بین شهری کشور استفاده می‌شود که دارای معایب فراوانی است و لازم است در این خصوص مطالعات جامعی صورت گیرد.

در پژوهش انجام شده توسط شاهی و همکاران (۱۳۹۲)، مکانیزم عمل و تأثیرات استفاده از نمک و شن بر سطح آسفالت و ایمنی راه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهشگران فوق، در نهایت جایگزین‌های مناسب و افزودنی‌های نوین برای کاهش استفاده از مخلوط نمک و شن و ماسه را معرفی نموده‌اند تا با برخی از تکنیک‌های ساده و تجهیزات جدید بتوان به طور قابل توجهی خطرات و اثرات تخریبی استفاده بی- رویه از نمک، شن و ماسه را کاهش داده و ایمنی جاده-ها را ارتقا بخشید.

ادواردز و همکاران (۱۹۹۹) در مطالعه‌ای نشان دادند که آسیب‌های وارد به روسازی در اثر مواد یخزدا به ترکیب شیمیایی قیر بستگی دارد و البته چگونگی آن ناشناخته است. آنها بیان کردند که پیش‌بینی قیر مستعد

آسفالتی می‌باشد. هدف دیگر، سنجش تأثیر عدم استفاده از مواد یخزدا و ضدیخ، یعنی قرار گرفتن روسازی در معرض آب خالص و تکرار سیکل ذوب و یخ بر پارامترهای بیان شده، می‌باشد. همچنین، روش‌های استاندارد ارائه شده توسط ASTM و AASHTO جهت ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی در برابر ضدیخ‌ها و یخ-زداها و استاندارد تهیه این مواد از فرضیات این تحقیق می‌باشد.

جهت ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر مواد ضدیخ و یخزدا، از آزمایش‌های استحکام مارشال، مدول برجهنگی و مقاومت کششی استفاده شده است. در این آزمایش‌ها ۴۵ نمونه‌های مارشال ساخته شده در معرض آب خالص، کلرید کلسیم، کلرید منیزیم، کلرید سدیم و اوره قرار گرفته و پس از تکرار سیکل یخبندان- ذوب، تأثیر مواد فوق بر پارامترهای بیان شده سنجیده می‌شود. همچنین، به منظور مقایسه بهتر نتایج، از ۹ نمونه کنترل هم که در معرض هیچیک از محلول‌های فوق قرار نگرفته‌اند، استفاده شده است.

۲. پیشینه تحقیق

مطالعات زیادی روی مواد ضدیخ و یخزداها در بخش-های مختلفی صورت گرفته که پیوند بین مطالعه حاضر و مطالعات فوق ممکن است منجر به نتایج مطلوب‌تری شود. در ادامه، برخی از این مطالعات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سلیمانی کرمانی (۱۳۸۷) مطالعه خود را به بررسی تأثیر نمک‌پاشی بر مقاومت لغزشی سطح جاده‌ها اختصاص داد. نتایج نشان می‌دهد که حضور محلول نمک بر سطح جاده، مقاومت لغزشی سطح را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. همچنین، زهکشی مناسب جاده برای خارج کردن محلول نمک از سطح رویه و برقراری مقاومت لغزشی مناسب در این راستا

آلاتیو (۲۰۰۵) در آزمایشگاه مهندسی راه کشور فنلاند، با انجام آزمایش، اثر محلول‌های شیمیایی یخزدا بر پوشش قیری سنگدانه‌ها را با آزمون جوشاندن مورد ارزیابی قرار داد. پژوهش او نشان داد که جوشاندن قیرهای نرمتر در محلول‌های یخزدا دچار تغییرات بیشتری می‌شوند. اما قیر اصلاح شده با پودر لاستیک تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین، افزایش غلظت محلول‌های شیمیایی یخزدا از ۱ تا ۵ درصد، میزان پوشش قیری را کاهش داد.

استارک و لوفگرن (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر ضد یخ‌ها بر فیلرهای مختلف در مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش مکانیکی-دینامیکی و رفتار تنش، پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که گرانروی مخلوط به طور قابل توجهی پس از غوطه‌وری در مواد یخزدا، افزایش یافته است.

آلاتیو و والتونن (۲۰۰۷) نشان دادند که تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان ساختمان شیمیایی قیرهای جوشانیده شده در مواد یخزدا وجود ندارد. البته وزن نمونه‌های جوشانیده شده در محلول نمک‌های یخزدا کاهش یافته است.

مطالعه دیگری نشان داد که استفاده از قیرهای سخت‌تر باعث کاهش آسیب دیدگی ناشی از یخزدایی می‌شود. همچنین فضای خالی بیشتر در مخلوط آسفالتی موجب تشدید آسیب دیدگی می‌شود (مؤسسه تکنولوژی آسفالت پیشرفته، ۲۰۰۷).

آپی‌گایی و همکاران (۲۰۰۸) اقدام به بررسی امکان بروز واکنش قلیایی-سیلیسی در مخلوط‌های آسفالتی در معرض محلول یخزدای استات پتاسیم، نمودند. این pH محلول که حدود ۱۰ است در مجاورت با هیدروکسید سدیم به بیش از ۱۴ می‌رسد. در صورت استفاده از سنگدانه‌های مستعد و وجود یون هیدروکسید کلسیم که به عنوان ماده ضد عریان‌شدگی به مخلوط‌های آسفالتی افزوده می‌شود، امکان بروز این

خرابی، مشکل است ولی قیرهای سخت‌تر در برابر آسیب دیدگی رطوبتی، مقاوم‌ترند.

حسن و همکاران (۲۰۰۰)، با سنجش وزن و چگالی آزمون‌های غوطه‌ور در فرمات سدیم پس از ۳۵ چرخه یخبندان-ذوب بیشترین میزان از هم‌پاشیدگی را گزارش کردند. این در حالی است که پس از ۵۰ چرخه، مخرب‌ترین یخزداها به ترتیب اوره و استات پتاسیم بودند.

حسن و همکاران (۲۰۰۱) میزان افت وزنی آزمون‌های عمل‌آوری شده در آب مقطر، محلول کلرید سدیم، کلرید سدیم با نسبت سدیم به کلسیم ۱ به ۵۰ و محلول آب نمک طبیعی را تحت چرخه یخبندان-ذوب بررسی نمودند. افت وزنی آزمون‌ها در پایان چرخه‌های یخبندان و ذوب خیلی ناچیز بود.

فرها و همکاران (۲۰۰۲) در مطالعه‌ای به بررسی درجه نفوذ قیرها پس از ۴۰ چرخه رطوبت‌دهی و خشک نمودن و به دنبال آن ۱۵ چرخه یخبندان و ذوب پرداختند. نتایج حاکی از آن است که چرخه‌های یخبندان و ذوب سبب بروز نرم‌شدگی قیر خالص شده، اما چرخه‌های رطوبت‌دهی و خشک‌کنندگی سبب سخت‌شدگی قیر می‌شوند.

حسن و همکاران (۲۰۰۲) به مطالعه تأثیر غلظت مواد شیمیایی یخزدا بر سنگدانه‌های آهکی و کوارتزی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که غلظت بحرانی برای تمام انواع یخزداها ۱-۲ درصد بوده و مصالح کوارتزی بیشتر از آهکی دچار صدمه شدند. همچنین، مقادیر مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول الاستیسیته در اثر مجاورت با مواد یخزدا کاهش یافتند.

برتول (۲۰۰۴) در مطالعه خود روی دو نوع مخلوط آسفالتی ریزدانه و مخلوط با دانه‌بندی باز به بررسی تأثیر ضد یخ‌ها بر مقاومت لغزشی و عریان‌شدگی پرداخت. او نشان داد که در همه مواد یخزدا، با افزایش غلظت، عدد مقاومت لغزشی کاهش می‌یابد.

سنگدانه‌ها، عریان‌شدگی، قیرزدگی)، قیر (درجه نفوذ، ساختمان شیمیایی قیر، واکنش‌های شیمیایی قیر، نفوذ یخزدها به قیر، امولسیون‌شدگی، تقطیر، چسبندگی به دانه‌ها)، سنگدانه‌ها (تأثیر بر فیلرهای مختلف، واکنش-های قلیایی-سیلیسی، تأثیر بر سنگدانه‌های آهکی و کوارتزی) و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی (مقاومت لغزشی، چگالی دانه‌ها، افت وزنی آزمون‌ها، کشش غیر مستقیم، چقرمگی) متمرکز شده است. در بخش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی، ارزیابی تأثیر ضدیخ‌ها و یخزدها بر مقاومت مارشال و مدول برجهندگی مشاهده نمی‌شود و یا مطالعات محدودی در این زمینه وجود دارد. لذا، در این پژوهش، با توجه به خلأ یاد شده، مطالعه لازم صورت گرفته است.

۳. مواد و مصالح

۳-۱. مصالح سنگی

مصالح سنگی که برای ساخت انواع آسفالت به‌کار می‌روند باید دارای حداقل مشخصات فنی تعیین شده توسط AASHTO و ASTM باشد. به جهت بهره‌برداری بیشتر از نتایج تحقیق و با توجه به اینکه عمده معادن ایران از نوع آهکی است، مصالح انتخاب شده نیز از جنس مصالح آهکی انتخاب شد. مشخصات مصالح مصرفی در این پژوهش مطابق جدول ۱ است.

مشخصه مهم دیگر در مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی گرم، دانه‌بندی آن است که بر استقامت و ظرفیت باربری تأثیرگذار است. توزیع مناسب دانه‌ها در دانه‌بندی باعث داشتن یک دانه‌بندی پیوسته می‌شود. در چنین شرایطی تراکم لایه با فضای خالی مناسب به-خوبی صورت می‌گیرد. دانه‌بندی مصالح مصرفی در آزمایش‌های این پژوهش، دانه‌بندی D-4، ASTM D3515 می‌باشد که در جدول ۲ نشان داده شده است.

واکنش بیشتر خواهد شد. آنها بیان کردند که امکان بروز واکنش قلیایی-سیلیسی در مخلوط‌های ساخته شده از سنگدانه‌های سیلیسی با ماده ضد عریان‌شدگی هیدروکسید کلسیم، که در معرض یخزدای با استات پتاسیم قرار می‌گیرد، محتمل بوده، اما نیاز به بررسی بیشتر می‌باشد.

پن (۲۰۰۸) به مطالعه فرایند خرابی بتن آسفالتی در معرض یخزدهای استاتی پرداخت و اظهار نمود که یخزدها در اثر نیروی ثقل، افزایش دما یا دلایل ناشناخته دیگر به قیر موجود در لایه روسازی نفوذ می‌کنند. همچنین، به دلیل کشش سطحی کم میان یخزدها و قیر، محلول یخزدها در قیر شروع به جذب شدن می‌کند و ممکن است منجر به بروز تغییرات شیمیایی در ترکیب قیر شود. نهایتاً قیر در اثر امولسیون‌شدگی، نرم شده و از سطح سنگدانه‌ها زدوده می‌شود و به صورت عریان‌شدگی یا قیرزدگی در سطح روسازی نمایان می‌شود.

شی و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که صدمه مواد یخزدها به رویه آسفالتی ناشی از تخریب فیزیکی، شیمیایی و یا واکنشی ترکیبی است. آنها نشان دادند که ایجاد خرابی به علت ترکیبی از واکنش‌های شیمیایی و امولسیون‌شدگی و تقطیر می‌باشد.

بررسی تأثیر ضدیخ‌ها بر مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح بازالتی و سیلیسی و با قیرهای خالص و پلیمری توسط سنتاگاتا و همکاران (۲۰۱۳) صورت گرفت. نتایج حاکی از این است که برخلاف انتظار، مخلوط با قیر پلیمری دارای عریان‌شدگی بیشتری است و مقادیر کشش غیر مستقیم و چقرمگی دچار کاهش شدند.

همانطور که ملاحظه می‌شود، مطالعات انجام شده در مورد تأثیر یخزدها و ضدیخ‌ها بر عواملی نظیر محیط‌زیست، خرابی‌های رطوبتی (تأثیر بر پوشش قیری

جدول ۱. حداقل مشخصات فنی و مشخصات فنی مصالح انتخاب شده بر اساس استاندارد AASHTO (آشتو، ۲۰۰۱)

آزمایش	روش آزمایش	مقادیر استاندارد	نتایج آزمایش
شاخص خمیری	AASHTO T90	NP	NP
ارزش ماسه‌ای (%)	AASHTO T176	حداقل ۵۰	۸۴
سایش لس آنجلس (%)	AASHTO T96	حداکثر ۲۵	۱۴
جذب آب، درشت‌دانه (%)	AASHTO T85	حداقل ۲/۵	۲/۲
جذب آب، ریزدانه (%)	AASHTO T84	حداقل ۲/۵	۲/۹
افت وزنی در سولفات سدیم، درشت‌دانه (%)	AASHTO T104	حداکثر ۸	۰/۷۰
افت وزنی در سولفات سدیم، ریزدانه (%)	AASHTO T104	حداکثر ۸	۲/۲
درصد شکستگی (مانده روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر)	ASTM D5821	حداقل ۹۵/۹۰	۹۸/۹۵
درصد دانه ای سوزنی و پولکی (مانده روی الک ۹/۵ میلی‌متر)	ASTM D4791	حداکثر ۱۵	۱۶/۱۳
وزن مخصوص ظاهری، درشت دانه، gr/cm^3	AASHTO T85	-	۲/۶۳۰
وزن مخصوص حجمی، درشت دانه، gr/cm^3	AASHTO T85	-	۲/۴۸۵
وزن مخصوص ظاهری، ریزدانه، gr/cm^3	AASHTO T84	-	۲/۵۹۳
وزن مخصوص حجمی، ریزدانه، gr/cm^3	AASHTO T84	-	۲/۴۱۰
وزن مخصوص مصالح رد شده از الک ۲۰۰، gr/cm^3	AASHTO T100	-	۲/۶۴۲
وزن مخصوص ظاهری کل مصالح، gr/cm^3	AASHTO T19	-	۲/۴۶۷
چسبندگی قیر به دانه‌ها	ASTM D3625	$>90\%$	$>95\%$

جدول ۲. دانه‌بندی ASTM D3515, D-4 برای مصالح سنگی آزمایش‌های (ASTM، ۲۰۰۱)

اندازه الک (میلی‌متر)	درصد عبوری از هر الک	ASTM D3515
۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۱۰۰	۹۰-۱۰۰
۱۲/۵	۹۵	-
۹/۵	۷۳	۵۶-۸۰
(الک شماره ۴) ۴/۷۵	۶۴	۳۵-۶۵
(الک شماره ۸) ۲/۳۶	۳۸	۲۳-۴۹
(الک شماره ۵۰) ۰/۳	۱۱	۵-۱۹
(الک شماره ۲۰۰) ۰/۰۷۵	۵	۲-۸

۲-۳. قیر

با درجه نفوذ AC85/100 و AC120/150 مناسب می‌باشد. در این مطالعه، برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، قیر خالص با درجه نفوذ AC85/100 با توجه به توان باربری بیشتر، انتخاب شده است. مشخصات این قیر در جدول ۳ آورده شده است.

انتخاب قیر برای مخلوط‌های آسفالتی براساس شرایط جوی محل و بارهای وارده می‌باشد. پژوهش حاضر در ارتباط با بررسی تأثیر مواد یخزدا بوده و آنچه مسلم است مربوط به مناطق سردسیر خواهد بود. بنابراین، قیر

جدول ۳. مشخصات قیر انتخاب شده برای آزمایش‌ها (ASTM، ۲۰۰۱)

ASTM AC85/100		نتیجه آزمایش	روش استاندارد	آزمایش
حداقل	حداکثر			
-	-	۱/۰۱۵	ASTM D70	وزن مخصوص قیر در دمای ۲۵ °C، gr/cm ³
۸۵	۱۰۰	۹۲	ASTM D5	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر) در دمای ۲۵ °C، ۱۰۰gr، ۵ ثانیه
۲۳۲	-	۲۸۶	ASTM D92	نقطه اشتعال قیر، ظرف روباز کلپولند (درجه سلسیوس)
۱۰۰	-	۱۰۰<	ASTM D113	کشش پذیری قیر (سانتی‌متر) در دمای ۲۵ °C، ۵ cm/min
۴۵	۵۲	۴۷	ASTM D36	نقطه نرمی قیر (درجه سلسیوس) در آب مقطر
۹۹	-	۹۹/۶	ASTM D2042	حلالیت قیر (درصد) در تری‌کلرواتیلن
-	-	۵۸۵	ASTM D2170	کند روانی سینماتیک (سانتی استوکس) در دمای ۱۲۰ °C
-	-	۲۹۱	ASTM D2170	کند روانی سینماتیک (سانتی استوکس) در دمای ۱۳۵ °C
-	-	۹۴	ASTM D2170	کند روانی سینماتیک (سانتی استوکس) در دمای ۱۶۰ °C
-	۱	۰/۰۱	ASTM D1754	لعب نازک قیر در گرم خانه، تغییر جرم اولیه (درصد) در دمای ۱۶۳ °C، ۵ ساعت
-	-	۶۱	ASTM D5	درجه نفوذ پسماند لعاب نازک قیر در گرم خانه (۰/۱ میلی‌متر) در دمای ۲۵ °C، ۱۰۰gr، ۵ ثانیه
۵۰	-	۶۶	ASTM D5	درجه نفوذ قیر پسماند نسبت به قیر اولیه (درصد)
۷۵	-	۱۰۰<	ASTM D113	کشش‌پذیری پسماند لعاب نازک قیر در گرم‌خانه (سانتی‌متر) در دمای ۲۵ °C، ۵ cm/min

۳-۳. مواد یخ‌زدا و ضدیخ

طبقه‌بندی می‌شوند. انواع مختلف آنها، عناصر سازنده، دمای ذوب و قیمت آنها در جدول ۴ ارائه شده است (کمیته برنامه ملی تحقیقات بزرگراه‌ها، ۲۰۰۷).

به طور کلی، مواد یخ‌زدا و ضدیخ در دسته‌های نمک-های کلریدی، نمک‌های آلی و ترکیبات نیتروژن‌دار

جدول ۴. انواع مواد ضدیخ و یخ‌زدا و مشخصات آنها (کمیته برنامه ملی تحقیقات بزرگراه‌ها، ۲۰۰۷)

نوع ماده	مواد یخ‌زدا	عناصر سازنده	دمای ذوب (°C) و غلظت (%)	قیمت هر تن (دلار)
	کلرید سدیم	Na, Cl	۲۳/۳ - ۲۱	۳۶
نمک‌های کلریدی	کلرید کلسیم	Ca, Cl	۲۹/۸ - ۵۱	۱۲۰
	کلرید منیزیم	Mg, Cl	۲۱/۶ - ۳۳	۹۵
	کلسیم منیزیم استات	Ca, Mg, C ₂ H ₃ O ₂	۳۲/۵ - ۲۷/۵	۱۲۸۰
نمک‌های آلی	استات پتاسیم	K, C ₂ H ₃ O ₂	۴۹ - ۶۰	۱۸۵۰
	مشتقات کشاورزی	کمپلکس شکر	متغیر	۱۰۸
	ترکیبات آلی مصنوعی	گلیکول و متانول	متغیر	۱۵۱۰
ترکیبات نیتروژن‌دار	اوره	اوره، آمونیاک	۳۳ - ۱۲	۵۰

اختلال‌های قلبی و عروقی است. اوره نیز به عنوان کود در خاک‌ها قابل استفاده است. ولی مصرف زیاد در صورت وجود pH بیشتر از ۷/۵ منجر به تولید گاز آمونیاک شده که می‌تواند به ریشه گیاهان صدمه بزند. از عوامل مهم دیگر، تأثیرات خوردگی مواد فوق بر ماشین‌ها، میل‌گرد سازه‌ها و پایه‌های علائم و تابلوهای راهنمایی و رانندگی می‌باشد (کمپته برنامه ملی تحقیقات بزرگراه‌ها، ۲۰۰۷).

با توجه به مطالعات ارائه شده در آزمایش‌های این پژوهش، کلرید کلسیم، کلرید منیزیم، کلرید سدیم و اوره به عنوان ماده یخزدا و ضدیخ انتخاب شدند. هر یک از مواد فوق براساس استاندارد تولید، دارای دمای ذوب و دمای مؤثر متفاوتی می‌باشند. دمای ذوب و مؤثر تعیین شده با توجه به غلظت محلول می‌باشد (کلین-پیست و واهلین، ۲۰۱۳؛ کمپته برنامه ملی تحقیقات بزرگراه‌ها، ۲۰۰۷). مقادیر دمای ذوب و مؤثر و غلظت متناظر آنها برای مواد یخزدا و ضدیخ مصرفی، به همراه علامت اختصاری استفاده شده در آزمایش‌ها، در جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به مصرف چندین میلیون تنی این مواد و اطلاعات جدول ۴، همانطور که ملاحظه می‌شود، از بین مواد فوق، قیمت‌های کلرید کلسیم، کلرید منیزیم، کلرید سدیم و اوره به صورتی است که می‌توان آنها را در حد وسیعی در سطح راه‌ها استفاده کرد. سایر موارد به علت قیمت بسیار بالا دارای استفاده خاص و محدودی خواهند بود.

مطالعات وسیعی در خصوص تأثیرات زیست-محیطی این مواد انجام شده است. نتایج و خلاصه این مطالعات نشان می‌دهد یون کلر برای خاک‌ها مفید بوده، اما شواهد محدودی نشان می‌دهند که این یون می‌تواند باعث جابجایی فلزات سنگین و افزایش فشار اسمزی در خاک گردد. همچنین، این یون برای انسان، آب و هوا چالش‌زا نیست. تأثیر یون‌های کلرید کلسیم و منیزیم بر خاک‌ها مثبت بوده و در برخی شرایط موجب جابجایی فلزات سنگین می‌شوند. این دو یون نیز برای انسان مشکلات خاصی را ایجاد نمی‌کنند. کلرید سدیم برای خاک‌ها و گیاهان بسیار مضر بوده و یون آن باعث افزایش فشار اسمزی، کاهش نفوذپذیری، پتانسیل جابجایی فلزات سنگین در خاک و قابلیت تغییرات کاتیونی می‌شود. یون سدیم تهدید بالقوه‌ای برای

جدول ۵. مشخصات فنی مواد ضدیخ و یخزدا استفاده شده در این تحقیق

نوع ماده	دمای ذوب (°C)	دمای مؤثر (°C)	غلظت (درصد وزنی)	اختصار
نمونه خشک	-	-	-	DS
آب خالص	-	-	۱۰۰	DW
کلرید کلسیم ^۱	-۵۱	-۳۲	۳۰	CA
کلرید منیزیم ^۲	-۳۳	-۱۵	۲۲	MG
کلرید سدیم ^۳	-۲۱	-۹	۲۳	NA
اوره ^۴	-۱۲	-۴	۳۳	UR

^۱- Calcium Chloride

^۲- Magnesium Chloride

^۳- Sodium Chloride

^۴- Urea

۳-۴. مخلوط بتن آسفالتی و عمل آوری

در این پژوهش، برای تعیین درصد قیر بهینه و مشخصات حجمی نمونه‌های آسفالتی، از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شده است. تعداد ۵۴ نمونه مارشال به روش طرح اختلاط مارشال و با تراکم دستگاه ژیراتوری ساخته شدند. انتخاب مصالح در نمونه‌های آسفالتی بایستی به صورتی باشد که در آنها فضای خالی ۴ و ۷ درصد تأمین شود. مطابق استاندارد برای آزمایش‌های استقامت مارشال و مدول برجهندگی از نمونه‌ها با ۴ درصد فضای خالی و برای مقاومت کششی از نمونه‌ها با ۷ درصد فضای خالی استفاده می‌شود (آشتو، ۲۰۰۱). مشخصات نمونه‌های آسفالتی در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است.

برای عمل‌آوری نمونه‌ها، محلولی خالص از آب مقطر و محلول‌هایی با آب مقطر و یخزدا، با استفاده از غلظت‌های تعیین شده در جدول ۵، آماده شدند. از ۵۴

نمونه ساخته شده، ۹ نمونه برای عمل‌آوری در آب خالص، ۳۶ نمونه برای عمل‌آوری در محلول‌های ضدیخ و ۹ نمونه دیگر در حالت خشک و بدون هیچگونه عمل‌آوری به جهت مقایسه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها انتخاب شدند. برای عمل‌آوری، نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت درون آب خالص و سایر محلول‌های آماده شده با یخزداها و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس اشباع شده و سپس به مدت ۱۶ ساعت درون فریزر با دمای ۱۸- درجه سلسیوس قرار گرفتند. این نمونه‌ها پس از خارج شدن از فریزر به مدت ۲۴ ساعت درون آب مقطر و محلول‌های ضدیخ مربوطه با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. مطابق استاندارد AASHTO T283 این عمل ۵ بار برای تمام نمونه‌ها تکرار شده و سپس به همراه نمونه‌های خشک جهت آزمایش‌ها آماده می‌شوند (آشتو، ۲۰۰۱).

جدول ۶. مشخصات حجمی و مکانیکی مخلوط آسفالتی با قیر بهینه در فضای خالی ۴٪

مقدار استاندارد	مقدار	روش آزمایش	مشخصه
-	۵/۸	-	قیر بهینه، درصد
۷/۸۴۵ >	۱۰/۹۸۳	AASHTO T245	استقامت مارشال در قیر بهینه، KN
۲-۳/۵	۳/۲	AASHTO T245	روانی در قیر بهینه، میلی‌متر
-	۲/۳۰۶	AASHTO T209	دانسیته حداکثر آسفالت gr/cm^3
-	۲/۴۶۷	AASHTO T19	دانسیته حقیقی کل مصالح gr/cm^3
-	۲/۲۱۰	AASHTO T166	دانسیته حقیقی آسفالت، برای ۴/۱۶ درصد فضای خالی gr/cm^3
-	۴/۱۶	AASHTO T269	فضای خالی مخلوط متراکم (P_n)، درصد
-	-	-	فضای خالی مخلوط مصالح سنگی (VMA)
۱۴ >	۱۵/۶۱	AASHTO T269	در ۴/۱۵ درصد فضای خالی
۶۰-۷۵	۷۳/۳۵	AASHTO T269	فضای خالی پرشده با قیر (VFA)، درصد

جدول ۷. مشخصات حجمی و مکانیکی مخلوط آسفالتی با قیر بهینه در فضای خالی ۷٪

مقدار استاندارد	مقدار	روش آزمایش	مشخصه
-	۵/۸	-	قیر بهینه، درصد
۷/۸۴۵ >	۱۰/۵۹۰	AASHTO T245	استقامت مارشال در قیر بهینه، KN
۲-۳/۵	۳/۱	AASHTO T245	روانی در قیر بهینه، میلی‌متر
-	۲/۳۰۶	AASHTO T209	دانسیته حداکثر آسفالت، gr/cm ³
-	۲/۴۶۷	AASHTO T19	دانسیته حقیقی کل مصالح، gr/cm ³
-	۲/۱۴۵	AASHTO T166	دانسیته حقیقی آسفالت، برای ۶/۹۸ درصد فضای خالی، gr/cm ³
-	۶/۹۸	AASHTO T269	فضای خالی مخلوط متراکم (P _a)، درصد
۱۴ >	۱۸/۰۹	AASHTO T269	فضای خالی مخلوط مصالح سنگی (VMA)، در ۶/۹۸ درصد فضای خالی
۶۰-۷۵	۶۱/۴۱	AASHTO T269	فضای خالی پر شده با قیر (VFA)، درصد

استقامت مارشال به روانی و درصد مقاومت نسبت به نمونه‌های خشک است، در شکل ۱ ارائه شده است.

۴. نتایج

۴-۱. آزمایش مقاومت مارشال

نتیجه انجام آزمایش مارشال روی نمونه‌های آسفالتی، تعیین استحکام مارشال (بیشترین بار قابل تحمل در لحظه شکست) و روانی (میزان تغییر شکل نمونه در لحظه شکست) است. در برخی مراجع، برای ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی از شاخص سختی مارشال (نسبت استحکام مارشال به روانی آن) که مقداری تجربی برای تعیین سختی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد نیز استفاده می‌شود. افزایش مقدار شاخص سختی مارشال نشان دهنده مخلوط سخت‌تر و حاکی از آن است که احتمالاً مخلوط دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دائم می‌باشد. نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت ۳۰ دقیقه درون آب ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس آزمایش مقاومت مارشال روی آنها انجام شده است (آشتو، ۲۰۰۱؛ ASTM، ۲۰۰۱). نتایج آزمایش مارشال که شامل مقادیر استقامت مارشال، روانی، نسبت

۴-۲. مقاومت کششی

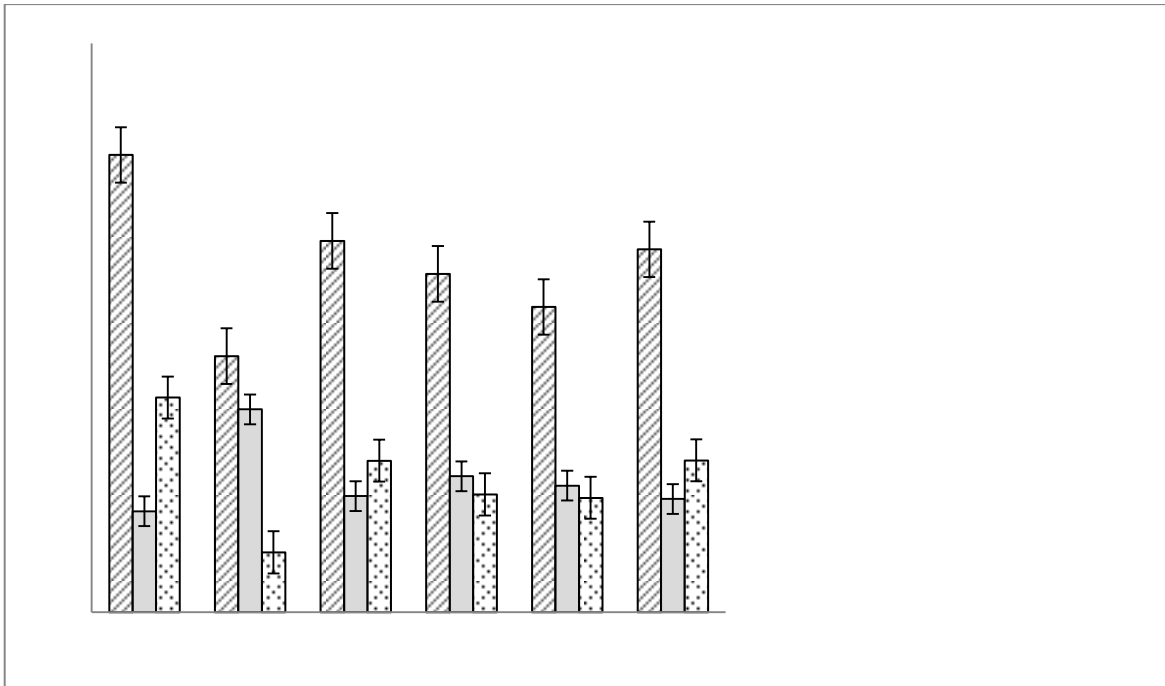
از آزمایش کشش غیرمستقیم برای تعیین خصوصیات کششی بتن آسفالتی که می‌تواند منجر به شناخت خصوصیات ترک‌خوردگی روسازی شود، استفاده می‌شود. مقاومت کششی نمونه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (آشتو، ۲۰۰۱):

$$S_t = \frac{2000P_{\max}}{\pi t d} \quad (1)$$

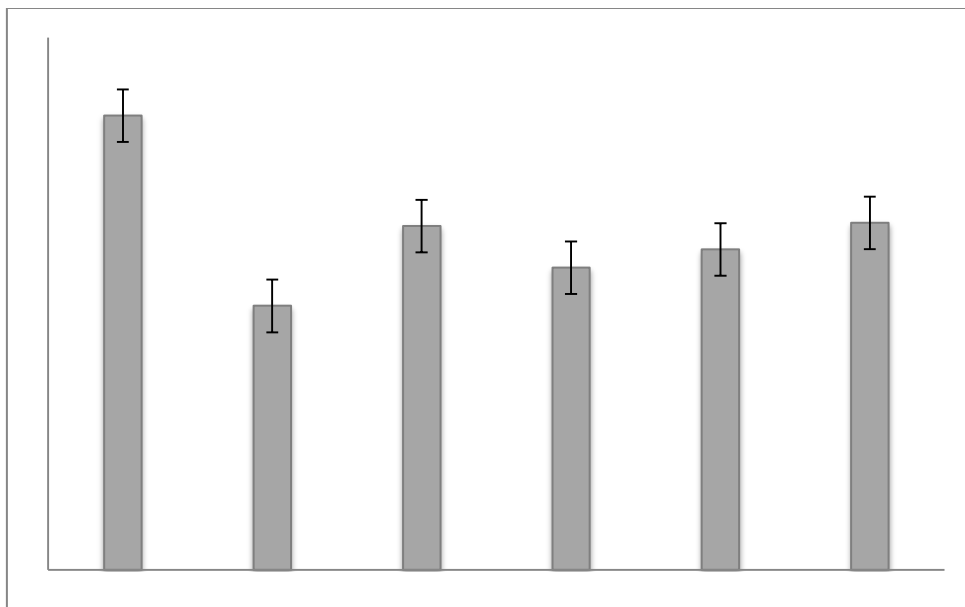
که P_{\max} بار نهایی اعمال شده (نیوتن)، t ارتفاع نمونه (میلی‌متر)، d قطر نمونه (میلی‌متر) و S_t مقاومت کششی (کیلوپاسکال) است.

مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده و نمونه‌های خشک پس از قرارگیری به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سلسیوس و مطابق روش استاندارد AASHTO T283 اندازه‌گیری می‌شود (آشتو، ۲۰۰۱). نتایج آزمایش مقاومت کششی به همراه درصد

مقاومت نسبت به نمونه‌های خشک در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. مقادیر استقامت مارشال، روانی، نسبت استقامت مارشال به روانی و درصد مقاومت نسبت به نمونه‌های خشک



شکل ۲. مقادیر مقاومت کششی و درصد مقاومت نسبت به نمونه‌های خشک

۳-۴. مدول برجهدگی

مدول برجهدگی به‌خوبی رفتار غیر الاستیک مخلوط را در مقابل بارها توصیف می‌کند. این توصیف خوب، منجر به طراحی روسازی راه براساس عملکرد واقعی لایه‌ها در زیر بار خواهد شد. برجهدگی قابلیت یک ماده برای جذب انرژی در زمان تغییرشکل الاستیک و آزاد کردن آن در زمان باربرداری است. به دلیل این توصیف و تطابق با عملکرد واقعی، در روش‌های طراحی روسازی‌ها در دهه‌های اخیر سعی بر جایگزینی مدول برجهدگی به جای CBR شده است. مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی طبق استاندارد ASTM D4123 به روش کشش غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود، و یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین نمودار تنش- کرنش جهت ارزیابی خصوصیات الاستیک مصالح است (آشتو، ۲۰۰۱).

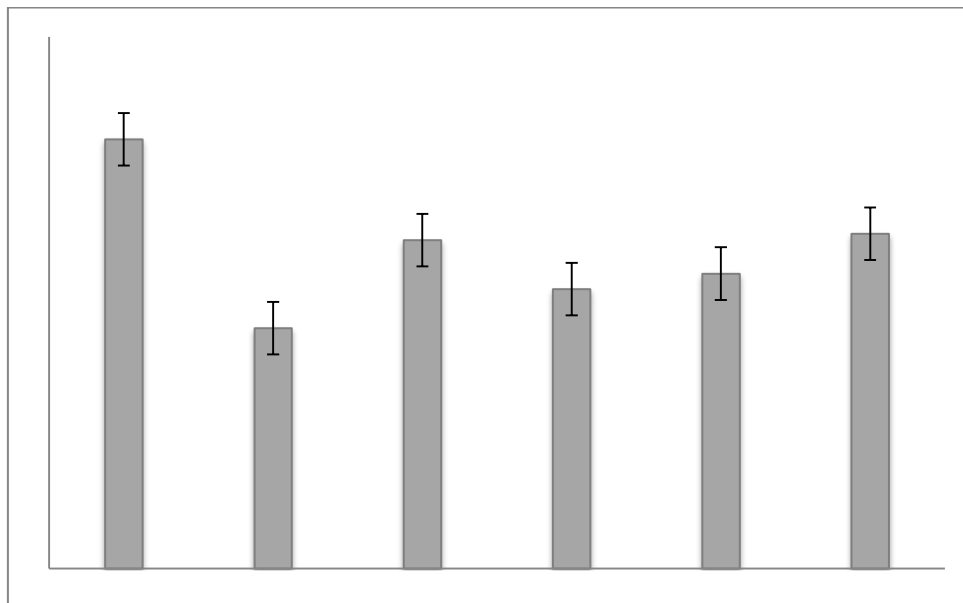
برای یک بار دینامیک با حداکثر اندازه P که تغییرشکل‌های افقی ناشی از آن اندازه‌گیری شده‌اند،

مدول برجهدگی کل با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید (آشتو، ۲۰۰۱):

$$M_r = \frac{P(\mu + 0.27)}{t \delta_h} \quad (2)$$

که M_r مدول برجهدگی (MPa)، P حداکثر بار دینامیک (N)، μ ضریب پواسون (۰/۳۵)، t طول نمونه (mm) و δ_h تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر کل (mm) است.

برای تعیین مدول برجهدگی در دمای ۲۵ °C از دستگاه UTM 14 و از شکل بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس یک هرتز و سیکل بارگذاری یک ثانیه (مدت زمان استراحت ۰/۹ ثانیه) و ضریب پواسون ۰/۳۵ مطابق روش استاندارد ASTM D4123 استفاده گردید (آشتو، ۲۰۰۱؛ ASTM، ۲۰۰۱). نتایج آزمایش مدول برجهدگی برای تمامی مخلوط‌های خشک و اشباع در شکل ۳ به همراه درصد مدول برجهدگی نسبت به نمونه‌های خشک، ارائه شده است.



شکل ۳. مقادیر مدول برجهدگی و درصد مدول برجهدگی نسبت به نمونه‌های خشک

۴-۴- تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی

در مطالعات آزمایشگاهی و میدانی لازم است از نرمال بودن نتایج اطمینان حاصل نمود. بدین منظور از آزمون-های مختلفی نظیر کولموگروف-اسمیرنوف¹ استفاده می‌شود. آماره آزمون به قرار زیر است:

H_0 : داده‌ها نرمال هستند

H_a : داده‌ها نرمال نیستند

این آزمون با نرم‌افزار SPSS انجام می‌گردد. اگر

P-value یا همان Sig نرم‌افزار از سطح معنی‌داری ۰/۰۵

بزرگتر یا مساوی باشد، فرض H_0 رد نمی‌شود و داده‌ها نرمال هستند. اگر P-value یا همان Sig نرم‌افزار از سطح معنی‌داری ۰/۰۵ کوچکتر باشد، فرض H_0 رد می‌شود و داده‌ها نرمال نیستند. نتایج آزمون فوق در جدول ۸ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، مقادیر P-value همگی بزرگتر از ۰/۰۵ بوده و بنابراین داده‌ها نرمال خواهند بود و نتایج و تحلیل‌های آنها صحیح می‌باشد (نیکوکار و عربزاده، ۱۳۸۵).

جدول ۸. خروجی تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی با نرم‌افزار SPSS

		Mr	TSR	Marshal
N		18	18	18
Normal Parameters	Mean	23910.33	763.17	7.35433
	Std. Deviation	4560.680	140.545	1.370922
Most Extreme Differences	Absolute	.215	.200	.141
	Positive	.215	.200	.141
	Negative	-.132	-.123	-.107
Kolmogorov-Smirnov Z		.914	.849	.600
Asymp. Sig. (2-tailed)		.373	.468	.865

۵. بحث و نتیجه‌گیری

لزوم ارزیابی مواد و مصالح مصرفی در روسازی‌ها و تأثیرات آنها روی یکدیگر محرز است. در شرایط زمستانی، استفاده از مواد یخ‌زدا و ضدیخ اجتناب‌ناپذیر است. غفلت از تأثیرات این مواد روی رویه‌های آسفالتی و محیط‌زیست می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را وارد کند. در این مطالعه، مقاومت نمونه‌های مارشال که در محلول‌های کلرید کلسیم، کلرید منیزیم، کلرید سدیم و اوره عمل‌آوری شده بودند، مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای این ارزیابی از آزمایش‌های مقاومت مارشال، مقاومت کششی و مدول برجهندگی استفاده شد. نتایج این مطالعه و داشتن اطلاعاتی نظیر حداقل دمای محیط، قیمت هر ماده ضدیخ و آسیب‌های زیست‌محیطی هر یک می‌تواند در انتخاب نوع ماده یخ‌زدا با توجه به کمترین آسیب رسانی به محیط و مخلوط

آسفالتی، راهگشا باشد. جمع‌بندی نتایج ارائه شده در بخش قبل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- نمونه‌های اشباع عمل‌آوری شده در محلول آب خالص دارای بیشترین افت استحکام مارشال، مقاومت کششی و مدول برجهندگی نسبت به نمونه‌های خشک است. میانگین افت این نمونه‌ها در استحکام مارشال ۴۴٪، مقاومت کششی ۴۲٪ و مدول برجهندگی ۴۴٪ می‌باشد. این نتیجه حاکی از آن است که قرار گرفتن رویه آسفالتی در معرض سیکل ذوب و یخ، مقاومت را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد و صرف‌نظر از جنبه‌های بهره‌برداری، لزوم نگهداری پیشگیرانه را تأیید و تأکید می‌کند. مکانیزم کاهش مقاومت احتمالاً در اثر افزایش فشار یخ تشکیل یافته در خلل و فرج موجود در نمونه‌های آسفالتی است.

1- Kolmogorov-Smirnov

کارفرمایان به علت ارزانی، تمایل بیشتری برای مصرف آن دارند. به همین دلیل، در بندهای قبلی توصیه استفاده از این ماده به عنوان یخزدا حذف شده است. از نظر محیط‌زیست، اوره و سپس کلرید کلسیم و منیزیم در شرایط بهتری قرار دارند که اوره از نظر قیمت هم مناسب‌تر می‌باشد. اما حداقل دمای محیط مصرف نیز در انتخاب نوع ماده یخزدا تعیین‌کننده می‌باشد.

۶- نتایج بیان‌کننده این است که کلرید منیزیم و کلرید سدیم بیشترین اثر منفی را در بین سایر یخزداها بر نمونه‌های آزمایشگاهی دارند. بنابراین، تا آنجا که می‌توان باید از مصرف آنها اجتناب کرد و مواد مناسب دیگری را پس از مطالعات لازم، جایگزین کرد. البته در خصوص کلرید سدیم باید حذف کامل این ماده را در دستور کار قرار داد.

۷- مخلوط‌های آسفالتی از مصالح سنگی، قیر و هوا تشکیل شده‌اند. تغییر در مشخصات هر یک و یا ضعف و قوت هر یک منجر به تغییر در مشخصات نهایی مخلوط تهیه شده می‌شود. همانطور که در پیشینه تحقیق مشاهده شد مطالعات زیادی روی تأثیر انواع مختلف یخزداها و ضدیخ‌ها روی قیر، مصالح سنگی، فیلرها و چسبندگی بین آنها، صورت گرفته است. همه مطالعات نشان دادند که مصرف ضدیخ‌ها و یخزداها بر مصالح سنگی، قیر و چسبندگی بین آنها تأثیر منفی دارد. نتیجه آثار منفی فوق‌همانند پژوهش‌های دیگر و این پژوهش، در کاهش پارامترهای مقاومتی نظیر استقامت مارشال، مقاومت کششی و مدول برجهندگی نمایان می‌شود. کاهش پارامترهای مقاومتی ناشی از خرابی‌های رطوبتی (نظیر تأثیر بر پوشش قیری سنگدانه‌ها، عریان شدگی، قیرزدگی)، تغییر مشخصات قیر (نظیر تأثیر بر درجه نفوذ، ساختمان شیمیایی قیر، واکنش‌های شیمیایی قیر، نفوذ یخزداها به قیر، امولسیون‌شدگی، تقطیر، چسبندگی به دانه‌ها) و تغییر مشخصات سنگدانه‌ها (تأثیر بر فیلرهای مختلف، واکنش‌های قلیایی-سیلیسی، تأثیر بر

۲- براساس نتایج آزمایش استقامت مارشال، کمترین افت مقاومت به ترتیب مربوطه به کلرید کلسیم (۱۹٪)، اوره (۲۱٪)، کلرید منیزیم (۲۶٪) و کلرید سدیم (۳۳٪) می‌باشد. لذا در مواردی که معیار مقاومت، آزمایش مارشال انتخاب می‌شود به ترتیب کلرید کلسیم، اوره و کلرید منیزیم توصیه می‌شود. همچنین، بیشترین نسبت استقامت به روانی مربوط به اوره بوده که احتمالاً کمترین تغییر شکل‌های دایمی را خواهد داشت.

۳- ملاحظه در نتایج آزمایش مقاومت کششی نشان می‌دهد که کمترین افت مقاومت به ترتیب مربوطه به کلرید کلسیم (۲۴٪)، اوره (۲۴٪)، کلرید سدیم (۲۹٪) و کلرید منیزیم (۳۳٪) می‌باشد. در مناطق سردسیر، به علت انقباض ناشی از دمای کم، مقاومت کششی مخلوط اهمیت خاصی داشته و بنابراین در این شرایط برای کاهش ترک‌های کششی استفاده از کلرید کلسیم، اوره و سپس کلرید منیزیم و به عنوان یخزدا، در اولویت قرار می‌گیرند. نتایج این مطالعه با مطالعات حسن و همکاران (۲۰۰۰) و سنتاگاتا و همکاران (۲۰۱۳) تطابق دارد.

۴- آزمایش مدول برجهندگی یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در طراحی روسازی‌ها با استفاده از روش‌های پیشرفته می‌باشد و بیان‌کننده رفتار غیر الاستیک مخلوط می‌باشد. این در حالی است که مقاومت مارشال توانایی بیان آن را ندارد. مقادیر آزمایش مدول برجهندگی نشان می‌دهد که کمترین افت مقاومت به ترتیب مربوطه به اوره (۲۲٪)، کلرید کلسیم (۲۴٪)، کلرید سدیم (۳۲٪) و کلرید منیزیم (۳۵٪) می‌باشد. در این حالت، استفاده از اوره، کلرید کلسیم و منیزیم به ترتیب مورد توجه واقع می‌شود.

۵- با توجه به جدول ۴، از نظر اقتصادی کمترین هزینه به ترتیب مربوطه به کلرید سدیم، اوره، کلرید منیزیم و کلرید کلسیم است. ولی مخرب‌ترین ماده برای محیط‌زیست و انسان، کلرید سدیم است که متأسفانه

ج) در مناطقی که دمای آنها کمتر از ۲۰- درجه سلسیوس می‌باشد، فقط باید از کلرید کلسیم به عنوان ماده یخزدا استفاده نمود.

۶. سپاسگزاری

بدینوسیله از مدیر عامل و پرسنل محترم آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان تهران که ما را در انجام آزمایش‌ها یاری رساندند کمال قدردانی و تشکر را داریم.

سنگدانه‌های آهکی و کوارتزی) می‌باشد. دامنه این تغییرات با توجه به نوع ماده مصرفی جهت یخزدایی و مقدار توانایی تأثیر بر پارامترهای فوق، متفاوت است.

۸- نهایتاً، براساس مطالعه حاضر و مشخصه هر یک از مواد یخزدا و آثار زیست‌محیطی و قیمت آنها، دامنه مصرف آنها به صورت زیر توصیه می‌شود:

الف) در مناطقی که دمای آنها بین صفر تا ۱۰- درجه سلسیوس می‌باشد، از اوره به‌عنوان ماده یخزدا استفاده شود.

ب) در مناطقی که دمای آنها بین ۱۰- تا ۲۰- درجه سانتی‌گراد می‌باشد، از کلرید منیزیم استفاده شود.

۷. مراجع

ایمنی، ب. و حضرتی، ر. ۱۳۸۸. "مقایسه عملکردی استات کلسیم منیزیم با ماسه و نمک به عنوان ماده یخزدا در فصل سرما". اولین کنفرانس ملی تصادف و سوانح جاده‌ای و ریلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان. سلیمانی کرمانی، م. ر. ۱۳۸۷. "تأثیر نمک‌پاشی بر مقاومت لغزشی سطح جاده‌ها". پژوهشنامه حمل و نقل، ۵(۲): ۱۸۷-۱۹۳.

شاهی، ف.، کاظمی، ب. و افرند، ح. ۱۳۹۲. "بررسی تأثیرات استفاده از نمک و شن بر سطح معابر، جاده‌ها و عوامل ایمنی راه‌ها". فصلنامه صنعت مقاوم سازی و بهسازی، شماره ۲۶.

نجفی شالمائی، م.، قبادی، ف.، سرحدی، س. و امیراصلانی، ف. ۱۳۸۸. "بررسی عوارض زیست‌محیطی شن و مواد شیمیایی یخزدا در شهر تهران و ارائه راهکارهایی جهت کاهش این عوارض". سومین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.

نیکوکار، م. و عربزاده، ب. ۱۳۸۵. "آمار و احتمالات کاربردی". نشر آزاده.

Advanced Asphalt Technologies. 2007. "AATP project 05-03: Effect of Deicing Chemical on HMA Airfeild Pavement". Phase II aseplaans with Summary of Ph.

AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. 2001. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Alatypko, V. 2005. "Conclusions-Finnish Deicing Project", Helsinki University of Technology, Laboratory of Highway Engineering, Helsinki, Finland.

Alatypko, V. and Valtonen, J. 2007. "Experiences on the effects of de-icing chemicals on bituminous airfield runways in Finland". Proceedings of the 2007 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, N.J.

Apeageyi, A. K., Struble, L. J. and Buttlar, W. 2008. "Investigation of Alkali-Silica Reaction in Asphalt Mixtures Exposed to Potassium Acetate Deicing Solution". Tech. Note No. 37, Center of Excellence for Airport Technology.

American Society for Testing and Materials. 2001. ASTM.

Burtwell, M. 2004. "Assessment of Safecote New Deicer Product". Transportation Research Laboratory Limited, Nunber E-C063.

- Edwards, Y., Rollen, J., Lange, G., Aurstad, J. and Nilsen, T. 1999. "Durability Problems on Nordic Airfields- the Influence of De-Icing Agents on Asphalt Concrete Pavement". VTI Notat 24A- 1999, Linköping, Sweden, The Swedish National Road and Transport Institute (VTI), 199, Pb.54.
- Farha, M. H., Hassan, Y., Abd El Halim, A. O., Razaqpur, A. G., El-Desouky, A. and Mostafa, A. 2002. "Effects of new deicing alternatives on airfield asphalt concrete pavements". The 2002 Federal Aviation Administration Technology Transfer Conference.
- Federal Highway Administration. 2005. "How do weather events impact roads?" [Online]. Available at: http://ops.fhwa.dot.gov/Weather/q1_roadimpact.htm.
- Fischel, M. 2001. "Evaluation of Selected Deicers Based on a Review of the Literature". Report Number CDOT-DTD-R-2001-15, The SeaCrest Group, Louisville, Colorado.
- Hassan, Y., Abd El Halim, A. O. and Razaqpur, A. G. 2000. "Laboratory Evaluation and Assessment of the Effect of Runway Deicers on the Mechanical Properties of Asphalt Concrete Mixes Subjected to Freeze-Thaw Cycles". Safety and Security, Civil Aviation, Aerodrome Safety, Technical Evaluation Engineering Division, Transport Canada, Ontario, Canada.
- Hassan, Y., Abd El Halim, A. O., Razaqpur, A. G. and Farha, M. 2001. "Laboratory investigation of effect of deicing chemicals on airfield asphalt concrete pavements materials". Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Materials, San Jose, California, Vol. I, pp. 299-308.
- Hassan, Y., Abd El Halim, A. O., Razaqpur, A., Bekheet, W. and Farha, M. 2002. "Effects of runway deicers on pavement materials and mixes: Comparison with road salt". J. Transport. Eng., Doi.10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:4(385), 385-391.
- Klein-Paste, A. and Wahlin, J. 2013. "Wet pavement anti-icing: A physical mechanism". Cold Regions Sci. Technol., 96: 1-7.
- Levelton Consultants Limited. 2007. "Guidelines for the Selection of Snow and Ice Control Materials to Mitigate Environmental Impacts". NCHRP Report 577, Richmond, BC, Canada.
- O'Keefe, K. and Shi, X. 2005. "Synthesis of Information on Anti-icing and Pre-wetting for Winter Highway Maintenance Practices in North America". Final Report Prepared for the Pacific Northwest Snowfighters Association, Western Transportation Institute.
- Pan, T. 2008. "Mitigation of Moisture and Deicer Effects on Asphalts Thermal Cracking Through Polymer Modification". Western Transportation Institute, College of Engineering, Montana State University.
- Pan, T., Fay, L. and Shi, X. 2006. "Deicer Impacts on Pavement Materials: A Critical Review". A report prepared for the Colorado Department of Transportation, Denver, Colorado.
- Salt Institute. 2005. "Highway Deicing and Anti-icing for Safety and Mobility". [Online], Available at: <http://www.saltinstitute.org/30.html>.
- Santagata, E., Baglieri, O. and Riviera, P. 2013. "Effect of Anti-icing Chemicals on Stripping of Asphalt Concrete Mixtures for Airport Runway Wearing Courses". 2013 Airfield & Highway Pavement Conference, Los Angeles, CA, USA, June 9-12, pp. 1229-1239.
- Shi, X., Akin, M., Pan, T., Fay, L., Liu, Y. and Yang, Z. 2009. "Deicer impacts on pavement materials: Introduction and recent developments". The Open Civil Eng. J., 3: 16-27.
- Starck, P. and Löfgren, B. 2007. "Influence of de-icing agents on the viscoelastic properties of asphalt mastics". J. Mater. Sci., 42(2): 676-685.
- Wisconsin Transportation Bulletin. 1996. "Using sand for winter maintenance".