

مرور تجارب جهانی در خصوص تولید و بکارگیری مصالح نوین در مخلوط‌های آسفالتی به منظور جلوگیری از یخبندان

مقاله علمی - مروری

ندا کامبوزیا*، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سید محمد میرعبدالعظیمی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: nkamboozia@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۱۰۰-۸۱

چکیده

از مهمترین چالش‌ها برای ارگان‌های شهری و بخصوص شهرداری‌ها نگهداری معابر و راه‌ها در فصل سرما و یخ‌زدایی بواسطه نشستن برف بر روی سطح معابر و راه‌ها است که امری اجتناب‌ناپذیر است. حضور برف و یخ بر روی سطح جاده و معابر باعث کاهش ایمنی شده و باعث خسارات سنگین مالی و گاهی جانی می‌شود. در کنار استفاده از روش سنتی استفاده از نمک و شن و ماسه که تأثیرات منفی زیست محیطی زیادی در بر دارد همواره دانشمندان و متولیان این حوزه سعی در ارائه ترکیبات و راهکارهای جدید داشته‌اند. نگاه آنها همواره به کاهش آسیب به زیرساخت‌ها و سازه‌های شهری بوده و همواره دغدغه‌های زیست محیطی را مد نظر قرار داده‌اند. در این پژوهش سعی گردیده بصورت اجمالی به مرور تجارب جهانی در خصوص تولید و بکارگیری مصالح نوین در مخلوط‌های آسفالتی به منظور جلوگیری از یخبندان و بررسی روش‌های بهینه و بخصوص استفاده از ترکیبات ضد یخ و سازگار با محیط زیست به منظور اصلاح مخلوط آسفالتی مورد نیاز در سطح جاده‌ها پرداخته شود. بر اساس یافته‌ها، هر کدام از مواد ضد یخ و یخ‌زا دارای محدوده عملکرد متفاوتی می‌باشند که در آن محدوده، بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند. بدیهی است وقتی در دماهای پایین‌تر از محدوده عملکردی از این مواد استفاده شد، علاوه بر اینکه مشکلی را حل نخواهد کرد، سبب می‌شود، هزینه‌های بیشتری نیز تحمیل گردد.

واژه‌های کلیدی: روسازی آسفالتی، یخبندان، مواد ضد یخ، مواد یخ‌زدا، نگهداری معابر شهری

۱- مقدمه

ضروری می‌باشد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). برای مقابله با یخ‌زدن سطح راه از ضد یخ استفاده می‌شود. در صورتی که عملیات پیشگیری از یخ‌زدگی با موفقیت انجام نشود، باید از یخ‌زدا جهت از بین بردن یخ‌های سطح راه استفاده شود (نجفی مقدم، ۱۳۹۸). بهترین شیوه برای مقابله با یخ‌زدگی رویه راه، پیشگیری از وقوع آن است. اساس این روش جلوگیری از برقراری پیوند بین رویه راه با یخ و برف فشرده‌ای است که راه را پوشش خواهد داد که می‌توان با مواد شیمیایی که موجب

برف و یخبندان هر ساله در بسیاری از کشورها موجب مشکلاتی در راه‌ها می‌شود. این مشکلات می‌تواند خطرات و آسیب‌های جدی را برای مسافران به دنبال داشته باشد. یخ‌زدن راه پدیده‌ای طبیعی است که منجر به از بین رفتن اصطکاک میان چرخ‌ها و رویه و در نتیجه کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. این موضوع سبب می‌شود تا کنترل وسیله نقلیه دشوار باشد. از این رو نگهداری از روسازی راه به منظور جلوگیری از یخ‌زدن سطح راه و یافتن روش‌های مقابله با این مشکل

مصالح کمتری نسبت به روش استفاده از ضد یخ، استفاده می‌کند (Li, P., Peng et al., 2023).

یکی از روش‌های تجدیدپذیر و جایگزین نمک، استفاده از مایعات گرم‌کننده روسازی است. این مایعات در درون لوله‌هایی که داخل روسازی تعبیه شده‌اند، جریان می‌یابند و عموماً از مخلوط آب و نمک، روغن و یا ترکیبی از آب و گلیکول در درون لوله‌ها استفاده می‌گردد. در سیستم مایعات گرم‌کننده روسازی از انرژی خورشیدی استفاده می‌گردد؛ به طوری که این انرژی را در طول روزهای گرم سال ذخیره کرده و سپس در فصل‌های سرد، از این انرژی برای گرم کردن مایع درون لوله‌ها استفاده می‌کند تا سطح روسازی را گرم کرده و به عنوان یخ‌زدا عمل کند (Mirzananadi R et al., 2018).

تفلون از دیرباز به عنوان یک ماده آبریز ضد اصطکاک موثر شناخته شده است. چسبندگی مخلوط تفلون و پلی فنیلن سولفید که به عنوان یک پوشش فوق آبریز روی سطوح آلومینیومی استفاده می‌شود، پنج برابر بیشتر از تفلون خالص است که حذف یخ را بسیار آسان‌تر می‌کند. علاوه بر این، در دمای منفی ۱۸ درجه سانتی‌گراد، تشکیل یخ بر روی سطوح فوق آبریز زمان کمتری می‌برد و ساختار را سنگین‌تر نمی‌کند (Kenzhebayeva et al., 2021).

پودر پلی تترا فلورو اتیلن در آسفالت امولسیون شده، چسبندگی بین سطح و یخ تشکیل شده را نه تنها بسته به مقدار پلی تترافلورو اتیلن در ماده، بلکه به روش افزودن آن به مخلوط نیز کاهش می‌دهد. به طور کلی، لایه‌های یخ روی تمام نمونه‌های آسفالت امولسیون شده آبریز، شکننده و لایه لایه بودند. آب جذب شده توسط آسفالت معمولی کوچکترین سوراخ‌های ساختار متخلخل را مسدود می‌کند. بر اساس این پدیده، پوشش یخی تشکیل شده در مقایسه با پوشش آبریز، یکنواخت‌تر و همگن‌تر است، جایی که قطرات آب منفرد تمایل به تجمع در سطح دارند و یخ نه تنها به صورت موضعی، پوششی، جایی که قطرات آب جداگانه پخش می‌شود، بلکه به راحتی تحت بار جابجا می‌شود (Kenzhebayeva et al., 2021). همچنین استفاده از روسازی آسفالتی فوق آبریز متشکل از فلوروسیلان و نانوذرات دی اکسید سیلیکون (SiO₂) به طور قابل توجهی روند یخ زدگی را در طول تشکیل یخ ثانویه کند می‌کند. میزان تشکیل یخ باقیمانده روی این ماده در مقایسه با شاخص مربوط به نمونه بدون پوشش

کاهش دمای انجماد می‌شود، از یخ زدگی و یا برقراری پیوند بین یخ و رویه راه جلوگیری کرد (نجفی مقدم، ۱۳۹۸). در صورتی که عملیات پیشگیری از یخ‌زدگی رویه راه به دلیل شرایط خاص آب و هوایی و تاخیر در اجرا، کاملاً موفق نباشند، پدیده یخ‌زدگی اتفاق می‌افتد که در این حالت عملیات یخ‌زدایی باید اجرا شود. اساس این روش شکستن پیوند برقرار شده بین رویه راه و یخ و برف فشرده‌ای است که راه را پوشش داده است (Glagolev et al., 2018). یخ‌زدایی معمولاً پس از شروع بارش و نشست برف روی راه آغاز می‌شود. در صورتی که دمای رویه راه در حد دمای انجماد آب باشد یا به آن نزول کند به سرعت اتصال رویه و یخ متراکم شده بر قرار می‌گردد و موجب کاهش شدید ایمنی راه شده و عملیات راه‌داری را علاوه بر دشواری، با هزینه بیشتری نسبت به عملیات پیشگیری مواجه می‌سازد (نجفی مقدم، ۱۳۹۸). به طور کلی برای کنترل یخ‌زدن روسازی دو روش وجود دارد که در آن‌ها از مواد شیمیایی پایین آورنده نقطه انجماد استفاده می‌شود: روش اول جلوگیری از یخ‌زدن با ضد یخ، روش دوم یخ‌زدایی می‌باشد (آقاجان سروری، ۱۴۰۱).

۱-۱- ضد یخ‌ها

ضد یخ‌ها افزودنی‌هایی هستند که به روسازی اضافه می‌شوند و هدف از انجام این کار، این است که در فواصل سرد و در دماهای پایین، از یخ زدگی و لغزندگی جاده‌ها جلوگیری کند. به عبارت دیگر، این کار، رویکردی پیشگیرانه است که از آسیب به سطح روسازی جلوگیری کرده و شامل پاشش یا قرار دادن مصالحی بر روی سطح آسفالت است تا از برخورد برف یا یخ به سطح روسازی و یا یخ زدن آن جلوگیری کند (P. Arabi & S. Shomalzadeh, 2023).

۱-۲- یخ‌زداها

یخ‌زداها، برخلاف ضد یخ‌ها، بعد از نشست برف یا یخ بر روی آسفالت و روسازی و یا بعد از یخ زدن آن مصرف می‌شوند. یخ‌زداها معمولاً بعد از یخ زدگی سطح روسازی، توسط کامیون‌هایی بر روی آن پاشیده می‌شود تا روند ذوب یخ را تسریع کند. مطالعات نشان می‌دهند که عملیات استفاده از یخ‌زداها به طور متوسط به میزان یک چهارم الی یک پنجم

کشش / کنده شدن مشخص شد مقاومت کشش / کنده شدن AFAC حدود ۵۰٪ کمتر از نمونه کنترل است. میزان تخریب محیط زیست ناشی از استفاده از این نوع ماده در محیط شبیه سازی با توجه به شرایط اقلیمی قسمت مرکزی چین صورت گرفت. پس از پنج چرخه تخریب محیطی، مقاومت کششی AFAC هنوز ۲۵ درصد کم تر از نمونه کنترل شده در دمای ۳- درجه سانتی گراد بود (Xia et al., 2020).

ذاکر زاده و همکاران در سال ۲۰۱۸ طبق روشی که اخیراً در جهان جایگزین روش های سنتی یخ زدایی شده استفاده از مواد و پوشش های فوق آبگریز را در پیش گرفت. یکی از روش های اصلی تشخیص و ارزیابی سطوح آبگریز اندازه گیری زاویه تماس قطره آب با سطح است. برای این منظور، زاویه تماس در حضور پوشش های مختلف آبگریز و با درصد وزنی خاص از مواد اسپری شده و مصرف ۱۲ گرم ماده آبگریز به ابعاد ۶×۶ سانتی متر در نمونه های آسفالت اندازه گیری شد. با بررسی زاویه تماس روی نمونه های آسفالت با ۸ ماده آبگریز مختلف مشخص شد آکريلات آبگریز W4 بیشترین تماس زاویه ای را دارد به طوری که به طور متوسط زاویه تماس سطوح آسفالت را از ۷۵ به ۱۵۶ افزایش می دهد و سطح روسازی آسفالت را فوق العاده آبگریز می کند (Zakerzadeh et al., 2018).

پن و همکاران در سال ۲۰۱۶ یک لایه ماده فوق آبگریز متشکل از پلی متیل متاکریلات و نانو سیلیکا بر روی سطح فولادی استفاده کردند. این لایه با زاویه تماس ۱۵۸ درجه و زاویه سر خوردگی ۲ درجه اجرا شد و مقاومت بسیار مطلوبی در برابر خوردگی و یخ زدگی از خود نشان داد (Pan et al., 2016).

کیم و همکاران در سال ۲۰۱۸ سطح اکسید شده ی لایه آلومینیومی را جدا کردند و سپس از لایه آلومینیومی نمونه برداری کردند. بعد از آن، نمونه را در محلولی که حاصل از مخلوط آن-هگزان و پرفلورورو-دسیل تری کلروسیلان بود، غوطه ور کردند. در نهایت با خشک کردن این محلول، مواد فوق آبگریزی حاصل گردید که قطرات آب به آن نفوذ نمی کرد و در برابر یخ زدگی مقاوم بود. مطالعات آزمایشگاهی بر روی این ماده نشان داد که مواد فوق آبگریز، زمان اثر گذاری یخ بر روی سطح جاده را به طور میانگین بین ۲۲ الی ۹۲ درصد به تعویق انداخت و این نتیجه حاصل گردید که مواد فوق

بسیار کمتر است که می تواند ظرفیت جاده را به میزان قابل توجهی افزایش دهد (Kenzhebayeva et al., 2021).

سطوح فوق آبگریز با زاویه تماس بزرگتر دارای عملکرد تاخیر انجماد عالی با تغییر شکل پایدار قطره هستند که بر انتقال حرارت بین قطره و سطح دمای پایین و انتقال حرارت داخل قطره تاثیر می گذارد. همچنین تصفیه تخلیه می تواند فرآیند اکسیداسیون سطحی را ارتقا دهد و درجه اکسیداسیون را افزایش دهد. علاوه بر این، جذب مواد آلی هیدروکربنی از هوای محیط می تواند یکی دیگر از دلایل اصلی فوق آب دوستی باشد. در نتیجه طبق پژوهش انجام شده، پوشش فوق آبگریز بیونیک مصنوعی (با زاویه تماس ۱۵۳/۲ درجه) خاصیت ضد یخ دارد و نرخ تاخیر انجماد می تواند به ۶۰/۹ درصد برسد و در مقایسه با پوشش فوق آبگریز تهیه شده با اصلاح شیمیایی، دوام مکانیکی و دوام طولانی مدت بیشتری دارد (Liu et al., 2020).

اخیراً از پلی اورتان به دلیل خاصیت آب گریز و یخ گریز آن، بعنوان روکش روی سطح آسفالت استفاده می گردد. استفاده از پلی اورتان در لایه های سطحی روسازی، باعث عملکرد بهتر آن در برابر یخ زدگی می شود (D. Wang et al., 2017).

۲- پیشینه تحقیق

Xia و همکاران در سال ۲۰۲۰ نوع جدیدی فیلر ضد یخ سازگار با محیط زیست (AFF) تهیه کردند. اجزای اصلی AFF شامل حامل، مواد شیمیایی یخ زدا و اصلاح کننده سطح هستند. علاوه بر این از ماده ای که خوردگی را به تاخیر می اندازد استفاده شده تا میزان تاثیر را بروی محیط زیست کاهش دهد. برای بهینه سازی نسبت هر یک از اجزای موجود در AFF از روش های مختلف استفاده شده است، از جمله تست ذوب یخ، آزمایش نفوذ، آزمایش خوردگی، تست سطح ویژه و آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی. بتن آسفالتی ضد یخ (AFAC) با AFF تهیه و عملکرد آن مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمون نشان داد که عملکرد AFAC در هر دو دمای بالا و پایین با افزایش مقدار AFF کاهش می یابد، اما همچنان الزامات مشخصات را برآورده می کند. به خصوص زمانی که نرخ جایگزینی فیلر کمتر از ۷۵ درصد باشد، AFAC پایداری آب خوبی دارد. در محدوده دمایی ۰ تا ۱۰- درجه سانتیگراد، مقاومت چسبندگی یخ که با آزمایش

گائو و همکاران در سال ۲۰۱۸ با آبکافت فلئوئوروسیلان تحت شرایط PH=8 به ماده ای به نام سیلانول دست یافتند که اگر با nano-SiO₂ ترکیب شود، باعث ایجاد لایه فوق آبگریزی می‌گردد. با آزمایشات متعددی بر روی این ماده، نتیجه شد که این مواد علاوه بر مقاومت بهتر در برابر یخ زدگی و خرابی، قابلیت ضد لغزش نیز دارد (Gao et al., 2018).

چائو پنگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ با مطالعه بر روی مواد فوق آبگریز و بررسی دو ماده لایه فوق آبگریز اکریلیکی (ASC) و لایه اکریلیک اسیدی (AAC) به این نتیجه دست یافتند که ASC سطح تماس قطرات آب با روسازی را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که قطره آب با زاویه کمی از روی سطح روسازی سر بخورد. تست اصطکاک روسازی و تست نفوذپذیری آب نشان می‌دهد که ASC می‌تواند عملکرد ضد لغزش و نفوذپذیری آب را افزایش دهد (Chao et al., 2020). چون چن و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از تحقیق بر روی ضد یخ‌ها و یخ‌زدهای ساخته شده از مواد پلی‌اورتان، به این نتایج دست یافتند با اینکه رسانایی مواد حاوی پلی‌اورتان مشابه رسانای مواد معمولی بود، ولی گرمای بسیار بیشتری را نسبت به مخلوط آسفالتی انتقال می‌داد. همچنین مخلوط حاوی پلی‌اورتان زمان یخ زدن سطح را بسیار افزایش می‌داد که نشان دهنده این است که این مواد قابلیت یخ زدایی بسیار بهتری نسبت به مخلوط آسفالتی معمولی دارد (Jun Chen et al., 2018).

یینگ لی گائو و همکاران در سال ۲۰۱۸ با مطالعه بر روی مواد فوق آبگریز متوجه شدند که قطرات آب به راحتی بر روی این سطوح سر می‌خورند و جذب آن نمی‌شوند. همچنین از چسبندگی بین یخ و سطح روسازی جلوگیری کرده و عملکرد ضد یخ بهتری دارد و همچنین صرفه اقتصادی بسیار بالایی دارد (Yingli Gao et al., 2018).

آپی گایی و همکاران اقدام به بررسی امکان بروز واکنش قلیایی-سیلیسی در مخلوط‌های آسفالتی در معرض محلول یخ‌زدای استات پتاسیم نمودند. pH این 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 واکنش بیشتر خواهد شد. آنها بیان کردند که امکان بروز واکنش

آبگریز بسیار در برابر یخ زدگی مقاوم هستند (Kim et al., 2018).

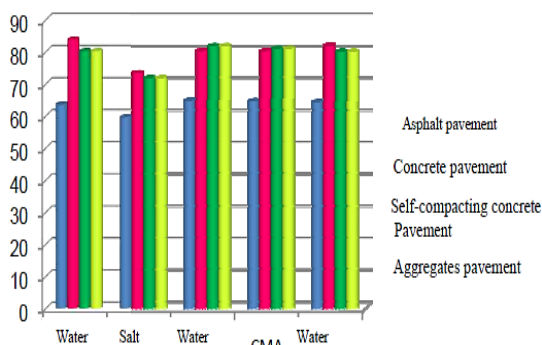
ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۹ با آزمایش بر روی مواد فوق آبگریز متوجه شدند که این مواد بهترین عملکرد خود را در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد دارد و دارای پایداری مطلوبی نسبت به مواد معمولی هستند (Zhou et al., 2019).

نظری و همکاران در سال ۲۰۱۹ گزارش دادند که یخ زدها می‌توانند باعث تخریب عملکرد آسفالت مانند کاهش عملکرد در دمای پایین و ویسکوزیته و همچنین آسیب به سنگدانه‌ها و ساختار سطحی شوند که منجر به کاهش الاستیسیته روسازی و همپنین کاهش مقاومت به سایش می‌شود. در دماهای پایین‌تر، کلرید کلسیم و کلرید منیزیم موثرتر از کلرید سدیم بودند. اما، نسبت به کلرید سدیم، هزینه‌بر تر و ایجاد آسیب به سطح روسازی آنها بیشتر بود (Nazari et al., 2019).

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ با مطالعه بر روی یخ زدهای حاوی استات به این نتیجه رسیدند که با اینکه یخ زدهای حاوی استات، آسیب بسیار کمتری نسبت به یخ زدهای سنتی (سدیم کلراید) به سطح روسازی وارد می‌کند، اما این یخ زدها عاری از آسیب نیستند. مطالعات بر بروی مکانسیم اثر گذاری این نوع یخ زدها در طولانی مدت نشان می‌دهد که یخ زدهای حاوی استات نیز باعث ایجاد خرابی بر سطح روسازی نیز می‌شوند (Zhang et al., 2021).

پنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ دو پوشش سیلیکونی فوق آبگریز تهیه کردند. یکی از آن‌ها با اسپری کردن میکرو / نانو سیلیکا بر روی سطح لاستیک سیلیکونی با دمای اتاق ساخته می‌شود و زاویه تماس آن ۱۶۶۷° است. و دیگری پوششی است که با مخلوط کردن دمای اتاق با هیدروکسیدهای دوگانه اصلاح شده سطحی ساخته می‌شود. سپس مایع روغنی شماره ۱۲۰ به آن افزوده می‌شود تا با هیدروکسیدهای دوگانه واکنش نشان دهد تا یک ساختار مسطح با زاویه تماس ۱۵۲/۳° را تشکیل دهند. مطالعات آزمایشگاهی بر روی این دو مواد نشان داد که مدت زمان یخ زدن قطرات آب با استفاده از این مواد، به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند و همچنین چسبندگی بین سطح لایه یخ با آسفالت را نیز کاهش می‌دهد (Peng et al., 2018).

از نتایج حاصل از پردازش تصویر شکستگی یخ بر روی نمونه‌ها مدل ریاضی ارائه دادند تا با استفاده از آن بتوان دمای سطح رویه و نرخ شکست یخ را پیش‌بینی کرد (Wei et al., 2016). صحاف و مرادزاده در سال ۲۰۱۵ در مقاله‌ای تحت عنوان "مقایسه استفاده از کلسیم منیزیم استات به عنوان ضد یخ و نمک در ایمنی جاده در شرایط برف و یخبندان" به بررسی تأثیر استفاده از مواد ضد یخ بر ایمنی جاده پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که با وجود اقتصادی، ارزان بودن و در دسترس بودن نمک نسبت به کلسیم منیزیم استات، این ماده ایمنی جاده را در شرایط برف و یخبندان نسبت به کلسیم منیزیم اسید کاهش خواهد داد این دو محقق در مطالعه‌ای دیگر در همان سال در مقاله‌ای دیگر اثر این دو ماده را بر مقاومت لغزنگی آسفالت مورد بررسی قرار دادند. مطابق شکل ۱ تمامی نمونه‌های مورد آزمایش تحت تأثیر ضد یخ کلسیم منیزیم استات از مقادیر مقاومت لغزشی بالاتری نسبت به نمک دارا می‌باشند (Sahaf et al., 2015).



شکل ۱. مقاومت لغزشی نمونه‌های مختلف تحت تأثیر نمک و ضد یخ کلسیم منیزیم استات (Sahaf et al., 2015)

بهبهانی و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد نمک کلسیم منیزیم استات (CMA) که به عنوان یک نمک سازگار با محیط زیست شناخته می‌شود را با نمک رایج کلسیم کلرید تحت سیکل‌های یخ - ذوب مقایسه کردند. آنها نشان دادند، نمونه‌هایی که در محلول CMA اشباع شدند دارای ITS و TSR بیشتری نسبت به نمونه‌هایی که در نمک NaCl اشباع شده اند دارند. آنها همچنین نشان دادند در حضور نمک CMA عمر خستگی نسبت به نمک NaCl بیشتر می‌باشد (Behbahani et al., 2020).

قلیایی- سیلیسی در مخلوط‌های ساخته شده از سنگدانه‌های سیلیسی با ماده ضد عریان شدگی هیدروکسید کلسیم، که در معرض یخ‌زدایی با استات پتاسیم قرار می‌گیرد، محتمل بوده اما نیاز به بررسی بیشتر می‌باشد (Apeageyi et al., 2009).

ما و همکاران (۲۰۱۶) با جایگزین کردن یک ضد یخ چینی با درصد وزنی ۵، ۴ و ۶ درصد سنگدانه‌های مخلوط‌های آسفالتی و اصلاح خصوصیات قیر با SBS یک مخلوط آسفالتی اصلاح شده ضد یخی ساختند و مطابق با مقاومت شیارشدگی، شکست کرنشی، مقاومت مارشال و حساسیت رطوبتی نمونه‌های ساخته شده را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که همه مشخصات مکانیکی ذکر شده تا افزایش ۴ درصدی فیلرهای استفاده شده، کاهش و سپس با افزودن ۵ درصد وزنی ضد یخ، افزایش می‌یابد (Ma et al., 2016).

جولیانی و همکاران (۲۰۱۲) استفاده از فیلر ضد یخ بر پایه کلرید سدیم (با ۵،۷ درصد وزنی) را در آسفالت بررسی کرد و نتایج را با روسازی با فیلر آهکی معمولی مقایسه کرد. فیلر ضد یخ باعث تاخیر در تشکیل یخ و یخ زدگی، تسریع در ذوب و کاهش استحکام چسبندگی بین یخ و آسفالت شد. پس از حدود ۲۰ روز حدود ۶۵ درصد از مقدار نمک اصلی آزاد شد. با این حال، نویسندگان ادعا کردند که انتظار می‌رود دوام کلی به دلیل انتشار، که نمک را از بدنه آسفالت به سطح حرکت می‌دهد، بالا باشد. (Giuliani et al. 2012)

وانگ و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی آزمایشگاهی مشخصات ضد یخی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های مگنتیت نشان دادند که این مخلوط‌ها دارای عملکردی بهتری در مقایسه با مخلوط‌های با دانه‌بندی بازالتی می‌باشند و زمانی که درصد دانه‌های مگنتیت به ۸۰ درصد می‌رسد، دمای سطح آسفالت از ۱۴ درجه تا ۶۷ درجه افزایش می‌یابد و کمک شایانی به ذوب برف و یخ بالای سطح روسازی می‌کند، با این وجود، زمان عملیات یخ‌زدایی با افزایش دانه‌های مگنتیت تا ۸۰ درصد کاهش می‌یابد (Wang et al., 2016).

وی و همکاران (۲۰۱۶) با ارزیابی عملکرد ضد یخی مخلوط‌های آسفالتی SMA اصلاح شده با پودر لاستیک نشان دادند که عملکرد مکانیکی مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک در مقابل نمونه‌های کنترلی و اصلاح نشده بهبود می‌یابد و سبب کاهش مقاومت مارشال نمونه‌ها خواهد شد. همچنین با استفاده

ماده یخ زدا، حذف ماسه از ترکیب آن و استفاده از طرح اختلاط واشنگتن در مناطق مستعد حادثه خیز مانند پل ها و قوس های تند و همچنین باندهای فرودگاه ها می باشد (حضرتی، ۱۳۸۸).

Aruguete در سال ۲۰۲۰ یک ماده ژل مانند یونی که از مخلوط ژلاتین و بوتیل ایمیدازولیم برماید تهیه می شود را به عنوان بستر یخ زدا مورد بررسی قرار گرفت. این ترکیب نه تنها تشکیل یخ زدگی را با ممانعت از رشد هسته زایی در یخ به تعویق می اندازد بلکه قدرت ذوب یخ خوبی داشته و اثرات زیست محیطی کمی را هم دارا می باشد (Aruguete et al., 2020).

Wu و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی عملکرد بلندمدت و ظرفیت ذوب یخ روسازی آسفالتی ضد یخ پرداختند. در این تحقیق دو نوع مخلوط آسفالتی SMA-13 with Iceguard و SMA-13 with Mafilon به روش مارشال تهیه شد. آزمایش های پایداری آب، پایداری در دمای بالا، ترک خوردگی دمای پایین و آزمایش شکافتگی یخ ذوب برای ارزیابی عملکرد مخلوطها انجام شد. اثر فیلر ضد انجماد، مقدار آسفالت و دمای غوطه وری بر انحلال نمک مخلوط های آسفالتی ضد یخ آنالیز شد. نتایج نشان داد که پایداری آب مخلوط آسفالتی ضد یخ کاهش یافته و پایداری دینامیکی پس از پیرشدگی کوتاه مدت بهبود یافته است. کرنش کششی و نسبت استحکام کششی مخلوط آسفالتی ضد یخ پس از پیرشدگی طولانی مدت و غوطه وری در آب کاهش یافت. علاوه بر این، با افزایش مقدار فیلر ضد یخ و کاهش مقدار آسفالت، سرعت انحلال نمک افزایش یافت (Wu et al., 2020).

در تحقیقی، آقاجان سروری و همکاران در سال ۱۴۰۱ به بررسی استفاده از پروپیلن گلیکول و ماده آبگریز کوپسیل در یخ زدایی به جای روش های قدیمی مثل نمک پاشی به منظور جلوگیری از یخ زدگی روسازی آسفالتی، بررسی تاثیر استفاده از مواد فوق الذکر از لحاظ سازگاری با محیط زیست نسبت به موارد دیگر و میزان تاثیر این روش در کاهش خرابی رطوبتی مخلوط آسفالتی پرداختند. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون های آزمایشگاهی مشاهده می شود که در حالت کلی اضافه کردن ماده ضد یخ پروپیلن گلیکول و هم چنین نانوابگریز کوپسیل بر حساسیت رطوبتی تاثیر داشته و نسبت

منصوریان و همکاران در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی تاثیر مواد یخزدا بر حساسیت رطوبتی و مقاومت شکست نمونه های آسفالتی در دمای پایین پرداختند. در این تحقیق ابتدا نمونه های آسفالتی تهیه شده به روش تراکم چرخشی، به نمونه های با مقطع نیم دایره برش داده شدند، سپس این نمونه ها تحت تاثیر آب و هر یک محلول های سدیم کلراید (NaCl) کلسیم کلراید (CaCl₂) کلسیم منیزیم استات (CMA) و پتاسیم استات (KA) قرار گرفتند. در ادامه با انجام آزمایش خمش روی نمونه های نیم دیسکی، چقرمگی شکست آنها در سه دمای ۰، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی گراد اندازه گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد، متناسب با دمای بررسی (۰، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی گراد)، اثر مواد یخزدا روی چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی می تواند متفاوت می باشد. به طوری که در دمای صفر درجه سانتی گراد، اثر مخرب مواد یخزدا روی چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی مشاهده نگردید، در صورتی که در دمای ۱۰- درجه سانتی گراد محلول CMA منجر به کاهش ۶ درصدی و در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد محلول های CaCl₂، CMA و NaCl به ترتیب منجر به کاهش ۵، ۵ و ۱۲ درصد چقرمگی شکست نمونه های آسفالتی شدند. همچنین نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان داد مواد مذکور اثر مخربی روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی ندارند (منصوریان و همکاران، ۲۰۱۸).

حضرتی در سال ۱۳۸۸ به بررسی تاثیر ماده کلسیم استات بروی عریان شدگی آسفالت و مقایسه آن با تاثیر نمک پرداخت. برای محقق کردن این امر، بعد از شبیه سازی فصل سرما از دو روش آزمایشگاهی برای بررسی عملکرد مواد استفاده شد. همچنین سعی بر آن شد تا حتی المقدور اثر عوامل جانبی از جمله نوع طرح اختلاط و جریان مواد یخ زدا در دوره های یخ بندان مورد بررسی قرار گیرد. در نتیجه آزمایشات؛ آشکار گردید که حضور استات کلسیم باعث کاهش شدت عریان شدگی روسازی آسفالت نسبت به حضور نمک می شود. از طرفی تاثیرگذار بودن نوع طرح اختلاط؛ تاثیر منفی جریان مواد یخ زدا و تاثیر منفی حضور ماسه به عنوان ماده کمکی یخ زدا آشکار گردید. در مجموع بهترین گزینه از لحاظ عملکردی و با در نظر گرفتن شرایط اقتصادی برای مقابله با پدیده عریان شدگی، استفاده از ماده کلسیم استات به عنوان

برجهدگی 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 برجهدگی 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 ضد یخ و یخزدا را تأیید و تأکید می‌کند. با توجه به جدول ۱ از نظر اقتصادی کمترین هزینه به ترتیب مربوطه به کلرید سدیم، اوره، کلرید منیزیم و کلرید کلسیم است. ولی مخرب ترین ماده برای محیط زیست و انسان، کلرید سدیم است که متأسفانه کارفرمایان به علت ارزانی تمایل بیشتری برای مصرف آن دارند به همین دلیل توصیه شده است استفاده از این ماده به عنوان یخ زدا حذف شود. از نظر محیط زیست 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 یخ زدا تعیین کننده می‌باشد. نهایتاً براساس مطالعه حاضر و مشخصه هر یک از مواد یخ زدا و آثار زیست محیطی و قیمت آنها، دامنه مصرف آنها به صورت زیر توصیه می‌شود.

-در مناطقی که دمای آنها بین صفر تا ۱۰- درجه سانتی‌گراد می‌باشد از اوره به عنوان ماده یخ زدا استفاده شود.

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

-در مناطقی که دمای آنها کمتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد فقط باید از کلرید کلسیم به عنوان ماده یخ زدا استفاده کرد.

(ابوطالبی و همکاران، ۱۳۹۵)

جدول ۱. انواع مواد ضد یخ و یخ زدا و مشخصات آنها

(ابوطالبی و همکاران، ۱۳۹۵)

نوع ماده	مواد یخ زدا	عناصر سازنده	دمای ذوب (°C)	قیمت هر تن
			و غلظت (%)	(دلار)
نمک‌های کلریدی	کلرید سدیم	Na, Cl	۲۲۳-۲۱	۳۶
	کلرید کلسیم	Ca, Cl	۲۹/۸-۵۱	۱۲۰
	کلرید منیزیم	Mg, Cl	۲۱/۶-۳۳	۹۵
نمک‌های آلی	کلسیم منیزیم اسنات	Ca, Mg, C ₂ H ₃ O ₂	۳۲/۵-۲۷/۵	۱۲۸۰
	اسنات پتاسیم	K, C ₂ H ₃ O ₂	۴۹-۶۰	۱۸۵۰
ترکیبات آلی مصنوعی	مشتقات کشاورزی	کپلکس شکر	متغیر	۱۰۸
	ترکیبات آلی مصنوعی	گلیکول و متانول	متغیر	۱۵۱۰
ترکیبات نیتروژن‌دار	اوره	اوره، آمونیاک	۳۳-۱۲	۵۰

مقاومت کششی را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان داد که استفاده از ماده ضد یخ پروپیلن گلیکول و هم چنین نانواَبگریز کوپسیل باعث افزایش انرژی شکست در دماهای منفی و سرعت‌های بارگذاری مختلف گردید. مقدار چقرمگی شکست نیز در نمونه‌های با افزودنی ضد یخ پروپیلن گلیکول و هم چنین نانو اَبگریز کوپسیل در دماهای پایین و سرعت‌های بارگذاری مختلف روند افزایشی داشته است. اما در تست ذوب و یخبندان مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم و درصد افت وزنی روند کاهش داشت (آقاجان سروری، ۱۴۰۱).

Wright (۲۰۱۳) بررسی کرد که چگونه افزودن فرمات سدیم و سیلیکات سدیم به مخلوط آسفالتی بر خواص آسفالت مانند تراکم‌پذیری، سفتی، خستگی، تغییر شکل دائمی و مقاومت در برابر لغزش در مقایسه با آسفالت معمولی تأثیر می‌گذارد. کاهش در چسبندگی یخ و نقطه انجماد نیز مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات نشان داد که این افزودنی‌ها بر خواص آسفالت تأثیر منفی نمی‌گذارند، اما ممکن است حساسیت به خرابی در حضور آب را افزایش دهند که ممکن است عمر مفید را کاهش دهد. افزودنی‌ها همچنین نقطه انجماد و قدرت چسبندگی یخ را کاهش دادند. این مطالعه همچنین انتقال مواد افزودنی به سطح را بررسی کرد و دریافت که انتقال، به رطوبت نسبی محیط و تعداد و ترتیب فضای خالی سطحی بستگی دارد. انتقال به سطح معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که رطوبت نسبی بیشتر از ۷۰ درصد باشد که در آن مواد شیمیایی آب را از جو جذب می‌کنند. با توجه به کاهش نقطه انجماد، در ۳ و ۵ درصد (وزنی) این افزودنی‌ها نقطه انجماد را به ترتیب به ۱،۶- و ۲،۱- درجه سانتی‌گراد کاهش دادند (Wright, M., 2013). در ادامه به تعدادی از تحقیقات مرتبط با جزئیات بیشتری پرداخته می‌شود.

۱-۲- تأثیر مواد یخ زدا و ضد یخ بر مقاومت مخلوط آسفالتی

ابوطالبی و همکاران (۲۰) در سال ۱۳۹۵ تأثیر مواد یخ زدا و ضد یخ بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی گرم ارزیابی کردند. هدف این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از کلرید کلسیم، کلرید منیزیم، کلرید سدیم و اوره 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

۲-۲- تاثیر عوامل یخ زدا بر عملکرد روسازی فرودگاه

در سال ۲۰۲۳، لی و همکاران در مقاله تاثیر عوامل یخ زدا بر عملکرد روسازی آسفالت فرودگاه، ۳ نوع ضد یخ با نام های NaCl و NW056 و KHF-1A را باهم مقایسه کردند (جدول ۲). آزمایش های تست DSR، تست BBR، تست کشش غیرمستقیم، تست تیر خمشی و تست انجماد- ذوب برای بررسی تأثیر ضد یخ ها بر عملکرد آسفالت و مخلوط آسفالتی انجام شد. NW056 و KHF-1A، دو ضد یخ حاوی استات هستند که مواد اولیه تشکیل دهنده آنها یکسان اند، اما افزودنی ها و ترکیبات فعال و همچنین عملکرد آنها در یخ زدایی، مقداری تفاوت دارند.

جدول ۲. اطلاعات یخ زدا ها (Ping Li et al., 2023)

Type	NaCl	NW056	KHF-1A
Appearance	White particle	Colorless liquid	Colorless liquid
PH (25°C)	6.7-7.3	9.93	9.29
Freezing point (°C)	-21	≤-28	≤-26
Active ingredients (%)	NaCl, 99%	CH ₃ COOK, 58.3%	CH ₃ COOK, 52.2%
Solubility 20°C (%)	23.0	49.0	53.2
Density 25°C (g/cm ³)	2.165	1.282	1.260

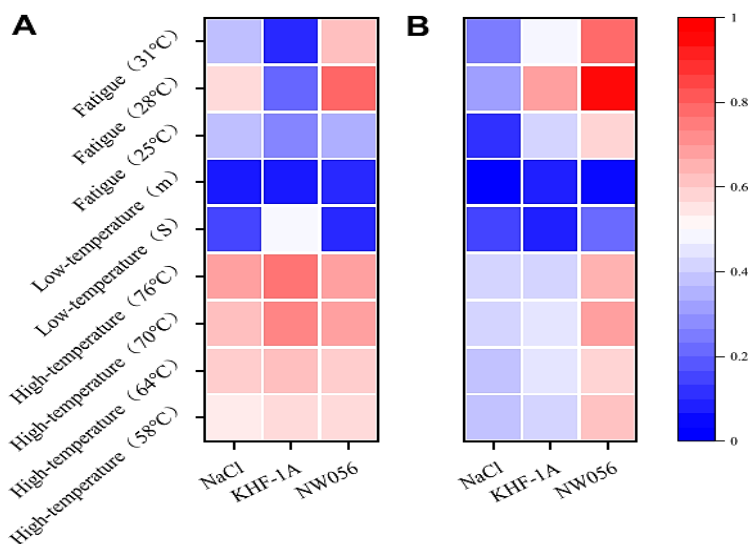
اثرات پارامترهای آزمایشی مختلف بر عملکرد آسفالت با استفاده از چهار شاخص کلیدی مورد بررسی قرار گرفت: فاکتور ضد شیارشدگی $G^*/\sin\delta$ ، سفتی خزش S، نرخ خزش m، و عامل ضد خستگی $G^*\cdot\sin\delta$. تغییرات نسبی این شاخص ها برای آسفالت ترمیم شده با عوامل یخ زدا مختلف در مقایسه با نمونه ترمیم نشده در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس شکل ۲ اثر بارزتری بر عملکرد دمای بالا آسفالت به دلیل استفاده از عوامل یخ زدایی نسبت به عملکرد دمای پایین مشاهده شد. عملکرد دمای بالا بیش از ۴۰٪ بهبود یافته است در حالی که عملکرد دمای پایین کمتر از ۴۰٪ کاهش یافته است. عملکرد خستگی آسفالت توسط عوامل یخ زدا مختلف بدتر شد و تفاوت محسوس بود. در شکل A، ۱۰ درصد، سه نوع عامل یخزدا اثرات مشابهی بر عملکرد

آسفالت در دمای بالا داشتند. عامل یخ زدایی KHF-1A ناپیچترین اثر و بهترین عملکرد را در مورد تخریب خستگی آسفالت داشت. در شکل B، ۲۶ درصد، عامل یخزدا NW056 تأثیر بسیار مهم تری بر عملکرد آسفالت در دمای بالا نسبت به دو عامل یخزدا دیگر داشت. عامل یخزدا NW056 نیز تأثیر بسیار قوی تری بر تخریب خستگی آسفالت نسبت به NaCl داشت، در حالی که KHF-1A تأثیر متوسطی داشت. بر اساس ارزیابی جامع اثرات عامل یخ زدایی معمولی NaCl و دو عامل یخ زدای استات، KHF-1A و NW056، بر عملکرد آسفالت، KHF-1A نسبت به NW056 عملکرد بهتری داشت. همچنین در برخی جنبه ها عملکرد مشابه یا بهتری نسبت به NaCl داشت. به دلیل وجود اسید استیک در یخزدهای NW056 و KHF-1A و اثر امولسیونی آن، عملکرد این یخزدها در دماهای پایین نسبت به NaCl بهتر است. همچنین به دلیل ضعیف بودن عامل خورنده در مواد حاوی استات، آسیب بسیار کمتری در طول زمان به روسازی وارد می کنند که در مقایسه با NaCl، این آسیب ها گسترده نیستند. یخزدا NW056 به دلیل این که کمترین آسیب را به روسازی وارد می کند و همچنین تأثیر چندانی بر دمای بالا و پایین مخلوط ندارد، جایگزین بسیار مناسبی برای یخ زدهای سنتی می باشد (Li et al., 2023).

۲-۳- تاثیرات زیست محیطی مواد ضد یخ بر سطح روسازی

عربی و همکاران در سال ۲۰۲۳، در مقاله ای تحت عنوان تاثیرات زیست محیطی مواد ضد یخ بر سطح روسازی آسفالتی، موادی مانند کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات و همچنین سدیم کلراید را با یکدیگر مقایسه کردند.

با مطالعات انجام شده، مشخص شد که کلسیم منیزیم استات کمترین آسیب به محیط زیست را وارد می کند. براساس نتایج این مطالعه، به نظر می رسد که استفاده از مواد ضد یخ زدگی بر روی آسفالت در طول نگهداری زمستانی می تواند برای حفظ ویژگی های محیطی مناسب باشد، اما توجه به جزئیات و درصد مواد استفاده شده، لازم و ضروری است.



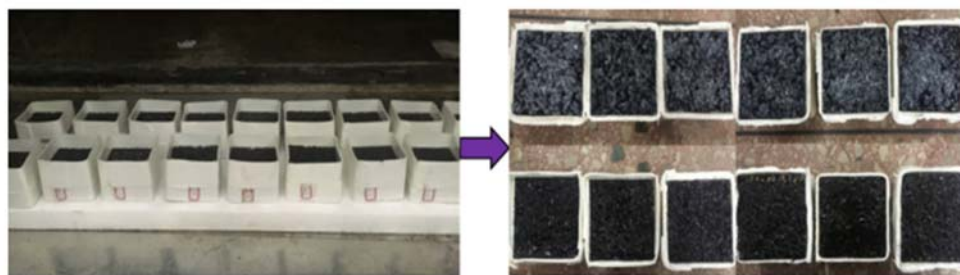
شکل ۲. تغییرات شاخص ارزیابی عملکرد آسفالت

آسفالت تهیه شد. خواص زمان خشک شدن، زاویه تماس و جذب آب ماده جدید مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تست‌های مقاومت برشی چسبگی یخ، تست سی تی اسکن در دمای پایین، عملکرد مقاومت در برابر لغزش، تست استحکام چرخه‌ای انجمد_ذوب انجام شد. در این تحقیق از مخلوط آسفالتی درشت دانه بندی شده AC-13(C) استفاده شد، سنگدانه، سنگ آهک و فیلر، پودر سنگ آهک بود. نمونه‌های مخلوط آسفالتی آماده شده به مدت ۱ ساعت در محفظه آزمایش با دمای پایین از قبل سرد شدند تا دمای سطح نمونه‌های مخلوط آسفالتی به ۵- درجه سانتی‌گراد برسد، مخلوط آسفالتی در قسمت پایین و اطراف نمونه با چسب رزین اپوکسی مهر و موم شده و سپس حدود ۳۵ گرم آب در قسمت بالایی نمونه ریخته شد و در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد به یخ تبدیل شد. سپس نمونه‌ها مطابق شکل ۳ به مدت ۲ ساعت در اتاقک با دمای پایین در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

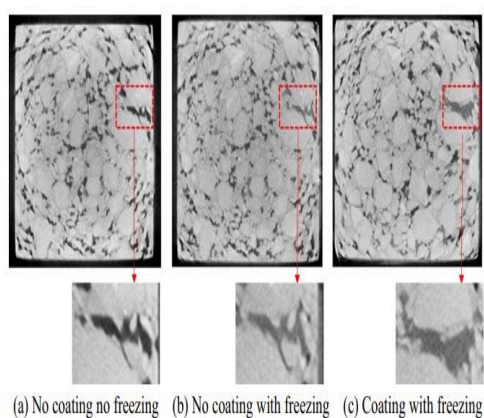
به طوری کلی کلسیم منیزیم استات بهترین عملکرد را بین مواد مورد نظر دارد. به دلیل اینکه این ماده کمترین میزان خوردگی در بتن و فلز و همچنین کمترین میزان تغییر PH آب را داشته است. همچنین از بین این مواد پتاسیم استات بدترین عملکرد را به دلیل ایجاد مشکلات رطوبتی و خستگی زودتر از موعد آسفالت، دارد. به طور کلی استفاده بهینه و سازگار با محیط زیست از مواد ضد یخ زدگی، به خصوص استات منیزیم کلسیم، می‌تواند به بهبود زیست محیطی در خواص آسفالت و افزایش کارایی اقتصادی کمک کند (Arabi et al., 2023).

۲-۴- خواص ضد یخ پلی اوره اصلاح شده با پوشش سیلیکون (SMPC) بر روسازی آسفالتی

به منظور بهبود خواص ضد یخ زدگی روسازی آسفالتی در شرایط آب و هوایی سرد و مرطوب، یک ماده جدید از پوشش پلی اوره اصلاح شده سیلیکونی (SMPC) برای روسازی



شکل ۳. مخلوط آسفالتی برای آزمایش یخ



شکل ۴. توزیع فضای خالی

نتیجه آزمون دوام نشان می‌دهد که نمونه همچنان عملکرد خوبی در کاهش پیوند یخ پس از آزمایش چرخه‌ای انجماد-ذوب دارد، و سطح شکست لایه پیوند یخ همچنان رابط بین لایه یخ و نمونه مخلوط است که نشان می‌دهد که SMPC دوام خوبی دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که SMPC پتانسیل بالایی برای بهبود خاصیت ضد یخ زدگی روسازی‌های آسفالتی دارد (Yu et al., 2020).

۲-۵- مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو آهک هیدراته جهت افزایش مقاومت در برابر رطوبت با استفاده از عوامل یخ زدایی

از عوامل یخ زدا برای از بین بردن یخبندان در سطح جاده‌ها در زمستان و مناطق سردسیر استفاده می‌شود. این بررسی تأثیر دو یخ زدایی جدید کلسیم منیزیم استات (CMA) استات پتاسیم (PA) همچنین کلرید سدیم عامل سنتی (NaCl) بر عملکرد رطوبت و خستگی مخلوط‌های آسفالتی، مدل

شکل ۴ (a) توزیع فضای خالی را نشان می‌دهد که نمونه با SMPC پوشانده نشده است و نمونه منجمد نشده است. شکل ۴ (b) توزیع فضای خالی را نشان می‌دهد که نمونه در شرایط انجماد با SMPC پوشانده نشده است و شکل ۴ (c) توزیع فضای خالی هوای را نشان می‌دهد که نمونه با SMPC در شرایط انجماد پوشش داده شده است. از مقایسه شکل ۴ (a) و (b)، ذوب شدن و تغییر ساختار منافذ قبل و بعد از انجماد به وضوح قابل مشاهده است. پس از فرآیند انجماد، منافذ میکروسکوپی روی سطح نمونه بدون پوشش با یخ تعبیه شده در مخلوط پر می‌شود. از مقایسه شکل ۴ (b) و (c)، نتایج سی تی اسکن نشان می‌دهد که فضای خالی لایه یخ تعبیه شده با پوشش بزرگتر از نمونه یخ بدون پوشش است، دلیل آن این است که انرژی سطحی پایین و ساختار زبری میکرو نانو SMPC باعث کاهش تجمع و سطح تماس با قطرات آب می‌شود. نتایج آزمایش نشان داد که سطح شکست برشی مخلوط آسفالتی AC-13(C) پوشش داده شده با SMPC، سطح پیوند یخی بود و میانگین استحکام پیوند یخ در مقایسه با عدم پوشش ۶۱/۲ درصد کاهش یافت. مخلوط آسفالت AC-13(C) پوشش داده شده با SMPC الزامات مقاومت در برابر لغزش را برآورده می‌کند و پس از ۱۰ چرخه یخ زدگی و ذوب هنوز هم اثر ضد یخ خوبی از خود نشان می‌دهد. نفوذ یخ در روسازی را می‌توان با پوشش SMPC کاهش داد. هنگامی که مقدار پوشش ۰/۴ کیلوگرم بر مترمربع باشد، فضای خالی سطح منجمد روسازی در مقایسه با بدون پوشش ۹۵ درصد افزایش می‌یابد. عملکرد مقاومت در برابر لغزش سطح روسازی با افزایش مقدار پوشش به آرامی کاهش می‌یابد.

می‌یابد. علاوه بر این، اندازه ذرات افزودنی‌های ضد یخ نیز تأثیر آشکاری بر پایداری قیر امولسیون دارد. براساس نتایج آزمایش، ترکیب مواد افزودنی ضد یخ که دارای چگالی ظاهری کوچک و اندازه ذرات ریز هستند با قیر امولسیون کاتیونی توصیه نمی‌شود. علاوه بر این، زمان پایداری قیر امولسیون کاتیونی با افزایش مقدار افزودنی کاهش می‌یابد. (Shan et al., 2021).

۲-۷- تهیه روکش آسفالتی اصلاح شده با پروتئین ضد یخ

بیولوژیکی و تحقیق در مورد عملکرد ضد یخ زدگی آن

موجودات طبیعی از پروتئین‌های ضد یخ (AFP) بیولوژیکی خود برای مقابله با محیط‌های سرد استفاده می‌کنند. بر اساس این پدیده طبیعی، ما در اینجا از AFP بیولوژیکی و مواد مبتنی بر آسفالت برای تهیه مواد پوشش ضد یخ جاده و متعاقباً بررسی پایداری ذخیره سازی و عملکرد ضد یخ زدگی آن استفاده می‌کنیم. آزمایش پایداری ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل میکروسکوپ فلورسانس، تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی و تجزیه و تحلیل طیف مادون قرمز نشان داد که هنگامی که مقدار پودر AFP بیش از ۵ درصد نبود، به طور مساوی در آسفالت امولسیونی پراکنده شد و پایداری خوبی داشت، تحت واکنش با یک ماده شیمیایی قرار نگرفت و فعالیت مولکولی AFP را حفظ کرد. با افزایش مقدار پودر AFP، اثر ضد یخ بهبود می‌یابد. تست عملکرد راه نشان داد که دوام و مقاومت خوبی در برابر پوسته شدن دارد. استفاده از یک پوشش بیولوژیکی با AFP می‌تواند عملکرد ضد یخ زدگی راه‌ها را به طور قابل توجهی بهبود بخشد و به محیط زیست آسیبی نرساند (Meng et al., 2021).

۲-۸- طراحی مواد و آنالیز عملکرد لایه ضد یخ و ضد لغزش

روی روسازی

یک روش طراحی برای لایه ضد یخ و ضد لغزش روی روسازی نوعی در این تحقیق ارائه شده است. نوعی ماده چسباننده با خواص عالی ساخته شده که می‌تواند قابلیت اتصال خوبی را در محیط‌های با دمای بالا و پایین حفظ کند و مقاومت خوبی در برابر پیرشدگی UV (شکل ۵) نیز دارد. سنگدانه رسی متخلخل با مقاومت بالا برای جایگزینی بخش‌هایی از سنگ استفاده می‌شوند و ویژگی‌های عملکردی باز دارندگی یخ از لایه سایش با غوطه وری در آب نمک اشباع تحقق می‌یابد.

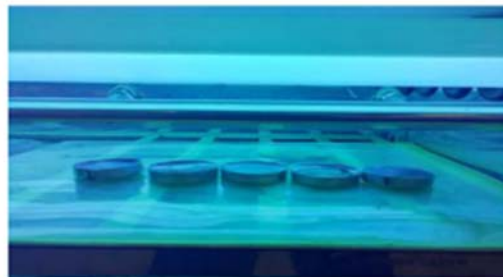
پیش‌بینی نسبت مقاومت کششی (TSR) و نسبت عمر خستگی (NFR) با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP) بر اساس مولفه‌های اجزای انرژی آزاد سطح (SFE) و سایر خواص مخلوط آسفالتی ارائه شد. نانو آهک هیدراته (NHL) به عنوان یک اصلاح‌کننده قیر و یک عامل ضد عریان شدگی برای بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد.

نتایج نشان داد که مخلوط‌های اشباع در CMA دارای بالاترین استحکام کششی غیرمستقیم (ITS) و عمر خستگی پایین‌تر در چرخه‌های انجماد-ذوب داشتند. نمونه‌های اشباع شده با CMA بیشترین TSR و NFR را داشتند. استفاده از NHL در تمام نمونه‌های اشباع شده منجر به افزایش مقادیر TSR و NFR شد. نتایج روش SFE نشان داد که استفاده از NHL باعث افزایش اجزای قطبی، غیرقطبی و بازی قیر و کاهش اجزای اسیدی آنها شد. همچنین استفاده از NHL باعث افزایش میزان کل SFE قیر شده و چسبندگی سنگدانه و قیر و انسجام در غشای قیر را افزایش داده و در نتیجه مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشد. نمونه‌های اشباع شده با پتاسیم استات بیشترین نفوذپذیری مقادیر مخلوط آسفالتی (PAM) را داشتند.

با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی برای دستیابی به حداکثر TSR و NFR، منحنی پارتو نشان داد که ۱/۳۲٪ نانو آهک هیدراته مقدار بهینه برای افزایش همزمان مقاومت در برابر رطوبت و عمر خستگی است (Behbahani et al., 2020).

۲-۶- اثر افزودنی‌های ضد یخ بر پایداری قیر امولسیون

سازگاری بین مواد افزودنی ضد یخ و قیر امولسیون تأثیر مهمی بر دوام و عملکرد پایداری قیر امولسیونی ضد یخ دارد. این تحقیق با هدف بررسی اثر افزودنی‌های ضد یخ بر عملکرد پایداری قیر امولسیون انجام شده است. در این مطالعه، اثر نوع یون امولسیفایر و خواص افزودنی ضد یخ (پتانسیل زتا، مدول نرمی، چگالی ظاهری) با آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. چهار نوع قیر در این تحقیق انتخاب شد و به منظور تجزیه و تحلیل اثر نوع امولسیفایر بر پایداری، دو نوع امولسیفایر آنیونی و دو نوع امولسیفایر کاتیونی انتخاب شد. افزودنی ضد یخ نوعی افزودنی نمک پودری است. براساس نتایج، مشخص شد که پایداری قیر امولسیونی کاتیونی بهتر از قیر امولسیونی آنیونی پس از افزودن افزودنی ضد یخ است. برای قیر امولسیونی کاتیونی، پایداری با پتانسیل زتا (Zeta) مرتبط است و زمان پایداری با افزایش پتانسیل زتا افزایش

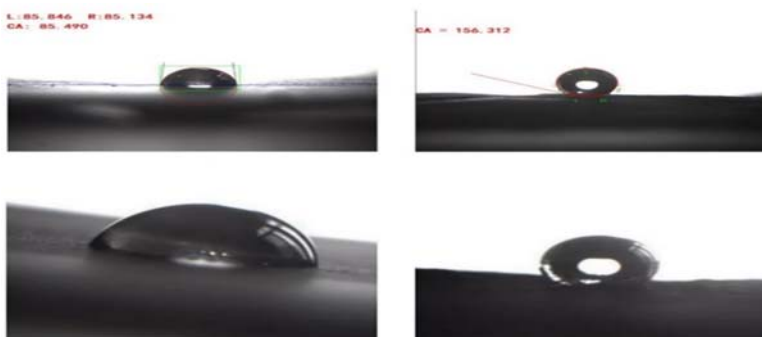


شکل ۵. تجهیزات پیرشدگی اشعه ماوراء بنفش

پوشش‌های فوق آبگریز به جای روش‌های سنتی نگهداری روسازی زمستانی می‌تواند یک راه حل مناسب باشد. یک پوشش فوق آبگریز اکریلیک (ASC) روی آسفالت روسازی از نانولوله‌های اسید اکریلیک و کربن تصفیه نشده تهیه شد. زاویه تماس (شکل ۶) و زاویه نفوذ قطرات آب روی سطح (ASC) ۱۵۵٫۱۷۳ و ۴۰٫۲۶ درجه است. آزمایش مشاهده یخ نشان داد که زمان انجماد قطره آب روی سطح ASC در مقایسه با سطح مخلوط آسفالت ۱۷ درصد طولانی شده است و فرآیند یخ زدگی قطرات آب را به تاخیر بیندازد. نتایج آزمون عملکرد ضد لغزش نشان داد ضریب اصطکاک (ASC) ۵۰۷ درصد از روکش آسفالت بهبود یافته است. نتایج تست نفوذ پذیری آب نشان داد که ASC می‌تواند از نفوذ آب به ساختار روسازی بالا جلوگیری کرده و در نتیجه آسیب رطوبتی را کاهش دهد. نتیجه آزمایش کشش مخلوط آسفالتی با پوشش ASC ثابت می‌کند که ASC دارای قدرت چسبندگی کافی روسازی آسفالت است و در اثر تنش برشی از وسایل نقلیه به راحتی جدا نمی‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ASC پتانسیل خوبی برای بهبود عملکرد ضد یخ روسازی آسفالت ۲۰۲۰ را داراست (Peng et al., 2020).

مواد چسباننده شامل رزین اپوکسی (CYD-128)، عامل عمل آوری (CYDHD-593)، Maleic anhydride، Glycerol و کف‌زدا می‌باشد. از محلول کلرید سدیم اشباع و از سنگدانه‌های سرامسایت و آندزیت استفاده شد. نتایج نشان داد که پس از افزودن سرامسایت، نقطه انجماد روسازی را می‌توان حداکثر تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش داد و سرعت ذوب یخ را تقریباً ۳۰ درصد افزایش داد. پس از غوطه‌وری مداوم به مدت ده روز، نمک همچنان می‌تواند از سنگدانه رسوب کند که می‌تواند تا حد مشخصی از تشکیل یک لایه یخ جلوگیری کند. با افزایش سهم سرامسایت، مقاومت سیقل‌پذیری روسازی افزایش می‌یابد. در شرایط سیل و یخ زدگی، مقاومت لغزشی مخلوط با سنگدانه سرامیت تقریباً ۵۰ درصد بیشتر از سنگدانه آندزیت است که می‌تواند عملکرد ضد یخ و ضد لغزش خوبی را ارائه دهد، که این امر برای ایمنی ترافیک در شرایط زمستانی مفید است (Pei et al., 2021).

۲-۹- ارزیابی ضد یخ زدگی، ضد لغزش و نفوذناپذیری آب با پوشش اکریلیک فوق آبگریز روی روسازی آسفالتی
پنگ و همکاران دریافتند که به منظور چسبندگی یخ و برف به روسازی و کاهش آن‌ها از سطح راه‌ها، استفاده از



شکل ۶. عکس تست زاویه تماس (Peng et al., 2020)

۱۰-۲- خصوصیات حرارتی لایه‌های الکتروسانا برای کاربردهای ضد یخ و برف زدایی در جاده‌ها

لیوا و همکاران به ارزیابی عملکرد حرارتی ملات‌های آسفالتی الکترو سانا تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی متغیر با زمان با هدف استفاده از این مواد برای کاربردهای ضد یخ‌زدگی و برف‌زدایی در جاده‌ها پرداختند. لایه هوشمند الکتروسانای پیشنهادی در این تحقیق برای قرارگیری در زیر لایه سطحی روسازی به منظور ارائه سیستمی برای افزایش دمای سازه و کمک به تاخیر در بروز ترک‌ها از لایه زیرین به لایه بالایی طراحی شده است. یا برعکس. ملات‌های رسانای الکتریکی مورد مطالعه با استفاده از الیاف فلزی به دست آمده از لاستیک‌های بازیافتی تولید شدند. این ملات‌های ابداعی جاده‌ای با اندازه‌گیری تغییرات دمایی تولید شده در طول و پس از فعال‌سازی میدان مغناطیسی متغیر با زمان، در یک سیستم ۲ لایه‌ای متشکل از یک لایه آسفالتی الکتروسانا تحت یک سطح غیر معمولی آزمایش شدند. نتایج نشان داد که دمای جاده را می‌توان بسته به شدت میدان مغناطیسی، مقدار الیاف فلزی و ضخامت مسیر سطح راه کنترل کرد. بنابراین ملات‌های رسانای الکتریکی ممکن است یک جایگزین کاربردی برای حفظ جاده های قابل سرویس در زمستان‌های برفی باشد (Leiva et al., 2022).

۱۱-۲- خواص مهندسی و گرمایش مایکروویو ناشی از عملکرد ذوب- یخ مخلوط آسفالتی با پودر کربن فعال

به منظور حل مسائل یخ‌زدایی روسازی آسفالتی از طریق روشی سازگار با محیط زیست از پودر کربن فعال برای جایگزینی جزئی فیلرها در بتن آسفالتی برای بهبود توانایی یخ‌زدایی روسازی با گرمایش مایکروویو استفاده شد. در این تحقیق از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای مشاهده مورفولوژی میکروسکوپی پودر کربن فعال و پودر معدنی استفاده شد. سپس خواص مهندسی شامل مقاومت شیارشدگی، مقاومت ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی برای ارزیابی اثر جایگزینی پودر کربن فعال بر عملکرد مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. فیلرها، ماستیک آسفالت و مخلوط آسفالتی با جایگزین‌های مختلف پودر کربن فعال تحت تابش مایکروویو گرم شدند. نتایج نشان داد که به دلیل ساختار متخلخل و خواص مواد کربن فعال، اثر نفوذ بین کربن فعال و آسفالت بهتر از پودر معدنی و آسفالت است. با افزایش

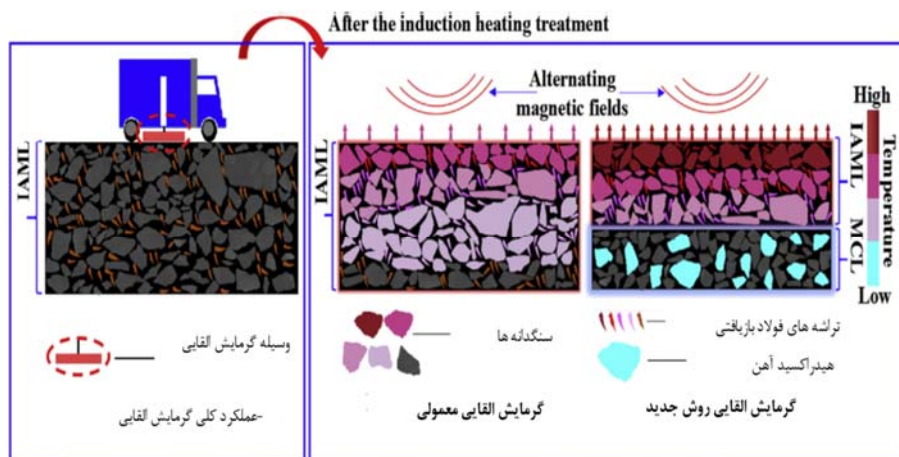
جایگزینی کربن فعال، مقدار آسفالت بهینه و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت کمی افزایش یافت. مقاومت شیارشدگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی دمایی پایین به طور قابل توجهی بهبود یافت. علاوه بر این، کربن فعال می‌تواند راندمان گرمایش مایکروویو ماستیک و مخلوط آسفالتی را تا حد زیادی بهبود بخشد (Liu et al., 2019).

۱۲-۲- تحلیل راندمان یخ‌زدایی و ارزیابی اقتصادی- محیطی یک روسازی آسفالتی با گرمایش القایی نوین

لیو و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک متد گرمایش القایی جدید به صورتی که یک لایه رسانای مغناطیسی جایگزین قسمت تحتانی مخلوط آسفالتی شده است (شکل ۷) را بررسی کردند. روش جدید می‌تواند با تمرکز گرما بر روی قسمت بالایی سطح آسفالت موثرتر باشد که نه تنها باعث بهینه‌تر شدن یخ‌زدایی می‌شود بلکه باعث حفظ محیط زیست و مصرف کمتر انرژی می‌شود در این تحقیق ثابت شد که استفاده از پشم فولاد کارایی بیشتری از فیبرهای فولادی و وسایل آهنربایی داشت. اثر یخ‌زدایی نمونه‌های حاوی انواع مختلف و مقادیر مختلف مواد زائد مورد مطالعه قرار گرفت. اثر یخ‌زدایی نمونه‌های مخلوط با ۶ درصد پشم فولاد ضایعاتی بهترین است. در این میان ۶ درصد مناسب‌ترین مقدار پشم فولادی ضایعاتی برای یخ‌زدایی و ذوب برف است.

-تأثیر سرعت‌های مختلف حرکت تجهیزات گرمایشی بر روی اثر یخ‌زدایی مورد مطالعه قرار گرفت. مشخص شد که سریع‌ترین سرعت قابل قبول یخ‌زدایی نمونه مخلوط با ۶ درصد ضایعات پشم فولادی ۶ سانتی‌متر بر ثانیه است راندمان یخ‌زدایی به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های دیگر است. این همچنین ثابت کرد که هر چه حرارت بیشتر در قسمت بالایی نمونه متمرکز شود، راندمان یخ‌زدایی بالاتر است.

به‌طور کلی به این نتیجه رسیدند که این روش نیازهای حداقلی و مشخص شده را برآورد می‌کند و همچنین دارای مقاومت ساختاری بیشتر و انجام پذیری بیشتری هم هستند و در این پژوهش این را نشان دادند که این روش گرمایش القایی جدید می‌تواند تا ۸۱ درصد تأثیر ضد یخی را نسبت به روش‌های گرمایش القایی قدیمی افزایش دهد. همچنین در روش جدید استفاده مواد بازیافتی باعث شد تا مزایایی همچون مصرف انرژی کمتر و هزینه کمتری را دارا باشد (Liu et al., 2020)



شکل ۷. تصویر شماتیک گرمایش القایی (K. Liu et al., 2020)

فرآوری رطوبتی شدند و یک نمونه به‌عنوان شاهد و بدون عمل‌آوری در نظر گرفته شد. سپس کل نمونه‌ها تحت آزمایش جاروب فرکانس قرار گرفتند. تحلیل نتایج منحنی جامع مدول مختلط برشی شکل ۸ نشان می‌دهد در فرکانس بالا (دمای پایین)، ماستیک‌های فرآوری شده در مجاورت پتاسیم استات مقدار مدول مختلط برشی بیشتری از خود نشان می‌دهند. از طرف دیگر، سدیم کلراید و آب مقطر سبب نرم‌تر شدن ماستیک آسفالتی در فرکانس بالا (دمای پایین) شده‌اند. به همین ترتیب، با توجه به شکل ۹ می‌توان پی برد در فرکانس پایین (دمای بالا) نمونه‌های فرآوری شده در سدیم کلراید و پتاسیم استات، سختی بیشتری نشان می‌دهند.

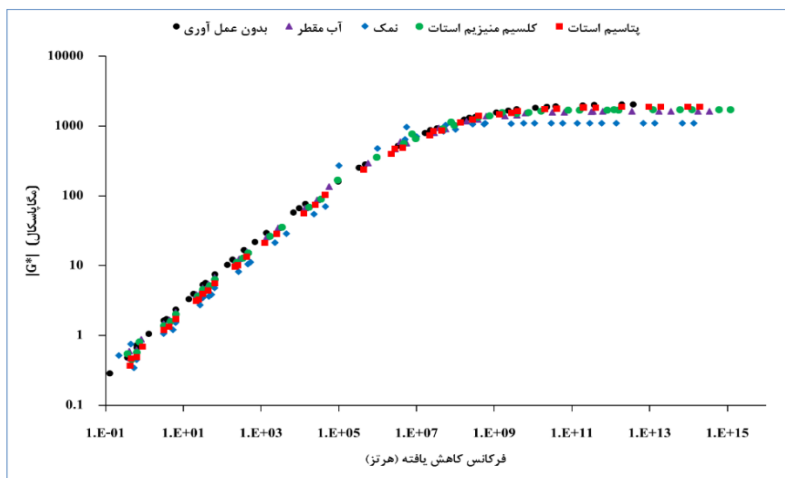
۱۳-۲- بررسی تأثیر یخ زدها بر مشخصات ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی

در این پژوهش، جهت بررسی تأثیر یخ‌زدها بر روسازی آسفالتی، از نمونه‌های ماستیک آسفالتی به دلیل تأثیر بسیار زیادی که روی مشخصات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی دارند، استفاده شد.

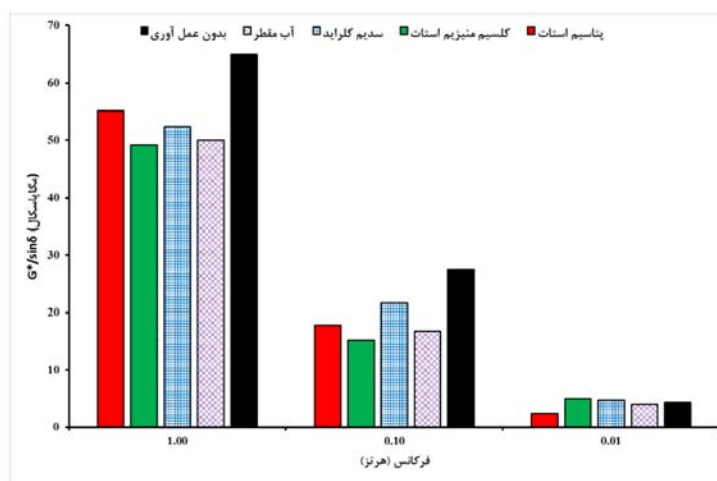
قیر مورد استفاده در این پژوهش PG58-22 است. در جدول ۳ مشخصات یخ‌زدهای ارائه شده است. نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در محلول‌های آب مقطر، سدیم کلراید، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات

جدول ۳. مشخصات یخ‌زدها

مشخصات	کلسیم منیزیم استات	پتاسیم استات	سدیم کلراید
فرمول شیمیایی	$\text{CaMg}_2(\text{CH}_3\text{COO})_6$	KCH_3COO	NaCl
وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (g/cm^3)	۰-۱۷	۱/۵۷	۲/۱۶
PH	۸-۱۰	۱۱/۱۰-۵	۶-۷/۵
دمای یوتکتیک (درجه سانتی‌گراد)	-۲۷/۵	-۶۰	-۲۱
دمای مؤثر (درجه سانتی‌گراد)	-۷	-۲۶	-۹
دمای جوش (درجه سانتی‌گراد)	۱۱۷/۱	-	-
دمای ذوب (درجه سانتی‌گراد)	-	۲۹۲	۸۰۱
غلظت (درصد)	۳۲/۵	۴۹	۲۳/۳
وزن مولکولی (g/mol)	۱۲۳/۴۳	۹۸/۱۴	۵۸/۴۴



شکل ۸. منحنی جامع مدول مختلط برشی ماستیک‌های آسفالتی



شکل ۹. پارامتر شیار شدگی ماستیک آسفالتی در دمای ۵۴/۴ درجه سانتی‌گراد

۳- عملکرد بهینه مواد ضد یخ و یخ‌زا

هر کدام از مواد ضد یخ و یخ‌زا دارای محدوده عملکرد متفاوتی می‌باشند که در آن محدوده بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند. بدیهی است وقتی در دماهای پایین‌تر از محدوده عملکردی، از این مواد استفاده شد، علاوه بر اینکه مشکلی را حل نخواهد کرد، سبب می‌شود، هزینه‌های بیشتری تحمیل گردد. جدول ۴ مشخصات این مواد و محدوده عملکردی آن ذکر شده است (Muthumani et al., 2014)

بررسی نتایج آزمایش و پارامترهای مدل نشان داد فرآوری رطوبتی در محلول سدیم کلراید باعث نرم شدگی ماستیک آسفالتی می‌شود. کلسیم منیزیم استات مقدار G^* را در فرکانس‌های پایین بارگذاری (دماهای بالا) افزایش می‌دهد. تأثیر این یخ‌زدا روی پارامتر خستگی بسیار وابسته به فرکانس بارگذاری است، به نحوی که هر چه قدر فرکانس بارگذاری پایین‌تر باشد، مقاومت ماستیک در برابر خرابی خستگی کمتر می‌شود. پتاسیم استات باعث افزایش مقدار G^* ماستیک آسفالتی در دماهای میانه و بالا می‌شود. همچنین، تمامی یخ‌زداها باعث کاهش مقاومت ماستیک آسفالتی در برابر خرابی شیار شدگی می‌شوند و در بین آنها کلسیم منیزیم استات بیشترین اثر مخرب را دارد (میرزابابائی و همکاران، ۲۰۲۳)

جدول ۴. مشخصات مواد ضد یخ و یخزدا

نوع	نام	نحوه استفاده	دمای بهینه عملکرد	دمای انجماد
نمک	سدیم کلرید	جامد و محلول در آب	-۹	-۲۱
	کلسیم کلرید	محلول در آب	-۲۹	-۵۱
	منیزیم کلرید	محلول در آب	-۱۵	-۳۳
ارگانیک	استات پتاسیم	جامد و مایع	-۲۶	-۶۰
	استات منیزیم کلسیم	مایع	-۱۷	-۲۷
	اوره	مایع	-۴	-۱۲

مواد ارگانیک از جمله استات پتاسیم و استات منیزیم کلسیم، در دامنه دمایی پایین تر همچنان کارایی خود را دارا می باشند. هر چند دمای عملکردی این مواد از کلسیم کلرید بیشتر است، ولی به دلیل خواص خوردندگی کلسیم کلرید، استفاده از مواد ارگانیک در مناطق سردسیر عملکرد بهتری از خود نشان خواهد داد.

نمک های سدیم در محدوده دماهای پایین، عملکرد مناسبی نداشته و میزان یخزدایی با این مواد در دماهای پایین به طرز قابل توجهی کمتر از دماهای نزدیک به صفر است.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت های معنوی و مادی مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهرداری کلانشهر تهران سپاسگزاری می نمایند.

۶- مراجع

- آقاجان سروری، سجاد (۱۴۰۱). یافتن روشی نوین و غیر مخرب به عنوان جایگزین روش های متداول جهت یخزدایی روسازی آسفالتی. پایان نامه کارشناسی، دانشگاه گیلان.

- حسینی سید سجاد، باقرزاده خلخالی احد، حیاتی پرهام، (۱۳۹۷). مقایسه روش های یخ زدایی روسازی های آسفالتی و بتنی. فصلنامه علمی- تخصصی/ رویکردهای نوین در مهندسی عمران.

- نجفی مقدم، وحید (۱۳۹۸). ارائه مدل ریاضی برای انتخاب ترکیب بهینه مواد ضد یخ بومی با کمترین اثر خرابی بر مخلوط های آسفالتی در مناطق سردسیر و سازگار با محیط زیست. پایان نامه دکتری گرایش راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران.

بر اساس جدول ۴ مشاهده می شود مواد ارگانیک از جمله استات پتاسیم و استات منیزیم کلسیم، در دامنه دمایی پایین تر همچنان کارایی خود را دارا می باشند. هر چند دمای عملکردی این مواد از کلسیم کلرید بیشتر است، ولی به دلیل خواص خوردندگی کلسیم کلرید، استفاده از مواد ارگانیک در مناطق سردسیر عملکرد بهتری از خود نشان خواهد داد. همچنین نمک های سدیم در محدوده دماهای پایین، عملکرد مناسبی نداشته و میزان یخزدایی با این مواد در دماهای پایین به طرز قابل توجهی کمتر از دماهای نزدیک به صفر است. اما در نهایت دماهای پایین تر از -۱۱- درجه سانتیگراد، میزان کارایی این مواد شیمیایی بسیار کم است و برای یخزدایی به حجم بیشتری از این مواد نیاز می باشد. (حسینی و همکاران، ۲۰۱۸)

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش بصورت اجمالی به مرور تجارب جهانی در خصوص تولید و بکارگیری مصالح نوین در مخلوط های آسفالتی به منظور جلوگیری از یخبندان و بررسی روش های بهینه و بخصوص استفاده از ترکیبات ضد یخ و سازگار با محیط زیست به منظور اصلاح مخلوط آسفالتی مورد نیاز در سطح جاده ها پرداخته شود. مهمترین نتایج تحقیق به قرار زیر است.

هر کدام از مواد ضد یخ و یخزا دارای محدوده عملکرد متفاوتی می باشند که در آن محدوده بهترین عملکرد را از خود نشان می دهند. بدیهی است وقتی در دماهای پایین تر از محدوده عملکردی، از این مواد استفاده شد، علاوه بر اینکه مشکلی را حل نخواهد کرد، سبب می شود، هزینه های بیشتری تحمل گردد.

- Chao Peng, Xin Hu, Zhanping You, Fang Xu. Guosheng Jiang, Hui Ouyang, Chong Guo, Hongchao Ma, Li Lu, Jing Dai, (2020). Investigation of anti-icing, anti-skid, and water impermeability performances of an acrylic superhydrophobic coating on asphalt pavement. **doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120702, 0950-0618**
- D. Wang, A. Schacht, Z. Leng, C. Leng, J. Kollmann, M. Oeser, (2017). Effects of material composition on mechanical and acoustic performance of poroelastic road surface (PERS), *Constr. Build. Mater.* 135, 352-360.
- Gao, Y., Qu, L., He, B., Dai, K., Fang, Z., & Zhu, R. (2018). Study on effectiveness of anti-icing and deicing performance of superhydrophobic asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 191, 270-280.
- Giuliani, F., Merusi, F., Polacco, G., Filippi, S., and M. Paci, 2012. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 30:174-179.
- Glagolev, S., Shevtsova, A., & Shekhovtsova, S. (2018). Basis for application of new-generation anti-icing materials as an efficient way to reduce the accident rate on roads in winter. *Transportation Research Procedia*, 36, 193-198.
- Guo, Y., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2023). The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 390(May), 131754.
- Jun Chen, Xie Ma, Hao Wang, Pengyu Xie, Wei Huang (2018). Experimental study on anti-icing and deicing performance of polyurethane concrete as road surface layer, *Construction and Building Materials*, 161, 598-605.
- Kenzhebayeva, A., Bakbolat, B., Sultanov, F., Daulbayev, C., & Mansurov, Z. (2021). A mini-review on recent developments in anti-icing methods. *Polymers*, 13(23), 4149.
- Kim, J., Jeon, J., Kim, D. R., & Lee, K. S. (2018). Quantitative analysis of anti-freezing characteristics of superhydrophobic surfaces according to initial ice nuclei formation time and freezing propagation velocity. -منصوریان، احمد، قدیم، روحانی و قدیم، مهرسا (۲۰۱۸). ارزیابی تاثیر مواد یخزدا بر حساسیت رطوبتی و مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی در دمای پایین. *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۱۵(۴)، ۲۸۵-۲۹۷.
- حضرتی، رضا (۱۳۸۸). بررسی تاثیر ماده کلسیم استات بر روی عریان شدگی آسفالت و مقایسه آن با تاثیر نمک. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).
- ابوطالبی اصفهانی، محسن، گلی خوراسگانی، احمد و رحیمی پردنجانی، امین (۱۳۹۵). تأثیر مواد یخ زدا و ضد یخ بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی گرم. *مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل*.
- میرزابائی، پیمان، حاجی کریمی، پوریا و مقدس نژاد، فریدون (۲۰۲۳). بررسی تاثیر یخزداها بر مشخصات ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۵۵(۱۰)، ۲۱۳۴-۲۱۱۳.
- حسینی، سید سجاد، باقرزاده، حیاتی، پرهام (۲۰۱۸). مقایسه روش‌های یخ زدایی روسازی‌های آسفالتی و بتنی. *رویکردهای نوین در مهندسی عمران*، ۲(۱)، ۱۳-۱.
- Apeageyi, A. K., Struble, L. J., & Buttlar, W. G. (2009). Investigation of Alkali-Silica Reaction in asphalt mixtures exposed to potassium acetate deicing solution. In *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Two Volume Set, CRC Press*. 479-492.
- Arabi, P., & Zadeh, S. S. (2023). The environmental impact of anti-icing materials on asphalt surfaces (commonly used anti-icing agents). *Environ Eng*, 9, 1-4.
- Aruguete, D. M., Wallace, A., Blakney, T., Kerr, R., Gerber, G., & Ferko, J. (2020). Palladium release from catalytic converter materials induced by road de-icer components chloride and ferrocyanide. *Chemosphere*, 245, 125578.
- Behbahani, H., Hamed, G. H., & Gilani, V. N. M. (2020). Predictive model of modified asphalt mixtures with nano hydrated lime to increase resistance to moisture and fatigue damages by the use of deicing agents. *Construction and Building Materials*, 265, 120353.

- icing chemicals: A review of potential approaches. *Cold Regions Science and Technology*, 97, 21-32.
- Nazari, M. H., and Shi, X. (2019). Developing renewable agro-based anti-icers for sustainable winter road maintenance operations. *J. Mater Civ. Eng.* 31, 4019299.
doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002963
- Pan, S., Wang, N., Xiong, D., Deng, Y., & Shi, Y. (2016). Fabrication of superhydrophobic coating via spraying method and its applications in anti-icing and anti-corrosion. *Applied Surface Science*, 389, 547-553.
- Pei, Z., Yi, J., Li, Y., Cheng, P., Zhu, Y., & Feng, D. (2021). Material design and performance analysis of the anti-ice and antiskid wear layer on pavement. *Construction and Building Materials*, 282, 122734.
- Peng, C., Hu, X., You, Z., Xu, F., Jiang, G., Ouyang, H., Guo, C., Ma, H., Lu, L., & Dai, J. (2020). Investigation of anti-icing, anti-skid, and water impermeability performances of an acrylic superhydrophobic coating on asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 264.
- Peng, C., Zhang, H., You, Z., Xu, F., Jiang, G., Lv, S., & Yang, H. (2018). Preparation and anti-icing properties of a superhydrophobic silicone coating on asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 189, 227-235.
- Sahaf, A., & Moradzadeh, B. (2015). Laboratory E valuation of CMA impact on the S lipping resistance of the roads surface. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 4.
- Shan, L., Li, Z., Tian, D., & Tan, Y. (2021). Effect of anti-icing additives on the stability of emulsified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 275, 121951.
- Wang, Z., Wang, H., An, D., Ai, T., & Zhao, P. (2016). Laboratory investigation on deicing characteristics of asphalt mixtures using magnetite aggregate as microwave-absorbing materials. *Construction and Building Materials*, 124, 589-597.
- Wei, H., He, Q., Jiao, Y., Chen, J., & Hu, M. (2016). Evaluation of anti-icing performance for crumb rubber and diatomite compound modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 107, 109-116.
- International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 109-117.
- Leiva-Padilla, P., Moreno-Navarro, F., Iglesias, G. R., & Rubio-Gamez, M. C. (2022). Thermal characterisation of electroconductive layers for anti-icing and de-snowing applications on roads. *Road Materials and Pavement Design*, 23(1), 168-183.
- Li, P., Peng, W., Han, Y., Wang, B., Liu, Z., Li, W., & Wei, W. (2023). Effect of deicing agents on the performance of airport asphalt pavement. *Frontiers in Materials*, 10, 1231483.
- Liu, C., Liu, Q., Jin, R., Lin, Z., Qiu, H., & Xu, Y. (2020). Mechanism analysis and durability evaluation of anti-icing property of superhydrophobic surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156.
- Liu, K., Xu, P., Wang, F., Jin, C., Huang, M., Dai, D., & Fu, C. (2020). Deicing efficiency analysis and economic-environment assessment of a novel induction heating asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 273.
doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123123
- Liu, Z., Yang, X., Wang, Y., & Luo, S. (2019). Engineering properties and microwave heating induced ice-melting performance of asphalt mixture with activated carbon powder filler. *Construction and Building Materials*, 197, 50-62.
- Ma, T., Geng, L., Ding, X., Zhang, D., & Huang, X. (2016). Experimental study of deicing asphalt mixture with anti-icing additives. *Construction and Building Materials*, 127, 653-662.
- Meng, Y., Zhao, Q., Lei, J., Mao, M., Qin, Y., Xi, C., & Rong, H. (2021). Preparation of biological antifreeze protein-modified emulsified asphalt coating and research on its anti-icing performance. *Construction and Building Materials*, 294, 123473.
- Mirzanimadi R., Hagentoft C., Johansson P., Johanson J. (2018), Anti-icing of road surfaces using Hydronic Heating Pavement with low temperature, *Cold Regions Science and Technology* 145(2018) 106-118. Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology, *Gothenburg SE-412 96, Sweden*.
- Muthumani, A., Fay, L., Akin, M., Wang, S., Gong, J., & Shi, X. (2014). Correlating lab and field tests for evaluation of deicing and anti-

- Zakerzadeh, M., Abtahi, S. M., Allafchian, A., & Chamani, M. R. (2018). Examining the effect of different super hydrophobic nanomaterials on asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 180, 285–290.
- Zhang, Q., Wu, D., Zhang, X., Chang, K., and Wang, Y. (2021). Effect of organic deicing agents on asphalt rheology and analysis of the mechanism. *Constr. Build. MATER* 284, 122649.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122649
- Zhang, Y., & Shi, X. (2019). A New Sustainable Additive for Anti-Icing Pavement.
- Zhang, Y., Deng, Y., & Shi, X. (2022). Model development and prediction of anti-icing longevity of asphalt pavement with salt-storage additive. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 3(1), 1.
- Zhou, X., Yu, S., Wang, J., Zang, J., & Lv, Z. (2019). Superhydrophilic anti-corrosive and superhydrophobic durable TiO₂/Ti mesh for oil/water separation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 105, 124-133.
- Zhao, Y., Peng, Y., Zhao, Q., Chen, Y., & Chu, X. (2023). Preparation of a green sustained-release microcapsule-type anti-icing agent for asphalt pavement and its application demonstration project. *ACS omega*, 8(5), 4906-4920.
- Wright, M., 2013. A study of the effects of adding ice retardant additives to pavement surface course materials, Ph.D. Thesis, *University of Nottingham, Nottingham, UK.*
- Wu, S., Zheng, M., Liu, Q., Zhou, W., Li, Y., & Ma, Z. (2020). Analysis of long-term performance and snowmelt capacity of anti-freezing asphalt pavement. *Advances in Civil Engineering Materials*, 9(1), 683-710.
- Xia, H., Zhao, X., Wu, Y., Yuan, T., Song, L., Yan, M., Wang, F., & Chen, H. (2020). Preparation and performance of antifreeze adhesive materials for asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 258, 119554.
- Yingli Gao, Liangchen Qu, Bei He, Kaiming Dai, Zaosheng Fang, Ruijuan Zhu (2018). Study on effectiveness of anti-icing and deicing performance of super-hydrophobic asphalt concrete, *Construction and Building Materials* 191 (2018) 270–280. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, *Changsha 410114*, PR China.
- Yu, H., He, Z., Qian, G., Gong, X., & Qu, X. (2020). Research on the anti-icing properties of silicone modified polyurea coatings (SMPC) for asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 242, 117793.

Global Experiences in the Production and Use of Innovative Materials in Asphalt Mixtures for Preventing Icing

Neda Kamboozia, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Seyyed Mohammad Mirabdolazimi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran.

E-mail: nkamboozia@iust.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Maintaining roads and highways during the winter season poses a significant challenge for urban authorities, particularly municipalities, due to the inevitable accumulation of snow and ice on roadways. The presence of snow and ice on roads and pavements significantly reduces safety and can lead to substantial financial losses and even casualties. While traditional methods like using salt, sand, and gravel have been employed for de-icing, they come with numerous drawbacks, including negative environmental impacts. Recognizing these limitations, scientists and industry experts have continuously sought innovative solutions and formulations to address winter road maintenance challenges. Efforts in developing new de-icing methods have prioritized minimizing damage to infrastructure and urban structures while addressing environmental concerns. This research delves into global experiences in the production and application of innovative materials in asphalt mixtures to prevent icing and explores optimized approaches, particularly the use of eco-friendly de-icing compounds, to modify asphalt mixtures for road surfaces. The effectiveness of de-icing agents varies depending on temperature ranges. Each de-icing agent exhibits optimal performance within a specific temperature range. Utilizing de-icing agents beyond their effective temperature ranges not only fails to address the issue but also leads to increased costs.

Keywords: Asphalt Pavement, Frosting, De-Icing Agents, Ice-Melting Agents, Urban Road Maintenance