



## بررسی تأثیر یخ‌زدها بر مشخصات ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی

پیمان میرزابابائی، پوریا حاجی کریمی، فریدون مقدس نژاد\*

دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۳  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

### کلمات کلیدی:

ویسکوالاستیسیته  
مدل 2S2PID  
ماستیک آسفالتی  
مواد یخ‌زدا  
نگهداری زمستانی راه‌ها

**خلاصه:** دست‌یابی به یک روسازی ماندگار مستلزم عوامل بسیاری است که در بین آن‌ها نگهداری زمستانی از اهمیت بالایی برخوردار است. در دهه‌های گذشته استفاده از مواد شیمیایی برای یخ‌زدایی بسیار شایع بوده ولی استفاده از آن‌ها باعث بروز خرابی در بسیاری از زیرساخت‌های حمل‌ونقل شده‌است. در پژوهش پیش رو، 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. نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در محلول‌های آب مقطر، سدیم کلراید، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات فرآوری رطوبتی شدند و یک نمونه به‌عنوان شاهد و بدون عمل‌آوری در نظر گرفته شد. سپس کل نمونه‌ها تحت آزمایش جاروب فرکانس قرار گرفتند و مدل ویسکوالاستیک 2S2PID روی داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش برآزش شد. بررسی نتایج آزمایش و پارامترهای مدل نشان داد فرآوری رطوبتی در محلول سدیم کلراید باعث نرم‌شدگی 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 چقدر 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 یخ‌زدها باعث کاهش مقاومت ماستیک آسفالتی در برابر خرابی شیار شدگی می‌شوند و در بین آن‌ها کلسیم منیزیم استات بیشترین اثر مخرب را دارد.

### ۱- مقدمه

راه و حمل‌ونقل شد. از جمله وظایف مهندسی حوزه راهسازی، بررسی علل و میزان تخریب زیرساخت‌های راه در اثر استفاده از این مواد است که ممکن است تحقیقات در این زمینه صرفاً متکی به داده‌های میدانی باشد و یا از داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی نرم‌افزاری نیز کمک گرفت.

شناسایی علل بروز خرابی‌ها در روسازی راه‌ها، به ویژه آن دسته از خرابی‌هایی که ممکن است در روند طراحی دیده نشده باشند یا اهمیت آن‌ها به درستی درک نشده باشد و اتخاذ تمهیداتی که منجر به عدم بروز یا تکرار آن‌ها شود، از مهم‌ترین موضوعات مورد توجه در تعمیر و نگهداری روسازی راه‌ها است. دست‌یابی به یک روسازی ماندگار، مستلزم عوامل بسیاری است که در بین آن‌ها نگهداری زمستانی راه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. پژوهش‌های فراوانی به منظور بررسی تأثیر ضدیخ‌ها و یخ‌زدها روی مشخصات فنی و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی انجام شده‌است. در دهه‌های گذشته استفاده از مواد شیمیایی بسیار شایع بوده است و بسیاری از کارفرمایان، علی‌رغم تذکر جدی کارگروه‌های حفظ محیط‌زیست و مؤسسات تحقیقاتی، به‌صورت گسترده‌ای به استفاده از این مواد روی آوردند که بعدها باعث آلودگی محیط‌زیست و وارد شدن آسیب‌های جدی به زیرساخت‌های

### ۱-۱- مطالعات پیشین

برای نگهداری زمستانی راه‌ها و ذوب برف و یخ در فصول سرد سال، سدیم کلراید از دیرباز به دلیل فراوانی، ارزانی، در دسترس بودن و قابلیت حل‌الیت بالا در دماهای پایین مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این ماده بدون عوارض نبوده و اثرات مخرب آن روی کیفیت آب‌های زیرزمینی و آشامیدنی و همچنین گیاهان، خوردگی بدنه وسایل نقلیه و زیرساخت‌های راه پدیدار شده‌است. به دلیل عملکرد بهتر منیزیم کلراید نسبت به مخلوط ماسه و سدیم کلراید (پتانسیل ذوب بالاتر، آلاینده‌گی و رسوب کمتر در آب و همچنین ذرات معلق کمتر) این ماده شیمیایی در بعضی از ایالات آمریکا

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir



مورد استفاده قرار گرفت اما اثرات مخرب آن روی گیاهان و همچنین نرخ بالای آلاینده‌گی و خوردگی آن خصوصاً روی زیرساخت‌های راه و حمل‌ونقل دلیل اصلی کاهش استفاده از آن بود. در نهایت استفاده از نمک‌های کلرایدی غیر ارگانیک در فرودگاه‌ها توسط موسسه نگهداری و ایمنی کانادا ممنوع شد [۱].

به دلیل سمی بودن نمک‌های کلرایدی غیر ارگانیک، استفاده از اوره به‌تنهایی یا ترکیب اوره و اتیلن گلیکول رواج پیدا کرد، اما این نسل از ضدیخ‌ها نیز نه‌تنها سمی بودند بلکه به دلیل وجود مقدار بالایی از یون آمونیوم، اکسیژن زیادی برای تجزیه مصرف می‌کردند و خطراتی برای اکوسیستم داشتند. با منسوخ شدن این نسل از یخ‌زدها و با در نظر گرفتن مخاطرات زیست‌محیطی، استفاده از نمک‌های اسیدی ارگانیک همانند کلسیم منیزیم استات پیشنهاد شد [۲، ۳]. نرخ اثرگذاری این نمک‌ها در دماهای بسیار پایین بیشتر بود و همچنین اکسیژن کمتری برای تجزیه مصرف می‌کردند اما استفاده از این یخ‌زدها مسائلی هم در پی داشت. به‌عنوان مثال در بعضی موارد، بالا بودن میزان یون استات در خاک و همچنین انتقال بعضی از فلزات سمی در آب‌های سطحی گزارش شده بود. با استفاده از این جنس یخ‌زدها در فرودگاه نوردیک، قیرزدگی و همچنین مقاومت پایین آسفالت گزارش شد به نحوی که قیر و سنگدانه‌ها در بعضی موارد کاملاً از هم جدا و باعث افت قابل توجه مقاومت مخلوط آسفالتی شده بودند. همچنین در بعضی از مناطق این فرودگاه، عریان شدگی مخلوط آسفالتی، نرم شدگی قیر و شن زدگی دیده شد که قبل از استفاده از این جنس یخ‌زدها هرگز در گذشته دیده نشده بود [۴، ۵].

از سوی دیگر، برخی از پژوهشگران نتایج ضد و نقیضی در خصوص تأثیر یخ‌زدها بر روسازی آسفالتی گزارش کردند؛ به‌عنوان مثال در کانادا گزارش شد که استفاده از سدیم استات و پتاسیم فرمات تأثیر قابل‌توجهی روی خرابی مخلوط آسفالتی ندارد [۶]. مطالعات آل‌اتیپو<sup>۱</sup> و همکاران [۷، ۸] بر اساس آنالیز آزمایش شیمیایی ساختمان قیر توسط کروماتوگرافی گازی (GC)، تغییر چشم‌گیری در ساختمان شیمیایی قیر نشان نداد. همچنین ایشان به این نتیجه رسیدند که یخ‌زدهای شیمیایی سبب کاهش کشش سطحی می‌شوند که این موضوع یکی از مهم‌ترین عوامل نفوذ آب و یخ‌زدها به داخل ساختمان مخلوط آسفالتی است. نتایج رثومتی با دستگاه آنالیز مکانیکی دینامیکی (DMA) در دماهای پایین‌تر از دمای محیط نشان داد که سختی ماستیک آسفالتی در دمای پایین بعد از یک هفته فرآوری

رطوبتی تقریباً یکسان بود، اما نمونه‌های دیگری که در مجاورت یخ‌زدهای استاتی و فرماتی بودند تغییر عمده‌ای داشتند. این در حالی است که تأثیر آب روی ماستیک‌ها کم‌اهمیت گزارش شد. همچنین احتمال دارد که تفاوت در برخی مشخصات کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگدانه نمونه‌ها، دلیل اصلی برای تفاوت بین دمای شیشه‌ای شدن نمونه‌های شاهد با سایر نمونه‌ها باشد که این مسئله تأثیر زیادی بر مشخصات چسبندگی نمونه‌ها در حضور رطوبت دارد [۹].

بعضی از مطالعات [۷، ۹] نشان دادند که غوطه‌ورسازی نمونه‌ها در یخ‌زدها روی نقطه نرمی قیرها اثر دارد، بدین‌صورت که هر چه زمان فرآوری رطوبتی بیشتر باشد نقطه نرمی نیز بالاتر خواهد رفت. اندازه‌گیری ویسکوزیته نشان داد که غوطه‌ورسازی ماستیک‌های آسفالتی در یخ‌زدها برای زمانی مشخص، تأثیر فزاینده‌ای روی مشخصات گرانیروی آن‌ها دارد.

مطالعات حسن و همکاران [۱۰، ۱۱] نشان داد که چرخه‌های ذوب و یخبندان باعث نرم شدن قیر موجود در مخلوط آسفالتی می‌شود اما قرار گرفتن قیر در مجاورت یخ‌زدها سبب سفت شدن آن می‌شود. یافته‌ی این مطالعات، در مطالعات بعدی نیز تایید شد [۱۲]، بدین‌صورت که چرخه‌های ذوب و یخبندان سبب نرمی قیر می‌شوند درحالی‌که چرخه‌های رطوبت و خشک شدن باعث سفتی آن می‌شوند. به همین دلیل است که قیر در مخلوط آسفالتی در فصول گرم سفت‌تر می‌شود. علاوه بر آن، تجمع سدیم کلراید در روسازی آسفالتی، تأثیر زیادی روی شکل‌پذیری قیر دارد و به‌تبع آن تأثیر بسزایی روی مقاومت در برابر شکست در دمای پایین می‌گذارد. به‌طورکلی تأثیر سدیم کلراید روی مخلوط آسفالتی خصوصاً در فصول سرد سال قابل‌چشم‌پوشی نیست. خرابی در دمای پایین در فصل مشترک قیر و سنگدانه‌ها عموماً به دلیل تفاوت عمده بین ضرایب انقباض رخ می‌دهد. در این موارد، عموماً ترک‌های ریزی پدیدار می‌شوند که با افزایش و رشد آن‌ها، احتمال ورود آب و رطوبت به جسم راه زیاد می‌شود که به دنبال آن خرابی‌هایی به دنبال خواهد داشت.

بر اساس تجربیات کشور کانادا [۱]، نمونه‌هایی که در مجاورت سدیم استات قرار داشتند کمترین مقاومت را پس از چرخه ذوب و یخبندان از خود نشان دادند. تمامی نمونه‌ها در آزمایش مارشال پس از سیکل‌های رطوبت و خشک شدن از خود افزایش مقاومت نشان دادند. بر اساس تجربیات رونالد<sup>۲</sup> و همکاران [۱۳] تمامی نمونه‌هایی که در مجاورت آب مقطر قرار داشتند یک کاهش مقاومت در آزمایش مارشال از خود نشان دادند. این مسئله جالبی

مدل سیگموئیدی لجستیک تعمیم‌یافته (GLSM)<sup>۶</sup>؛ مدل دو لجستیک<sup>۷</sup> (DLM) و غیره پیشنهاد شدند که هر کدام کارایی مخصوص به خود را دارند [۱۴]. در مطالعاتی که اولارد و همکاران [۱۵] انجام دادند، مدل 2S2P1D را که بر اساس تعمیم مدل هیو-سای<sup>۸</sup> شکل گرفته به‌عنوان یک مدل کارآمد برای برآزش به داده‌های کلیه ترکیب‌های آسفالتی اعم از قیر خالص، قیر اصلاح‌شده، ماستیک، ملات و مخلوط آسفالتی معرفی کردند.

اصغر زاده و همکاران [۱۴] رفتار منحنی‌های جامع قیرهای مختلف را طبقه‌بندی کردند و با توجه به شکل ظاهری و مدل رفتاری نمونه‌ها، نشان دادند که بهترین مدل ویسکوالاستیک برای برآزش به نتایج به‌دست‌آمده، کدام مدل است. به‌عنوان مثال مدل CAM برای منحنی‌هایی که زاویه فاز آن‌ها در دماهای میانه به حالت تخت<sup>۹</sup> درمی‌آید، و در فرکانس‌های پایین (دماهای بالا) دارای قله است و در فرکانس‌های بالا (دماهای پایین) کاهش شدید دارد و به صفر میل می‌کند، نمی‌تواند با دقت خوبی برآزش شود. آن‌ها نشان دادند بسیاری از مدل‌های ارائه‌شده، فقط قابلیت برآزش خوبی روی داده‌های نمونه‌های قیر خالص دارند و کارایی خوبی در برآزش روی داده‌های قیرهای اصلاح‌شده و یا سایر ترکیب‌های آسفالتی از خود نشان نمی‌دهند. در بین تمام مدل‌ها، مدل 2S2P1D کارایی بسیار خوبی در برآزش روی تمام داده‌های آزمایشگاهی داشت و در برآزش روی داده‌های قیرهای اصلاح‌شده، بالاترین دقت را از خود نشان داد.

در یک جمع‌بندی کلی، می‌توان اظهار داشت بر اساس مطالعات گذشته و نتایج ضدونقیض گزارش‌شده در خصوص تأثیر یخ‌زدها بر عملکرد ماستیک و مخلوط آسفالتی، یکی از اصلی‌ترین دلایل اختلاف در نتایج گزارش شده، تفاوت در روش‌های فرآوری رطوبتی و نادیده گرفتن تأثیر دماهای بالا بر میزان اثرگذاری یخ‌زدها بر مخلوط آسفالتی است. استفاده از روش‌های اصلاح‌شده و مؤثرتری که به‌درستی بتواند شرایط محیطی واقعی حضور رطوبت و یخ‌زدها را شبیه‌سازی کند، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین در مطالعات گذشته، مطالعاتی بسیار کمی روی ماستیک آسفالتی انجام گرفته است، چرا که از یک طرف، این فاز بیشترین تأثیر را روی مشخصات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی دارد و از طرف دیگر، انجام آزمایش روی آن بسیار سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر از ساخت مخلوط آسفالتی و انجام آزمایش روی آن است. توجه بیشتر به این فاز و انجام آزمایش

است که حتی پس از صد سیکل ذوب و یخبندان نمونه‌های فرآوری شده در مجاورت یخ‌زدها همچنان مقاومت کافی داشتند.

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم که توسط پژوهشگران بسیاری گزارش شده است روند یکسان و واضحی را نشان نمی‌دهد. نتایج پژوهش‌های حسن و همکاران [۱۰، ۱۱] نشان داد بعد از یک سیکل ذوب و یخبندان، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌هایی که در مجاورت اوره قرار داشتند کمتر از مقاومت نمونه‌هایی بود که در مجاورت آب مقطر بودند، ولی با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌هایی که در مجاورت یخ‌زدها قرار داشتند، بالاتر از نمونه‌هایی بود که در مجاورت آب مقطر قرار داشتند؛ اما تحقیقات فنگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲] نتایج کاملاً متفاوتی را نشان دادند. بدین‌صورت که با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های غوطه‌ور در محلول سدیم کلراید، کاهش یافت.

آلاتیپو<sup>۲</sup> و همکاران [۷] آزمایش‌های متفاوتی با بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی روی نمونه‌های آسفالتی انجام دادند که نتایج متفاوتی با مطالعات میدانی داشت. در مطالعات آن‌ها تفاوت مهمی بین مقاومت نمونه‌ها با و یا بدون چرخه‌های ذوب و یخبندان و یا چرخه‌های رطوبت و خشک شدن که در مجاورت آب مقطر و یخ‌زدهای استاتی و فرماتی قرار داشتند، گزارش نشد.

بررسی ماستیک آسفالتی نقش بسزایی در شناخت رفتار مخلوط آسفالتی دارد و به همین دلیل پژوهش‌های فراوانی به تازگی روی ماستیک‌های آسفالتی متمرکز شده است. از طرفی به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی، امکان انجام آزمایش در دماهای بسیار پایین یا فرکانس‌های بالا، خصوصاً روی ماستیک‌های آسفالتی وجود ندارد. برای حل این مشکل، پژوهشگران به کمک برآزش مدل‌های مختلف ویسکوالاستیک، سعی کردند تا بر اساس داده‌های موجود، رفتار قیر، ماستیک، ملات یا مخلوط آسفالتی را در دماها یا فرکانس‌هایی که دستگاه‌های موجود قادر به اندازه‌گیری مشخصات نمونه‌ها نیستند یا اندازه‌گیری آن‌ها بسیار پرهزینه است، پیش‌بینی کنند. بدین منظور، مدل‌های مختلفی اعم از ماکسول تعمیم‌یافته، 2S2P1D، مدل کسری<sup>۳</sup>، کریستین-آندرسون (CA)<sup>۴</sup>، کریستین-آندرسون-ماراستیانو<sup>۵</sup> (CAM)،

6 Generalized logistic sigmoidal  
7 Double-logistic model  
8 Huet-Sayegh model  
9 Plateau

1 Feng  
2 Alatyppö  
3 Fractional model  
4 Christensen-Anderson  
5 Christensen-Anderson-Maraşteanu

جدول ۱. مشخصات فنی قیر خالص

Table 1. The properties of the original asphalt binder

واحد	حدود مجاز	نتیجه	استاندارد	دمای آزمایش (°C)	آزمایش
۰/۱ mm	-	۷۰	ASTM D5	۲۵	درجه نفوذ
cm	>۱۰۰	> ۱۰۰	ASTM D113	۲۵	تعیین خاصیت انگمی
g/cm <sup>3</sup>	-	۱/۰۳۵	ASTM D70	۲۵	وزن مخصوص
%	>۹۹	۹۹/۲	ASTM D2042	-	حلالیت در تری کلرو اتیلن
%	۰/۰-۸	۰/۷۵	ASTM D1754	-	افت وزنی
°C	>۲۳۲	۳۱۰	ASTM D92	-	نقطه اشتعال
°C	-	۴۹	ASTM D36	-	نقطه نرمی
mm <sup>2</sup> /s	-	۸۱۰	ASTM D2170	۱۲۰	گرانروی کینماتیکی
-	-	۰.۱۴	-	-	شاخص نفوذ (PI)

برازش مدل ویسکوالاستیک 2S2P1D به کمک نرم‌افزار اکسل روی داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده، سعی خواهد شد تا با بررسی میزان تغییر پارامترهای این مدل، رفتار رئولوژیکی ماستیک‌های در مجاورت رطوبت و مواد یخ‌زدا به نحو مناسبی تفسیر شوند. علاوه بر آن، از سایر خروجی‌های به دست آمده اعم از منحنی‌های جامع مدول مختلط برشی و زاویه فاز و همچنین شاخص شکل‌پذیری ( $G^* \times \cos \delta$ ) که در ادبیات فنی با نام شاخص شیارشدگی شناخته می‌شود) و شاخص خستگی ( $G^* \times \sin \delta$ ) نیز برای تفسیر بهتر نتایج کمک گرفته خواهد شد.

برای تعیین مشخصات آن در بازه گسترده‌ای از دما و فرکانس بارگذاری، در شناخت بهتر رفتار روسازی آسفالتی که در معرض رطوبت و مواد یخ‌زدا قرار گرفته، کمک شایانی به پژوهشگران خواهد کرد. از طرف دیگر، به دلیل محدودیت دستگاه‌ها برای انجام آزمایش در دماهای بسیار پایین یا فرکانس‌های بسیار بالا، بسیاری از نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین، درک درستی از مشخصات ویسکوالاستیک روسازی آسفالتی ارائه نمی‌دهند و پژوهشگران ناگزیر به استفاده از مدل‌هایی هستند که بتوانند رفتار روسازی آسفالتی را در طیف وسیعی از دماها و فرکانس‌های بارگذاری پیش‌بینی کنند.

۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

در این بخش به معرفی قیر، سنگدانه، نوع دانه‌بندی، انواع یخ‌زداها، نحوه ساخت و شبیه‌سازی محیطی نمونه‌ها پرداخته شده است. همچنین، آزمایش موردنیاز جهت تعیین مشخصات رئولوژیکی ماستیک آسفالتی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته، معرفی شده است.

۲-۱- مواد و مصالح

۲-۱-۱- قیر

قیر مورد استفاده در این پژوهش از شرکت قیران پخش ستاره ایرانیان تهیه شده است و رده عملکردی آن PG58-22 است. مشخصات فنی قیر استفاده‌شده، در «جدول ۱» نشان داده شده است.

۲-۱- اهداف و چشم‌انداز

در ادبیات فنی، نظریه‌ها و آزمایش‌های مختلفی برای بررسی تأثیر یخ‌زداها بر عملکرد ماستیک و مخلوط آسفالتی معرفی شده‌اند که تمرکز بیشتر آن‌ها روی تأثیر این مواد بر مخاطرات زیست‌محیطی، آسیب پل‌ها و زیرساخت‌ها و همچنین حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی بوده است. هدف اصلی این مطالعه‌ی پژوهشی بررسی تأثیر حضور آب مقطر، سدیم کلراید، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات به‌عنوان مواد یخ‌زدا بر مشخصات ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی به کمک انجام آزمایش جاروب فرکانسی در دماهای مختلف است. بدین منظور از دستگاه رئومتر برش دینامیکی (DSR) جهت انجام آزمایش روی ماستیک‌های آسفالتی در یک بازه‌ی گسترده‌ی دمایی و فرکانسی استفاده خواهد شد و پس از

جدول ۲. مشخصات یخزداها

Table 2. Deicers characteristics

مشخصات	کلسیم منیزیم استات	پتاسیم استات	سدیم کلراید
فرمول شیمیایی	CaMg <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> COO) <sub>6</sub>	KCH <sub>3</sub> COO	NaCl
وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (g/cm <sup>3</sup> )	۰-۱/۷	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

۲-۱-۲- یخزداها

«جدول ۲» مشخصات یخزداهای استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. سدیم کلراید یکی از قدیمی‌ترین و پرمصرف‌ترین یخزداها است که به دلیل ارزان و در دسترس بودن، تقریباً در اقصی نقاط جهان برای نگهداری زمستانی استفاده می‌شود [۱۶]. کلسیم منیزیم استات به دلیل آلودگی پایین‌تر زیست‌محیطی و همچنین دمای یوتکتیک (پایین‌ترین دمای ذوب ماده که در آن بلوره‌های منجمد و فاز مایع در حالت تعادل با هم وجود دارند) پایین‌تر به‌عنوان جایگزینی برای نمک‌های بر پایه کلراید توسط مؤسسات تحقیقاتی معرفی شد [۱۷]. پتاسیم استات به دلیل دمای یوتکتیک بسیار پایین (۶۰- درجه سانتی‌گراد)، در یخ‌زدایی مناطق بسیار سردسیر و خصوصاً فرودگاه‌ها استفاده‌ی فراوانی دارد [۱۸]. همچنین نمونه‌ها در مجاورت آب مقطر نیز فرآوری رطوبتی شدند تا مشخص شود در صورتی که از یخ‌زدا استفاده نشود، ذوب برف و یخ به‌تنهایی چه اثری روی ماستیک آسفالتی خواهد داشت.

۲-۱-۳- مصالح سنگی

از آنجا که سنگدانه‌های آب‌دوست (مصالح سیلیسی) در برابر آسیب‌های ناشی از رطوبت، حساسیت بیشتری دارند، از این جنس مصالح برای ساخت نمونه‌های ماستیک آسفالتی استفاده شد. دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده‌شده در این پژوهش، دانه‌بندی شماره ۴ آسفالت توپر آیین‌نامه روسازی آسفالتی

راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور) است که بر اساس آن میزان درصد فیلر مصرفی برای ساخت ماستیک آسفالتی محاسبه شد.

۲-۲- تهیه نمونه‌ها و آزمایش‌ها

در این قسمت به معرفی آزمایش‌های انجام‌گرفته روی مصالح سنگی، محاسبه‌ی درصد قیر بهینه و ساخت نمونه‌های ماستیک آسفالتی، روش شبیه‌سازی شرایط محیطی در حضور مواد یخ‌زدا و همچنین آزمایش انجام‌گرفته روی ماستیک آسفالتی پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱- آزمایش‌های مصالح سنگی

برای تهیه ماستیک آسفالتی از فیلر به‌دست‌آمده از سنگ مادر با مشخصات فیزیکی و مکانیکی مندرج در «جدول ۳» استفاده شد.

۲-۲-۲- محاسبه درصد قیر بهینه و ساخت نمونه‌های ماستیک آسفالتی

از روش طرح اختلاط مارشال برای تعیین درصد قیر بهینه استفاده شد. بدین منظور، پس از آماده‌سازی مصالح سنگی، درصدهای مختلف قیر با ۱۲۰۰ گرم مصالح سنگی که مطابق با ردیف شماره ۴ آسفالت توپر آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگی

Table 3. Physical and mechanical properties of aggregates

نتایج	استاندارد	آزمایش‌های مصالح سنگی
۲/۷۲۶۵	AASHTO T85	وزن مخصوص توده حجمی مصالح درشت‌دانه ( $\text{g/cm}^3$ )
۲/۸۱۷۵	AASHTO T85	وزن مخصوص ظاهری مصالح درشت‌دانه ( $\text{g/cm}^3$ )
۲/۷۹۴	AASHTO T84	وزن مخصوص توده مصالح ریزدانه ( $\text{g/cm}^3$ )
۲/۹۳۴	AASHTO T84	وزن مخصوص ظاهری مصالح ریزدانه ( $\text{g/cm}^3$ )
۳/۱۵۰	AASHTO T84	وزن مخصوص فیلر ( $\text{g/cm}^3$ )
۲۳	AASHTO T96	درصد سایش به روش لوس‌آنجلس (%)
۰/۸۳	AASHTO T85	درصد جذب آب مصالح درشت‌دانه (%)
۹۳۳/۸		خشک
۸۱۳/۴	ASTM C170	مقاومت فشاری تک‌محوره ( $\text{kg/cm}^2$ )
		خیس

کشور) دانه‌بندی شده بودند، توسط همزن برقی مخلوط شدند. سپس نمونه‌ها داخل قالب با قطر ۱۰ سانتیمتر ریخته شدند و پس از اعمال ۷۵ ضربه در هر دو طرف نمونه‌ها (برای شبیه‌سازی تراکم در مناطق با ترافیک بالا)، نمونه‌ها از قالب خارج شدند. میزان مقاومت مارشال و روانی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D5581 [۱۹] و همچنین وزن مخصوص توده و حداکثر وزن مخصوص تئوری مطابق با استانداردهای ASTM D2726 [20] و ASTM D2041 [21] تعیین و پس از ترسیم منحنی‌های شش‌گانه مربوطه، درصد قیر بهینه برابر ۶ درصد محاسبه شد. تهیه و ساخت نمونه‌های ماستیک آسفالتی به نحوی انجام گرفت که دقیقاً شبیه ماستیک موجود در مخلوط آسفالتی باشد. فرض شد که ماستیک حاوی فیلر و همچنین کل قیر مؤثر موجود در مخلوط آسفالتی است [22]. با دانستن وزن مخصوص قیر (۱,۰۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و فیلر (۳,۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و همچنین با توجه به دانه‌بندی شماره ۴ آسفالت توپر نشریه روسازی راه‌های ایران نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی که در آن ۶ درصد فیلر برای دانه‌بندی مذکور لحاظ شده است، نسبت حجمی قیر و فیلر به صورت

با انجام محاسبات وزنی-حجمی، ۵۱ درصد وزنی از فیلر سیلیسی با ۴۹ درصد وزنی قیر توسط همزن با سرعت بالا (حدوداً ۳۰۰۰ دور بر دقیقه) در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد بر اساس ویسکوزیته قیر مصرفی مخلوط شدند تا نمونه‌های ماستیک آسفالتی متناظر با نمونه‌های مخلوط آسفالتی تولید شوند.

۲-۲-۳- شبیه‌سازی شرایط محیطی برای نمونه‌ها

پژوهش‌های بسیاری توسط محققین مختلف حوزه راه‌سازی انجام گرفت تا بتوانند به کمک انجام آزمایش‌های مختلف، به طرز مؤثری شرایط واقعی حضور رطوبت و یخ‌زدها را در روسازی آسفالتی شبیه‌سازی کنند. بر اساس مطالعات میدانی، آلتینیو و همکاران [۷] نتیجه گرفتند که ساختمان شیمیایی قیر قرار گرفته در مجاورت یخ‌زدها دچار تغییرات شیمیایی قابل توجهی می‌شود. در بسیاری از مناطق که دارای ماه‌های گرمی در سال می‌باشند، خرابی روسازی‌هایی که در مجاورت مواد یخ‌زدا قرار گرفتند، بسیار بیشتر گزارش شده است. این مسئله در مطالعات گسترده‌ی کینگ





شکل ۱. شبیه‌سازی شرایط محیطی برای نمونه‌ها: (الف) پیش از فرآوری و (ب) حین فرآوری

Fig. 1. Simulating circumferential conditions for the samples: a) Before conditioning and, b) After conditioning

لو<sup>۱</sup> و همکاران [۲۳-۲۶] نیز اشاره شده است. پس از بررسی روش‌های مختلف، کریستنسن<sup>۲</sup> و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۰ روشی را جهت فرآوری بهتر و مؤثرتر نمونه‌های آسفالتی پیشنهاد دادند که در آن مشابه روش AASHTO-T283 نمونه‌ها فرآوری رطوبتی می‌شوند ولی به‌جای استفاده از پمپ خلأ و اشباع‌سازی، نمونه‌ها به مدت ۴ روز در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد مستغرق می‌شوند. همچنین به پیشنهاد همین پژوهشگران و با استناد به تحقیقات قبلی، سیکل ذوب و یخبندان به کار گرفته نشد زیرا این دماهای بالا هستند که در خرابی‌های مربوط به یخ‌زدها حالت بحرانی ایجاد می‌کنند. بر همین اساس، نمونه‌ها در محلول آب مقطر، سدیم کلراید، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات فرآوری شدند. یک نمونه هم به‌صورت خشک (بدون عمل‌آوری) و بدون شبیه‌سازی شرایط محیطی در نظر گرفته شد. «شکل ۱» قسمت الف تهیه نمونه‌ها پیش از فرآوری را نشان می‌دهد که نمونه‌ها به نحوی تهیه شدند که سطح تماس بالایی با محلول‌ها داشته باشند و قسمت ب فرآوری نمونه‌ها را در محلول‌های موردنظر در حمام آب بن‌ماری نشان می‌دهد.

۰٫۱ تا ۱۰ هرتر و میزان تنش اعمالی به نحوی تعیین شد که میزان کرنش کمتر از ۱ درصد باشد که در این محدوده فرض بر آن است که قیر و ماستیک آسفالتی در محدوده رفتار ویسکوالاستیک خطی قرار دارند. همچنین ۵ دما شامل ۱۵، ۲۱، ۳۷٫۸، ۵۴٫۴ و ۶۴ درجه سانتی‌گراد (بر اساس دماهای پیشنهاد شده آشتو T342 [۲۸]) برای تعیین مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی) برای انجام آزمایش انتخاب شدند. با توجه به بالا بودن درصد فیلر در ماستیک آسفالتی و سفت بودن آن، دستگاه DSR قادر به انجام آزمایش در دمای پایین‌تر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد نبود. از نمونه‌ها با قطر ۸ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر جهت انجام آزمایش در دماهای ۱۵، ۲۱، ۳۷٫۸ و از نمونه‌ها با قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر جهت انجام آزمایش در دماهای ۵۴٫۴ و ۶۴ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. همه نمونه‌ها حداقل یک ساعت قبل از انجام آزمایش روی دستگاه قرار گرفتند تا به دمای موردنظر برسند. در هر دما یک تنش برشی به نمونه‌ها اعمال شد به نحوی که میزان کرنش برشی نمونه‌ها زیر یک درصد (برای اطمینان از خطی بودن پاسخ رفتار ویسکوالاستیک) باقی بماند. میزان تنش برشی و کرنشی متناظر از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است.

#### ۲-۲-۴- آزمایش جاروب فرکانس:

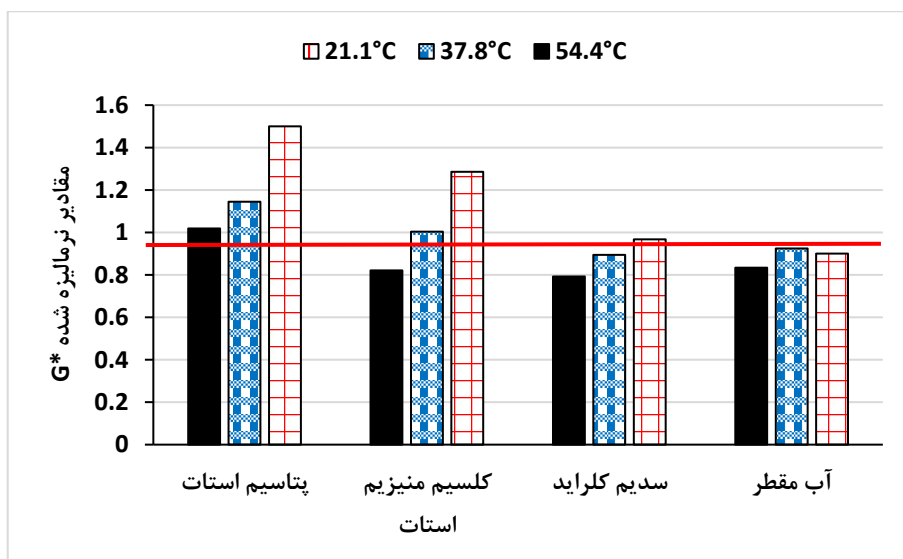
در این پژوهش یک دستگاه DSR مدل RN 4.3 ساخت شرکت Rheotest جهت تعیین مشخصات ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی شامل مدول مختلط برشی ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) به کار گرفته شد. مقادیر مدول ذخیره ( $G'$ ) و مدول اتلاف ( $G''$ ) از ضرب مدول مختلط برشی به ترتیب در  $\cos\delta$  و  $\sin\delta$  تعریف می‌شوند. فرکانس بارگذاری از محدوده

$$\tau(t) = \tau_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$\gamma(t) = \gamma_0 e^{i(\omega t - \delta)} \quad (2)$$

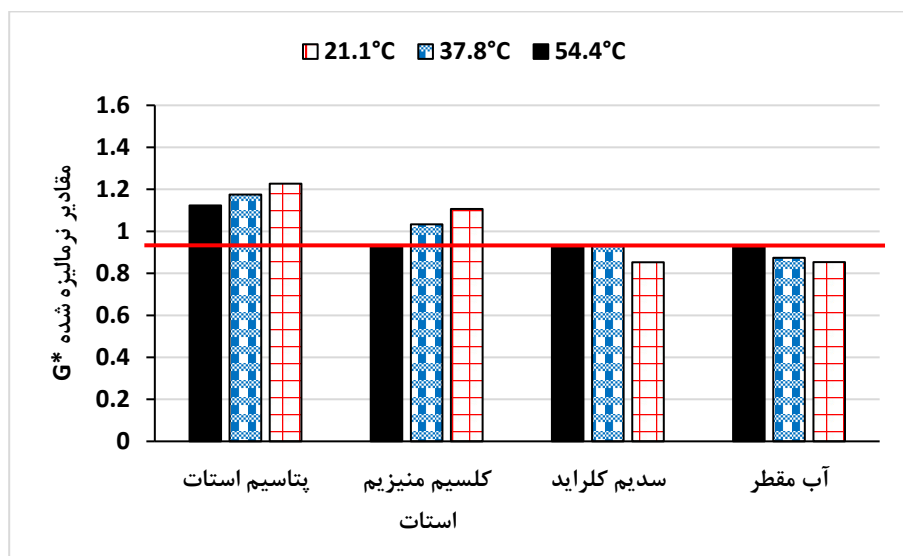
که در آن  $\sigma_0$  و  $\gamma_0$  میزان تنش و کرنش،  $\delta$  زاویه فاز (رادیان)،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه) و  $t$  زمان (ثانیه) است.

1 Qing lu  
2 Christensen



شکل ۲. مقادیر نرمالیزه شده  $|G^*|$  برای فرکانس بارگذاری ۱ هرتز

Fig. 2. Normalized values of  $|G^*|$  at 1 Hz loading frequency



شکل ۳. مقادیر نرمالیزه شده  $|G^*|$  برای فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز

Fig. 3. Normalized values of  $|G^*|$  at 10 Hz loading frequency

### ۳- تحلیل نتایج و بحث

در این قسمت به بررسی و تحلیل نتایج آزمایش جاروب فرکانسی روی نمونه‌های ماستیک آسفالتی بدون عمل‌آوری و همچنین نمونه‌های شبیه‌سازی شده در شرایط محیطی با حضور آب مقطر و یخ‌زدها پرداخته شده است.

### ۳-۱- مدل مختلط برشی:

با توجه به اینکه مقادیر  $G^*$  در دماهای مختلف اختلاف فراوانی دارند، جهت مقایسه بهتر، نتایج به‌دست‌آمده نسبت به مقادیر به‌دست‌آمده برای نمونه خشک (بدون عمل‌آوری) نرمالیزه شدند (بر نتایج به‌دست‌آمده برای نمونه خشک تقسیم شدند تا امکان مقایسه آن‌ها و بررسی روند تأثیر یخ‌زدها



تغییر رفتار در پارامتر  $|G^*|$  شده و باعث کاهش آن می‌شود. این مسئله بیانگر آن است که عملکرد کلسیم منیزیم استات بسیار وابسته به دمای بارگذاری بوده و هرچه دما بالاتر برود، اثر مخرب کلسیم منیزیم استات بیشتر آشکار خواهد شد. همچنین، پتاسیم استات در دماهای میانه و بالا باعث سفت‌تر شدن ماستیک می‌شود.

البته باید به این نکته نیز توجه داشت که بررسی مقادیر  $|G^*|$  به‌تنهایی نمی‌تواند در رفتارشناسی ماستیک آسفالت کافی باشد. به‌عنوان مثال، اگرچه بالا بودن مقادیر  $|G^*|$  حاکی از مقاومت بیشتر ماستیک و به‌تبع آن مخلوط آسفالتی در برابر تنش‌های برشی وارده است ولی این افزایش در صورتی مطلوب خواهد بود که ماستیک آسفالتی همچنان خواص ویسکوالاستیک خود را حفظ کند و از طرف دیگر، در برابر آسیب‌های ناشی از دمای پایین، ترد و شکننده نباشد. مثلاً همان‌گونه که در «شکل ۱» دیده می‌شود، پس از فرآوری رطوبتی در محلول پتاسیم استات، مقادیر زیادی قیر روی سطح محلول باقی مانده است که نشان می‌دهد این یخ‌زدا باعث شسته شدن قیر از سطح ماستیک آسفالتی می‌شود و اگرچه ممکن است به دلیل کاهش میزان قیر در ماستیک آسفالتی، رفتار نمونه الاستیک‌تر به نظر برسد، اما این پدیده مطلوب نیست. از این‌رو، نتیجه‌گیری در خصوص تأثیر یخ‌زداها بر رفتار ماستیک آسفالتی، منوط به بررسی بیشتر شاخص‌ها و پارامترهایی است که بعضی از آن‌ها در ادامه آورده شده‌اند.

### ۳-۲- منحنی‌های جامع:

به‌منظور بررسی و مقایسه‌ی بهتر عملکرد ماستیک‌های آسفالتی در طیف وسیع دمایی و فرکانس‌های بارگذاری، منحنی‌های جامع  $|G^*|$  و  $\delta$  نمونه‌های ماستیک آسفالتی ترسیم شدند، که به ترتیب در «اشکال ۴ و ۵» آورده شده است.

تحلیل نتایج منحنی جامع مدول مختلط برشی 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 منحنی جامع مدول مختلط برشی ماستیک آسفالتی می‌توان پی برد در فرکانس پایین (دمای بالا) نمونه‌های فرآوری شده در سدیم کلراید و پتاسیم استات، سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند.

میسر شود). مقادیر موردنظر به ازای فرکانس‌های بارگذاری ۱ و ۱۰ هرتز به ترتیب در «اشکال ۲ و ۳» نشان داده شده است.

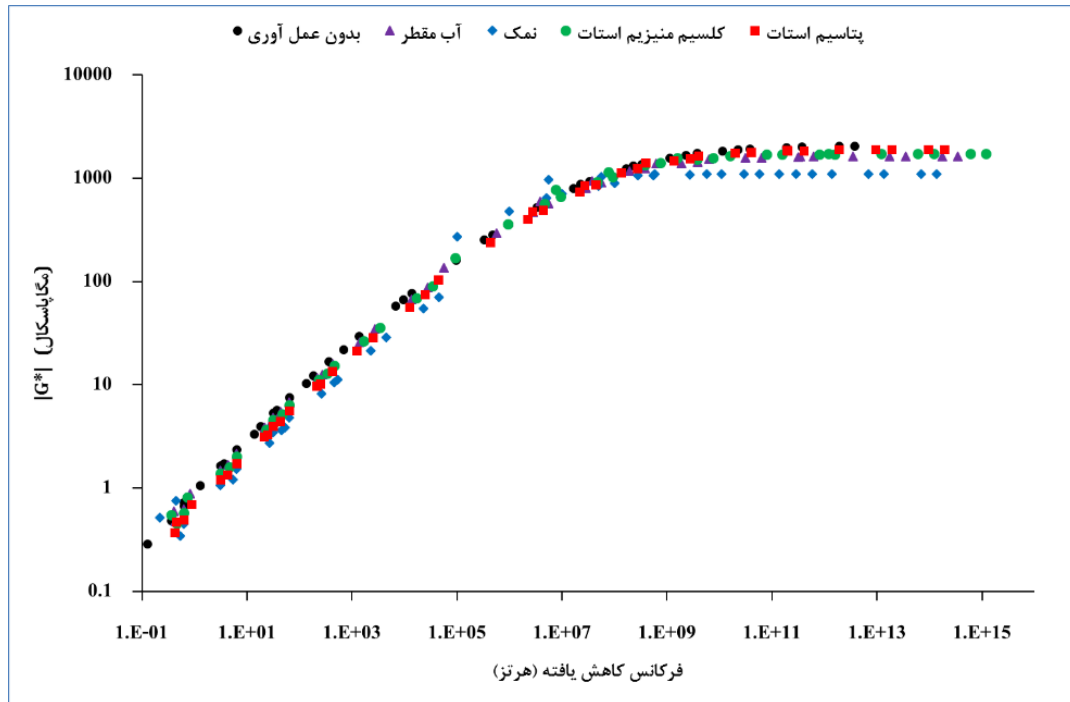
بررسی نتایج نشان می‌دهد آب مقطر و سدیم کلراید سبب کاهش  $|G^*|$  در دماهای میانه می‌شوند. این کاهش، در فرکانس بارگذاری ۱ هرتز به ترتیب ۱۰ درصد و ۳ درصد و در فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز در حدود ۱۵ درصد، در دمای ۲۱،۱ درجه سانتی‌گراد است. در دمای ۳۷،۸ درجه سانتی‌گراد و در فرکانس ۱ هرتز این کاهش به ترتیب برابر ۸ و ۱۰ درصد و در فرکانس ۱۰ هرتز به ترتیب برابر ۱۱ و ۷ درصد هست. این‌گونه می‌توان استنباط نمود که ماستیک آسفالتی در مجاورت آب مقطر و سدیم کلراید در دماهای میانه، نرم‌تر می‌شود.

همچنین در دمای ۲۱،۱ درجه سانتی‌گراد، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات سبب افزایش  $|G^*|$  به میزان ۲۹ و ۵۰ درصد در فرکانس ۱ هرتز و به میزان ۱۱ و ۲۳ درصد در فرکانس ۱۰ هرتز شدند. در دمای ۳۷،۸ سانتی‌گراد، کلسیم منیزیم استات در هر دو فرکانس ۱ و ۱۰ هرتز، سبب تغییر معناداری در مقدار  $|G^*|$  نشد ولی پتاسیم استات باعث افزایش به ترتیب ۱۵ و ۱۸ درصدی  $|G^*|$  گردید. این مسئله بیانگر آن است که پتاسیم استات نقش مهمی در سخت‌شدگی ماستیک آسفالتی در دماهای میانه دارد.

در دمای بالا، آب مقطر و سدیم کلراید رفتار مشابه با دمای میانه از خود نشان دادند و سبب کاهش ۱۷ و ۲۱ درصدی  $|G^*|$  در فرکانس ۱ هرتز و کاهش ۸ درصدی آن در فرکانس ۱۰ هرتز شدند. می‌توان استنباط نمود که آب مقطر و سدیم کلراید، ماستیک آسفالتی را در دماهای میانه و بالا و به ازای فرکانس‌های پایین و بالای بارگذاری، نرم‌تر می‌کنند.

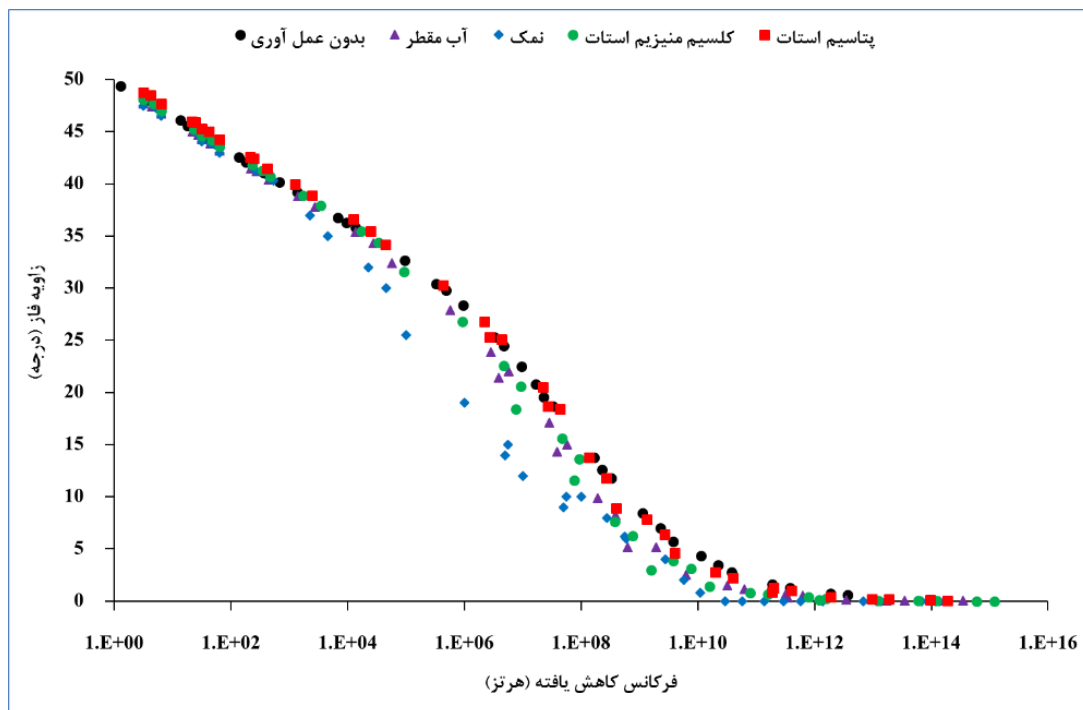
همچنین در دمای ۵۴،۴ درجه سانتی‌گراد، کلسیم منیزیم استات باعث کاهش  $|G^*|$  به میزان ۱۸ و ۸ درصد در فرکانس‌های ۱ و ۱۰ هرتز شد، اما در این محدوده دمایی، پتاسیم استات رفتار متفاوتی در فرکانس‌های مختلف از خود نشان داد. در فرکانس ۱ هرتز تغییر محسوس در میزان  $|G^*|$  ایجاد نکرد ولی در فرکانس ۱۰ هرتز، باعث افزایش ۱۲ درصدی آن شد. به‌صورت کلی می‌توان اظهار داشت که پتاسیم استات باعث سختی ماستیک آسفالتی در هر دو دمای میانه و بالا می‌شود.

در یک جمع‌بندی کلی آب مقطر و سدیم کلراید در دماهای میانه و بالا و همچنین به ازای فرکانس‌های پایین و بالای بارگذاری، سبب کاهش  $|G^*|$  و نرم‌شدگی ماستیک آسفالتی می‌شوند. کلسیم منیزیم استات در دماهای میانه باعث سفت‌تر شدن ماستیک آسفالتی می‌شود و با افزایش دما سبب



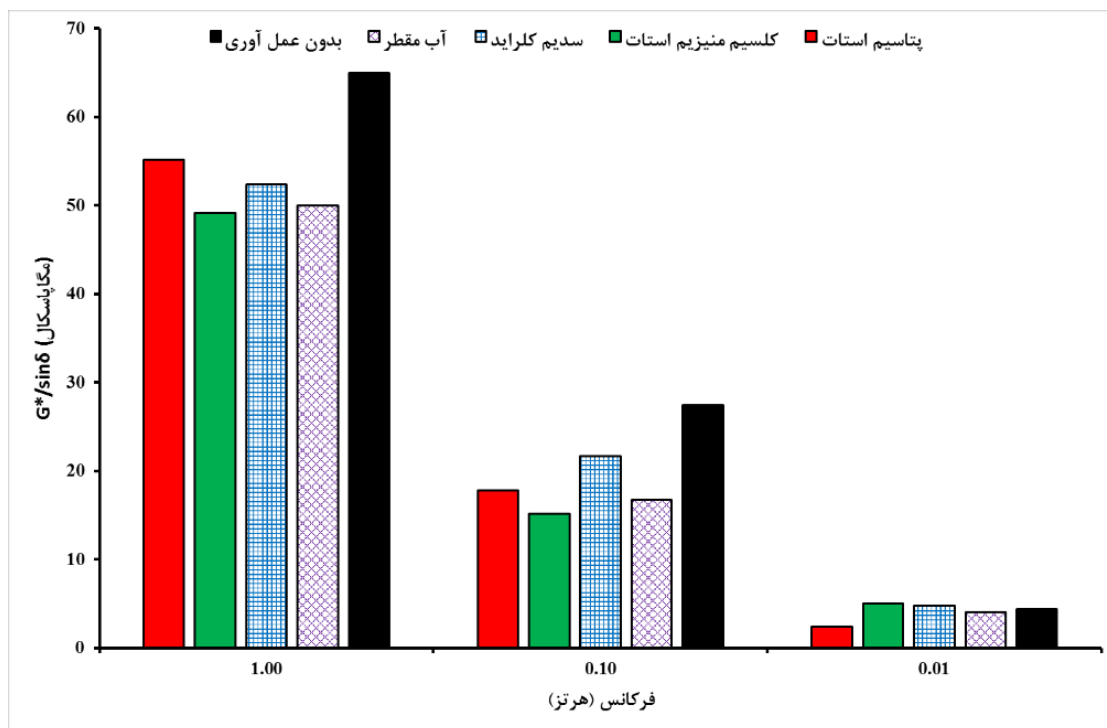
شکل ۴. منحنی جامع مدول مختلط برشی ماستیک‌های آسفالتی

Fig. 4.  $G^*$  master curve of the mastic samples



شکل ۵. منحنی جامع زاویه فاز ماستیک‌های آسفالتی

Fig. 5.  $\delta$  master curve of the mastic samples



شکل ۶. پارامتر شیاردگی ماستیک آسفالتی در دمای ۵۴٫۴ درجه سانتی گراد

Fig. 6. Rutting parameter of the mastic samples at 54.4 °C

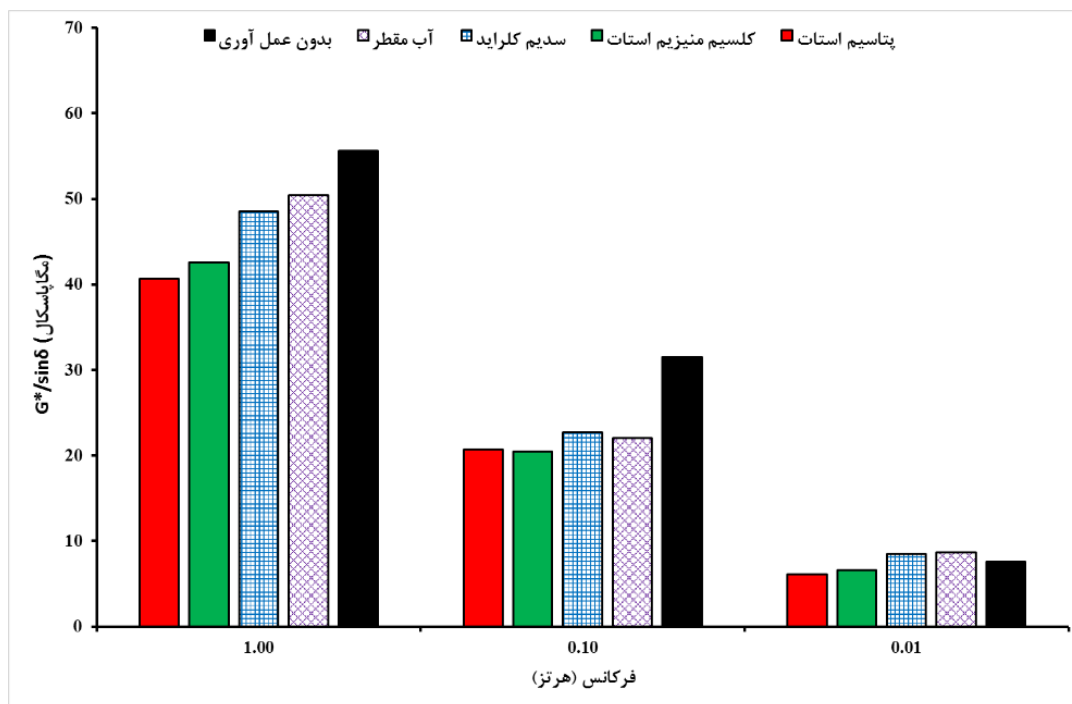
بررسی پارامتر شیاردگی نمونه‌های ماستیک آسفالتی در دماهای بالا نشان می‌دهد فرآوری در مجاورت آب مقطر و تمامی یخ‌زدها در فرکانس‌های ۰٫۱ و ۱ هرتز سبب کاهش مقاومت شیاردگی شده است. در هر دو دمای ۵۴٫۴ و ۶۴ درجه سانتی‌گراد، این کاهش مقاومت در فرکانس‌های ۰٫۱ و ۱ هرتز در نمونه‌های فرآوری شده در محلول کلسیم منیزیم استات بیشتر از بقیه نمونه‌ها به دست آمد. میزان کاهش یا افزایش پارامتر شیاردگی نسبت به نمونه عمل‌آوری نشده، در «جدول ۴» نشان داده شده است.

همچنین، در فرکانس بارگذاری ۰٫۱ هرتز و در هر دو دمای ۵۴٫۴ و ۶۴ سانتی‌گراد، تفاوت فاحشی بین مقاومت در برابر شیاردگی برای نمونه‌های مختلف وجود ندارد. این موضوع احتمالاً به دلیل آن است که در دماهای بالا و فرکانس بسیار پایین، قیر عملاً باربری ندارد و این ذرات فیلر هستند که در برابر تنش‌های وارده از خود عکس‌العمل نشان می‌دهند. به همین دلیل، رفتار نمونه‌های مختلف، تقریباً مشابه است.

از طرف دیگر، مقادیر زاویه فاز پایین‌تر نمونه‌های ماستیکی که در آب مقطر و سدیم کلراید فرآوری رطوبتی شدند حاکی از آن است که رفتار نمونه در مجاورت این مواد الاستیک‌تر شده است. این موضوع احتمالاً به دلیل شسته شدن قیر از سطح ماستیک رخ داده که به تبع آن، نسبت میزان قیر و فیلر در نمونه تغییر کرده است. شسته شدن قیر از سطح ترکیب‌های آسفالتی با سازوکارهای مختلفی ممکن است اتفاق بیفتد که در مطالعات پیشین به آن‌ها اشاره شده است [۲۹، ۳۰].

### ۳-۳- ارزیابی عملکردی با استفاده از پارامتر شیاردگی:

دماهای بالا (۵۴٫۴ و ۶۴ درجه سانتی‌گراد) و فرکانس‌های پایین (۰٫۱ و ۰٫۱ هرتز) انتخاب شدند تا بهتر بتوانند میزان مقاومت ماستیک آسفالتی را در برابر تغییر شکل‌های دائم نشان دهند. مقادیر  $G^*/\sin\delta$  موسوم به پارامتر شیاردگی معرفی شده در پروتکل سوپریپو در «اشکال ۶ و ۷» نشان داده شده است.



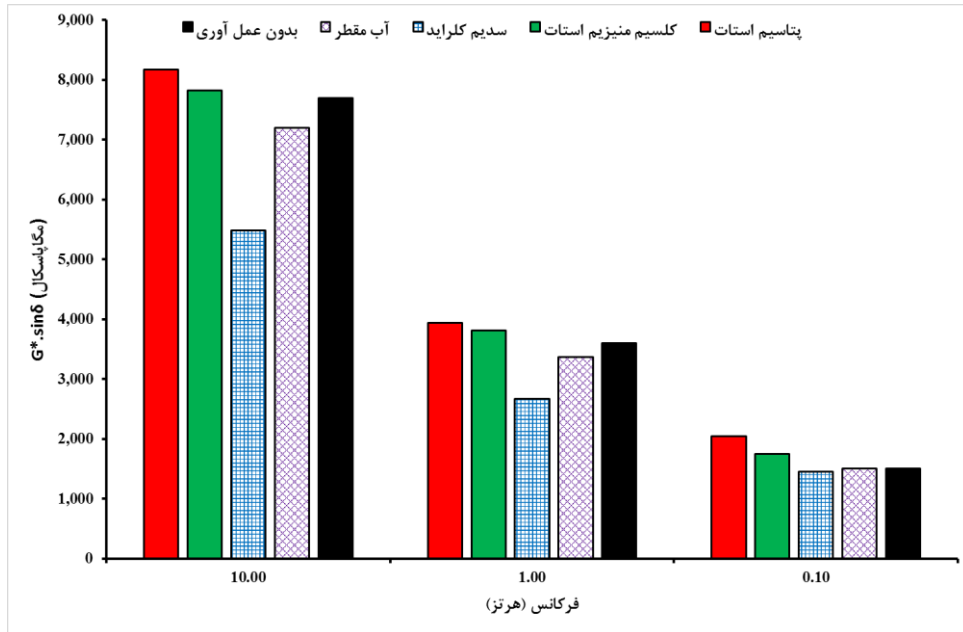
شکل ۷. پارامتر شیار شدگی ماستیک آسفالتی در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد

Fig. 7. Rutting parameter of the mastic samples at 64 °C

جدول ۴. درصد تغییر شاخص‌های شیارشدگی و خستگی نسبت به نمونه بدون عمل‌آوری

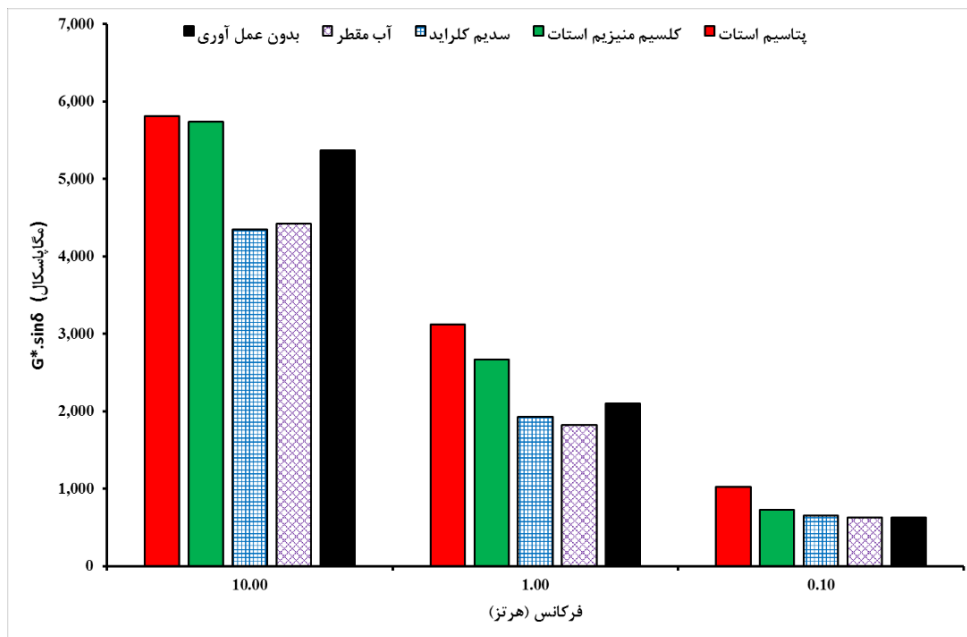
Table 4. The changes in the values of rutting and fatigue indices compared to the control sample

شاخص	دما (C°)	فرکانس (هرتز)	آب مقطر	سدیم کلراید	کلسیم منیزیم استات	پتاسیم استات
شیارشدگی (G*/sinδ)	۵۴/۴	۰/۰۱	۷/۰	-۸/۰	-۰/۹	۴۵/۰
		۰/۱	۳۹/۰	۲۱/۰	۴۵/۰	۳۵/۰
		۱	۲۳/۰	۱۹/۰	۲۴/۰	۱۵/۰
	۶۴	۰/۰۱	-۱۰/۰	-۹/۰	۱۳/۰	۲۰/۰
		۰/۱	۳۰/۰	۲۸/۰	۳۵/۰	۳۴/۰
		۱	۹/۰	۱۳/۰	۲۳/۰	۲۷/۰
خستگی (G*.sinδ)	۱۵	۰/۱	۰/۰	۴/۰	-۱۶/۰	-۳۶/۰
		۱	۶/۰	۲۶/۰	-۶/۰	-۱۰/۰
		۱۰	۶/۰	۲۹/۰	-۲/۰	-۶/۰
	۲۱.۱	۰/۱	۰/۰	-۴/۰	-۲۷/۰	-۶۳/۰
		۱	۱۳/۰	۸/۰	-۱۷/۰	-۴۹/۰
		۱۰	۱۸/۰	۱۹/۰	-۷/۰	-۸/۰



شکل ۸. پارامتر خستگی ماستیک‌های آسفالتی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد

Fig. 8. Fatigue parameter of the mastic samples at 15.0 °C



شکل ۹. پارامتر خستگی ماستیک‌های آسفالتی در دمای ۲۱,۱ درجه سانتی‌گراد

Fig. 9. Fatigue parameter of the mastic samples at 21.1 °C

بارگذاری ۰,۱ و ۱ و ۱۰ هرتز انتخاب شدند. مقادیر  $G^* \times \sin \delta$  موسوم به پارامتر خستگی در «اشکال ۸ و ۹» نشان داده شده است.

۳-۴- ارزیابی عملکردی با استفاده از پارامتر خستگی برای نشان دادن میزان مقاومت ماستیک آسفالتی در برابر خرابی خستگی دماهای میانه ۱۵ و ۲۱,۱ درجه سانتی‌گراد و همچنین فرکانس‌های

۱۷ و ۷ درصد به دست آمد. برای نمونه‌های در مجاورت پتاسیم استات، این افزایش برای فرکانس‌های مشابه به ترتیب برابر ۶۳ و ۴۹ و ۸ درصد محاسبه شد که به‌وضوح نشان می‌دهد رفتار خستگی نمونه‌هایی که در مجاورت کلسیم منیزیم استات یا پتاسیم استات قرار می‌گیرند بسیار وابسته به فرکانس بارگذاری است. بدین‌صورت که هرچه قدر فرکانس بارگذاری کاهش یابد (یا دما افزایش یابد)، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی خستگی کاهش پیدا می‌کند. «جدول ۴»، درصد تغییر در شاخص‌های شیارشدگی و خستگی را نسبت به نمونه ماستیک بدون عمل‌آوری نشان می‌دهد.

در یک جمع‌بندی کلی بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از بررسی پارامتر خستگی در دماهای میانه، می‌توان نتیجه گرفت که فرآوری رطوبتی در مجاورت آب مقطر و سدیم کلراید باعث نرم‌شدگی ماستیک آسفالتی و به‌تبع آن، کاهش پارامتر  $G^* \times \sin \delta$  می‌شود که می‌تواند بیانگر کاهش حساسیت ماستیک در برابر خرابی خستگی باشد. همچنین، به ازای تمامی فرکانس‌های بارگذاری، فرآوری رطوبتی در مجاورت کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات باعث افزایش پارامتر  $G^* \times \sin \delta$  می‌شوند و احتمال بروز خرابی به علت تکرار بارگذاری و خرابی خستگی افزایش خواهد یافت.

### ۳-۵- برازش مدل ویسکوالاستیک 2S2PID

عموماً مدل‌های رئولوژیکی قیر که مشخصات ویسکوالاستیک ترکیب‌های قیری را تشریح می‌کنند از سه المان اصلی تشکیل شده‌اند: فنر، میراگر و یک المان پارابولیک (میراگر غیرخطی). المان پارابولیک شبیه یک تابع خزشی پارابولیک به شکل زیر است.

$$J(t) = a(t / \tau)^h \quad (۳)$$

و معادله  $G^*$  به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$G^* = (i\omega\tau)^h / a\Gamma(h+1) \quad (۴)$$

که در آن  $J(t)$  تابع نرمی خزشی است،  $h$  توان است به صورتی که  $1 < h < 0$  (که در آن  $h=0$  برای حالت الاستیک کامل و  $h=1$  برای حالت ویسکوز است)،  $a$  یک ثابت بدون بعد است  $(1/\lambda)$ ،  $\lambda$  زمان رهایش،  $\Gamma$  تابع گاما،  $t$  زمان بارگذاری،  $\tau$  زمان مشخصه (که مقدار آن فقط با دما تغییر

بررسی پارامتر خستگی در دماهای میانه حاکی از آن است که فرآوری نمونه‌ها در مجاورت آب مقطر و سدیم کلراید، باعث کاهش مقدار  $G^* \times \sin \delta$  شده که این مسئله در خصوص خرابی خستگی مطلوب است. تقریباً به ازای تمامی فرکانس‌های بارگذاری، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات باعث سختی و تردی ماستیک آسفالتی شده و پتانسیل رشد ترک در اثر تکرار بارگذاری را افزایش می‌دهند.

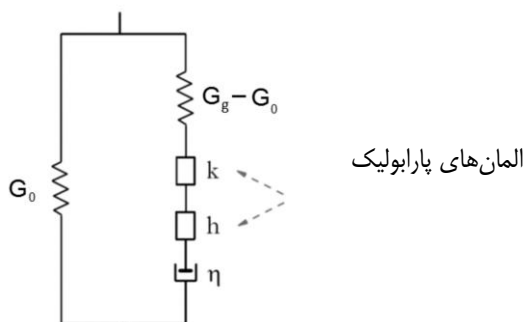
در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، به ازای فرکانس‌های بارگذاری ۱ و ۱۰ هرتز، برای نمونه‌هایی که در مجاورت آب مقطر فرآوری رطوبتی شدند، میزان کاهش پارامتر  $G^* \times \sin \delta$  بسیار کم و در حدود ۶ درصد برای هر دو فرکانس است. این مقدار برای نمونه‌هایی که در مجاورت محلول سدیم کلراید بودند، به ترتیب برابر ۲۶ و ۲۹ درصد به دست آمد. این بدان معناست که سدیم کلراید احتمالاً مقاومت ماستیک آسفالتی را در برابر خرابی خستگی افزایش داده است. در فرکانس بارگذاری ۰٫۱ هرتز، تقریباً افزایش یا کاهش چشمگیری دیده نشد.

نمونه‌هایی که در مجاورت کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات فرآوری شدند، مقادیر  $G^* \times \sin \delta$  بالاتری داشتند که مقدار افزایش آن در فرکانس ۰٫۱ هرتز، به ترتیب برابر ۱۶ و ۳۶ درصد است. تغییری در مقدار  $G^* \times \sin \delta$  در فرکانس بارگذاری ۱ و ۱۰ هرتز برای نمونه‌هایی که در مجاورت کلسیم منیزیم استات بودند مشاهده نشد، اما پتاسیم استات تأثیر کم و در حدود ۶ درصد در هر دو فرکانس نامبرده داشت. این نتایج تلویحاً نشان می‌دهند که عملکرد کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات بسیار وابسته به نرخ بارگذاری (و یا دما) است بدین‌صورت که هرچه قدر فرکانس بارگذاری کمتر باشد (یا دما بالاتر باشد)، اثر مخرب این یخ‌زدها بر ماستیک آسفالتی بیشتر خواهد بود که این تأثیر، به‌طور مستقیم روی مشخصات عملکردی مخلوط آسفالتی اثر خواهد گذاشت [۳۱].

نظیر آنچه در قبل آمد، در دمای ۲۱٫۱ درجه، نمونه‌ها رفتار مشابهی از خود نشان دادند و اگرچه در فرکانس بارگذاری ۰٫۱ هرتز، تغییر قابل‌توجهی در پارامتر خستگی دیده نشد، لیکن در فرکانس‌های بارگذاری ۱ و ۱۰ هرتز، برای نمونه‌هایی که در مجاورت آب مقطر فرآوری رطوبتی شدند، این افزایش مقاومت به ترتیب برابر ۱۳ و ۱۸ درصد مشاهده شد. همچنین، پارامتر خستگی برای نمونه‌های فرآوری شده در مجاورت محلول سدیم کلراید در فرکانس بارگذاری ۰٫۱ هرتز تغییری نداشت ولی برای فرکانس‌های ۱ و ۱۰ هرتز، به میزان ۸ و ۱۹ درصد کاهش یافت.

برای نمونه‌های در مجاورت کلسیم منیزیم استات، افزایش مقاومت در پارامتر خستگی برای فرکانس‌های ۰٫۱، ۱ و ۱۰ هرتز به ترتیب برابر ۲۷ و





شکل ۱۰. شکل شماتیک مدل 2S2PID [۳۲]

Fig. 10. A schematic representation the 2S2PID model

$$R^2 = 1 - (n - k) / ((n - 1) \times (S_e / S_r)^2) \quad (7)$$

که در آن،  $\eta$  ویسکوزیته نیوتنی و  $\tau$  زمان مشخصه و تابعی از دما است.  $\tau$  می‌تواند با استفاده از توابع ضریب انتقال اعم از WLF یا معادلات Arrhenius در بازه دمایی مشاهده‌شده در آزمایشگاه به کمک رابطه (۸) تخمین زده شود.

$$\tau = a_T(T) \times \tau_0 \quad (8)$$

یا با استفاده از معادله WLF داریم.

$$\tau = \tau_0 \times 10^{(C_1(T - T_{ref})) / (C_2 + (T - T_{ref})))} \quad (9)$$

که در آن  $a_T(T)$  ضریب انتقال در دمای  $T_1$  است و  $\tau_0$  برابر با  $\tau(T_{ref})$  که در دمای  $T_{ref}$  تعیین می‌شود و همچنین  $C_1$  و  $C_2$  ضرایبی هستند که توسط معادله WLF می‌بایست تعیین شوند.

معمولاً از یک تابع چندجمله‌ای درجه ۲ همانند رابطه (۱۰) برای برازش داده‌ها استفاده می‌شود.

$$\ln \tau = a + bT + cT^2 \quad (10)$$

که در آن  $a, b, c$  پارامترهایی هستند که می‌بایست تعیین شوند.

می‌کند،  $i$  عدد مختلط ( $i = \sqrt{-1}$ )، و  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای است. برای یک میراگر خطی، رابطه بالا به صورت زیر می‌تواند نوشته شود.

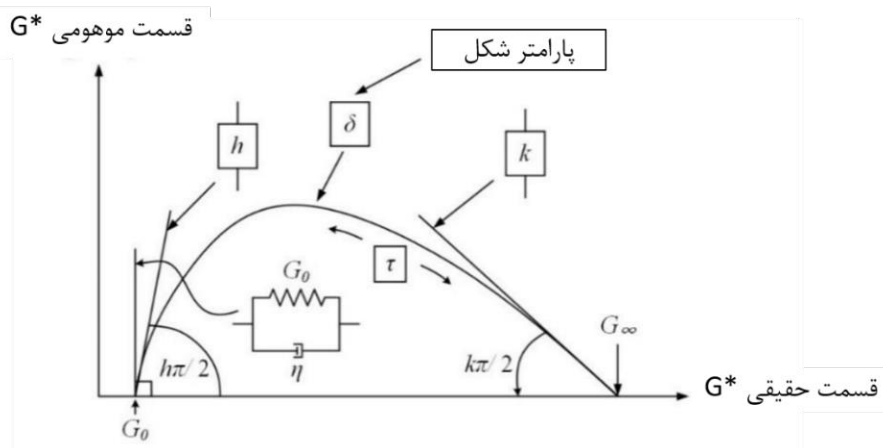
$$G^* = i\omega\tau / a \quad (5)$$

که پارامترهای آن سابقاً معرفی شده‌اند. طی ۶۰ سال گذشته، مدل‌های بنیادین<sup>۱</sup> فراوانی برای تشریح رفتار ویسکوالاستیک قیر، ماستیک، ملات و مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شده‌اند که مدل 2S2PID یکی از آنها است [۱۴، ۳۲، ۳۳]. «شکل ۱۰» به صورت شماتیک، اجزای مدل 2S2PID را نشان می‌دهد.

2S2PID مخفف ترکیب دو فنر، دو المان خزشی پارابولیک و یک میراگر است که در مطالعات گذشته، بر اساس مفاهیم آماری به خوبی توانسته است مشخصات رئولوژیکی ترکیب‌های آسفالتی را تشریح نماید [۲۹]، [۳۲]. این مدل که بر اساس تعمیم مدل هیو-سای ساخته شده، شامل ۷ پارامتر است و مقدار  $G^*$  در آن بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G^*(\omega) = G_0 + ((G_g - G_0) / ((1 + \delta(i\omega\tau)^{-k}) + (i\omega\tau)^{-h}) + (i\omega\beta\tau)^{-1})) \quad (6)$$

که در آن  $k$  و  $h$  توان‌هایی هستند که در بازه بین صفر تا یک قرار دارند و  $0 < k < h < 1$ ،  $\alpha$  ثابت است و  $G_0$  مدول الاستیک است وقتی که  $\omega \rightarrow 0$ ،  $G_g$  مدول شیشه‌ای است وقتی که  $\omega \rightarrow \infty$ . ضمناً،  $\beta$  یک ثابت است و به صورت زیر تعریف می‌شود.



شکل ۱۱. پارامترهای مدل 2S2P1D

Fig. 11. Parameters of the 2S2P1D model

[۱۵] برای ارتباط بین قیر و مخلوط آسفالتی پیشنهاد شده است. در پایان، پارامترهای مدل با استفاده از روش سعی و خطا و به کمک نرم‌افزار اکسل به نحوی تعیین شدند که بهترین برازش ممکن روی داده‌ها صورت پذیرد. «شکل ۱۲» نتیجه برازش مدل 2S2P1D را روی داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

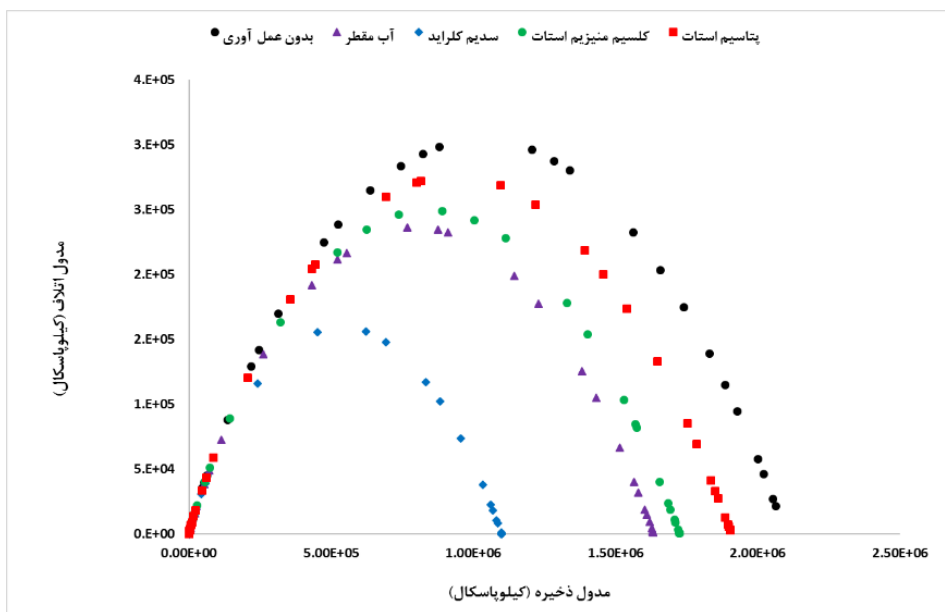
«جدول ۵» پارامترهای برازش شده مدل 2S2P1D را نشان می‌دهد. همچنین مطالعات گذشته نشان داد که مقدار  $G_0$  برای ماستیک‌های حاوی تا ۳۵ درصد فیلر می‌تواند برابر صفر در نظر گرفته شود ولی هر مقدار که درصد فیلر بالاتر برود، دیگر نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل 2S2P1D به خوبی می‌تواند در ناحیه ویسکوالاستیک خطی روی داده‌های رئولوژی ماستیک‌های آسفالتی برازش شود.

یافته‌های این مقاله مطابق با یافته‌های مطالعات فان و همکاران [۳۴] است که نشان می‌دهد پارامترهای  $\delta$ ،  $h$ ،  $k$  و  $\beta$  وابسته به منبع قیر خام هستند، پارامتر  $G_0$  وابسته به ساختمان فیلر یا سنگدانه هستند. یخ‌زدها می‌توانند مشخصات ذاتی ماستیک‌ها شامل  $G_g$  و  $\tau_0$  را تغییر دهند. همچنین مطابق با یافته‌های فان<sup>۴</sup> و همکاران [۳۴]، این گونه استنباط می‌شود که مشخصات ماستیک آسفالتی کاملاً وابسته به مشخصات قیر است و میزان یا جنس فیلر فقط مقادیر  $G$  و  $\tau_0$  را تغییر می‌دهد، بدین صورت که با افزایش مقدار فیلر، مقادیر  $G$  و  $\tau_0$  نیز افزایش پیدا می‌کند.

شایان‌ذکر است که این مدل فقط نیاز به ۷ پارامتر دارد تا مشخصات رئولوژیکی قیر یا ترکیب‌های آسفالتی را در محدوده ویسکوالاستیک خطی نشان دهد. هرچند که اگر این مدل برای قیر خالص استفاده شود، معمولاً مقدار  $G_0$  عددی بسیار نزدیک به صفر خواهد بود و می‌توان از آن صرف‌نظر نمود و تعداد پارامترهای مدل به ۶ کاهش می‌یابد. «شکل ۱۱» به‌صورت شماتیک تأثیر هر یک از پارامترها را روی دیاگرام Cole-Cole (نمایش گرافیکی مدول ذخیره در مقابل مدول اتلاف به ازای تمامی دماها و فرکانس‌های بارگذاری) نشان می‌دهد.

برای تعیین ضرایب مدل 2S2P1D، در ابتدا آنالیز حساسیت روی پارامترهای مدل انجام شد. بر همین اساس، پارامترهای مدل به‌جز پارامتر دلخواه، ثابت نگه‌داشته شدند و پارامتر موردنظر در یک بازه منطقی (بر اساس نتایج مطالعات پیشین و ادبیات فنی) تغییر کرد تا میزان صحت برازش مدل بررسی شود. نتایج نشان داد که مقادیر  $G_g$  و  $\tau$  بیشترین اثر را داشتند و پس از آن‌ها  $\beta$  اثر کمی داشت. سایر پارامترها تأثیر ناچیزی داشتند. همچنین، بعضی روابط هستند که در بررسی صحت مدل می‌توانند کمک شایانی کنند، مثل رابطه  $\ln(\tau_{\text{maastic}}/\tau_{\text{bitumen}}) = 1.56\phi_f$  که توسط دل‌پورت<sup>۱</sup> و همکاران [۱۵] معرفی شد که ارتباط بین  $\tau$  قیر و ماستیک آسفالتی را با دقت خوبی نشان می‌دهد که در آن  $\phi_f$  درصد فیلر در ماستیک آسفالتی است. همچنین رابطه  $\tau_{\text{mix}} = 10^{2.66} \times \tau_{\text{bitumen}}$  نیز توسط اولارد<sup>۲</sup> و دی بندتو<sup>۳</sup>

- 1 Delaporte
- 2 Olard
- 3 Di benedetto



شکل ۱۲. دیاگرام Cole-cole ماستیک‌های آسفالتی

Fig. 12. Cole-Cole diagram of the asphalt mastic samples

جدول ۵. پارامترهای مدل ویسکوالاستیک 2S2PID

Table 5. 2S2PID model parameters

$S_e/S_y$	$R^2$	$\beta$	$h$	$\kappa$	$\delta$	$G_0$ [kPa]	$G_g$ [kPa]	$\tau_0$	نحوه فرآوری رطوبتی
0.26	0.97	3000	0.59	0.35	6.25	0.3	2.1E+06	3.02E-06	بدون عمل آوری
0.26	0.96	3000	0.59	0.35	6.25	0.3	1.6E+06	4.02E-06	آب مقطر
0.31	0.93	3000	0.59	0.35	6.25	0.3	1.1E+06	4.52E-06	سدیم کلراید
0.25	0.96	3000	0.59	0.35	6.25	0.3	1.7E+06	3.22E-06	کلسیم منیزیم استات
0.23	0.97	3000	0.59	0.35	6.25	0.3	1.9E+06	2.02E-06	پتاسیم استات

پارامترهای  $h$  و  $k$  به ترتیب شیب‌های نمودار در ابتدا و انتهای نمودار را نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال یوسف و همکاران [۳۵] نشان دادند وقتی رفتار مصالح کاملاً الاستیک باشد  $h=0$  و وقتی کاملاً ویسکوز باشد  $h=1$  می‌باشد. جیانتائو<sup>۱</sup> و همکاران [۳۶] دریافتند پیرشدگی قیر سبب می‌شود پارامترهای  $\delta$  و  $\beta$  افزایش یابند. آن‌ها  $\delta$  را به‌عنوان شاخصی از پیرشدگی معرفی کردند و عنوان داشتند که  $\beta$  وابستگی زیادی به میزان قیر دارد، بدین‌صورت که هرچه‌قدر میزان آسفالتن افزایش یابد،  $\beta$  نیز افزایش می‌یابد.

با تغییر جنس فیلر مقادیر  $h$ ،  $k$  و  $\delta$  ثابت باقی ماندند. دلاپورت<sup>۲</sup> و دی بندتو<sup>۳</sup> [۳۷] هم به نتایج مشابهی دست یافتند، بدین‌صورت که با افزایش میزان فیلر در ماستیک آسفالتی، مقدار  $\tau_0$  هم افزایش یافت. نتایج مطالعات اولارد<sup>۴</sup> و دی بندتو [۳۳] نشان داد وقتی از قیر نرم‌تر برای رئولوژی استفاده شد، مقدار  $\delta$  کاهش یافت.

2 Delaporte  
3 Di benedetto  
4 Olard

1 Jiantao

جدول ۶. شاخصه‌های نیکویی برازش

Table 6. Criteria for the goodness of fit statistics

$S_e/S_y$	$R^2$	دقت برازش
$\leq 0.35$	$\geq 0.90$	عالی
0.36-0.55	0.7-0.89	خوب
0.56-0.75	0.4-.69	متوسط
0.76-0.89	.2-.39	ضعیف
$\geq 0.90$	$\leq 0.19$	بسیار ضعیف

بررسی پارامتر  $\delta$  در نتایج به‌دست‌آمده از برازش مدل 2S2P1D روی داده‌ها نشان می‌دهد که میزان این پارامتر در تمامی نمونه‌ها ثابت مانده است. بررسی پارامترهای  $h$  و  $k$  نشان می‌دهد، فرآوری رطوبتی در مجاورت آب مقطر و یخ‌زدها تغییری در شیب اولیه و انتهایی نمودار (میزان الاستیسیته ماستیک‌ها) ایجاد نمی‌کند. میزان سختی اولیه ( $G_0$ ) برای همه نمونه‌ها یکسان به دست آمد که نشان می‌دهد فرآوری رطوبتی در مجاورت تمامی یخ‌زدها، روی این پارامتر بی‌اثر بوده است. همچنین، بررسی پارامتر  $G_p$  نشان می‌دهد که فرآوری رطوبتی به مقدار زیادی روی مدول شیشه‌ای ماستیک‌های آسفالتی اثرگذار است و می‌توان این‌گونه استنباط کرد که فرآوری رطوبتی در مجاورت آب مقطر و تمامی یخ‌زدها باعث افزایش مدول شیشه‌ای ماستیک‌های آسفالتی می‌شود که مستقیماً روی مشخصات عملکردی مخلوط آسفالتی نیز اثرگذار خواهد بود. پارامتر  $\tau_0$  که مطابق «شکل ۱۱»، میزان کشیدگی نمودار cole-cole را نشان می‌دهد، به مقدار زیادی تحت تأثیر فرآوری رطوبتی قرار گرفته و همان‌گونه که در «جدول ۵» نشان داده شده است، مقدار این پارامتر برای تمامی نمونه‌ها متفاوت به‌دست‌آمده است.

۴-۱- نسبت خطای استاندارد

خطای استاندارد تخمین ( $S_e$ ) و انحراف خطای استاندارد ( $S_y$ ) به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$S_e = \sqrt{((\sum(Y - \bar{Y})^2) / ((n - k)))} \quad (11)$$

$$S_y = \sqrt{((\sum(Y - \bar{Y})^2) / ((n - 1)))} \quad (12)$$

که در آن  $Y$  مقدار به‌دست آمده از آزمایش و  $\hat{Y}$  مقدار پیش‌بینی شده است.  $\bar{Y}$  میانگین مقادیر به‌دست آمده از آزمایش است،  $n$  اندازه نمونه و  $k$  تعداد متغیرهای مستقل در مدل هستند. مقادیر پایین  $S_e/S_y$  نشان‌دهنده همبستگی بهتری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده هستند.

۴-۲- ضریب تعیین

ضریب تعیین به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$R^2 = 1 - (n - k) / (n - 1) \times (S_e / S_y)^2 \quad (13)$$

۴-۳ نیکویی برازش

دو شاخصه آماری متفاوت برای بررسی نیکویی برازش مدل 2S2P1D روی داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد که در ادامه توضیح داده شده است.

- تمامی یخزدها باعث کاهش مقاومت ماستیک آسفالتی در برابر خرابی شیار شدگی می‌شوند و در بین آن‌ها کلسیم منیزیم استات بیشترین اثر مخرب را دارد.
- پتاسیم استات باعث افزایش مقدار  $G^*$  ماستیک آسفالتی در دماهای میانه و بالا می‌شود.
- آب مقطر و سدیم کلراید باعث نرم شدگی ماستیک آسفالتی و افزایش مقاومت ماستیک آسفالتی در برابر خرابی خستگی می‌شوند، درحالی‌که تأثیر کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات بسیار وابسته به فرکانس بارگذاری است. به نحوی که هرچه قدر فرکانس بارگذاری کمتر باشد، نمونه‌ها مقاومت کمتری در برابر خرابی خستگی از خود نشان می‌دهند.
- بررسی نتایج نیکویی برازش مدل 2S2P1D نشان می‌دهد این مدل با دقت عالی می‌تواند روی داده‌های ماستیک آسفالتی برازش شود.
- بررسی پارامترهای  $h$  و  $k$  در مدل 2S2P1D نشان می‌دهد، فرآوری رطوبتی در مجاورت آب مقطر و یخزدها تغییری در میزان الاستیسیته ماستیک‌ها ایجاد نمی‌کند. همچنین پارامتر  $G_0$  با فرآوری رطوبتی در آب مقطر یا یخزدها تغییری نکرد.
- فرآوری رطوبتی در آب مقطر و یخزدها بیشترین تأثیر را روی پارامترهای  $\tau_0$  و  $G_g$  دارد و می‌تواند مشخصات ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی را تغییر دهد.

پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری روی خصوصیات ویسکوالاستیک قیر و ترکیب‌های آسفالتی (ملات و مخلوط) در مجاورت سایر یخزدها و با انواع دیگر مصالح سنگی و دانه‌بندی و همچنین با استفاده از قیرهای اصلاح‌شده و پلیمری برای تأیید نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه‌ی پژوهشی انجام گیرد.

## ۶- تشکر و قدردانی

از همکاری شرکت‌های دژپا، قیران پخش ستاره ایرانیان، مهندسین مشاور ساخت آزما، اکسیر شرق مشهد و سینکو پلاس که در این کار پژوهشی همراهی نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

- [1] C. Environment, Road Salts, Priority Substances List Assessment Report, (2001) 181-181.
- [2] W. Lewis Jr, Magnesium chloride deicer: a literature review with emphasis on the State of Colorado, Final Report, Colorado Department of Transportation, Denver

که پارامترهای آن مشابه تعاریف ارائه شده برای معادلات (۱۱) و (۱۲) است. برای یک برازش بی‌نظیر مقدار  $R^2$  برابر ۱ است. شاخصه‌های نیکویی برازش در جدول ۶ آورده شده‌است. براساس نتایج به‌دست آمده در «جدول ۵»، مدل 2S2P1D توانسته‌است داده‌های آزمایشگاهی را با دقت عالی پیش‌بینی کند.

## ۵- نتیجه‌گیری

جهت بررسی تأثیر یخزدها روی مشخصات ویسکوالاستیک ماستیک‌های آسفالتی، ابتدا با استفاده از آزمایش مقاومت مارشال درصد قیر بهینه محاسبه شد. سپس، نمونه‌های ماستیک آسفالتی با نسبت ۵۱ درصد فیلر مصالح سیلیسی و ۴۹ درصد قیر PG 58-22 ترکیب شدند. یک نمونه به‌صورت خشک (بدون عمل‌آوری) در نظر گرفته شد و باقی نمونه‌ها به ترتیب در آب مقطر و محلول‌های سدیم کلراید، کلسیم منیزیم استات و پتاسیم استات به مدت ۹۶ ساعت و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد فرآوری رطوبتی شدند. مشخصات ویسکوالاستیک نمونه‌ها با استفاده از دستگاه DSR و در دماهای مختلف با استفاده از آزمایش جاروب فرکانسی به دست آمد. سپس مدل ویسکوالاستیک 2S2P1D به داده‌ها برازش و پارامترهای آن تعیین شد تا به کمک آن‌ها بتواند بهتر تأثیر یخزدها را بررسی نمود. همچنین از مقادیر نرمالیزه شده مدول مختلط برشی، منحنی‌های جامع مدول مختلط برشی و زاویه فاز و همچنین شاخص‌های شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ ) و خستگی ( $G^* \times \sin\delta$ ) برای تفسیر بهتر نتایج استفاده شد. در ادامه مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش آورده شده است.

- فرآوری رطوبتی در مجاورت آب مقطر باعث نرم شدگی ماستیک آسفالتی در فرکانس‌های پایین بارگذاری (دماهای بالا) و به‌تبع آن کاهش مقدار  $G^*$  می‌شود. این پدیده می‌تواند به علل مختلفی از جمله امولسیون شدگی خود به خودی و یا سایر مکانیزم‌های حساسیت رطوبتی رخ دهد.
- فرآوری رطوبتی در مجاورت سدیم کلراید باعث نرم شدگی ماستیک آسفالتی می‌شود.
- کلسیم منیزیم استات باعث افزایش پارامتر  $G^*$  در فرکانس‌های پایین بارگذاری (دماهای بالا) می‌شود. تأثیر این یخزدها روی پارامتر خستگی بسیار وابسته به فرکانس بارگذاری است، به نحوی که هرچه قدر فرکانس بارگذاری پایین‌تر باشد، مقاومت ماستیک در برابر خرابی خستگی کمتر می‌شود.

- [13] R.W. Eck, M.A. Usmen, W.A. Sack, I. Arar, A. Atefi, Evaluation of the Effect of Natural Brine Deicing Agents on Pavement Materials, *Transportation Research Record*, 933 (1983) 24-24.
- [14] S.m. Asgharzadeh, N. Tababae, K. Naderi, M.N. Partl, Evaluation of rheological master curve models for bituminous binders, (2015) 393-406.
- [15] F. Olard, H.D. Benedetto, F. Olard, H. Di, Road Materials and Pavement Design General “ 2S2P1D ” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes General “ 2S2P1D ” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and, (November 2014) (2011) 37-41.
- [16] X. Shi, L. Fay, C. Gallaway, K. Volkening, M.M. Peterson, T. Pan, A. Creighton, C. Lawlor, S. Mumma, Y.J.C.D.o.T.D.A.R. Liu, I. Branch, Evaluation of alternative anti-icing and deicing compounds using sodium chloride and magnesium chloride as baseline deicers—Phase I, (2009).
- [17] B. Amini, R. Hazrati, Functional comparison of Calcium Magnesium Acetate with sand and salt as a deicer in winter, First national conference of roadway & railway accident, (2009).
- [18] P. Starck, B. Löfgren, Influence of de-icing agents on the viscoelastic properties of asphalt mastics, *Journal of Materials Science*, 42(2) (2007) 676-685.
- [19] ASTM D5581, Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 in. Diameter Specimen), 2021.
- [20] ASTM D2726, Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures, 2011.
- [21] ASTM D2041, Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures, 2010.
- [22] B.S. Underwood, Y.R. Kim, Experimental investigation into the multiscale behaviour of asphalt concrete, *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4) Colorado, (1997).
- [3] W.M. Lewis, W.E. Analysts, Studies of environmental effects of magnesium chloride deicer in Colorado, Colorado Department of Transportation, Research Branch, 1999.
- [4] Y. Xi, Z. Xie, Corrosion effects of magnesium chloride and sodium chloride on automobile components, Colorado Department of Transportation, Research [Branch], 2002.
- [5] X. Shi, L. Fay, C. Gallaway, K. Volkening, M.M. Peterson, T. Pan, A. Creighton, C. Lawlor, S. Mumma, Y. Liu, T.A. Nguyen, Evaluation of alternative anti-icing and de-icing compounds using sodium chloride and magnesium chloride as baseline deicers, (February) (2009).
- [6] F. Nilsson, Durability problems on Nordic airfields—the influence of deicing agents on asphalt concrete, 2003.
- [7] V. Alatyppö, P. Jauhiainen, J. Valtonen, Conclusions—Finnish Deicing Project, Helsinki University of Technology, Laboratory of Highway Engineering, Helsinki, Finland, (2005).
- [8] V. Alatyppö, J. Valtonen, Experiences on the effects of de-icing chemicals on bituminous airfield runways in Finland, 2005.
- [9] Starck, Löfgren - 2007 - Influence of de-icing agents on the viscoelastic properties of asphalt mastics.
- [10] Y. Hassan, A.O. Abd El Halim, A.G. Razaqpur, Laboratory Evaluation and Assessment of the Effect of Runway Deicers on the Mechanical Properties of Asphalt Concrete Mixes Subjected to Freeze-Thaw Cycles, Safety and Security, Civil Aviation, Aerodrome Safety, Technical Evaluation Engineering Division, Transport Canada, Ontario, ON, Canada, (2000).
- [11] Y. Hassan, A.O. Abd El Halim, A.G. Razaqpur, W. Bekheet, M.H.J.J.o.t.e. Farha, Effects of runway deicers on pavement materials and mixes: comparison with road salt, 128(4) (2002) 385-391.
- [12] D. Feng, J. Yi, D. Wang, L. Chen, Impact of salt and freeze-thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China, *Cold Regions Science and Technology*, 62(1) (2010) 34-41.



- [31] Y.-R. Kim, D. Little, R. Lytton, Effect of moisture damage on material properties and fatigue resistance of asphalt mixtures, *Transportation research record: journal of the transportation research board*, (1891) (2004) 48-54.
- [32] Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders, (April) (2012).
- [33] F. Olard, H. Di Benedetto, General “2S2P1D” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes, *Road materials and pavement design*, 4(2) (2003) 185-224.
- [34] C.V. Phan, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, D. Lesueur, S. Pouget, Influence of hydrated lime on linear viscoelastic properties of bituminous mastics, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 24(1) (2020) 25-40.
- [35] N.I.M. Yusoff, D. Mounier, G. Marc-Stéphane, M.R. Hainin, G.D. Airey, H. Di Benedetto, Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model, *Construction and Building Materials*, 38 (2013) 395-406.
- [36] W. Jiantao, N.I.M. Yusoff, F.M. Jakarni, M.R. Hainin, Correction of compliance errors in the dynamic shear modulus of bituminous binders data, *Sains Malaysiana*, 42(6) (2013) 783-792.
- [37] F. Olard, H. Di Benedetto, B. Eckmann, J.-P. Triquigneaux, Linear viscoelastic properties of bituminous binders and mixtures at low and intermediate temperatures, *Road materials and pavement design*, 4(1) (2003) 77-107.
- (2011) 357-370.
- [23] Q. Lu, Investigation of conditions for moisture damage in asphalt concrete and appropriate laboratory test methods, University of California, Berkeley, 2005.
- [24] Q. Lu, J.T. Harvey, Inclusion of moisture effect in fatigue test for asphalt pavements, in, 2008, pp. 498-504.
- [25] Q. Lu, J.T. Harvey, Evaluation of moisture sensitivity of hot mix asphalt by flexural beam fatigue test, in, 2006, pp. 124-133.
- [26] Q. Lu, C.L.M. John T. Harvey, Investigation of Conditions for Moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods: Summary Report, 2007.
- [27] D. Christensen, J. Mallela, D. Hein, E. Kalberer, M. Farrar, R. Bonaquist, Effect of deicing and anti-icing chemicals on HMA airfield runways, 2010.
- [28] AASHTO T342-11, Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures, (2019).
- [29] S. Caro, E. Masad, A. Bhasin, D.N. Little, Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms, *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2) (2008) 81-98.
- [30] N. Kringos, T. Scarpas, C. Kasbergen, P. Selvadurai, Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 1: governing processes and formulations, *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2) (2008) 115-128.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*P. Mirzababaei, P. Hajikarimi, F. Moghadas Nejad, Investigation of the effect of deicers on viscoelastic properties of asphalt mastics, Amirkabir J. Civil Eng., 55(10) (2024) 2113-2134.*

DOI: 10.22060/ceej.2023.22003.7877



