

# بررسی تاثیر جریان آب و مواد یخزدا بر خرابی بتن آسفالتی تحت سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب‌شدن

صالح شریف طهرانی<sup>۱</sup>، سید حسین حسینی لواسانی<sup>۲</sup>، بهروز شیرگیر<sup>۳</sup>

۱. استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی
۲. استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی
۳. استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

Shariftehрани@khu.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۵/۱۰/۱۸

تاریخ دریافت ۹۴/۱۲/۰۸

**چکیده** - روسازی راه از مهمترین سرمایه‌های هر کشوری است و سالانه هزینه‌های زیادی صرف تعمیر و نگهداری آنها می‌شود. با توجه به کاهش مقاومت لغزشی راه‌ها در هنگام وجود برف و یخ، مقادیر زیادی ماده یخ‌زدا برای آب نمودن برف و یخ راه‌ها استفاده می‌شود. مواد یخ‌زدا، باعث ذوب برف و یخ شده و آب حاصل که حاوی ماده یخ‌زدا است تحت شیب بر سطح راه جریان می‌یابد. حضور مواد یخ‌زدا آثار مخرب زیادی بر روسازی دارد و توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است. اما آنچه به خوبی بررسی نشده است، آثار جریان آب حاوی ماده یخ‌زدا است. این پژوهش به بررسی آثار توامان جریان آب و مواد یخ‌زدا در سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب شدن بر خرابی‌های بتن آسفالتی پرداخته است. در این راستا نمونه‌های آسفالتی ساخته شده تحت اثر پنج حالت مختلف از سیکل‌های یخبندان و دو ماده یخ‌زدا شامل نمک یخ‌زدا و استات کلسیم قرار داده شدند. همچنین به منظور بررسی دوام بتن آسفالتی، یک دستگاه سایش طراحی شد تا نمونه‌های آسفالتی را تحت بارگذاری عمودی و اصطکاکی قرار دهد. میزان درصد افت وزن و مقاومت مارشال نمونه‌ها به عنوان شاخص‌های خرابی بتن آسفالتی در نظر گرفته شدند. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که جریان محلول‌های یخ‌زدا در دوره یخبندان باعث افزایش شدت خرابی آسفالت می‌شود. به علاوه استفاده از نمک یخ‌زدا تاثیر به مراتب مخرب‌تری نسبت به استات کلسیم از خود نشان می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب‌شدن، جریان مواد یخ‌زدا، نمک یخ‌زدا، استات کلسیم، خرابی آسفالت روسازی، استات کلسیم.

## ۱- مقدمه

ساخت‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری‌های روزافزون است چرا که با افزایش عمر روسازی و تاخیر در تعمیر و نگهداری آنها، هزینه‌های نگهداری افزایش قابل توجهی می‌یابند [1]. طراحی روسازی راه با عمر مفید طولانی‌تر همواره یکی از موضوعات جالب توجه برای پژوهشگران بوده است و پژوهش‌های فراوانی در این خصوص صورت گرفته است. با توجه به اینکه پارامترهای متنوعی بر عمر مفید بتن موثراند، ساخت آسفالت با دوام بالا امری پیچیده است. بنابراین شناخت

راه‌ها از جمله دارایی‌های مهم و ارزشمند کشورها است و سالانه مقادیر زیادی برای ترمیم و بازسازی آنها گذاشته می‌شود. با توجه به گستره زیاد راه‌ها و اهمیت روزافزون این تسهیلات در ارائه سرویس سریع، ایمن و قابل اطمینان در طول سال و همچنین افزایش هزینه‌های ساخت، حفظ و نگهداری این منابع ارزشمند از اهمیت بسیاری برخوردار است. با توجه به گزارش زیرساختی دولت کانادا در سال ۲۰۱۲، بیشتر زیر

این پژوهش‌ها گردآوری شده و بهترین راه‌حل‌ها ارائه شده است.

امروزه بسیاری از راه‌ها و باندهای فرودگاه‌ها با استفاده از روسازی آسفالتی ساخته می‌شوند و همه ساله هزینه‌های چشم‌گیری برای نگهداری و ترمیم این لایه صرف می‌شود تا از گسترش خرابی‌ها جلوگیری و ایمنی و راحتی تردد افزایش یابد. کاهش ایمنی در ترافیک و هزینه‌های مدیریت و کنترل برف و یخ و برف‌روبی و همچنین هزینه‌های تصادفات ناشی از وجود برف و یخ در سطح جاده برای رانندگان و مسئولین مربوطه بسیار بالاست.

یکی از مشکلات اساسی در زمان بعد از آب شدگی برف و یخ، حل شدن مواد یخ‌زدا در آب حاصل از ذوب برف و یخ است. این محلول در اثر حرکت وسایل نقلیه و در برخی مناطق با توجه به شیب طبیعی جاده به حرکت درآمده و آثار مخربی بر آسفالت روسازی دارد. این محلول در هنگام شب که دمای هوا کاهش می‌یابد، دوباره یخ بسته و باعث کاهش چشم‌گیر ایمنی می‌شود.

یکی از مهم‌ترین خرابی‌های آسفالت رویه پدیده عریان شدگی است. مواد یخ‌زدا تاثیر چشم‌گیری بر این پدیده دارند و با کنترل این امر می‌توان از کاهش این خرابی‌ها جلوگیری کرد. علاوه بر عریان شدگی، شیارشدگی زودرس و افتادگی شانه نیز از جمله آثار منفی ناشی از حضور برف و یخ و بعد از آن حضور آب به دست آمده در سطح راه است چراکه یخبندان با افزایش حجم آب موجود در منافذ و تغییر شکل‌های ماندگار همراه است. به طور کلی سازوکار خرابی ناشی از رطوبت را می‌توان به دو نوع دسته‌بندی کرد یکی کاهش خاصیت چسبندگی و دیگری کاهش قدرت اتصال بین مواد است. کاهش چسبندگی ناشی از وارد شدن آب به درون آسفالت و ریزدانه‌ها و باعث عریان شدگی در بالاترین لایه آسفالت می‌شود [5].

استفاده از نمک مشکلات جدیدی از جمله آلودگی محیط‌زیست و خوردگی سطح جاده‌ها و سطح زیرین وسایل نقلیه را به همراه دارد. این مشکلات منجر به بکارگیری مواد یخ‌زدای جدید شده است. استات کلسیم زمان ماندگاری

عوامل مخرب آسفالت، بررسی سازوکار خرابی و یافتن راه‌حل‌های مقابله با این خرابی‌ها اهمیت بسیاری دارد. یکی از مهمترین عوامل محیطی که خسارات جبران ناپذیری را به روسازی راه‌ها وارد می‌آورد، سیکل‌های یخبندان است. در برخی از شهرهای سردسیر دنیا مانند شهر کلگری در ایالت آلبرتا کانادا، سالانه بیش از ۳۰۰ سیکل یخبندان به وقوع می‌پیوندد و بیش از ۴۰۰۰۰ کیلومتر بزرگراه در این ایالت تحت خطر آسیب دیدگی ناشی اثر سیکل‌های یخبندان قرار می‌گیرند [2].

معمولاً پس از بارش باران یا برف در مجاورت روسازی و جداول بتنی آب وجود دارد و حضور مداوم آب باعث می‌شود که درجه اشباع آسفالت افزایش یابد و در نتیجه در فصل‌های سرد سال به دلیل تکرار سیکل‌های یخبندان به شدت آسیب می‌بینند. یخ بستن آب یا آب نمک در حفره‌های موجود در آسفالت می‌تواند باعث خرابی‌های شدید و کاهش عمر مفید آن شود. آب خالص تحت فشار معمولی جوی در دمای  $0^{\circ}\text{C}$  یخ می‌زند. وقتی آب یخ می‌زند ۹٪ به حجم آن افزوده می‌شود و باعث افزایش فشار هیدرولیکی در حفره‌های آسفالت می‌شود. در صورتی که این فشار از مقاومت کششی آسفالت تجاوز کند، خرابی ایجاد خواهد شد.

با توجه به استفاده گسترده از مواد یخ‌زدا در روسازی راه‌ها برای آب کردن برف و یخ به منظور افزایش ایمنی و قابلیت تردد خودروها، آثار مخرب سیکل‌های ذوب و یخ افزایش بیشتری داشته است. هر ساله در حدود ۵ میلیون تن نمک در کشور کانادا برای فراهم نمودن دسترسی ایمن و قابل اطمینان در راه‌ها در طول زمستان روی جاده‌ها پخش می‌شود و مقدار متناظر در آمریکا ۱۵ میلیون تن در سال است [3]. مواد یخ‌زدا به دلیل واکنش شیمیایی خرابی‌های آسفالت را تشدید می‌کنند [4].

با توجه به آثار مخرب سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب شدن، پژوهش‌های گسترده‌ای در خصوص فرآیند یخبندان، خرابی‌های آسفالت بتنی تحت سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب شدن و راهکارهای افزایش دوام روسازی‌های آسفالت بتنی تحت سیکل‌های ذوب و یخ صورت گرفته است. در این مطالعه، نتایج

در این پژوهش علاوه بر خرابی‌های سطحی، خرابی‌های عمقی آسفالت نیز بررسی شد. بنابراین طراحی و ساخت دستگاه سایش پیچشی مورد توجه قرار می‌گیرد تا نمونه‌های آسفالتی را تحت نیروهای پیچشی، برشی و اصطکاکی قرار دهد.

#### ۴- مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته

Zhou و همکاران پژوهشی در زمینه ارزیابی روش‌های تست آزمایشگاهی برای مشخص کردن ویژگی‌های تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالت انجام دادند. هدف از این پژوهش این بود که نتایج حاصل از روش‌های آزمایشگاهی مختلف با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها و مشاهده میدانی مقایسه شود [6]. Nguyen و همکاران، پژوهشی با عنوان مطالعه طیف نگاری میدانی آب موجود در سطح مشترک لایه آسفالت و سیلیس و آثار آن بر عریان شدگی آسفالت انجام دادند [7]. Pan و همکار وی در سال ۱۹۹۹ با ساخت دستگاهی تحت عنوان Purwheel به بررسی عریان شدگی آسفالت پرداختند [8]. Hassan و همکار وی نیز پژوهشی در زمینه آثار مواد یخ‌زدای استفاده شده در سطح باند فرودگاه و نمک استفاده شده در راه‌ها بر مصالح روسازی پرداختند [9].

Mallick و همکاران پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از تجهیزات بارگذاری سریع برای تعیین حساسیت رطوبتی بلند مدت بتن آسفالتی گرم انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که بارگذاری تسریع شده می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای ارزیابی مقاومت بتن آسفالتی در مقابل خرابی‌های رطوبتی تحت تاثیر ترافیک در دمای بالا ارائه دهند [10]. یلدیریم و همکاران پژوهش‌هایی در زمینه گسترش یک روش آزمایشگاهی برای ارزیابی دوام اندود سطحی انجام دادند. این پژوهش روشی برای ارزیابی مقاومت برشی اندود سطحی در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی ارائه نمود [11].

روش تحقیقاتی چرخ هامبورگ از اوایل سال ۱۹۹۰ در آلمان برای بررسی خرابی‌های رطوبتی به کار گرفته شد. در این روش از دستگاهی موسوم به چرخ هامبورگ برای

بیشتری را نسبت به نمک یخ‌زدا دارد. این عامل باعث کاهش میزان مصرف استات کلسیم نسبت به نمک و حذف عملیاتیهای نمک پاشی می‌شود. استات کلسیم منیزیم دارای چسبندگی بیشتری نسبت به نمک یخ‌زدا بوده و آثار مخرب زیست محیطی کمتری دارد.

علاوه بر عملکرد مناسب و سرعت بیشتر مواد جدید در ذوب برف و یخ، کاهش میزان خوردگی و آثار منفی بر وسایل نقلیه، یکی دیگر از نکات مثبت به کارگیری این مواد است. از طرفی ماندگاری بالای این ماده، باعث تقلیل عملیات نگهداری و کاهش هزینه‌های مربوطه می‌شود.

#### ۲- خرابی بتن آسفالتی تحت تاثیر رطوبت و سیکل‌های یخبندان

یخ بستن آب به ویژه آب به همراه مواد یخ‌زدا در حفره‌های بتن آسفالتی می‌تواند باعث خرابی‌های شدید و کاهش قابل ملاحظه عمر سرویس دهی روسازی شود. دمایی که آب در حفره‌های مویینه یخ می‌زند تابعی از ابعاد حفره‌ها و وضعیت شیمیایی است. با کاهش اندازه حفره‌ها، دمای لازم برای یخ بستن آب نیز کاهش می‌یابد. افزایش حجم آب در هنگام انجماد تنش‌هایی در بتن آسفالتی ایجاد می‌کند [4].

#### ۳- چارچوب پژوهش

هدف از این پژوهش بررسی آثار حضور توامان جریان آب و مواد یخ‌زدای نمک و استات کلسیم روی خرابی‌های بتن آسفالتی روسازی‌ها تحت سیکل‌های ذوب و یخ است. در این راستا نمونه‌های آسفالتی ساخته شده در شرایط آزمایشگاهی تحت سیکل‌های یخبندان قرار می‌گیرند. شرایط واقعی یخبندان که معمولا روسازی جاده‌ها تحت تاثیر آن قرار می‌گیرند، با ایجاد جریان آب و استفاده از دو ماده یخ‌زدای نمک و استات کلسیم شبیه‌سازی می‌شوند. برای حالت‌های مختلف یخبندان، نمونه‌های آسفالتی تحت شرایط ساکن و متحرک و با حضور و بدون حضور مواد یخ‌زدا تحت سیکل‌های یخبندان قرار خواهند گرفت.

## ۵-۲ حالت ها و سیکل های یخ زدن و آب شدن

به منظور بررسی آثار واقعی یخبندان بر روسازی راهها، شرایط واقعی یخ زدن و آب شدن که معمولا روسازی جادهها تحت تاثیر آن قرار می گیرند با ایجاد جریان آب استفاده از دو ماده یخ زدای نمک و استات کلسیم شبیه سازی شد. بدین منظور ۵ حالت مختلف یخ زدن و آب شدن به صورت زیر طراحی شدند:

- ۱- یخ زدن و ذوب شدن بدون حضور مواد یخزدا
- ۲- یخ زدن و ذوب شدن در آب نمک ساکن
- ۳- یخ زدن و ذوب شدن در آب نمک در جریان
- ۴- یخ زدن و ذوب شدن در محلول آب و استات کلسیم ساکن
- ۵- یخ زدن و ذوب شدن در محلول آب و استات کلسیم در جریان

شکل (۱) دانه بندی طرح اختلاط

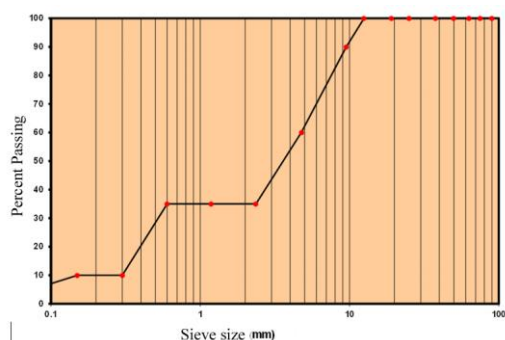


Fig. 1. Mixture aggregate gradation

برای ایجاد جریان آب در سیکل های یخ زدن و ذوب شدن از یک موتور الکتریکی استفاده شد. این موتور ۲/۴ دور در ثانیه چرخیده و جریان آرامی معادل ۰/۲ m/s ایجاد می کند. در شکل (۲) موتور الکتریکی و پروانه در حالت یخ زدن و ذوب شدن در آب نمک متحرک نشان داده شده است. به منظور شبیه سازی اثر حضور نمک یخ زدا در مجاورت روسازی های آسفالتی از محلول ۳٪ کلرید سدیم استفاده شد. میزان درصد وزنی استات کلسیم طبق گزارش ها و پژوهش های انجام شده برای عملکرد مشابه نمک یخزدا، ۳/۶ درصد در نظر گرفته شد. در تمامی حالت های یخ زدن و ذوب شدن، نمونه ها به صورت کامل در آب مستغرق شدند.

اندازه گیری های آزمایشگاهی مقاومت آسفالت در برابر تغییر شکل ها و همچنین عریان شدگی به کار گرفته می شود [12]. روش دیگری که به وسیله آقای هانز و همکار وی پیشنهاد شد یک آزمایش غیرمکانیکی بود که اجازه می دهد مقاومت نمونه ها در برابر تخریب ناشی از حضور رطوبت با چشم پوشی کردن از روش وقت گیر و مکانیکی آزمایش نسبت مقاومت کششی، نمایش داد. همچنین آنها دریافتند که ویژگی های قیر، سهم مصالح ریزدانه مانند فیلر، طرح اختلاط و همچنین هوای متخلخل موجود درون نمونه ها تاثیر چندانی بر مقاومت کششی نمونه ها ایجاد نمی کند [13].

روش دیگری موسوم به روش LFV<sup>۱</sup> که در سال ۲۰۰۳ به وسیله پژوهشگران آمریکایی ابداع شد؛ بدین ترتیب است که نمونه به همراه یک صفحه فلزی برای اعمال فشار باید درون ماده یخزدا قرار گیرد. در طول انجام آزمایش، این صفحه فلزی یک نیروی کشش تحت مکش با افزایش در مقاومت کششی حدود ۲۰۰ نیوتن بر ثانیه وارد می کند که این امر باعث ایجاد ترک روی نمونه می شود. در زمانی که اولین ترک روی نمونه دیده شد، آزمایش متوقف شده و میزان مقاومت سطح روی ترک و نوع ترک خوانده می شود [14].

## ۵- روش آزمایش

### ۵-۱ ساخت نمونه ها

به منظور انجام عملیات آزمایشگاهی تعداد ۲۵ نمونه بتن آسفالتی ساخته شد. دانه بندی استفاده شده برای ساخت نمونه های استوانه ای ۱۲۰۰ گرمی بر اساس طرح اختلاط ارائه شده نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور [15] با دانه بندی پیوسته نوع ۵ برای تحمل ترافیک سنگین به شرح نمودار ارائه شده در شکل (۱) انتخاب شده است و وزن باقیمانده روی زیر الک نیز ۶۰ گرم است باشد. این نمونه ها با قیر ۷۰-۶۰ ساخته شدند و میزان درصد وزنی قیر مصرفی ۵٪ درصد وزن مصالح سنگی یعنی ۶۰ گرم است. بعد از ساخت؛ نمونه ها وزن کشی شده و در شرایط مختلف آزمایشگاهی تحت تاثیر حالت های مختلف یخبندان قرار داده شدند.

های آسفالتی در مقابل فرسایش ناشی از رطوبت و مواد یخزدا ساخته شده اند. بیشتر این دستگاه‌ها پارامترهای غیر مستقیمی مانند مقاومت کششی، پیچشی یا خزشی را برای ارزیابی دوام مخلوط آسفالتی در مقابل تغییر شکل، شن زدگی و جریان شدگی اندازه‌گیری می‌کنند. به عنوان نمونه در ۱۹۹۰ میلادی، دستگاه آزمایش چرخ هامبورگ ساخته شد تا آسیب‌های رطوبتی و اثر رد چرخ را در آسفالت اندازه‌گیری و مقایسه نماید.

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، Mallick و همکارانش در سال ۲۰۰۵ تحقیقاتی گسترده در خصوص استفاده از تجهیزات بارگذاری تسریع شده برای ارزیابی حساسیت‌های دراز مدت روسازی استفاده نمودند [10]. Yildirim و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۵ از یک روش آزمایشگاهی استفاده کردند که بر مبنای اعمال نیروی برشی امکان بررسی دوام مخلوط‌ها و اندودها را فراهم می‌نمود [11].

اگرچه روش‌های مختلفی برای ارزیابی ویژگی‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی از جمله حساسیت‌های رطوبتی و ارزیابی عملکرد روسازی وجود دارد، هیچ کدام از این دستگاه‌ها امکان اندازه‌گیری و ارزیابی عملکرد روسازی آسفالتی تحت شرایطی که مواد یخزدا و جریان آب حضور دارند را نداشته و نمی‌توانند این آثار را تحت اثر نیروی‌های فشاری و برشی شبیه‌سازی کنند. بنابراین در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی آثار مخرب عبور وسایل نقلیه بر روسازی‌های آسفالتی، دستگاه سایش پیچشی آسفالت مطابق شکل (۴) طراحی و ساخته شد.

اجزای تشکیل دهنده این دستگاه شامل موتور الکتریکی، محور عمودی (شفت)، وزنه‌ها و غلاف نگهدارنده نمونه‌های آسفالتی و محفظه قرارگیری آب است. محور دستگاه با سرعت ۵۵ دور بر دقیقه دوران می‌کند. انتهای محور (شفت) یک صفحه فلزی دایره‌ای شکل به منظور تماس با سطح نمونه آسفالتی قرار داده شده است. ضخامت این صفحه فلزی حدود یک سانتی‌متر و قطر آن ۱۵ سانتی‌متر است. مرکز این صفحه بر مرکز نمونه آسفالتی منطبق می‌شود و با دوران، نیروی پیچشی بر نمونه آسفالتی وارد می‌کند. لایه پلاستیکی بسیار مقاومی بر سطح این صفحه نصب شده تا اثر لاستیک خودرو را شبیه‌سازی کند.

شکل (۲) ایجاد شرایط یخ بندان متحرک

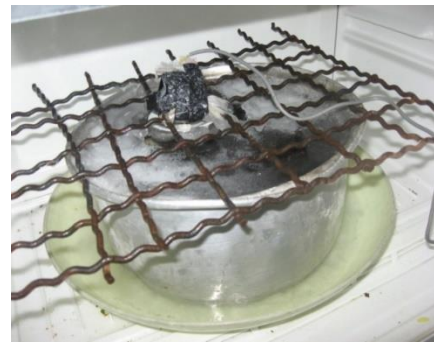


Fig. 2. Flowing freeze water condition

برای هماهنگی کامل سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب شدن با شرایط واقعی یخ‌بندان، سیکل‌ها به صورت ۲۴ ساعته مطابق با نمودار شکل (۳) طراحی شدند. با توجه به اینکه در زمستان سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب شدن معمولاً از بعد از ظهر شروع شده و تا صبح زمان می‌برد، ظرف حاوی نمونه‌ها از ساعت ۱۷:۰۰ تا ۸ صبح در فریزر قرار داده شد تا منجمد شود و با توجه به اینکه سیکل ذوب شدن نیز معمولاً از صبح شروع شده و تا بعد از ظهر به طول زمان می‌برد، نمونه‌ها از ساعت ۸ صبح تا ۱۷:۰۰ در خارج از فریزر در حالت ذوب شدن قرار داده شدند. هر سیکل کامل یخ‌زدن و ذوب شدن ۲۴ ساعت زمان می‌برد. محدوده دمایی شامل کاهش دما از  $4/4^{\circ}\text{C}$  تا  $17/8^{\circ}\text{C}$  و افزایش دما از  $17/8^{\circ}\text{C}$  تا  $4/4^{\circ}\text{C}$  است. در این پژوهش ۷ سیکل یخ‌زدن و ذوب شدن انجام شد و پس از آن نمونه‌ها در دستگاه سایش قرار داده شدند.

شکل (۳) نمودار زمان-دما در سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن

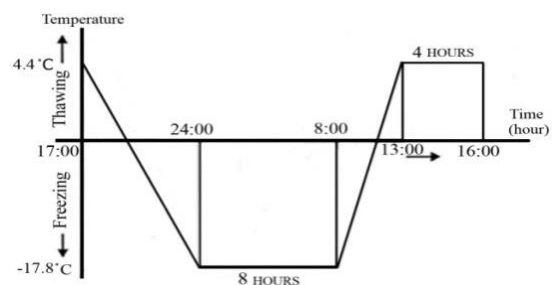


Fig. 3. Time-Temperature diagram in freeze-thaw cycles

### ۳-۵ دستگاه سایش پیچشی آسفالت

دستگاه‌های آزمایشگاهی متنوعی برای اندازه‌گیری نمونه



برخی از پارامترهای آزمایش سایش پیچشی از جمله وزن بارگذاری و تعداد دورهای چرخش دستگاه مانند عملکرد چرخ هامبورگ در نظر گرفته شدند. به این ترتیب نیروی بارگذاری ۷۰ Kg با استفاده از وزنه‌های دستگاه مهیا شد. از آنجا که معمولاً نقطه عریان شدگی در آزمایش چرخ هامبورگ و آزمایش‌های مشابه پس از ۱۰۰۰۰ دور چرخش ظاهر می‌شود، در این آزمایش نیز نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت تحت سایش قرار گرفتند تا نمونه‌ها تحت ۱۰۰۰۰ دور دوران قرار گیرند. برای تداوم حضور مواد یخزدا در حین انجام سایش، محلول‌های یخزده آب همراه با نمک و یا استات کلسیم درون ظرف اصلی دستگاه قرار گرفت. از طرفی برای این که مایع درون ظرف همیشه در دمای نزدیک به صفر درجه قرار گیرد، هرگاه که یخ درون ظرف آب شده و دمای محلول شروع به بالا آمدن کرد، محلول به وسیله‌ی دریچه‌های نصب شده روی ظرف تخلیه شده و بلافاصله محلول یخزده و خردشده جدید درون ظرف ریخته می‌شود.

شکل (۶) درصد افت وزنی نمونه‌ها پس از انجام سیکل‌های یخزدن و آب‌شدن و آزمایش سایش پیچشی

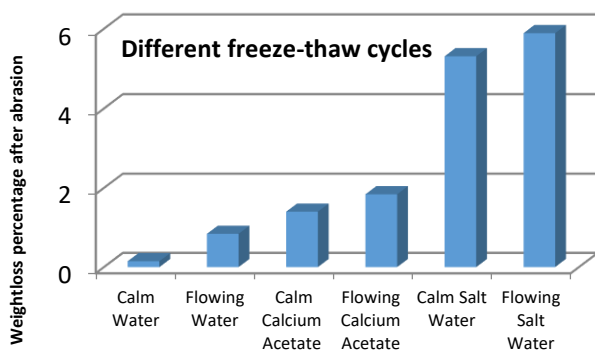


Fig. 6. Weight loss percentage after freeze-thaw cycles and abrasion test

## ۶- نتایج آزمایش سایش پیچشی

۶-۱ افت وزنی

افت وزنی نمونه‌ها تحت سیکل‌های یخزدن و آب‌شدن و آزمایش سایش اندازه‌گیری شد. درصد افت وزنی نمونه‌ها به عنوان شاخص عملکرد آسفالت در مقابل پدیده عریان شدگی

شکل (۴) دستگاه سایش پیچشی آسفالت

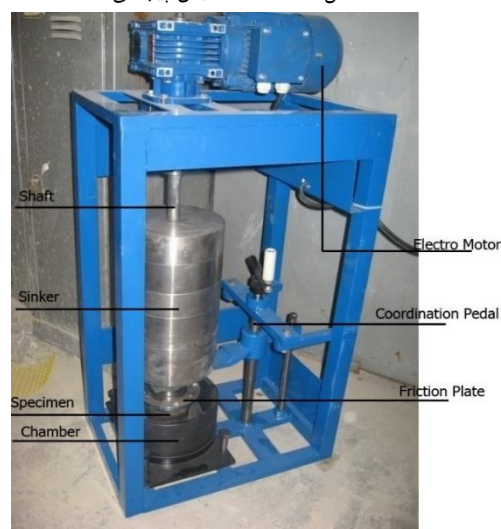


Fig. 4. Torsional asphalt abrasion device

شکل (۵) قرارگیری نمونه در غلاف نگهدارنده



Fig. 5. Placement of specimen in the chamber

برای آن که نمونه به طور مناسب و در محل دقیق زیر شفت اصلی قرار گیرد و همچنین تحت اثر نیروی پیچشی به وجود آمده، نمونه به حرکت در نیاید از یک غلاف نگهدارنده پلاستیکی استفاده شده است. غلاف نگهدارنده در داخل یک ظرف استوانه‌ای فلزی قرار گرفته است. شکل (۵) قرارگیری نمونه آسفالتی در داخل غلاف نگهدارنده را نشان می‌دهد. هر نمونه درون قالب قرار داده شده و با استفاده از محور تنظیم کننده دستگاه، صفحه سایش روی سطح نمونه منطبق می‌شود. با تغییر تعداد وزنه‌ها، نیروی بارگذاری قائم قابل تغییر است. محفظه پیرامونی نمونه برای قرار دادن مواد یخزدا، یخ و آب در مجاورت نمونه تعبیه شده است تا آثار حضور مواد یخ زدا و آب در هنگام عبور وسایل نقلیه شبیه‌سازی شود.

دچار ۱/۵ درصد افت وزنی شدند در حالیکه در هنگام استفاده از نمک یخزدا نمونه‌ها دچار ۵/۳۱ درصد افت وزنی شدند.

۶-۱-۱ تحلیل آماری نتایج افت وزنی

همبستگی بین پارامترها

برای بررسی دقیق‌تر نتایج و بررسی میزان تاثیر عوامل تاثیرگذار روی پدیده عریان‌شدگی، تحلیل آماری روی نتایج انجام شد. ضریب همبستگی بین پارامترها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS محاسبه و نتایج مقایسه شد. بررسی مقادیر ضریب همبستگی در جدول (۱) نشان داده شده است و بر اساس مقادیر بین پارامترها نتایج زیر حاصل می‌شود:

جدول (۱) ضرایب همبستگی مقدار افت وزن

Water Flow	Calcium acetate	Salt	Weight Loss
0.293	0.343	0.820	

Table 1. Correlation coefficients of weight loss

ضریب همبستگی بین افت وزنی و نمک یخزدا ۰/۸۲۰ است و نشان دهنده ارتباط مستقیم و قوی بین وجود نمک یخزدا و کاهش وزنی بتن آسفالتی تحت سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن و آزمایش سایش پیچشی است. ضریب همبستگی بین افت وزنی و استات کلسیم ۰/۳۴۳، و نشان دهنده ارتباط مستقیم و متوسط بین وجود استات کلسیم و کاهش وزنی بتن آسفالتی تحت سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن و آزمایش سایش پیچشی است. ضریب همبستگی بین افت وزنی و وجود جریان آب ۰/۲۹۳، و نشان دهنده ارتباط مستقیم و معنی‌دار بین وجود جریان آب و افت وزنی بتن آسفالتی تحت سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن و آزمایش سایش پیچشی است.

مدل افت وزنی

به منظور دستیابی به یک رابطه کمی میان افت وزنی بتن آسفالتی،  $W_{loss}$  به عنوان متغیر وابسته و حضور جریان آب، استفاده از نمک یخزدا و استفاده از استات کلسیم به عنوان متغیرهای مستقل، یک مدل رگرسیون خطی ارائه شد تا افت وزنی بتن آسفالتی تحت سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن محاسبه و پیش‌بینی شود. این مدل ( $R^2 = 0.9$ ) مطابق زیر است:

قابلیت گزارش را دارد. نتایج مربوط به درصد افت وزنی نمونه‌های قرار گرفته در حالت‌های مختلف یخ‌زدن و آب‌شدن و انجام آزمایش سایش در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۶) می‌توان مطالب زیر را فهمید:

کمترین درصد افت وزنی و یا به عبارت دیگر، کمترین اثر مخرب بر نمونه‌های بتن آسفالتی مربوط به حالت یخ‌زدن و آب‌شدن در آب خالص ساکن است.

جریان آب در سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن باعث شدت یافتن درصد افت وزنی و به عبارت دیگر افزایش شدت عریان‌شدگی آسفالت می‌شود. در زمان آزمایش‌ها مشاهده شد که جریان آب باعث کاهش سرعت شکل‌گیری یخ شد و بلورهای یخ ابتدا در کناره‌های ظرف آزمایش مشاهده شدند و روند شکل‌گیری یخ در اطراف نمونه‌ها آهسته شد و با در نظرگیری این نکته که شکل‌گیری یخ در بتن آسفالتی از لایه یخ موجود در سطح شروع می‌شود و به درون حفره‌های بتن آسفالتی نفوذ می‌کند، باعث کاهش دمای انجماد و افزایش فشار منفذی می‌شود. همچنین جریان آب به دلیل به حرکت در آوردن مواد یخزدا در اطراف نمونه‌ها باعث افزایش شدت واکنش‌های شیمیایی بین مواد یخزدا و بتن آسفالتی می‌شود. با افزایش خرابی‌های سطحی نمونه‌ها نفوذ مواد یخزدا به داخل نمونه‌ها افزایش یافته و شدت خرابی‌ها تشدید می‌شود. در تمامی حالت‌های یخ‌بندان، حضور جریان آب باعث افزایش میزان افت وزنی نمونه‌ها شده است. اما اثر استفاده از مواد یخزدا به مراتب بیشتر از وجود جریان آب است. نمونه‌ها در آب ساکن تنها دچار ۰/۱۵ درصد افت وزنی پس از ۷ سیکل یخ‌زدن و آب‌شدن و آزمایش سایش شدند در حالیکه در حالت آب در جریان این افت وزنی به حدود ۰/۹ درصد رسید. در محلول استات کلسیم حضور جریان آب باعث ۰/۵ درصد افت وزنی بیشتر و در محلول آب نمک باعث ۰/۶ درصد افت وزنی بیشتر شد.

استفاده از مواد یخزدا باعث افزایش درصد افت وزنی و به عبارت دیگر باعث افزایش شدت عریان‌شدگی می‌شود که در این بین نمک یخزدا تاثیر مخرب تری نسبت به استات کلسیم دارد. در حالت استفاده از استات کلسیم و آب ساکن نمونه‌ها

نمونه‌ها نشان داد. کمترین افت مقاومت مارشال نمونه‌ها نیز مربوط به آب ساکن است.

شکل (۷) درصد افت مقاومت مارشال نمونه‌ها پس از انجام سیکل‌های یخزدن و آب‌شدن

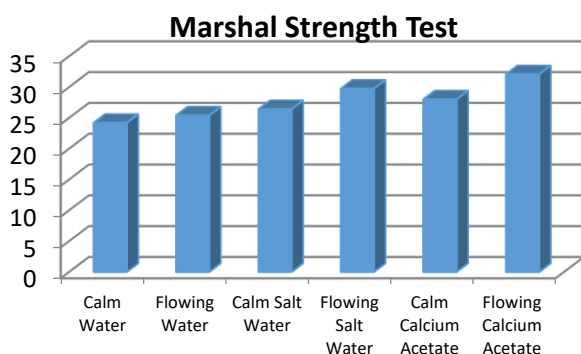


Fig. 7. Marshal strength loss percentage after freeze-thaw cycles

۶-۲-۱ تحلیل آماری نتایج افت مقاومت مارشال همبستگی بین پارامترها

برای تعیین آثار میان افت مقاومت مارشال نمونه‌ها پس از انجام سیکل‌های یخزدن و آب‌شدن، جریان آب، نمک یخزدا و استفاده از استات کلسیم ضریب همبستگی بین پارامترها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS محاسبه و نتایج مقایسه شد. مقادیر ضریب همبستگی در جدول (۳) نشان داده شده است و بررسی مقادیر ضریب همبستگی بین پارامترها نشان می‌دهد:

ضریب همبستگی بین افت مقاومت مارشال و نمک یخزدا ۰/۲۰۷، و نشان دهنده ارتباط مستقیم و معنی‌دار بین این دو پارامتر است و نشان می‌دهد که استفاده از نمک یخزدا در سیکل‌های یخزدن و آب‌شدن باعث کاهش مقاومت مارشال نمونه‌ها می‌شود. ضریب همبستگی بین افت مقاومت مارشال و جریان آب ۰/۴۸۸، و نشان دهنده ارتباط مستقیم و قوی بین این دو پارامتر است و نشان می‌دهد که حضور جریان آب در سیکل‌های یخزدن و آب‌شدن تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر افت مقاومت مارشال نمونه‌ها تحت سیکل‌های یخزدن و آب‌شدن می‌گذارد. ضریب همبستگی بین افت مقاومت مارشال و حضور استات کلسیم، ۰/۶۲۱، و نشان دهنده ارتباط مستقیم و قوی بین این دو پارامتر است و نشان می‌دهد که حضور استات کلسیم

$$W_{\text{loss}} = 5.105(S) + 1.135(A) + 0.563(F) + 0.213 \quad (1)$$

که در آن افت وزنی بتن آسفالتی،  $W_{\text{loss}}$ ، متغیر وابسته مثبت و متغیرهای مستقل ناپیوسته اسمی عبارتند از حضور نمک یخزدا (S)، حضور جریان آب (F) و حضور استات کلسیم (A). متغیرهای مستقل همگی از نوع اسمی بوده و دو مقدار صفر و یک را می‌پذیرند. مقدار صفر به معنی عدم وجود و مقدار یک به معنی وجود است. با استفاده از این مدل می‌توان درصد افت وزنی بتن آسفالتی تحت حالت‌های مختلف یخزدن و آب‌شدن و آزمایش سایش پیش‌بینی را محاسبه کرد.

در جدول (۲) پارامترهای اصلی مدل و ضرایب متغیرهای مستقل ارائه شده است. مقایسه ضرایب مدل نشان می‌دهد که نمک یخزدا مهمترین تاثیرگذاری را دارد. همچنین مشخص شد که تاثیر حضور استات کلسیم نیز به مراتب بیشتر از جریان آب است.

جدول (۲) پارامترهای مدل رگرسیون افت وزن

Regression Coefficient	t	$\beta$	Parameter
0.563	7.187	0.128	Water Flow
5.105	53.175	0.91	Deicing Salt
1.135	11.822	0.242	Calcium acetate

Table 2. Weight loss regression parameter

#### ۶-۲ تغییرات مقاومت مارشال

تغییرات مقاومت مارشال نمونه‌ها قبل و پس از انجام سیکل‌های یخزدن و آب‌شدن و آزمایش مارشال اندازه‌گیری شد و به عنوان معیاری از دوام نمونه‌ها در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از آزمایش در نمودار (۷) نشان داده شده است.

مقایسه مقاومت مارشال نمونه‌ها نشان داد که استفاده از استات کلسیم در هنگام حضور جریان آب بیشترین تاثیر مخرب را بر مقاومت مارشال نمونه‌ها دارد. در تمامی حالت‌های یخبندان حضور جریان آب باعث افزایش درصد افت مقاومت مارشال نمونه‌ها شده است. حضور جریان آب در محلول آب نمک و استات کلسیم آثار مشابهی بر افت مقاومت مارشال



در سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر افت مقاومت مارشال نمونه‌ها تحت سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن می‌گذارد.

آب به دلیل ضریب کوچکتز در مدل، اندکی کمتر از نمک یخ‌زدا است.

جدول (۴) پارامترهای مدل افت مقاومت مارشال

Regression Coefficient	$\beta$	t	Parameter
2.873	0.538	3.322	Water Flow
3.285	0.580	3.101	Deicing Salt
5.245	0.927	4.951	Calcium acetate

Table 4. Marshal strength loss model parameters

جدول (۳) ضرایب همبستگی مقدار افت وزن

Water Flow	Calcium acetate	Salt	Marshal strength loss
0.488	0.621	0.207	

Table 3. Weight loss correlation coefficients

### مدل افت مقاومت مارشال

به منظور دستیابی به یک رابطه کمی میان افت مارشال بتن آسفالتی،  $S_{loss}$ ، به عنوان متغیر وابسته و حضور جریان آب، استفاده از نمک یخ‌زدا و استات کلسیم به عنوان متغیرهای مستقل، یک مدل رگرسیون خطی ارائه شد تا افت مقاومت مارشال بتن آسفالتی تحت سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن محاسبه و پیش‌بینی شود. این مدل ( $R^2 = 0.873$ ) مطابق زیر است:

$$S_{loss} = 3.285(S) + 5.245(A) + 2.873(F) + 23.363 \quad (2)$$

که در آن افت مقاومت مارشال بتن آسفالتی،  $S_{loss}$ ، متغیر وابسته مثبت و متغیرهای مستقل ناپیوسته اسمی عبارتند از حضور نمک یخ‌زدا (S)، حضور جریان آب (F) و حضور استات کلسیم (A). متغیرهای مستقل همگی از نوع اسمی بوده و این متغیرها دو مقدار صفر و یک را می‌پذیرند. مقدار صفر به معنی عدم وجود و مقدار یک به معنی وجود است. با استفاده از این مدل می‌توان درصد افت مقاومت مارشال بتن آسفالتی تحت حالت‌های مختلف یخ‌زدن و آب‌شدن را محاسبه کرد.

در جدول (۴) پارامترهای اصلی مدل و ضرایب متغیرهای مستقل ارائه شده است. مقایسه ضرایب  $\beta$  نشان می‌دهد که استات کلسیم بیشترین تاثیر را بر کاهش مقاومت مارشال نمونه‌های بتن آسفالتی تحت سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن دارد. همچنین مشخص شد که تاثیر حضور جریان آب و نمک یخ‌زدا بر افت مقاومت مارشال تقریباً برابر است و تاثیر جریان

### ۷- نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این پژوهش، بررسی تاثیر جریان آب به همراه مواد یخ‌زدا بر خرابی‌های ناشی از حضور برف و یخ روی سطح روسازی جاده‌ها، از جمله پدیده عریان شدگی است. حضور مواد یخ‌زدا به تنهایی باعث افزایش شدت عریان شدگی می‌شود ولی چنانچه این حضور همراه با جریان آب باشد، باعث افزایش بیشتر شدت عریان شدگی می‌شود. حرکت وسایل نقلیه روی سطح جاده و همچنین شیب طبیعی جاده در برخی مناطق عامل اصل جریان مواد یخ‌زدا بعد از عملیات ذوب برف و یخ است. به منظور بررسی و شناخت دقیق آثار این عوامل شرایط واقعی یخبندان با ایجاد جریان آب و استفاده از دو ماده یخ‌زدای نمک و استات کلسیم شبیه سازی شد. بر اساس داده‌های حاصل از این پژوهش، نتایج زیر به دست آمد:

استفاده از نمک یخ‌زدا یا استات کلسیم، باعث افزایش افت وزنی بتن آسفالتی تحت سیکل‌های یخبندان و سایش می‌شود. اما تاثیر نمک یخ‌زدا به مقدار قابل توجهی بیش از استات کلسیم است. بنابراین استفاده از استات کلسیم به عنوان ماده یخ‌زدا آثار مخرب بسیار کمتری بر عریان شدگی بتن آسفالتی دارد. وجود جریان آب تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر افت وزنی نمونه‌های قرار گرفته در سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن و آزمایش سایش پیشگی دارد. این افزایش افت وزنی در صورت حضور نمک یخ‌زدا به دلیل انجام واکنش‌های شیمیایی قابل ملاحظه است. وجود جریان آب و مواد یخ‌زدا، همگی باعث کاهش مقاومت مارشال بتن آسفالتی می‌شود. اما برخلاف افت وزنی که نمک

- [5]- Kim, Y., and Lutfi, J. S. (2006). Material Selection and for Moisture Damage Design Consideration of Asphalt Pavement. Nebraska Department of Roads Research Reports, Nebraska, USA.
- [6]- Zhou, F., Chen, D., Scullion, T., and Bilyeu, J. (2003). Case Study: Evaluation of Laboratory Test Methods to Characterize Permanent Deformation Properties of Asphalt Mixes. The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 4 (3), pp. 155-164.
- [7]- Nguyen, T., Byrd, E., Bentz, D., and Martin, J. (2005). In Situ Spectroscopic Study of Water at the Asphalt/Siliceous Substrate Interface and Its Implication in Stripping. The Journal of Adhesion, 81, 1-28.
- [8]- Pan, C. and White T.D. (1999). Conditions for Stripping Using Accelerated Testing. Publication FHWA/IN/JTRP-97/13. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1999.
- [9]- Hassan, Y., Abd El Halim, A. G., Razaqpur, A., and Farha, M.H. (2002). Effects of Runway Deicers on Pavement Materials and Mixes: Comparison with Road Salt. Journal of Transportation Engineering, (ASCE), Vol 128, Issue 4, 385-391.
- [10]- Mallick, B., Pelland, R., and Hugos, F. (2005). Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 6, No. 2, 125-136.
- [11]- Yildirim, Y., Smit, F., and Korkmaz, A. (2005). Development of a Laboratory Test Procedure to Evaluate Tack Coat Performance. Turkish J. Eng. Env. Sci. 29, 195 - 205.
- [12]- Aschenbter, T. (1999). Evaluation of the Hamburg Wheel-Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt, Transportation Research Record 1492, Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
- [13]- Hanz, A., Ryan, J. (2007). Toward a Simpler, Quicker Test for Asphalt Moisture Susceptibility, Wisconsin Highway Research Program, Report No. 0092-05-12, Wisconsin, USA.
- [14]- Powers, T.C. and Helmuth, R.A., (1983). Theory of volume changes in hardened cement paste during freezing. Proceedings of the Annual Meeting - Highway Research Board, 32, 285.
- [15]- Technical department, Office of regulations and technical standards, (۲۰۰۳). General technical specifications Islamic republic of Iran's Management and Planning Organization, Tehran, Iran.

تاثیر مخرب‌تری داشت، استات کلسیم باعث افت مقاومت بیشتری در مقایسه با نمک یخزدا می‌شود. بنابراین تاثیر استات کلسیم بر خرابی‌های سطحی کمتر از نمک است، اما حضور این ماده تاثیر مخرب بیشتری بر مقاومت بتن آسفالتی دارد. بنابراین توصیه می‌شود در راه‌های با ترافیک کامیون کمتر، از استات کلسیم برای یخزدایی استفاده شود اما با توجه به افت بیشتر مقاومت مارشال در صورت استفاده از استات کلسیم، توصیه می‌شود از نمک یخزدا در راه‌های با ترافیک سنگین‌تر استفاده شود. در صورت استفاده از استات کلسیم به عنوان ماده یخزدا، نیاز به افزایش پایداری مخلوط طرح شده با استفاده از قیرهای اصلاح شده ضرورت بیشتری پیدا می‌کند.

بهترین راهکار برای مقابله با پدیده عریان شدگی، علاوه بر استفاده از مواد یخزدای جدید از جمله استات کلسیم و همچنین کاهش جریان مواد یخزدا بعد از عملیات یخزدایی است. این کار با اجرای صحیح شیب عرضی و زهکشی سریع و مناسب روان آب‌های سطحی صورت می‌گیرد. در هر صورت؛ توصیه می‌شود که هزینه و خسارت‌های ناشی از جریان مواد یخزدا باید در ارزیابی هزینه‌های نگهداری آسفالت روسازی مد نظر قرار گیرد.

## References

## ۸- مراجع

- [1]- Government of Canada, (2012), Canadian Infrastructure Report Card 2012, Municipal Roads and Water Systems, Volume 1.
- [2]- Alberta Municipal Affairs, Government of Alberta, "Building envelope survey. In partnership with the City of Calgary," Accessed online on September 2014 at [http://municipalaffairs.gov.ab.ca/documents/ss/0630\\_BuildingEnvelopeReport-Apr08.pdf](http://municipalaffairs.gov.ab.ca/documents/ss/0630_BuildingEnvelopeReport-Apr08.pdf), 2008.
- [3]- Salt Institute, Deicing salt and corrosion, <http://www.saltinstitute.org/th2020s.html>. Accessed online in September 2014.
- [4]- X. Shi, and L. Fay, (2010), Freeze-thaw damage and chemical change of a portland cement concrete in the presence of diluted deicers, Journal of Materials and Structures, Volume 43, Issue 7, 933-946, 2010.

# Effects of Water Flow and De-Ice Materials on Asphalt Concrete Deterioration Under Freeze-Thaw Cycles

S. Sharif Tehrani<sup>1</sup>, S. H. Hosseini Lavasani<sup>2</sup>, B. Shirgir<sup>3</sup>

1-Assist. Prof., Kharazmi University

2- Assist. Prof., Kharazmi University

3- Assist. Prof., Kharazmi University

Shirgir@gmail.com

## Abstract:

Roads and pavements are among the most important assets in any country and considerable amount of money is paid for their rehabilitation or maintenance, annually. Pavement surface is the most expensive and susceptible layer as it is in direct contact with traffic and also it experiences different environmental conditions during different seasons. Harsh weather condition and winter maintenance is another parameter that can increase the annual maintenance cost significantly. Winter snow and the resulting ice, can reduce pavement surface friction and therefore, deicing material such as deicing salt or calcium acetate are used to melt the ice and snow. Deicing material decrease the frost temperature and melt the remaining ice and snow and the resulting water flows due to the longitudinal and transverse grade over the pavement surface. The flowing water goes through longer distances in locations where the drainage system is not adequate.

Although several researchers and scientists have studied the effects of deicing material on asphalt and concrete pavement deterioration, but what has not been fully studied is the simultaneous effects of deicing material and water flow on the rate of pavement deterioration under freeze-thaw cycles. Therefore, the focus of this study is to evaluate the combined effects of flowing water and deicing material on the deterioration of asphalt pavements under freeze-thaw cycles. Two types of asphalt samples were prepared and subjected to five different freeze-thaw exposure conditions. Deicing salt and calcium acetate were used as the deicing material in this study. The samples were also tested in an abrasion test apparatus and subjected to normal and frictional forces. This abrasion test apparatus was built based on the concepts used in Hamburg Wheel-Tracking Device. Marshall strength loss and weight loss of the samples were measured and used as a measure of asphalt deterioration.

Results showed that the combined effects of water flow and deicers increases the deterioration of asphalt concrete samples under freeze-thaw conditions. Furthermore, deicing salt has more deteriorative effects on asphalt concrete in comparison to calcium acetate. In addition, results indicated that the water flow has significant effects on asphalt concrete pavement stripping and strength loss. Water flow slows down the formation of ice during freezing cycles by not allowing or slowing the formation of ice crystals and their agglomeration. In still plain water freeze-thaw chamber, a thin ice layer was formed in zero degrees of centigrade and its depth increased during the freezing cycles, while in the flowing plain water freezing condition, where the water flow was present, small ice particles started to form in areas in the chamber where the water flow was in its lowest level. Thereafter, the ice formation gradually expanded to the area with the highest level of water flow. Besides the mentioned effects of water flow, the presence of water flow decreases the freezing temperature of water in the asphalt concrete pores and, consequently, the hydrostatic pressure inside the asphalt concrete increases significantly. Therefore, the asphalt concrete deterioration process becomes faster and more severe when water flow is present in the freeze-thaw cycles.

**Keywords:** water flow; de-icing salt; calcium acetate; asphalt concrete pavement; deterioration; freeze-thaw