

## تعیین پتانسیل مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی افزودنی پلیمری و معدنی در برابر خرابی‌های رطوبتی

عباسعلی میر، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود  
پژمان امینیان\*، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود  
ایمان آقایان، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

E-mail: p.aminian@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۵ - پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۳۰

### چکیده

حساسیت رطوبتی، تغییر شکل‌های مکانیکی و چرخه‌های ذوب و یخبندان و نفوذ (در عملیات نگهداری زمستانی) به داخل مخلوط آسفالتی از مکانیزم‌های مهمی هستند که موجب ایجاد خرابی‌های مختلفی در روسازی‌های آسفالتی می‌شوند. در سال‌های اخیر، استفاده از ترکیب‌های گوگرد پلیمری (گوگاس) به علت سهولت دسترسی و ارزان بودن از یک سو و رعایت اصول محیط زیستی از سوی دیگر مورد توجه محققین قرار گرفته است. بر اساس مطالعات پیشین، مشخص شده که مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس در حضور رطوبت دارای ضعف هستند. در این تحقیق، تأثیر مواد افزودنی ساسوبیت و آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی، مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان در مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، مصالح سنگی، قیر و مواد افزودنی ذکر شده تهیه و آزمایش‌های مورد نیاز روی آن‌ها انجام شد. پس از تعیین درصد قیر بهینه به روش مارشال، به بررسی حساسیت رطوبتی، تغییر شکل‌های مکانیکی، مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان مخلوط آسفالتی با استفاده از پارامترهای نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (AASHTO T-283) و شاخص نسبت مارشال (ASTM D-1559) پرداخته شد. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، مشخص گردید که افزودنی ساسوبیت به‌طور مؤثری باعث بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی شاهد و مخلوط‌های حاوی گوگاس در برابر رطوبت و سیکل‌های ذوب و یخبندان می‌گردد. این در حالی بود که افزودنی آهک هیدراته تأثیر قابل توجهی در بهبود موارد ذکر شده نداشت. در مجموع، و به لحاظ آماری، مخلوط آسفالتی حاوی ۳۰ درصد گوگاس و ۱/۵ درصد ساسوبیت بهترین نتیجه را در بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آثار مخرب چرخه‌های ذوب و یخبندان ارائه داد.

واژه‌های کلیدی: خرابی رطوبتی، شاخص نسبت مارشال، گوگرد پلیمری (گوگاس)، مخلوط آسفالتی گرم، مقاومت کششی غیر مستقیم.

## ۱. مقدمه

شوند. حتی در این زمینه، آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴) نیز به استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی در زمان استفاده از این مصالح سنگی اشاره کرده است. خرابی‌های گفته شده به متغیرهای زیادی از قبیل نوع مخلوط آسفالتی، خصوصیات قیر، خصوصیات مخلوط قیر-فیلر، خصوصیات و بافت سنگدانه‌ها، شرایط آب و هوایی و رطوبتی، عدم وجود زهکشی مناسب، میزان ترافیک، دما، نحوه اجرا و تراکم و استفاده از افزودنی‌ها بستگی دارد. ظاهراً با توجه به شرایط آب و هوایی در برخی نقاط کشور و ماهیت اجرای روسازی‌های آسفالتی، حذف رطوبت و سیکل‌های ذوب و یخبندان از روسازی‌ها غیرقابل اجتناب است.

اهداف اصلی این تحقیق ارائه‌ی راهکارهای مناسب جهت مقابله با بروز خرابی‌های ناشی از رطوبت، تغییر شکل‌های مکانیکی و سیکل‌های ذوب و یخبندان در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که دلیل اصلی کم بودن دوام روسازی‌های آسفالتی در مناطق سردسیر، بارهای ترافیکی سنگین، مسائل رطوبتی و سیکل‌های ذوب و یخبندان می‌باشد. بنابراین، در این تحقیق، عوامل مؤثر در بروز موارد ذکر شده شناسایی و راهکارهای اساسی برای رفع آنها ارائه گردیده است. مهمترین اهداف این تحقیق عبارتند از:

- ۱- بررسی تأثیر درصدهای مختلف ساسوبیت، گوگاس و آهک هیدراته بر مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی در حالت خشک و اشباع با آب
- ۲- بررسی تأثیر درصدهای مختلف ساسوبیت، گوگاس و آهک هیدراته بر مقاومت و نسبت مارشال مخلوط‌های آسفالتی در حالت خشک و اشباع با آب
- ۳- بررسی تأثیر درصدهای مختلف ساسوبیت، گوگاس و آهک هیدراته بر مقاومت در برابر سیکل‌های مختلف ذوب و یخبندان مخلوط‌های آسفالتی.

در سال‌های اخیر، روند صعودی هزینه‌های مرمت و بازسازی روسازی راه‌ها، که در اثر افزایش شدت و تکرار بارهای ترافیکی، تأثیر رطوبت و چرخه‌های ذوب و یخبندان ایجاد می‌شود، باعث انجام تحقیقات جامعی در زمینه‌ی استفاده از مواد افزودنی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی، به منظور افزایش مقاومت آن‌ها در برابر خرابی‌ها، شده است. استفاده از افزودنی‌های ساسوبیت، گوگرد پلیمری و آهک هیدراته و اثر آنها بر خرابی‌های مکانیکی، حساسیت رطوبتی و سیکل‌های ذوب و یخبندان در مخلوط‌های آسفالتی کمتر مورد توجه بوده است. به همین دلیل، استفاده از افزودنی‌های دارای خواص مختلف (به عنوان مثال، گوگرد عامل ایجاد سختی و ساسوبیت باعث انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی است) و تأثیرات آنها به صورت همزمان در این پژوهش بررسی شده است. برای ساخت روسازی، همیشه دسترسی به مصالح سنگی مرغوب و مقاوم در فواصل نزدیک پروژه امکان‌پذیر نبوده و همچنین با توجه به این که سالانه هزینه‌های زیادی صرف تعمیر و نگهداری و بهسازی شبکه راه‌های کشور در برابر انواع خرابی‌ها می‌گردد، ضروری است که مشخصات مکانیکی، حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان در مخلوط‌های آسفالتی به طور جدی بررسی شود.

پدیده‌ی حساسیت رطوبتی مصالح سنگی، یکی از مهم‌ترین علل بروز خرابی‌های زود هنگام روسازی‌های آسفالتی است. اگرچه مصالح سنگی سیلیسی دارای مقاومت باربری بالایی در تحمل بارهای محوری سنگین کامیون‌ها در جاده‌ها هستند، ولی حضور آب به دلیل چسبندگی ناکافی این مصالح با قیر، باعث کاهش مقاومت رطوبتی این مخلوط‌ها می‌گردد. این عامل موجب شده این مصالح سنگی به عنوان مصالح مستعد در بروز پدیده‌ی عریان‌شدگی شناسایی

## ۲. مروری بر پیشینه تحقیق

حساسیت رطوبتی، یا همان عریان‌شدگی، شکسته شدن پیوند بین مصالح سنگی و قیر است. پدیده-ی حساسیت رطوبتی هنگامی رخ می‌دهد که چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر ضعیف می‌شود و یا از بین می‌رود. عموماً خرابی‌های ناشی از رطوبت می‌توانند به دو مکانیزم دسته‌بندی شوند که ابتدا شامل از دست دادن چسبندگی به دلیل حضور آب بین لایه‌ی قیر و سنگدانه است که موجب جداشدگی لایه‌ی قیر از سطح سنگدانه‌ها می‌شود. سپس، پیوستگی، به دلیل نرم شدن مخلوط قیر و فیلر، از دست می‌رود (غفارپور جهرمی، ۲۰۰۸). یکی از مهمترین عوامل گزارش خرابی آسفالت، وجود رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی است. امروزه، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام می‌گیرد، که استفاده از افزودنی‌های مختلف یکی از مهمترین آنها است. وجود رطوبت سبب جداشدگی مصالح سنگی و قیر می‌شود و این پدیده سبب کاهش چسبندگی اجزای تشکیل دهنده ی آسفالت می‌گردد (کاکار و همکاران، ۲۰۱۵). یکی از مهمترین آزمایش‌هایی که به منظور برآورد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود، آزمایش استاندارد لاتمن اصلاح شده (AASHTO T283) است که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است (شو و هوانگ، ۲۰۱۲). تحقیقات در زمینه حساسیت رطوبتی نشان داده که اثرهای مخرب رطوبت، منجر به کاهش مدول آسفالت تا حدود ۲۵٪، افزایش شیارشدگی تا حدود ۶۰٪ و نیز افزایش خرابی‌های ناشی از خستگی تا حدود ۳۰٪ می‌شود (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳). این موضوع اهمیت بحث حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی را بیش از پیش نمایان می‌کند.

تغییرشکل‌های ماندگار در مناطق گرمسیری به- علت سختی کمتر مخلوط در دماهای زیاد، شدیدتر است. شیارشدگی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر را می-

توان به صورت گسترش تدریجی گودشدگی طولی در مسیر حرکت وسیله نقلیه با افزایش تعداد تکرارهای بارگذاری تعریف کرد. علت آن، ترکیبی از تراکم و تغییرشکل‌های برشی است که در یک یا چند لایه اتفاق می‌افتد (ملاحسینی و همکاران، ۲۰۱۲). به منظور تعیین میزان تغییرشکل دائم یک مخلوط آسفالتی، پارامترهای به‌دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرند و عملکرد مخلوط پیش‌بینی می‌شود. رفتار مخلوط متأثر از نرخ بارگذاری، دما، پیرشدگی قیر و درصد هوای مخلوط است (شو و هوانگ، ۲۰۱۲).

سه نوع مکانیزم ایجاد تغییرشکل عبارتند از: الف) جابجایی ماندگار (پلاستیک): این مکانیزم معمولاً توسط تورفتگی‌ای که در نزدیکی مرکز اعمال بار و برآمدگی‌های جزئی که در دو طرف آن تورفتگی ایجاد می‌شود، شناسایی می‌شود. فاصله‌ی بین برآمدگی‌ها تا مرکز خط افتادگی به عنوان شاخص عمق شیارشدگی در نظر گرفته می‌شود (محبوب و آلن، ۱۹۹۰؛ سنتنو و همکاران، ۲۰۰۸). ب) تغییرشکل مکانیکی: تغییرشکل مکانیکی زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از اجزای زیرین سطح رویه روسازی به هر دلیلی یکپارچگی خود را از دست داده و جابجا شده باشند. شیارشدگی ایجاد شده از این نوع مکانیزم همواره با ترک‌های سطحی بسیار زیادی همراه خواهد بود (محبوب و آلن، ۱۹۹۰؛ سنتنو و همکاران، ۲۰۰۸) و ج) تحکیم: یکی از آزمایش‌هایی که به منظور برآورد مقاومت مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی از آن استفاده می‌شود، آزمایش مارشال است. در تعیین این پارامتر از نتیجه‌ی دو ویژگی استقامت مارشال که معرف بیشترین مقاومتی است که نمونه بدون گسیختگی می‌تواند تحمل کند و روانی مارشال که بیانگر میزان تغییرشکلی که در نمونه در لحظه شکست رخ می‌دهد، استفاده می‌شود (کیم و مور، ۲۰۰۹). نسبت مارشال (نسبت استقامت مارشال به روانی آن) پارامتری تجربی برای تعیین سختی

یکی از افزودنی‌هایی که باعث سختی و توان باربری بیشتر در مخلوط آسفالتی می‌گردد، ساسوبیت است. به غیر از افزودنی‌های ذکر شده، آهک هیدراته از افزودنی‌های معدنی مهمی است که بسیار کاربرد دارد (عربانی و حامدی، ۲۰۱۰). دلایل مختلفی برای استفاده از آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد که از مهمترین این موارد می‌توان به دسترسی مناسب، قیمت ارزان و اختلاط آسان آن با قیر و آسفالت اشاره نمود. استفاده از آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ در آمریکا شروع شده و پس از سال‌ها تحقیق، امروزه به عنوان یکی از مؤثرترین افزودنی‌ها در آسفالت به شمار می‌رود (لسویر و همکاران، ۲۰۱۲). به منظور بررسی تأثیر آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از دو آزمایش کشش غیر مستقیم و شاخص نسبت مارشال استفاده گردید و نتیجه شد که افزودن آهک هیدراته به میزان ۱٪ باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد (ملاحسینی و همکاران، ۲۰۱۲). مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از این دو افزودنی در مخلوط آسفالتی برای تست کشش غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی در شرایط اشباع، سطح اطمینان را تا ۹۰٪ افزایش می‌دهد. دلیل این امر تأثیر متقابل این افزودنی‌ها بر یکدیگر می‌باشد (کاووسی و همکاران، ۲۰۱۴).

### ۳. مواد و روش‌ها

به منظور بررسی حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ماده‌ی افزودنی گوگاس و مخلوط‌های آسفالتی گوگاسی اصلاح شده با افزودنی‌های آهک هیدراته و ساسوبیت و همچنین مقایسه‌ی نتایج آن‌ها با مخلوط‌های آسفالتی شاهد (بدون ماده افزودنی) از مقاومت کششی غیرمستقیم (لاتمن اصلاح شده) در حالت‌های خشک، اشباع شده با آب تحت یک سیکل و

مخلوط‌های آسفالتی است. مقادیر بالاتر این نسبت نشان دهنده سخت‌تر بودن مخلوط بوده و به این معنی است که مخلوط دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییرشکل دائمی است (سگوز و آگار، ۲۰۰۷).

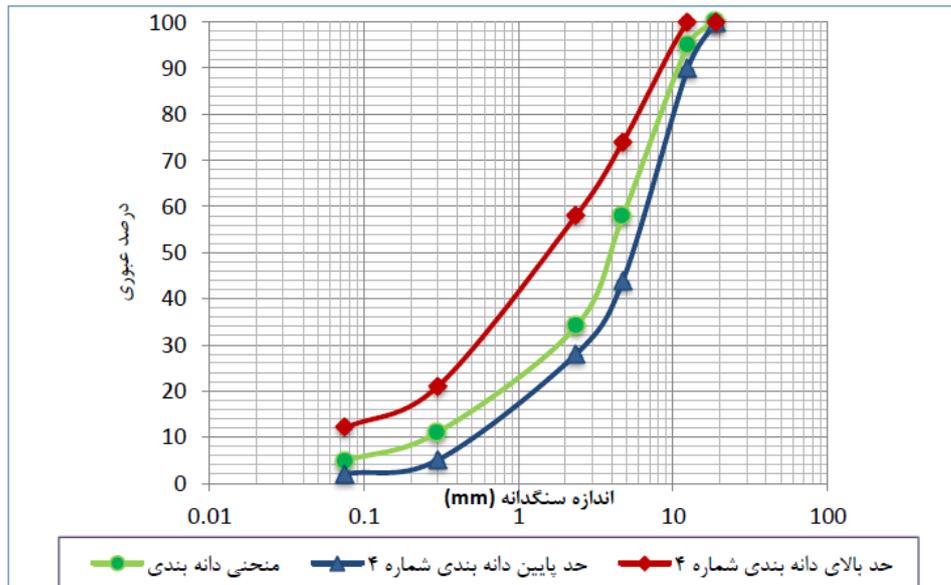
یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی اثر رطوبت و یخبندان بر مخلوط‌های آسفالتی گرم، آزمایش ذوب-انجماد طبق استاندارد ASTM D4867 است که بر اساس آن یک یا چند سیکل ذوب و انجماد برای شبیه‌سازی اثرهای مخرب رطوبت بر نمونه‌های مخلوط آسفالتی گرم اعمال می‌شود (گوه و همکاران، ۲۰۱۱). تا کنون مطالعات مختلفی برای کنترل این پدیده در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است که منجر به استفاده از مواد افزودنی مختلف، از جمله افزودنی‌های معدنی، پلیمری و شیمیایی، شده است. بر خلاف سایر مواد افزودنی که اغلب وارداتی و گران قیمت هستند، گوگرد پلیمری ماده‌ای نسبتاً ارزان و در دسترس است که کیفیت و دوام آسفالت را بهبود می‌بخشد. در مجموع، مخلوط حاوی گوگاس، علاوه بر برتری کیفی نسبت به آسفالت معمولی، با توجه به کاهش مصرف انرژی در قسمت تولید و پخش و کاهش ضخامت روسازی به‌طور میانگین، می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های احداث راه نسبت به آسفالت معمولی شود. همچنین، ساخت آسفالت حاوی گوگاس با تغییرات نسبتاً ساده‌ای در کارخانه‌های معمولی آسفالت امکان‌پذیر بوده و حمل و نقل، پخش و کوبیدن آن با روش‌های متداول انجام می‌شود. بنابراین، برای ساخت و اجرای این نوع آسفالت به فناوری پیچیده‌ای نیاز نیست. تحقیقات اخیر نشان داده که استفاده از گوگاس سبب بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌گردد. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم روی نمونه‌های حاوی گوگاس نشان داده که استفاده از این افزودنی باعث بهبود چسبندگی میان قیر و سنگدانه می‌شود (شفابخش و همکاران، ۲۰۱۵).

آستر و رویه روسازی می‌باشد، استفاده شد. منحنی دانه-بندی مصالح مصرفی در شکل ۱ آورده شده است. **خصوصیات مصالح سنگی مصرفی:** در جدول ۱، نتایج آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص حقیقی و ظاهری و درصد جذب آب مصالح سنگی درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر نشان داده شده است. برای تعیین وزن مخصوص درشت‌دانه‌ها از استاندارد ASTM C127 و وزن مخصوص ریزدانه‌ها از استاندارد ASTM C128 و وزن مخصوص فیلر نیز از استاندارد ASTM C188 استفاده شده است. از آنجا که مصالح به کار رفته در ساخت مخلوط آسفالتی باید مشخصات لازم، طبق آیین‌نامه ۲۳۴ را داشته باشند، آزمایش‌های وزن مخصوص سنگدانه، ارزش ماسه‌ای، شکل دانه‌ها، درصد شکستگی و سلامت روی سنگدانه‌های تهیه شده از معدن کارخانه آسفالت دنیای حفاری، واقع در پاکدشت، انجام شدند. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

سه سیکل ذوب و یخبندان استفاده شده است (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳). لازم به ذکر است که جهت بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های مکانیکی، حساسیت رطوبتی و نیز سیکل‌های ذوب و یخبندان با استفاده از آزمایش مارشال، نمونه‌های آزمایشگاهی به سه شیوه‌ی مختلف تهیه شده‌اند (حالت خشک، حالت اشباع با آب و تحت یک سیکل ذوب و یخ و اشباع با آب و تحت سه سیکل ذوب و یخ).

### ۳-۱. مصالح مصرفی

**دانه‌بندی:** دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از سری الک‌های دانه‌بندی قشرهای رویه شامل مصالح عبور کرده از الک‌های ۱۹ و ۱۲/۵ میلی‌متر و مصالح عبور کرده از الک‌های شماره ۴، ۸، ۵۰ و ۲۰۰ انتخاب شده است. برای تهیه نمونه مخلوط‌های آسفالتی در این تحقیق از دانه بندی پیوسته ی شماره‌ی ۴ نشریه ۲۳۴، که مناسب اجرا در لایه‌های



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۱. وزن مخصوص مصالح سنگی منتخب

شرح	روش آزمایش	مقدار
خصوصیات مصالح درشت دانه		
وزن مخصوص واقعی (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127	۲/۶۴۸
وزن مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127	۲/۶۹۱
درصد جذب آب	ASTM C127	۰/۶
خصوصیات مصالح ریزدانه		
وزن مخصوص واقعی (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128	۲/۶۳۳
وزن مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128	۲/۷۱۷
درصد جذب آب	ASTM C128	۱/۳
خصوصیات فیلر		
وزن مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C188	۲/۷۱۲

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

خصوصیات مصالح درشت‌دانه				
شرح	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین نامه		مصالح سنگی
		حداکثر	حداقل	
سایش به روش لس آنجلس (%)	ASTM C131	۲۵	-	۲۰
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (%)	ASTM C88	۸	-	۸
درصد شکستگی	ASTM D5821	-	۶۰	۱۰۰
درصد سنگدانه‌های پهن و دراز	ASTM D4791	۱۵	-	۹
خصوصیات مصالح ریزدانه				
شرح	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین نامه		مصالح سنگی
		حداکثر	حداقل	
دامنه خمیری PI (%)	ASTM D4318	NP	NP	NP
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (%)	ASTM C88	۱۲	-	۰/۷
ارزش ماسه‌ای (%)	ASTM D2419	-	۵۰	۷۰

آزمایش‌های قیر خالص: قیر مورد استفاده در این تحقیق از نوع قیر با درجه نفوذ<sup>۱</sup> ۶۰-۷۰ می‌باشد که بیشتر در نواحی با آب و هوای گرم و معتدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. قیر مورد استفاده از پالایشگاه اصفهان تهیه شده است. مشخصات این قیر در جدول ۳

1-PG۶۴-۱۶

آمده است.

گوگاس و مشخصات آن: گوگاس نوعی ترکیب سولفور پلیمر است که به رنگ خاکستری و به شکل پوکه یا پلت‌های گرد کوچک و حباب مانند دیده می‌شود. این ماده، وزن مخصوصی بیشتر از قیر دارد و پس از ذوب در دمای ۱۴۰-۱۳۰ درجه سلسیوس بخارها و بوی گوگرد خالص را ندارد و نیز مقاومت بالاتری

آغشته به قیر مصالح سنگی به مرور با افزایش کریستال ها به زبری گراییده و دانه بندی را درخود قفل می کند. مشخصات گوگاس مصرفی در این تحقیق در جدول ۴ آورده شده است. نمونه ای از آسفالت ساخته شده حاوی گوگاس در شکل ۲ نشان داده شده است.

نسبت به گوگرد در مقابل آتش گرفتن از خود نشان می دهد. حرارت قیر مذابی که روی مصالح در میکسر کارخانه آسفالت اسپری می شود برای ذوب نمودن آن کافی است. این ماده، پس از اختلاط با آسفالت، با نفوذ به ساختار قیر، ضمن انحلال در ساختار قیر، استحکام فزاینده ای به ساختار قیر می بخشد. همچنین، سطوح

جدول ۳. نتایج آزمایش های قیر خالص ۶۰-۷۰ پالایشگاه اصفهان

شماره	نوع آزمایش	روش آزمایش	محدوده ی آیین نامه		نتیجه ی آزمایش
			حداقل	حداکثر	
۱	درجه نفوذ (۰/۱ میلی متر)	ASTM D5	۶۰	۷۰	۶۴
۲	نقطه نرمی قیر (درجه سلسیوس)	ASTM D36	۴۹	۵۶	۵۰/۵
۳	قابلیت کشسانی در ۲۵ درجه سلسیوس (سانتی متر)	ASTM D113	۱۰۰	-	۱۰۰
۴	وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتی متر مکعب)	ASTM D3289	۱/۰۱۳	۱/۰۱۷	۱/۰۱۸
۵	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس	ASTM D2170	۲۰۰	۱۰۰۰	۱۲۷
۶	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس	ASTM D2170	۲۰۰	۱۰۰۰	۵۷۶
۷	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس	ASTM D2170	۲۰۰	۱۰۰۰	۳۲۶
۸	اندیس نفوذ، PI	-	-	-	-۰/۴۸
۹	عدد ویسکوزیته - درجه نفوذ	-	-	-	-۱
۱۰	خصوصیات پس از شرایط آزمایش لعاب نازک (۱۶۳ درجه سلسیوس و به مدت ۵ ساعت)	ASTM D1754	-	-	-
۱-۱۰	تغییر جرم - درصد	-	-	-	۰/۰۳
۲-۱۰	درجه نفوذ پس از آزمایش لعاب نازک قیر	-	۳۱	-	۴۴
۳-۱۰	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه	-	۵۴	-	۶۸/۷۵
۴-۱۰	قابلیت کشسانی پس از آزمایش لعاب نازک قیر	-	۵۰	-	۱۰۰

جدول ۴. مشخصات گوگاس مصرفی

عنوان آزمون	نتیجه آزمون
pH	۷/۶
شکل فیزیکی	گرانول
رنگ	خاکستری
بو	بوی مخصوص دارد
حلالیت در آب	غیر قابل حل در آب
وزن مخصوص نسبت به آب	حداقل ۱/۸۹ (g/cm <sup>3</sup> )
گرانروی	بعد از ذوب در دمای مختلف گرانروی ها تفاوت پیدا می کند
نقطه ذوب	حداقل در دمای ۹۰ درجه سلسیوس



شکل ۲. نمونه‌ای از آسفالت ساخته شده حاوی گوگاس

### ۲-۳. روش آزمایش

#### آزمایش کششی غیرمستقیم: آزمایش AASHTO

T283 با عنوان مخلوط‌های قیری متراکم در برابر خرابی رطوبتی یکی از معمول‌ترین فرایندهای آزمایشی برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. این آزمایش روی نمونه‌های متراکم شده با درصد هوای  $7 \pm 1$  انجام می‌شود. حداقل تعداد نمونه برای هر مخلوط ۶ عدد می‌باشد. نیمی از نمونه‌ها تحت شرایط استاندارد عمل‌آوری می‌شوند. ابتدا، نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد تحت شرایط خلأ قرار می‌گیرند. نمونه‌های خلأ و اشباع شده، به مدت ۱۶ ساعت در داخل فریزر با دمای  $-18$  درجه سلسیوس و سپس به مدت ۲۴ ساعت در داخل آب با دمای  $60$  درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. در نهایت، نمونه‌های تحت شرایط قرار گرفته و نیمی دیگر از نمونه‌ها به دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس رسانده می‌شوند. همه نمونه‌ها به دمای یکسان آزمایشگاه آورده شده و آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم روی نمونه‌ها انجام می‌شود. بار با سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس روی هر یک وارد می‌شود (مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۲). مقدار مقاومت

کششی غیرمستقیم<sup>۱</sup> (بر حسب کیلوپاسکال) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1)$$

که در آن  $p$  حداکثر بار عمودی وارده بر حسب نیوتن،  $D$  قطر نمونه بر حسب میلی‌متر و  $t$  ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت<sup>۲</sup> را با  $TSR$  و بر حسب درصد نشان می‌دهند که بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود. مقدار  $ITS$  در رابطه ۲ مقدار میانگین برای نمونه‌های تحت شرایط اشباع و خشک است. حداقل مقدار  $TSR$  باید  $70\%$  باشد و هر چه مقدار  $TSR$  بیشتر باشد نشان دهنده مقاومت بالاتر در برابر رطوبت است.

$$TSR = \frac{ITS_s}{ITS_d} \times 100 \quad (2)$$

که  $ITS_s$  و  $ITS_d$  به ترتیب مقاومت کششی غیرمستقیم تحت شرایط اشباع و خشک است.

**شاخص نسبت مارشال:** شاخص نسبت مارشال، نسبت استقامت مارشال به روانی آن است. جهت بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از

1- Indirect Tensile Strength  
2- Tensile Strength Ratio

در جدول ۵، نتایج مربوط به آزمایش لاتمن اصلاح شده جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر سیکل‌های مختلف ذوب و یخبندان در مخلوط‌های فوق‌الذکر ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمایش مارشال و بعد از رسیدن به درصد قیر بهینه، نمونه‌هایی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح شده تهیه گردید. با تقسیم مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک، نسبت TSR به دست می‌آید که شاخصی مؤثر برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. با توجه به نشریه‌ی ۲۳۴ ایران، این نسبت نباید کمتر از ۷۰٪ باشد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که افزودن گوگاس به مخلوط‌های آسفالتی سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در دو حالت خشک و مرطوب می‌شود. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، افزودن گوگاس به میزان ۳۰ و ۴۰ درصد به مخلوط آسفالتی گرم به ترتیب سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم خشک به اندازه‌ی ۱۶ و ۱۱ درصد می‌گردد. اما با افزودن مقادیر بیشتر گوگاس (گوگاس ۵۰٪) به مخلوط آسفالتی، مقاومت کششی غیرمستقیم خشک به اندازه‌ی ۱۰٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد. در حالت اشباع نیز مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس ۵۰٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش بیشتری داشته است. پارامتر TSR مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس نسبت به نمونه شاهد دچار کاهش شده‌اند. این عامل بیانگر مقاومت کم مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس در حضور رطوبت است. به منظور افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس در برابر رطوبت از افزودنی‌های ساسوبیت و آهک هیدراته استفاده شد. با افزودن ساسوبیت به مخلوط آسفالتی حاوی گوگاس، مقاومت کششی غیرمستقیم در دو حالت خشک و اشباع نسبت به مخلوط آسفالتی بدون ماده افزودنی (شاهد) و

آزمایش مارشال، دو سری نمونه تهیه شدند. نمونه‌های سری اول مربوط به حالت خشک بودند. یعنی هیچ‌گونه عملیات اشباع‌سازی و عمل‌آوری روی آن‌ها صورت نگرفت. این نمونه‌ها پس از تراکم با چکش مارشال و خنک شدن در دمای محیط، به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس مقاومت و روانی آنها توسط دستگاه مارشال اندازه گرفته شد. نمونه‌های سری دوم مربوط به حالت مرطوب آزمایش بودند. پس از تراکم با چکش مارشال و خنک شدن در دمای محیط، به مدت ۴۸ ساعت در آب با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط قرار داده شدند. بعد از آن نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و در نهایت با دستگاه آزمایش شدند (سنگول و همکاران، ۲۰۱۲).

#### ۴. نتایج

##### ۴-۱. آزمایش کششی غیرمستقیم

پس از تهیه‌ی مصالح سنگی و قیر، آزمایش‌های لازم روی سنگدانه‌ها و قیر انجام شد. با مقایسه نتایج آزمایش‌ها و محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه، تمامی مشخصات در محدوده‌ی استاندارد قرار گرفت. طرح اختلاط مصالح سنگی مورد استفاده به روش مارشال انجام شد و میزان قیر بهینه محاسبه گردید. از مهم‌ترین آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان به آزمایش‌های مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم به منظور تعیین پارامترهای نسبت مارشال و نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم اشاره کرد. این پارامترها در حالت خشک و اشباع تحت یک و سه سیکل ذوب و یخبندان در مخلوط آسفالتی و تأثیر مواد افزودنی آهک هیدراته، ساسوبیت و گوگاس بر آنها، مورد ارزیابی قرار گرفتند.

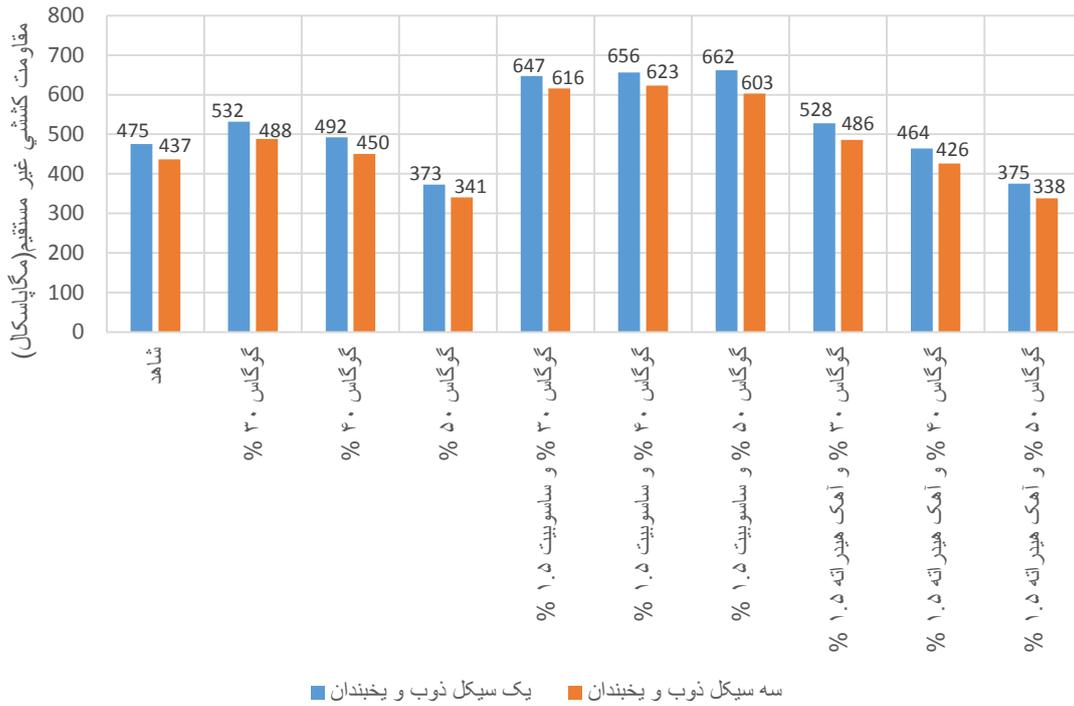
مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم آن در دو حالت خشک و اشباع می‌شود. اما افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به نمونه‌های شاهد ندارد. شکل ۳ مقادیر مقاومت کششی غیر مستقیم تحت یک و سه سیکل ذوب و یخبندان را نشان می‌دهد. همچنین، در شکل ۴، مقایسه مقادیر TSR نمونه‌های مورد آزمایش آورده شده است.

مخلوط آسفالتی حاوی گوگاس افزایش پیدا کرد. در حالت یک و سه سیکل یخبندان، پارامتر TSR مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰٪ گوگاس و ۱/۵٪ ساسوبیت، ۴۰٪ گوگاس و ۱/۵٪ ساسوبیت، به نمونه شاهد افزایش یافت. نتایج به‌دست آمده از آزمایش لاتمن اصلاح شده نشان داد که افزودن آهک هیدراته به

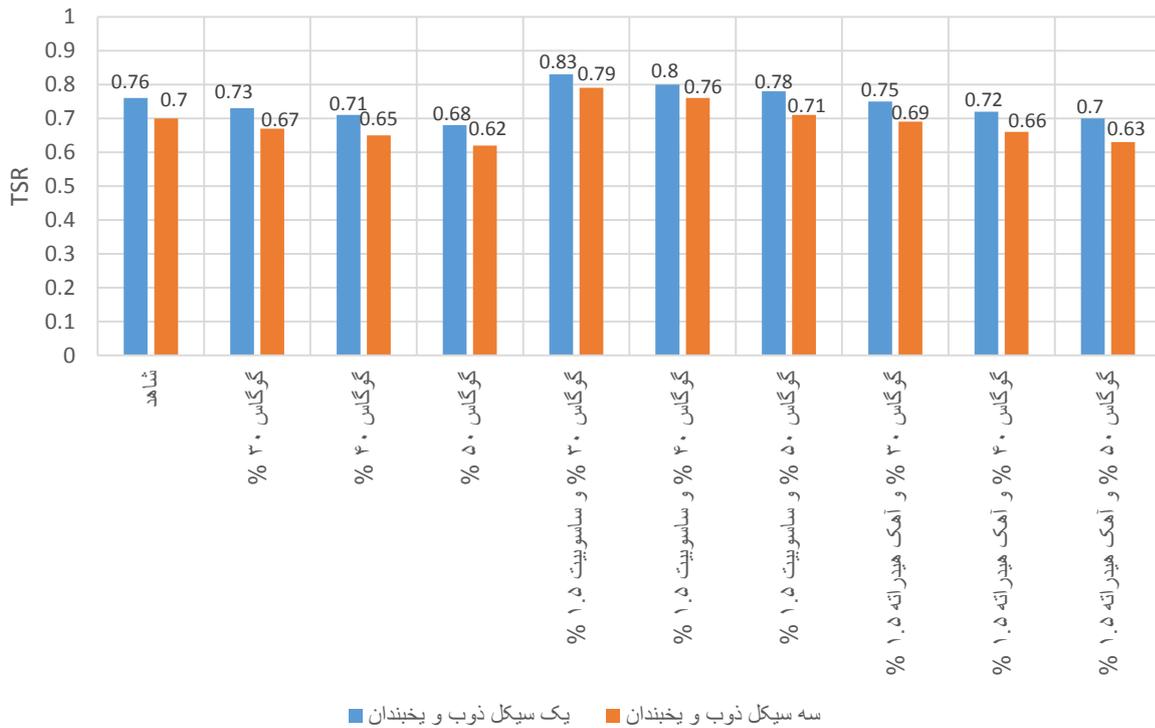
جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان

حساسیت رطوبتی (سه سیکل ذوب و یخبندان)		حساسیت رطوبتی (یک سیکل ذوب و یخبندان)		مقاومت کششی غیرمستقیم (حالت خشک)	درصد قیر	نوع نمونه (میانگین سه نمونه)
نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (حالت اشباع)	مقاومت کششی غیرمستقیم (حالت اشباع)	نسبت TSR	مقاومت کششی غیرمستقیم (حالت اشباع)			
۰/۷۰	۴۳۷	۰/۷۶	۴۷۵	۶۲۴	۴/۵	شاهد
۰/۶۷	۴۸۸	۰/۷۳	۵۳۲	۷۲۸	۴/۸۸	گوگاس ۳۰٪
۰/۶۵	۴۵۰	۰/۷۱	۴۹۲	۶۹۲	۵/۱۱	گوگاس ۴۰٪
۰/۶۲	۳۴۱	۰/۶۸	۳۷۳	۵۵۸	۵/۳۵	گوگاس ۵۰٪
۰/۷۹	۶۱۶	۰/۸۳	۶۴۷	۷۸۰	۴/۸۸	گوگاس ۳۰٪ و ساسوبیت ۱/۵٪
۰/۷۶	۶۲۳	۰/۸۰	۶۵۶	۸۲۰	۵/۱۱	گوگاس ۴۰٪ و ساسوبیت ۱/۵٪
۰/۷۱	۶۰۳	۰/۷۸	۶۶۲	۸۵۰	۵/۳۵	گوگاس ۵۰٪ و ساسوبیت ۱/۵٪
۰/۶۹	۴۸۶	۰/۷۵	۵۲۸	۷۰۴	۴/۸۸	گوگاس ۳۰٪ و آهک هیدراته ۱/۵٪
۰/۶۶	۴۲۶	۰/۷۲	۴۶۴	۶۴۵	۵/۱۱	گوگاس ۴۰٪ و آهک هیدراته ۱/۵٪
۰/۶۳	۳۳۸	۰/۷۰	۳۷۵	۵۳۶	۵/۳۵	گوگاس ۵۰٪ و آهک هیدراته ۱/۵٪

میر، امینیان و آقایان



شکل ۳. مقادیر مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های حاوی افزودنی‌های مختلف پس از یک و سه سیکل ذوب و یخبندان



شکل ۴. پارامتر TSR نمونه‌های حاوی افزودنی‌های مختلف پس از یک و سه سیکل ذوب و یخبندان

#### ۴-۲. نتایج آزمایش مارشال

نتایج آزمایش مارشال جهت ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی مختلف (حاوی ماده افزودنی گوگاس، آهک هیدراته و ساسوبیت) در برابر تغییر شکل‌های مکانیکی، حساسیت رطوبتی و نیز سیکل‌های ذوب و یخبندان در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش مارشال روی نمونه‌های تهیه شده در سه حالت خشک، تحت یک و سه سیکل ذوب و یخبندان، نشان می‌دهد که با اعمال شرایط ذوب و یخبندان، مقاومت مارشال به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. جهت ارزیابی میزان کاهش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در شرایط اعمال رطوبت و سیکل‌های ذوب و یخبندان در آزمایش مارشال، از پارامتر باقیمانده مارشال<sup>۱</sup> (MSR) استفاده شد که از تقسیم استحکام مارشال نمونه‌ها در حالت اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان به استحکام مارشال نمونه‌ها در حالت خشک به دست می‌آید. همانطور که از جدول ۶ مشاهده می‌شود، افزودن گوگاس به مخلوط آسفالتی گرم تأثیر قابل توجهی در افزایش نسبت مقاومت باقیمانده ندارد. این موضوع حاکی از ضعف مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس در شرایط وجود رطوبت و اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان است. لذا، به منظور افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس و نیز نمونه‌های شاهد در برابر اعمال رطوبت و چرخه‌های ذوب و یخبندان از افزودنی‌های ساسوبیت و آهک هیدراته استفاده شد. مقاومت مارشال و تغییرات آن با افزودنی‌های مختلف تحت یک و سه سیکل ذوب و یخبندان در شکل ۵ ارائه شده است.

نتایج به دست آمده از آزمایش مارشال نشان می‌دهد که افزودن ساسوبیت به مخلوط‌های آسفالتی سبب افزایش مقاومت باقیمانده‌ی آن در شرایط اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌شود. همانطور که از جدول ۶

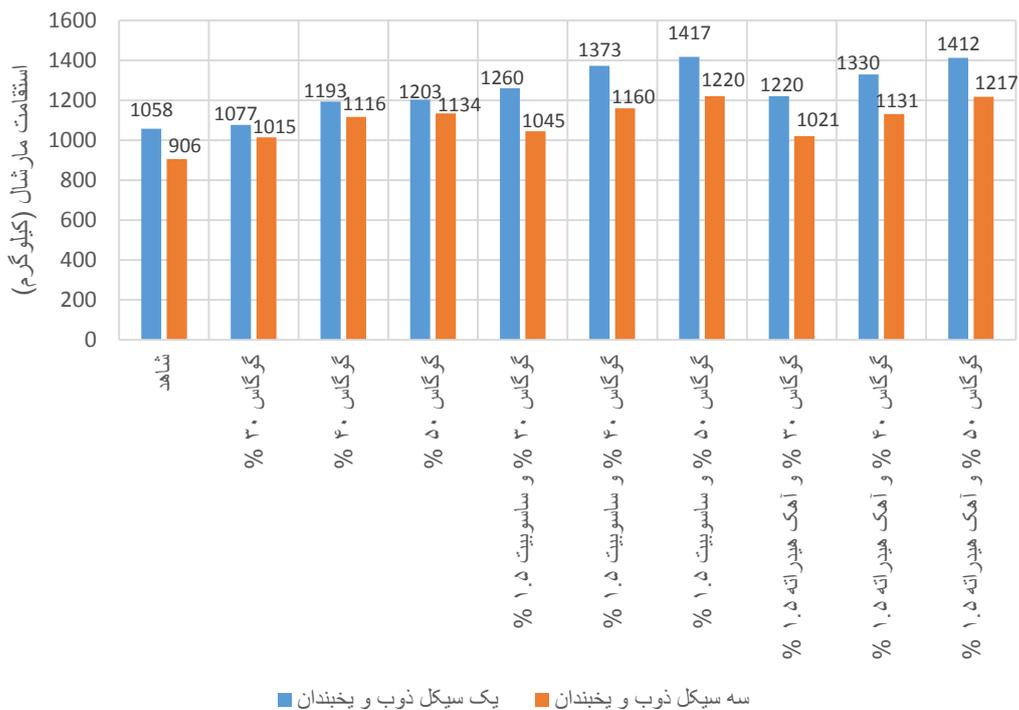
و شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزودن ۱/۵ درصد ساسوبیت به مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد گوگاس و تحت اعمال رطوبت و یک سیکل چرخه‌های ذوب و یخبندان، مقاومت باقیمانده مارشال نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد به ترتیب ۱۵، ۱۶ و ۱۵ درصد افزایش دارد. تحت اعمال سه سیکل چرخه‌ی ذوب و یخبندان به مخلوط‌های آسفالتی اشاره شده در بالا، پارامتر مقاومت باقیمانده به ترتیب ۱۰، ۱۳ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. افزودن آهک هیدراته به مخلوط آسفالتی شاهد باعث بهبود پارامتر مقاومت باقیمانده شد. همانطور که از جدول ۶ و شکل ۶ مشخص است، با افزودن ۱/۵ درصد آهک هیدراته به مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد گوگاس و در شرایط اعمال رطوبت و یک سیکل چرخه ذوب و یخبندان، مقاومت باقیمانده مارشال نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد به طور متوسط ۱۳٪ افزایش داشت. در شرایط اعمال سه سیکل چرخه‌ی ذوب و یخبندان در مخلوط‌های آسفالتی اشاره شده در بالا، به طور متوسط پارامتر مقاومت باقیمانده ۱۱٪ افزایش یافت.

#### 1- Marshal Stability Ratio

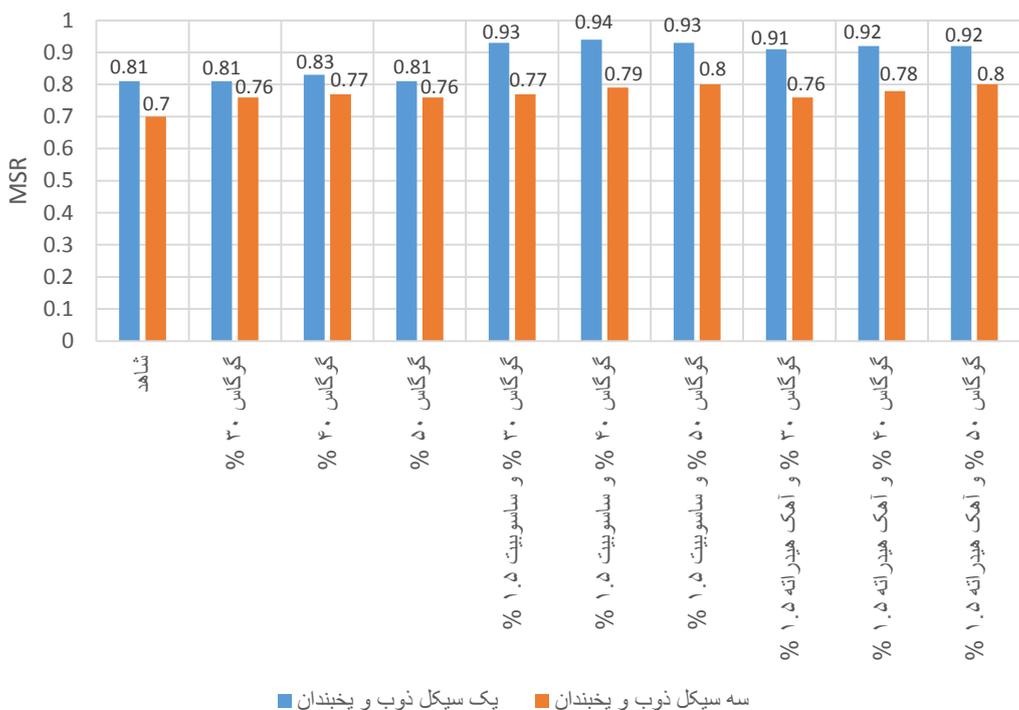
جدول ۶. نتایج آزمایش مارشال نمونه‌های آسفالتی جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان

نوع نمونه	حالت خشک			یک سیکل ذوب و یخبندان			سه سیکل ذوب و یخبندان		
	استقامت (kg)	روانی (mm)	نسبت مارشال (Ton/cm)	استقامت (kg)	روانی (mm)	نسبت مارشال (Ton/cm)	استقامت (kg)	روانی (mm)	نسبت مارشال (Ton/cm)
شاهد	۱۲۹۵	۲/۹	۴/۴۴	۱۰۵۸	۲/۵	۴/۲۴	۹۰۶	۲/۶۳	۳/۴۴
گوگاس ۳۰٪	۱۳۳۰	۱/۹۶	۶/۷۶	۱۰۷۷	۱/۵۶	۷/۰۳	۱۰۱۵	۱/۸۶	۵/۶۴
گوگاس ۴۰٪	۱۴۴۰	۱/۸۶	۷/۷۸	۱۱۹۳	۱/۵	۷/۹۸	۱۱۱۶	۱/۸	۶/۲۰
گوگاس ۵۰٪	۱۴۹۷	۱/۸	۸/۳۲	۱۲۰۳	۱/۳۶	۸/۷۹	۱۱۳۴	۱/۷	۶/۶۷
گوگاس ۳۰٪ و ساسوبیت ۱۰٪	۱۳۴۶	۳/۱	۴/۴۰	۱۲۶۰	۲/۸	۴/۵۰	۱۰۴۵	۲/۹۶	۴/۲۵
گوگاس ۴۰٪ و ساسوبیت ۱۰٪	۱۴۵۷	۳/۱	۴/۷۰	۱۳۶۳	۲/۶	۵/۲۸	۱۱۶۰	۲/۹	۴/۴۰
گوگاس ۵۰٪ و ساسوبیت ۱۰٪	۱۵۱۵	۳/۰	۵/۰۵	۱۴۱۷	۲/۵	۵/۶۷	۱۲۲۰	۲/۸۷	۴/۹۴
گوگاس ۳۰٪ و آهک هیدراته ۱۰٪	۱۳۳۸	۱/۹	۷/۰۴	۱۲۲۰	۱/۵۳	۷/۹۸	۱۰۲۱	۱/۷۶	۷/۰۳
گوگاس ۴۰٪ و آهک هیدراته ۱۰٪	۱۴۴۵	۱/۸	۷/۹۰	۱۳۳۰	۱/۴	۹/۵	۱۱۳۱	۱/۸	۷/۸۰
گوگاس ۵۰٪ و آهک هیدراته ۱۰٪	۱۵۲۲	۱/۸	۸/۴۵	۱۴۱۲	۱/۲۶	۱۱/۲۰	۱۲۱۷	۱/۵	۸/۵۰

تعیین پتانسیل مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی افزودنی پلیمری و معدنی در برابر خرابی‌های رطوبتی



شکل ۵. مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی افزودنی‌های مختلف پس از یک و سه سیکل ذوب و یخبندان



شکل ۶. پارامتر MSR نمونه‌های حاوی افزودنی‌های مختلف پس از یک و سه سیکل ذوب و یخبندان

## ۵. نتیجه‌گیری

حالت یک و سه سیکل ذوب و یخبندان، پارامتر TSR مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰٪ گوگاس و ۱/۵٪ ساسوبیت، ۴۰٪ گوگاس و ۱/۵٪ ساسوبیت و ۵۰٪ گوگاس و ۱/۵٪ ساسوبیت نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. این در حالی است که افزودن آهک هیدراته به مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم آن در دو حالت خشک و اشباع می‌شود اما افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به نمونه‌های شاهد ندارد.

۴- افزودن گوگاس به مخلوط آسفالتی گرم تأثیر قابل توجهی در افزایش نسبت مقاومت باقیمانده ندارد. این موضوع حاکی از ضعف مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس در شرایط وجود رطوبت و اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان است. با افزودن ۱/۵ درصد ساسوبیت به مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد گوگاس و تحت یک و سه سیکل چرخه‌های ذوب و یخبندان، پارامتر MSR نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد افزایش می‌یابد.

۵- آزمایش‌های نسبت کشش غیرمستقیم و مقاومت باقیمانده مارشال در دو حالت اعمال یک و سه سیکل ذوب و یخبندان حاکی از آن بود که از میان افزودنی‌های ذکر شده، مخلوط آسفالتی حاوی ۳۰٪ گوگاس و ۱/۵ درصد ساسوبیت بهترین نتایج را در بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تأثیر مخرب چرخه‌های ذوب و یخ ارائه نموده است.

۱- نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت مارشال نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی شاهد (بدون افزودنی) و مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس در حضور رطوبت دارای ضعف می‌باشند. برای رفع این مشکل می‌توان از افزودنی‌های آهک هیدراته و ساسوبیت استفاده کرد.

۲- افزودن گوگاس به میزان ۳۰ و ۴۰ درصد به مخلوط آسفالتی گرم به ترتیب سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم خشک به اندازه‌ی ۱۶ و ۱۱ درصد می‌گردد. اما با افزودن مقادیر بیشتر گوگاس (گوگاس ۵۰٪) به مخلوط آسفالتی، مقاومت کششی غیرمستقیم خشک به اندازه‌ی ۱۰٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد. در حالت اشباع نیز مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس ۵۰٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش بیشتری داشته است. پارامتر TSR مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس نسبت به نمونه شاهد دچار کاهش شده‌اند. این عامل بیانگر مقاومت کم مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس در حضور رطوبت است.

۳- به منظور افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس در برابر رطوبت از افزودنی‌های ساسوبیت و آهک هیدراته استفاده شد. با افزودن ساسوبیت به مخلوط آسفالتی حاوی گوگاس، مقاومت کششی غیرمستقیم در دو حالت خشک و اشباع نسبت به مخلوط آسفالتی بدون ماده افزودنی (شاهد) و مخلوط آسفالتی حاوی گوگاس افزایش پیدا کرد. در

## ۶. مراجع

- Arabani, M. and Hamed, G. 2010. "Using the surface free energy method to evaluate the effects of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt". *J. Mater. Civil Eng.*, 23(6): 802-811.
- Centeno, M., Sandoval, I., Cremades, I. and Alarcon, J. 2008. "Assessing rutting susceptibility of five different modified asphalts in bituminous mixture using rheology and wheel tracking test". Transportation Research Board, National Research Council, NCHRP Report 468, Washington, D.C., USA.
- Epps, J. A., Sebaaly, J. P., Maher, M. R. and McCann, M. B. 2000. "Compatibility of a test for moisture-induced damage with superpave volumetric mix design". Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Ghaffarpour Jahromi, S. 2008. "Estimation of resistance to moisture destruction in asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.*, 23: 2324-2331.
- Goh, S. W., Akin, M., You, Z. and Shi, X. 2011. "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro-or nano-modified asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.* 25: 195-200.
- Kakar, M. R., Hamzah, M. O. and Valentin, J. 2015. "A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations". *J. Clean. Prod.*, 99: 39-58.
- Kavussi, A., Qorbani, M., Khodaii, A. and Haghshenas, H. F. 2014. "Moisture susceptibility of warm mix asphalt: A statistical analysis of the laboratory testing results". *Constr. Build. Mater.*, 52: 511-517.
- Kim, J. and Moore, J. 2009. "Laboratory evaluation of zycosoil as an anti-stripping agent on superpave mixtures Phase I". National Center for Asphalt Technology (NCAT) and Zydex Industries, India.
- Lesueur, D., Petit, J. and Hans, J. R. 2012. "Increasing the Durability of Asphalt Mixture by Hydrated Lime Addition: What Evidence?". *Eurasphalt & Eurobitume Congress, A5EE-255*, Istanbul, Turkey.
- Mahboub, K. and Allen, D. L. 1990. "Characterization of rutting potential of large stone asphalt mixes in Kentucky". Transportation Research Record 1259, National Research Council, Washington, D.C., USA.
- Mehrara, A. and Khoadii, A. 2013. "A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 38: 423-442.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A. R., Hamed, Gh. H. and Azarhoosh, M. J. 2012. "Influence of using nonomaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 31: 384-388.
- Mollahosseini, H. S., Hayati, P. and Kavussi, A. 2012. "Evaluation of hydrated lime effect on asphalt mixture durability against moisture: A case study in Iran". *Eurasphalt & Eurobitume Congress, A5EE-437*, Istanbul, Turkey.
- Ozen, H. 2011. "Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixture for laboratory and field compacted samples". *Constr. Build. Mater.*, 25: 756-765.
- Segoz, B. and Agar, E. 2007. "Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot mix asphalt". *J. Build. Environ.*, 1: 3621-3628.
- Sengul, C. E., Aksoy, S., Iskender, E. and Ozen, H. 2012. "Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance". *Constr. Build. Mater.* 30:139-148.
- Shafabakhsh, G. H., Faramarzi, M. and Sadeghnejad, M. 2015. "Use of surface free energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with antistripping agents". *Constr. Build. Mater.*, 98: 456-464.
- Xu, T. and Huang, X. 2012. "Investigation into causes of in-place rutting in asphalt pavement", *Constr. Build. Mater.* 28: 525-530.