

بررسی آزمایشگاهی تاثیر ماده جاذب آلاینده بی کربنات سدیم بر خواص زیست محیطی و مکانیکی آسفالت داغ حاوی گوگرد فرآوری شده

مقاله علمی - پژوهشی

سعید احمدی*، استادیار، دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران
بهروز باباخانی، مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران، ایران
علی اکبر مشیری امین، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه غیرانتفاعی صدرا، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s.ahmadi@ihu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

صفحه ۱۲۲-۱۰۹

چکیده

امروزه استفاده از مواد ارزان قیمت و دورریختنی در راهسازی در جهت بهبود خواص آسفالت مدنظر محققان قرار گرفته است. گوگرد از جمله مواد ارزان و پایداری است که در صنایع مختلف جهان به خصوص در ساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از این پژوهش بررسی خصوصیات مکانیکی - زیست محیطی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد و آسفالت گوگردی حاوی ماده جاذب آلاینده بی کربنات سدیم (از بین برنده بوی نسبتاً نامطبوع گوگرد) می‌باشد. در این راستا آزمایش‌های مکانیکی-مقاومتی مخلوط آسفالتی شامل مدول برجهندگی، شیارشدگی، مقاومت مارشال، حساسیت رطوبتی و خستگی به روش کشش غیر مستقیم و همچنین آزمایش‌های زیست محیطی بررسی گازهای آلاینده (CO , SO_2 , H_2S , NO_2) بر روی مخلوط‌های آسفالتی شاهد، گوگردی و گوگردی دارای افزودنی جاذب آلاینده بی کربنات سدیم صورت گرفت. نتایج حاکی از آن است که آزمایش‌های عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد در مقایسه با نمونه شاهد افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته؛ به طوری که عمق شیار شدگی آسفالت گوگردی نسبت به نمونه شاهد ۴۲٪ کاهش یافته، مدول برجهندگی آسفالت گوگردی ۶٪ افزایش یافته، عمر خستگی آسفالت گوگردی ۳٫۶ برابر آسفالت شاهد شده و نهایتاً نسبت کشش غیر مستقیم بعد از سیکل ذوب و یخ به کشش غیرمستقیم در حالت خشک مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد ۲۰٪ بیشتر از آسفالت شاهد می‌باشد. همچنین به لحاظ زیست محیطی آسفالت گوگردی (بدون جاذب آلاینده) در رده استاندارد هوای پاک قرار گرفته و می‌توان از این نوع آسفالت در پروژه‌های راهسازی استفاده نمود؛ حال آنکه اثر بی کربنات سدیم بر خواص زیست محیطی و اکثر پارامترهای مکانیکی آسفالت حاوی گوگرد فرآوری شده مثبت بوده ولی باعث کاهش مقاومت در برابر سیکل ذوب و یخ می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آسفالت گوگردی فرآوری شده، جاذب آلاینده، خواص مکانیکی، خواص زیست محیطی

۱-مقدمه

عملکرد آن در بیشتر روسازی‌های انعطاف پذیر رضایت بخش بوده؛ اما قیرهای متعارف، همیشه قادر به حفظ معیارهای عملکردی شیارشدگی، تغییر شکل و ترک خوردگی به دلیل افزایش بارهای ترافیکی سنگین و شرایط نامساعد اقلیمی نیستند (Fini et al., 2012). قیرهای خالص با چسبندگی ضعیف، سبب ترک خوردگی در دمای پایین و تغییر شکل

بطورکلی روسازی‌های آسفالتی به طور گسترده‌ای در بزرگراه‌ها، راه‌های اصلی و خیابان‌ها در اکثر کشورهای دنیا استفاده می‌شود. با این حال، ذخایر نفت در حال حاضر برای استفاده در دهه‌های آینده کافی نمی‌باشند؛ که این عامل باعث افزایش قیمت قیر و در نتیجه افزایش قیمت روسازی آسفالتی نیز شده است. علاوه بر این، قیر معمولی یک چسباننده ویسکوالاستیک است که

افزایش برای ۲۰٪ گوگرد نسبتا کم و برای ۵۰٪ گوگرد قابل ملاحظه است. بنابراین قابلیت پخش بار در روسازی حاوی گوگرد به طول قابل توجهی بالاتر از مخلوط‌های سنتی می‌باشد (The Sulphur Institute, 2003).

شرط اول حفاظت از محیط زیست و جلوگیری از آلودگی‌ها و تخریب‌های ناشی از فعالیت انسان‌ها داشتن تعریف مشخص و شفاف از آلودگی و تخریب است. باید زبان مشترکی برای بیان خسارات وارده به محیط داشت. بدیهی است که بسیاری از فعالیت‌های عمرانی و توسعه‌ای، به طور اجتناب ناپذیری با آلودگی و تخریب محیط زیست همراه است و در عمده موارد نمی‌توان این آثار منفی را حذف کرد اما می‌توان آن را به حداقل رساند. در حال حاضر ایجاد بزرگراه، ساخت سد یا استخراج معدن، بدون تخریب طبیعت ممکن نبوده و بهره‌برداری از کارخانه سیمان، نیروگاه و یا خودرو بدون انتشار آلودگی امکان پذیر نشده است. بدست آوردن آسفالت ارزان، سازگار با محیط زیست و با مقاومت بالا سال‌هاست که مورد نظر محققان است؛ آسفالت گوگردی از آسفالت‌هایی بوده که تحقیقات در مورد شرایط زیست محیطی آنها بسیار مدنظر می‌باشد. در پژوهشی در عربستان خصوصیات مکانیکی و زیست محیطی آسفالت گوگردی به صورت همزمان بررسی شد. در این مطالعه خطرات گازهای حاصل از گوگرد در آسفالت مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگر شرایط کنترل شده باشد گاز هیدروژن سولفید تولید شده در هنگام ساخت مخلوط پخش نشده و زیر حد مجاز باقی می‌ماند. همچنین میزان سولفور دی اکسید در دمای اختلاط مخلوط آسفالتی (۱۴۵ درجه) بالا بوده که با احتیاط کردن، کم می‌شود. در نهایت مشخص شد که با توجه به تولید گازهای مضر کمتر از ۱ ppm، تا دمای سرویس دهی روسازی ۷۶ درجه سانتیگراد می‌توان به مناسب بودن استفاده از آسفالت گوگردی پی برد (Baig and Wahhab, 2013).

با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که وجود گوگرد در آسفالت، برخی خصوصیات مقاومتی مخلوط آسفالتی را بهبود بخشیده ولی نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که این نوع آسفالت به لحاظ زیست محیطی (آلاینده‌گی) دارای مشکلاتی می‌باشد که رفع مشکل زیست محیطی با استفاده از افزودنی جاذب آلاینده می‌تواند این مشکل را رفع نماید. فرضیه اصلی پژوهش حاضر این است که افزودن ماده جاذب آلاینده باعث بهبود خواص مکانیکی و زیست محیطی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد خواهد شد. در نهایت می‌توان گفت که هدف اصلی این پژوهش بررسی خصوصیات مکانیکی - مقاومتی و خصوصیات زیست محیطی آسفالت گوگردی و آسفالت حاوی مواد افزودنی جاذب آلاینده (بی کربنات سدیم) می‌باشد.

پلاستیک شده و در نتیجه استحکام ساختار روسازی را تضعیف می‌کنند. برای حل این مشکل، چسباننده قیری باید با برخی از مواد افزودنی که خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی را تقویت می‌کند، اصلاح شود. قیر اصلاح شده ضمن انعطاف پذیری بهتر و عمر مفید بیشتر، معمولا دارای دمای شکست کمتر و دمای نرم شدن بالاتر است (Notani et al., 2018). یکی از مواد افزودنی که بر روی خواص قیر تاثیر زیادی داشته گوگرد می‌باشد. در مطالعه‌ای قیر با درصدهای مختلف گوگرد (۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ وزنی قیر) اصلاح گردید؛ خصوصیات فیزیکی از جمله نقطه نرمی، گرانروی، درجه نفوذ و شکل پذیری قیرهای اصلاح شده گوگردی مورد بررسی قرار گرفت. توصیف خصوصیات رئولوژیکی قیر در آسفالت اصلاح شده نیز برای پیش بینی خسارات عمده روسازی مانند ناهمواری و ترک خوردگی بررسی شد. مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک قیر در آسفالت گوگردی اصلاح شده با استفاده از آنالیز مکانیکی و تست ویسکومتر چرخشی بروکفیلد انجام شد؛ نتایج نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگرد نسبت به آسفالت شاهد، مقاومت بالاتری در برابر ترک خوردگی روسازی در دمای پایین و حداقل تغییر شکل دائمی در دمای بالا دارند (Elkholly et al., 2018). عنصر گوگرد و سایر قیرهای پایه گوگردی یک جایگزین کم هزینه و بالقوه مناسب برای جایگزینی بخشی و یا کلی از قیر در روسازی است. سابقه تاریخی افزودنی در آسفالت نشان دهنده این است که می‌توان از عنصر گوگرد به عنوان جایگزینی ۳۰ تا ۴۰٪ وزنی قیر با عملکرد مشابه یا بهتر در روسازی استفاده کرد (Sakib et al., 2019) به طور خلاصه، مقرون به صرفه بودن، موفقیت اثبات شده گوگرد در گذشته و تحولات جالب توجه اخیر در فناوری‌های نوین سبب شده امکان استفاده از آسفالت حاوی گوگرد به عنوان یک ماده با ساختاری جایگزین قیر را توجیه نماید که ممکن است در مقایسه با آسفالت شاهد دوام مشابه یا بهتری داشته باشد (Faramarzi et al., 2017). در تحقیقی، کاوسی و همکاران استفاده از خرده لاستیک مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گوگرد را مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج حاکی از آن است که خرده لاستیک می‌تواند حساسیت رطوبتی آسفالت گوگردی را بهبود بخشد (Kavussi et al., 2019). در تحقیق دیگر پرویز و همکاران کارایی این دو ماده (گوگرد و خرده لاستیک) را در بهبود مقاومت شیارشدگی آسفالت مورد تایید قرار دادند (Parvez et al., 2014).

در پژوهشی دیگر، شرکت شل ضریب برجهندگی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که جایگزینی بخشی از قیر با گوگرد سبب می‌شود که مقدار ضریب برجهندگی ارتجاعی به خصوص برای قیرهای نرم‌تر افزایش یابد. مقدار این

۲- مواد و مصالح

۲-۱- قیر

قیر استفاده شده در این پژوهش، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ است. این قیر برای تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی داغ مورد استفاده قرار گرفته است. خصوصیات قیر مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. برای تهیه آسفالت گوگردی به بررسی میزان بهینه گوگرد جایگزین قیر در مخلوط آسفالتی پرداخته شد که در این پژوهش با توجه به نظر اکثر محققین از گوگرد به میزان ۴۰٪ وزنی قیر (به عنوان جایگزین قیر) در مخلوط آسفالتی استفاده شد (Elkholy et al., 2018). بر مبنای مطالعه Baig & Wahhab در سال ۲۰۱۳ همه نمونه‌ها در دمای بین ۱۴۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد ساخته شدند تا ترکیب گوگرد و قیر از نظر چسبندگی و کارایی و همچنین گازهای انتشار یافته دارای مشکل نشود.

۲-۲- سنگدانه

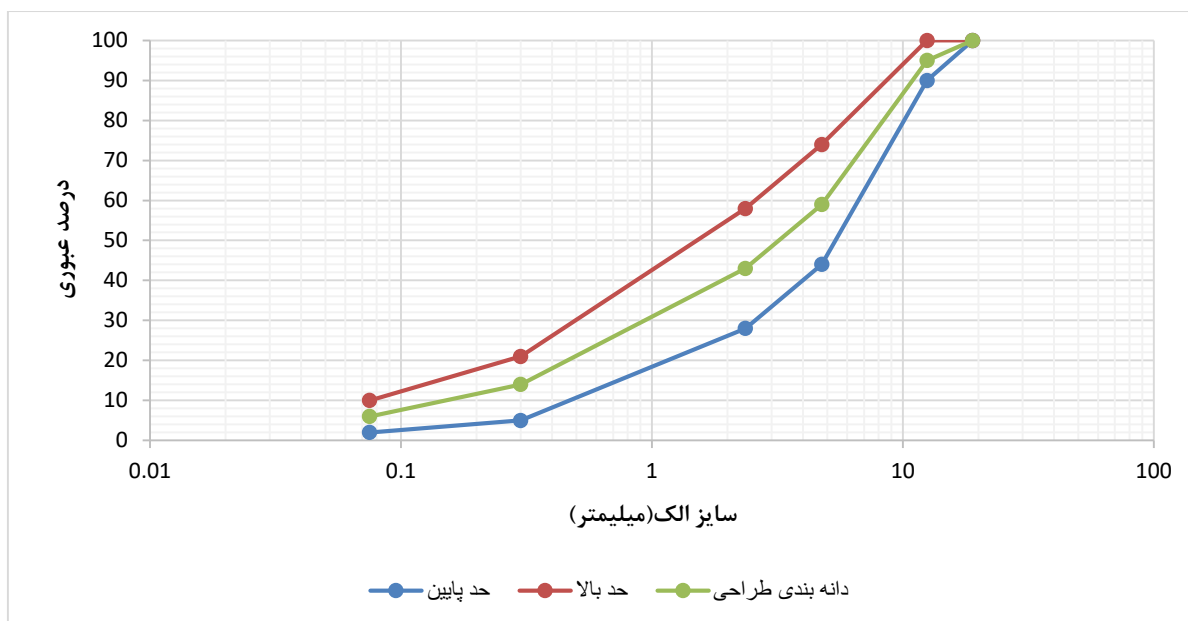
مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از نوع سنگدانه‌های شکسته آهکی از معدن اسپچران هستند که خواص فیزیکی آنها در جدول ۲ آمده است. دانه‌بندی مصرفی برای ساخت نمونه‌ها و درصد عبوری از هر الک برای مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۱ (بر مبنای آیین نامه ۲۳۴) نشان داده شده است. در این پژوهش میانه حد بالا و پایین آیین نامه‌ای درصد عبوری از هر الک (به عنوان معیار طرح اختلاط) مدنظر قرار گرفت.

جدول ۱. خصوصیات قیر مورد استفاده

واحد	روش آزمایش	قیر ۶۰/۷۰	خصوصیات قیر
کیلوگرم بر متر مکعب	ASTM D3289	۱۰۱۷	وزن مخصوص در ۶۰ درجه فارنهایت
دهم میلی‌متر	ASTM D5	۶۵	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	۴۹/۸	نقطه نرمی
سانتیمتر	ASTM D113	بیشتر از ۱۰۰	خاصیت انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
درجه سانتی‌گراد	ASTM D92	۳۳۴	نقطه اشتعال

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

واحد	نتایج آزمایش	حدود آیین نامه‌ای	نتایج آزمایش	شرح
درصد	AASHTO T96	کمتر از ۵۰٪	۲۲/۳	آزمایش سایش لس آنجلس
درصد	BS 812	کمتر از ۴۰٪	۱۶	حداکثر ضریب تورق
درصد	ASTM D5821	حداقل ۷۵٪	۹۳	حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴
درصد	AASHTO T85	-	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)
درصد	AASHTO T84	-	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
گرم بر سانتیمتر مکعب	ASTM C127	-	۲/۵۹	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت دانه
گرم بر سانتیمتر مکعب	ASTM C128	-	۲/۳۲	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریزدانه



شکل ۱. دانه بندی سنگدانه ای نمونه های بررسی شده در این پژوهش

زیست محیطی تعیین گازهای زیان آور در کارخانه آسفالت انجام گرفته است. در ادامه و در شکل ۲ خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام گرفته ارائه گردیده است.

۳-۱- ساخت نمونه

در این پژوهش ابتدا فرآیند طرح اختلاط مارشال بر مبنای AASHTO T245 برای تعیین میزان قیر بهینه برای سه نوع آسفالت مختلف (بدون افزودنی، حاوی گوگرد، حاوی گوگرد و جاذب آلاینده بی کربنات سدیم) انجام شده است که مشخص شد وجود گوگرد و بی کربنات سدیم بر میزان قیر بهینه تأثیری نداشته و میزان قیر بهینه در هر سه نوع مخلوط آسفالتی ۵/۲ درصد وزنی کل مخلوط بدست آمد. پس از تعیین قیر بهینه، آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در این پژوهش جهت انجام هر آزمایش از هر نوع مخلوط سه نمونه ساخته شد و پاسخ آزمایش‌ها بر مبنای میانگین مقادیر بدست آمده برای هر سه نمونه بوده و اگر اختلاف بین مقادیر آزمایش و میانگین زیاد باشد داده مورد نظر حذف شده و آزمایش مجدداً تکرار می‌شود.

۳-۲- ماده جاذب آلاینده بی کربنات سدیم

سدیم هیدروژن کربنات یا سدیم بی کربنات با فرمول NaHCO_3 یکی از نمک‌های سدیم در ترکیب با کربنیک اسید است که تنها یک فاکتور اسیدی در این ترکیب با سدیم جایگزین شده است. این ترکیب، بی بو و بی طعم است که کمی دارای خاصیت بازی است و به صورت پودر سفید یا بلورین می‌باشد. بی کربنات سدیم جاذب رطوبت و بوگیر بوده و استفاده گسترده‌ای به عنوان کاتالیزور و تصفیه‌کننده در فرآیند تولید پلیمرها و پلاستیک‌های پیچیده دارد. همچنین با توجه به خاصیتی که دارد از آن می‌توان برای برطرف کردن بوی بد بدن نیز استفاده کرد. بنابراین در این پژوهش از این ماده به عنوان جاذب آلاینده در ساخت آسفالت (بر مبنای تحقیقات رویز و همکاران (۱۹۸۲) و هویدال و همکاران (۱۹۸۶)) استفاده شد. همچنین میزان استفاده شده از آن در مخلوط آسفالتی به میزان ۱ درصد وزنی قیر می‌باشد.

۳-۳- طرح اختلاط و آزمایش‌ها

در این قسمت به روش‌های بررسی خواص مخلوط آسفالتی پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه دو معیار خواص مکانیکی و زیست محیطی مخلوط آسفالتی مدنظر بوده لذا آزمایش‌های مکانیکی بر روی مخلوط آسفالتی در آزمایشگاه و آزمایش

نمونه استوانه‌ای مورد استفاده در آزمایش شیارافتادگی به روش تراکم چرخشی با قطر و ارتفاع، به ترتیب، ۱۵ و ۶ سانتی‌متر مطابق استاندارد ASTM D6925 ساخته و متراکم شدند. برای انجام آزمایش، نمونه‌های آسفالتی در شرایط خشک، دمای ۵۵ درجه سانتیگراد، بار چرخ ۷۰۰ نیوتن و سرعت حرکت رفت و برگشتی ۵۰ عبور در دقیقه، تحت ۱۰۰۰۰ رفت و برگشت چرخ بارگذاری دستگاه شیارافتادگی قرار گرفت.

۳-۲-۲- آزمایش مدول برجهنگی

با توجه به اهمیت زیاد مدول برجهنگی در طراحی لایه‌های بیندر و توپکا، در این پژوهش انجام آزمایش مدول برجهنگی نمونه‌های آسفالتی مدنظر قرار گرفت. مطابق استاندارد ASTM D4123 در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد از شکل بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس یک هرتز، سیکل بارگذاری یک ثانیه، مدت زمان اعمال بار ۰٫۱ ثانیه، مدت زمان استراحت ۰٫۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰٫۳۵ استفاده گردید. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش به روش تراکم چرخشی مطابق استاندارد ASTM D6925 با قطر و ارتفاع، به ترتیب ۱۰۰ و ۶۴ میلی‌متر و فضای خالی ۴٪ ساخته و متراکم شدند (روش ساخت نمونه‌ها بر مبنای استاندارد ASTM D6925 می‌باشد).

۳-۲-۳- آزمایش خستگی بارگذاری کشش غیرمستقیم

خرابی خستگی رویه‌های آسفالتی از مهمترین خرابی‌های روسازی می‌باشد، حال آنکه این نوع خرابی که معمولاً همراه با پیرشدگی آسفالت بوده؛ تحت بارهای ترافیکی خود را با ترک‌های پوست سوسماری نشان می‌دهد. آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی به قطر ۱۰ سانتیمتر در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد با تنش بارگذاری ۵۰۰ کیلوپاسکال انجام گردید. در این آزمایش از شکل بارگذاری نیم سینوسی و مدت زمان سیکل بارگذاری یک ثانیه، مدت زمان اعمال بار ۰٫۱ ثانیه و مدت زمان استراحت در هر سیکل بارگذاری برابر ۰٫۹ ثانیه استفاده گردید. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش به روش تراکم چرخشی مطابق استاندارد ASTM D6925 با قطر و ارتفاع، به ترتیب، ۱۰۰ و ۶۵ میلی‌متر و فضای خالی ۴ درصد ساخته و متراکم شدند. نمونه‌های آزمایش تا رسیدن به مرحله گسیختگی معادل تغییر شکل ۶ میلی‌متر قرار گرفتند (شکل ۳).



شکل ۲. فلوجارت خلاصه آزمایش‌های انجام گرفته

۳-۲-۳- آزمایش‌های مخلوط آسفالتی

۳-۲-۳-۱- آزمایش شیارشدگی

شیارافتادگی جای چرخ از مهمترین خرابی‌های شناخته شده سطح رویه آسفالتی است که معمولاً در تابستان با ضعیف شدن و ناپایدار شدن آسفالت پدید می‌آید. آزمایش شیارافتادگی نمونه‌های آسفالتی توسط دستگاه شیارافتادگی ویلتراک هامبورگ براساس روش استاندارد AASHTO T324 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام می‌پذیرد. در این دستگاه، چرخ بارگذاری با بار ثابت بر روی نمونه به صورت رفت و برگشتی حرکت می‌کند و نمونه در شرایط خشک یا غرقاب مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

نمونه مورد استفاده در این دستگاه به شکل دو نمونه استوانه‌ای با قطر و ارتفاع، به ترتیب، ۱۵ و ۶ سانتی‌متر و یا دال مکعبی به ابعاد ۳۰×۳۰×۵ سانتی‌متر می‌باشد. چرخ بارگذاری دستگاه نیز به قطر ۲۰ سانتیمتر و پهنای ۵ سانتیمتر است.

در مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین این آزمایش برای ارزیابی حساسیت رطوبتی و عمر خستگی نمونه آسفالتی نیز استفاده می‌شود. در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، بارگذاری توسط دو تیغه با نوار فلزی مطابق استاندارد AASHTO T283 انجام می‌شود. هنگام آزمایش، نمونه در قالب بارگذاری مربوطه قرار داده می‌شود. این آزمون بر روی نمونه‌های متراکم شده بر مبنای استاندارد ASTM D6925 با درصد هوای 7 ± 1 انجام می‌شود. حداقل تعداد نمونه‌ها برای هر نوع مخلوط ۶ عدد است. نیمی از نمونه‌ها باید تحت شرایط استاندارد عمل آوری شوند که ابتدا نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد زیر شرایط خلأ قرار می‌گیرند. نمونه‌های خلأ و اشباع‌شده، در فریزر در دمای -18 درجه سانتی‌گراد برای ۱۶ ساعت و سپس در حمام آب 60 درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت نگهداری می‌شوند و در آخر به مدت ۲ ساعت در دمای 25 درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. در نهایت نمونه‌های تحت شرایط قرار گرفته و نیم دیگر نمونه‌ها به درجه حرارت ثابت 25 درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شوند در نهایت بارگذاری با کمک دستگاه استحکام مارشال با سرعت 50.8 میلی‌متر بر دقیقه به صورت قطری اعمال می‌گردد. بار نهایی در موقع شکستن نمونه (دو نیمه شدن) اندازه‌گیری شده و مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه با استفاده از رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$ITS = \frac{2000p}{\pi Dt} \quad (1)$$

ITS = مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلوپاسکال

P = بار نهایی در هنگام گسیختگی بر حسب کیلونیوتن

D = قطر نمونه بر حسب میلی‌متر

t = ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر

همچنین در رابطه ۲ میزان نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم بعد از سیکل ذوب و یخ به حالت خشک (TSR) نشان داده شده است که بیان‌کننده توانایی نمونه در برابر کشش غیرمستقیم بعد از سیکل ذوب و یخ را نشان می‌دهد به طوری که نمونه‌های دارای میزان TSR بالای ۸۰٪ می‌باشند از نظر مقاومتی در برابر رطوبتی مناسب و با دوام می‌باشند.

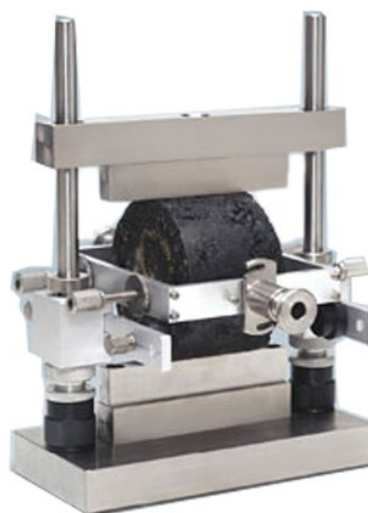
$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \quad (2)$$

ITS_{wet} = مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلوپاسکال

بعد از سیکل ذوب و یخ

ITS_{dry} = مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلوپاسکال

در حالت خشک



شکل ۳. آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

۳-۲-۴- آزمایش استحکام و روانی مارشال

آزمایش استحکام مارشال از جمله اولین آزمایش‌هایی است که برای بررسی خواص مقاومتی- مکانیکی آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش تعیین استحکام و روانی مارشال نمونه‌های آسفالتی با استاندارد AASHTO T245 تعیین می‌گردد. نمونه‌های آسفالتی با درصد قیر بهینه و اعمال ۷۵ ضربه مارشال به هر طرف نمونه در دمای اختلاط طرح با استفاده از مصالح و قیر موجود به روش مارشال تهیه شد.

۳-۲-۵- آزمایش دوام آسفالت در برابر زیان‌های رطوبتی

یکی از مهمترین و تاثیرگذارترین خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی حساسیت رطوبتی است. اگرچه اثر رطوبت در مخلوط آسفالتی بر خلاف بارگذاری ناشی از ترافیک و تنش‌های حرارتی تخریب‌کننده نیست، ولی نفوذ رطوبت اگرچه وزن قیر به عنوان یک جزء تشکیل‌دهنده مخلوط‌های آسفالتی نسبت به سایر اجزا مقدار کمی است، اما اثر مهمی بر روی عملکرد بهینه، دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد. امروزه به منظور اصلاح قیرهای خالص معمولی و ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی از مواد افزودنی اصلاح‌کننده و یا جایگزین قیر استفاده می‌شود. در این پژوهش گوگرد به عنوان جایگزین بخشی از قیر در مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر زیان‌های رطوبتی برای مخلوط‌های آسفالتی بر اساس روش استاندارد AASHTO T283 انجام پذیرفت. آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم ابزار مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها

۳-۳- آزمایش بررسی هوای پاک (ارزیابی زیست محیطی)

به طوری که می‌توان گفت وجود گوگرد در آسفالت سبب می‌شود که آسفالت در برابر تغییر شکل پلاستیک تحت بار چرخ مقاوم‌تر شود. دلیل این امر آن است که زمانیکه مقدار گوگرد بیش از ۲۰ درصد است گوگرد حل نشده و لخته می‌شود و قطرات بزرگ گوگرد تشکیل شده و پس از سرد شدن متبلور می‌شوند. در ادامه پیوندهای اضافی کریستالیزاسیون تشکیل شده و به همین دلیل آسفالت حاوی گوگرد در مقایسه با آسفالت شاهد سخت‌تر می‌شود. بنابراین مقاومت شیارشدگی آسفالت حاوی گوگرد در مقایسه با آسفالت شاهد افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند (Gladkikh et al., 2019).



الف

به منظور تعیین حدود آلودگی مجاز آلاینده‌ها، استانداردهایی تدوین می‌گردد که یکی از آنها، استاندارد هوای پاک می‌باشد. در این پژوهش با توجه به اینکه گوگرد هنگام ساخت آسفالت معمولاً دارای بوی نامطبوع می‌باشد و از نظر استاندارد هوای پاک و بررسی گازهای منتشر شده گازهایی را متساعد می‌کند، بنابراین در هنگام ساخت آسفالت گازهای (CO, NO₂, SO₂) (H₂S) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴ نشان دهنده دستگاه آزمایش تعیین گازهای منتشر شده در هوا (در کارخانه آسفالت و هنگام ساخت مخلوط آسفالتی) می‌باشد. در این روش، گازهای خروجی از آسفالت توسط نمونه گیر و با کمک پمپ مکش از محیط مورد نظر جذب می‌شود؛ سپس با عبور از مسیر با مجاورت هیتر و در ادامه عبور از مسیر دارای خنک کننده به سنسور یا همان آنالیزور (که دارای آشکارساز مادون قرمز می‌اشد) می‌رسد. در نهایت نمونه گاز توسط آشکارساز مادون قرمز بر مبنای اختلاف طول موج عناصر به ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده‌اش تفکیک شده و مشخص می‌شود که نمونه گاز از چه ترکیباتی تشکیل شده است.

۴- تحلیل و بررسی نتایج

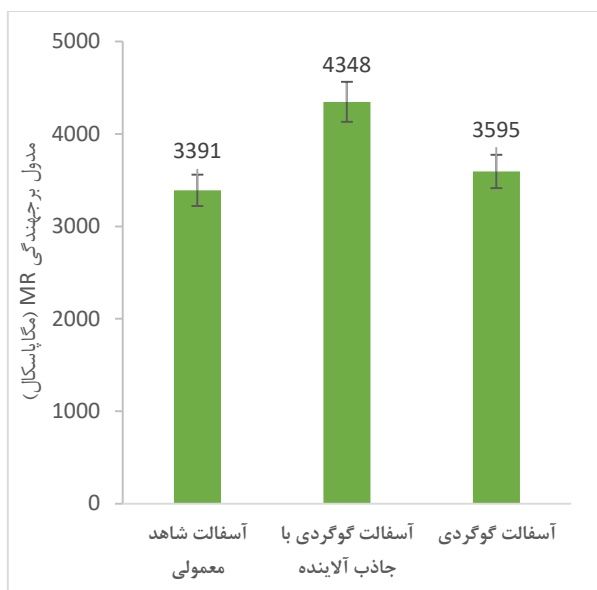
۴-۱- آزمایش شیار افتادگی



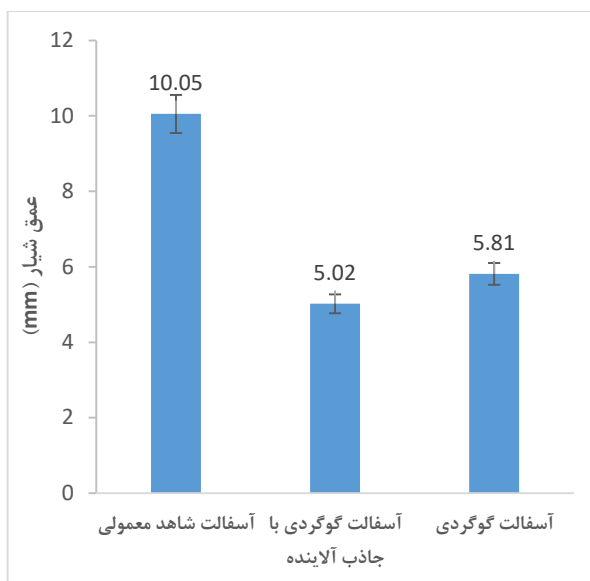
ب

در این بخش عمق نهایی شیارافتادگی جای چرخ بر نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان دهنده این واقعیت است که وجود گوگرد در مخلوط سبب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود، به طوری که نمونه‌های حاوی گوگرد و گوگرد با جاذب آلاینده به ترتیب دارای عمق شیارشدگی (پس از ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری) ۰.۴۲٪ و ۰.۵۰٪ کمتر نسبت به نمونه شاهد می‌باشند. در مورد آسفالت گوگردی حاوی جاذب آلاینده می‌توان گفت که وجود سدیم در آسفالت ترکیب با مقاومت بالایی در مخلوط آسفالتی به وجود آورده که این ترکیب سبب بهبود خواص آسفالت گوگردی از نظر مقاومت در برابر شیارشدگی جای چرخ می‌شود. همچنین نتایج نشان دهنده این واقعیت است که استفاده از گوگرد در آسفالت می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را در سطح راه تحت شرایط دمایی بالا بهبود بخشد؛

شکل ۴. الف) دستگاه آزمایش تعیین گازهای مضر
ب) نحوه آزمایش تعیین گازهای مضر



شکل ۶. نتایج آزمایش مردول برجهنگی نمونه‌های آسفالتی برحسب مگا پاسکال



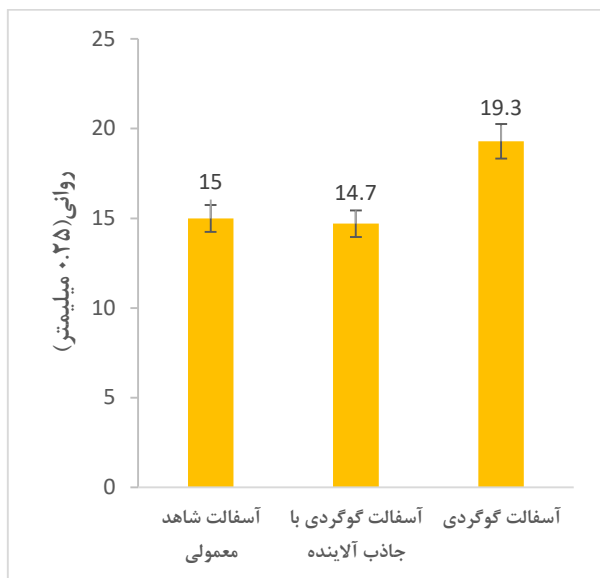
شکل ۵. عمق نهایی شیار نمونه‌ها پس از ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری برحسب میلی‌متر

۴-۲- آزمایش مردول برجهنگی

نتایج آزمایش مردول برجهنگی نمونه‌های آسفالتی در شکل ۶ بیان شده است. وجود گوگرد در مخلوط‌های آسفالتی سبب بهبود مردول برجهنگی مخلوط آسفالتی شده است؛ به طوری که مردول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگرد و گوگرد با جاذب آلاینده به ترتیب ۶٪ و ۲۸٪ در مقایسه با آسفالت شاهد افزایش داشته است. دلیل اصلی این خاصیت کاهش ویسکوزیته قیر در اطراف ذرات سنگدانه در دماهای بالا می‌باشد که در نتیجه گوگرد حل شده در آسفالت آن را سفت‌تر و ویسکوزتر می‌کند. همچنین، گوگرد متبلور در اطراف سنگدانه‌ها پیوند قوی‌تری بین قیر اصلاح شده با گوگرد و سنگدانه‌ها را ایجاد می‌نماید. بنابراین، فیلم قیر اطراف سنگدانه‌ها برای نمونه‌های اصلاح شده با گوگرد در مقایسه با نمونه شاهد به ویژه در دمای بالا پایدارتر می‌باشد. (Polacco et al., 2004). همچنین این نتایج را می‌توان بر مبنای افزایش سختی آسفالت به دلیل افزودن گوگرد به آن توجیح نمود به طوری که افزودن گوگرد به مخلوط آسفالتی سبب افزایش مردول برجهنگی تحت بارهای متناوب می‌شود.

۴-۳- آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم

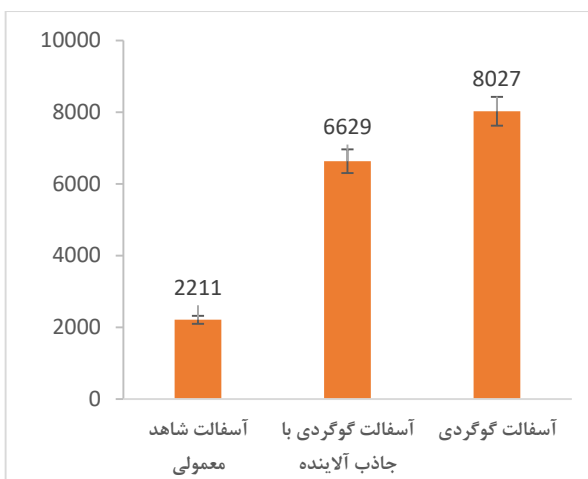
نتایج آزمایش خستگی کشش غیر مستقیم نمونه‌های آزمایش شده در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج آزمایش خستگی بیانگر این واقعیت است که افزودن گوگرد به مخلوط آسفالتی سبب می‌شود که عمر خستگی آن افزایش یابد. به طوری که تعداد سیکل لازم برای گسیختگی نمونه آسفالت گوگردی بیش از ۳,۶۳ برابر تعداد سیکل لازم برای گسیختگی نمونه آسفالتی شاهد می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزودن گوگرد به مخلوط آسفالتی و پیوند آن با قیر (به دلیل ایجاد پیوندهای محکم $S=C$ و $S=O$) سبب بهبود رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی شده و در نهایت سبب افزایش عمر خستگی مخلوط می‌شود. همچنین زمانی که در اثر سرد شدن مخلوط مقدار حفرات کاهش می‌یابد، گوگرد جامد، سختی مصالح را افزایش می‌دهد. زمانیکه مقدار گوگرد بیش از ۲۵ درصد وزنی باشد، سختی وابستگی به بار از خود نشان می‌دهد. این وابستگی در دماهای نسبتاً پایین بارزتر و محسوس‌تر است. مردول سختی مصالح روسازی ساخته شده با قیر گوگردی حتی می‌تواند ۵ برابر بزرگ‌تر از بتن آسفالتی معمولی در نسبت‌های متوسط بارگذاری باشد. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌ها نیز با افزایش گوگرد افزایش می‌یابد. طول عمر خستگی مخلوط‌های گوگردی در نسبت‌های کم تا متوسط بارگذاری نسبت به مخلوط‌های معمولی عملکرد بهتری دارد و در مقادیر بالای بارگذاری تقریباً با نمونه‌های معمولی یکسان هستند.



شکل ۹. نتایج آزمایش روانی مارشال

۴-۵- آزمایش حساسیت رطوبتی (کشش غیرمستقیم)

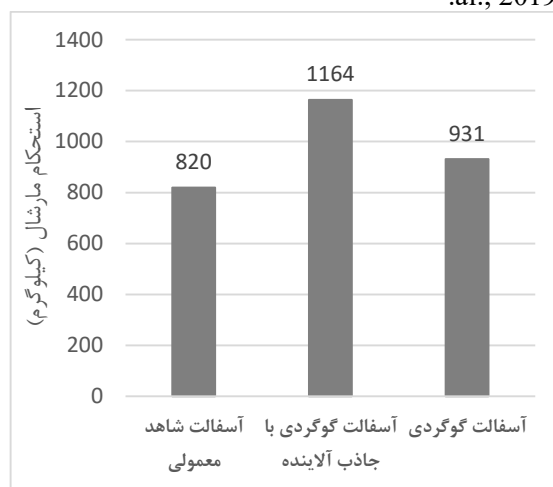
نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی به روش AASHTO T283 در شکل های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان دهنده این واقعیت است که بین هر سه نوع مخلوط آسفالتی بدون گرگرد، حاوی گوگرد و حاوی گوگرد با جاذب آلاینده تنها نمونه آسفالتی حاوی گوگرد دارای نسبت مقاومت کششی حالت اشباع به خشک بالاتر از ۸۰٪ (مرز مناسب بودن مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی) می باشد. دلیل این امر آن است که با توجه به عکس های میکروسکوپی قیرحاوی گوگرد، زمانی که مخلوط سرد می شود، گوگرد در فضای خالی بین ذرات سنگدانه ای پوشیده شده با قیر شروع به جامد شدن می کند و یک ساختار توپر و قوی تشکیل می دهد (Gawel, 2000). این در حالی است که وجود جاذب آلاینده در مخلوط سبب واکنش بین آب و ماده جاذب آلاینده شده که این فعل و انفعالات داخلی (شکست در ریزساختار داخلی) بر روی مقاومت اشباع نمونه تاثیر گذاشته و نسبت مقاومت کششی حالت اشباع به خشک را کاهش قابل ملاحظه ای داده است.



شکل ۷. نتایج آزمایش خستگی بارگذاری به روش کشش غیر مستقیم (تعداد سیکل بارگذاری)

۴-۶- آزمایش استحکام مارشال

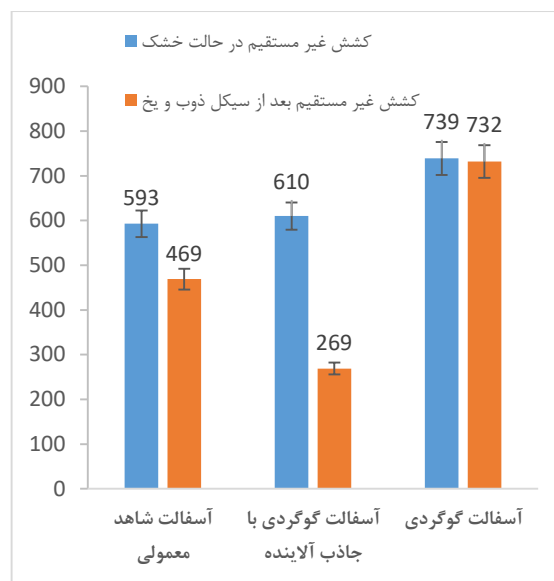
نتایج آزمایش های استحکام و روانی مارشال بر روی نمونه های آسفالتی به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که مقاومت مارشال نمونه آسفالتی با افزودن گوگرد به آسفالت افزایش می یابد حال آنکه مقاومت مارشال به ترتیب برای نمونه گوگردی ۸۰٪ و برای نمونه گوگردی با جاذب آلاینده ۹۴٪ بیشتر از مقاومت نمونه شاهد می باشد. یکی از دلایل افزایش مقاومت مارشال آسفالت اصلاح شده با گوگرد انطباق گوگرد با شکل حفرات آن که باعث ایجاد یک واکنش مکانیکی بین ذرات می شود و در نهایت باعث ایجاد مقاومت مارشال بیشتر مخلوط می گردد (Papirer et al., 1980) نتایج این پژوهش با نتایج محققان قبلی که بیان کننده افزایش مقاومت مارشال آسفالت گوگردی بود، همخوانی دارد (Nguyen et al., 2019).



شکل ۸. نتایج آزمایش استحکام مارشال برحسب کیلوگرم

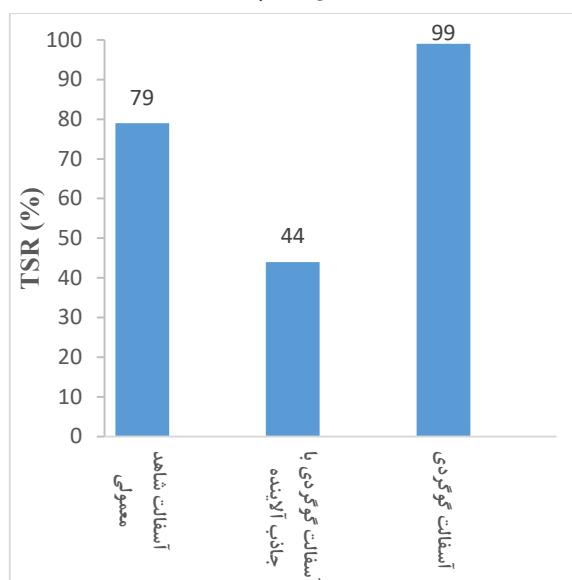
گاز مضر بوجود آمده هنگام ساخت آسفالت با استفاده از دستگاه تشخیص گازهای زیان آور و بر مبنای استفاده از اشعه مادون قرمز بررسی شده است. از جمله آلاینده‌هایی که طی فرآیندهای تولید آسفالت احتمالاً تولید و منتشر می‌شوند، می‌توان به گازهای مونواکسید کربن CO، گوگرد دی اکسید SO₂، هیدروژن سولفور H₂S و دی اکسید نیتروژن NO₂ اشاره کرد. از آنجا که تولید گازهای منتشر شونده می‌تواند در پذیرش آسفالت گوگردی، در ساخت روسازی، به شدت مهم باشد، برخی آزمایش‌ها جهت برآورد و بررسی تأثیر این گونه مصالح در حین ساخت و بعد از آن انجام شده است. سطح محدودیت‌های بالایی برای غلظت گازهای H₂S و SO₂ وجود دارد. در کشورهای مختلف محدودیت‌هایی در این زمینه در نظر گرفته شده است، به‌رحال حداکثر غلظت مجاز برای گازهای H₂S و SO₂ به ترتیب برابر ۲۰ و ۵ ppm است.

اگرچه مقدار غلظت H₂S، 20 ppm برای سلامتی مضر نیست اما باعث سوزش چشم می‌شود و این امر موجب شده تا توسط اجلاس دولتی آمریکا در سم‌شناسی و بهداشت، غلظت‌های ۱۰ و ۵ ppm به ترتیب برای H₂S و SO₂ پذیرفته شود (PRINCE, 1978; Gawel, 2000; Kennepohl and Miller 1978). اگرچه وجود بی‌کربنات سدیم سبب بهبود خواص زیست محیطی نمونه‌های آسفالتی حاوی گوگرد می‌شود به طوری که میزان SO₂ و H₂S به ترتیب ۱۵٪ و ۲۲٫۳٪ کاهش پیدا کردند ولی با توجه به جدول ۳، نتایج نشان می‌دهد که غلظت گازهای مورد بررسی در محیط نمونه‌گیری در هنگام ساخت و پخش در تمام نمونه‌های مخلوط آسفالتی (شاهد، گوگردی و گوگردی حاوی جاذب آلاینده) کمتر از حد مجاز می‌باشد. بر مبنای نتایج تحقیق بیگ و وهاب در محدوده دمایی معمول برای پخش و تراکم آسفالت (۱۲۵ تا ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد) هیچ فرآیند خاصی در مورد گازهای حاوی گوگرد وجود ندارد، اما اگر دمای مخلوط آسفالتی بالاتر از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد ممکن است فرآیند افزایشی سولفید هیدروژن و دی‌اکسید گوگرد رخ دهد. کنترل انتشار گازهای شیمیایی در محل‌های تولید آسفالت در طول ساخت نشان می‌دهد که گازهای خروجی قابل‌کنترل در محدوده قابل‌قبولی هستند. همچنین باید گفت مقدار قابل‌توجهی از گوگرد در شکل ترکیب‌های گوگرد با حلقه‌های ترکیبی متعدد و وزن مولکولی بزرگ ناشی از آلکیلاسیون منجر به حداقل انتشار زیستی می‌شود. مقداری از گوگرد به صورت H₂S و ذرات با وزن



شکل ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های

مورد بررسی کیلو پاسکال



شکل ۱۱. نتایج آزمایش تعیین نسبت مقاومت کششی نمونه‌های

اشباع به خشک

۴-۶- بررسی نتایج آزمایش زیست محیطی

با توجه به عوارض گوناگون ناشی از گازهای آلاینده و تماس افراد با آنها در محیط راهسازی (به دلیل دمای بالای تولید و تراکم آسفالت)، در این پژوهش بر روی آسفالت شاهد، آسفالت گوگردی و آسفالت گوگردی حاوی جاذب آلاینده، میزان آلاینده‌های گازی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. مورد نظر با استفاده از نمونه‌گیری در محیط کارخانه آسفالت در زمان تولید آسفالت گوگردی بوده است. حال آنکه درصد هر

نتایج تحقیقات بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که هیچ خطر ایمنی در طول ساخت روسازی یا بعدازآن وجود ندارد و از نظر تاثیر روی سلامتی افراد، نگران کننده نمی‌باشد. البته پیشنهاد می‌شود که کارشناسان و اپراتورهای راهسازی در هنگام کار با آسفالت گوگردی از ماسک و عینک مخصوص استفاده نمایند.

مولکولی پایین آزاد می‌شوند، اما این ترکیبات در غلظت‌های بسیار کم در گازهای آسفالت تازه تولید شده در دماهای کنترل شده (۱۲۵ تا ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد) حضور دارند (Baig, M. G., & Wahhab, 2013). بنابراین بر مبنای

جدول ۳. نتایج گازهای CO، SO₂، H₂S و NO₂ به دست آمده از دستگاه مورد استفاده در این پژوهش

استاندارد	مقدار	فاکتور	نوع نمونه
۳۵	۴,۴	CO	آسفالت شاهد معمولی
۰,۰۷۵	۰,۰۰۶	SO ₂	
۱۰	۰,۰۰	H ₂ S	
۰,۱	۰,۰۱۱	NO ₂	
۳۵	۴,۷	CO	آسفالت گوگردی با جاذب آلاینده
۰,۰۷۵	۰,۰۱۶	SO ₂	
۱۰	۱,۰۱	H ₂ S	
۰,۱	۰,۰۱۲	NO ₂	
۳۵	۴,۹	CO	آسفالت گوگردی
۰,۰۷۵	۰,۰۱۹	SO ₂	
۱۰	۱,۳	H ₂ S	
۰,۱	۰,۰۱۳	NO ₂	

۵- نتیجه گیری

نتایج حاکی از آن است که گوگرد از نظر خواص مکانیکی مدول برجهنگی، مقاومت مارشال، مقاومت در برابر شیارشدگی، عمرخستگی و حساسیت رطوبتی (کشش غیرمستقیم بعد از سیکل ذوب و یخ) شرایط آسفالت را بهبود بخشیده و در واقع باعث افزایش عمر آسفالت می‌شود؛ به طوری که:

-عمق شیار شدگی آسفالت گوگردی ۴۲٪ نسبت به عمق شیارشدگی آسفالت شاهد کمتر شده است.

در این پژوهش بر روی آسفالت شاهد، آسفالت حاوی گوگرد و آسفالت گوگردی حاوی ماده جاذب آلاینده بی کربنات سدیم آزمایش‌های مکانیکی-مقاومتی آسفالت (مدول برجهنگی، شیارشدگی، مقاومت مارشال، حساسیت رطوبتی و خستگی به روش کشش غیر مستقیم) و آزمایش‌های زیست محیطی بررسی گازهای آلاینده (CO, SO₂, H₂S, NO₂) صورت گرفت.

علاوه بر این نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه خواص زیست محیطی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد و جاذب آلاینده بی کربنات سدیم بهتر از آسفالت گوگردی شاهد می باشد ولی به دلیل ضعف این نوع آسفالت (گوگردی حاوی جاذب آلاینده) در برابر حساسیت رطوبتی به عنوان جایگزین آسفالت شاهد در پروژه های راهسازی پیشنهاد نمی شود. با توجه به اینکه در این پژوهش به خواص مکانیکی و زیست محیطی آسفالت حاوی گوگرد و آسفالت حاوی گوگرد و بی کربنات سدیم پرداخته شد لذا برای تحقیقات آینده محققین پیشنهاد می شود که از منظر آزمایشگاهی، خواص عملکردی و کلاسیک قیر حاوی گوگرد و قیر حاوی گوگرد و بی کربنات سدیم مدنظر قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می گردد که برای تحقیقات آینده از درصد های مختلف گوگرد و انواع مختلف جاذب آلاینده در مخلوط آسفالتی استفاده شود تا گاز های آلاینده آسفالت گوگردی کاهش یابد و از سویی دیگر خصوصیات مکانیکی آسفالت را تحت تاثیر قرار ندهد.

-مدول برجهنگی آسفالت گوگردی به میزان ۶٪ نسبت به آسفالت شاهد افزایش یافته است.
-عمر خستگی آسفالت گوگردی ۳,۶۳ برابر آسفالت شاهد شده است.
-میزان نسبت کشش غیر مستقیم بعد از سیکل ذوب و یخ به کشش غیرمستقیم در حالت خشک برای آسفالت گوگردی ۲۰٪ بیش از آسفالت شاهد می باشد.
-همچنین نتایج نشان دهنده این واقعیت است که آسفالت گوگردی اگرچه دارای گاز های آلاینده می باشد ولی مقدار آن از میزان استاندارد هوای پاک ایران کمتر بوده، لذا در صورت استفاده از این آسفالت مشکل انتشار گاز های مضر وجود ندارد؛ البته با توجه به افزایش قابل توجه خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد و در عین حال بوی نامساعد آسفالت گوگردی، توصیه می شود از این نوع آسفالت در لایه بیندر استفاده شود.

۶- مراجع

-Gladkikh, V., Korolev, E., Smirnov, V., & Sukhachev, I. (2016). Modeling the rutting kinetics of the sulfur-extended asphalt. *Procedia Engineering*, 165, 1417-1423.
-GAWEL, (2000). Sulphur-modified asphalts. *Dev. Pet. Sci.*, no. in: *Asphaltenes and asphalts*, Vol. 2. *Ed. by Teh Fu Yen, George V. Chilingarian*, 515-535.
-G. J. Kennepohl and L. J. Miller, (1978). Sulfur-Asphalt Binder Technology for Pavements. *Adv. Chem. Ser.*
-G. Polacco, J. Stastna, Z. Vlachovicova, D. Biondi, L. Zanzotto, (2004). Temporary networks in polymer-modified asphalts, *Polym. Eng. Sci.* 44 (12) 2185-2193.
-Hoidal, C. R., Hall, A. H., Robinson, M. D., Kulig, K., & Rumack, B. H. (1986). Hydrogen sulfide poisoning from toxic inhalations of roofing asphalt fumes. *Annals of Emergency Medicine*, 15(7), 826-830.

-Baig, M. G., & Wahhab, A. A. (2013). Assesment of sulfur containing air pollutants in utilizing the sulfur extended asphalt concrete mixes in Saudi Arabia. *Int. J. Dev. Res.*, 4(1), 144-152.
-E. Papirer, G. Fritschy, and A. Eckhardt, (1980). Structural modes of sulphur in sulphur-bitumen composites as studied by electron microscopy. *Fuel*, Vol. 59, No. 9, 617-620.
-E.H. Fini, I.L. Al-Qadi, Z. You, B. Zada, J. Mills-Beale, (2012). Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterization and modification, *Inter. J. Pave. Eng.* 13 (6). 515-522.
-Elkholy, S. A., El-Rahman, A. A., El-Shafie, M., & Abo-Shanab, Z. (2018). Physical and rheological properties of modified sulfur asphalt binder. *Int. J. Pavement Res. Technol.*

- Nguyen, V. H., & Le, V. P. (2019). Performance evaluation of sulfur as alternative binder additive for asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12, 380-387.
- Parvez, M, A., Al-Mehthel, M., Al-Abdul Wahhab, H., Hussein, I., (2014). Utilization of sulfur and crumb rubber in asphalt modification. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(7).
- Ruiz, J. M., Carden, B. M., Lena, L. J., Vincent, E. J., & Escalier, J. C. (1982). Determination of sulfur in asphalts by selective oxidation and photoelectron spectroscopy for chemical analysis. *Analytical Chemistry*, 54(4), 688-691.
- S. M. PRINCE, (1978). Construction and Performance of a Sulfur-Asphalt Road in Texas.
- The Sulphur Institute, (2003). Sulphur Outlook 2003. *TSI Publication*.
- Kavussi, A., Azarnia, M., Ayar, P., Pedram, M., (2019). The fatigue behavior of polymeric sulfur-modified asphalt mixtures subjected to freeze thaw conditioning, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 0892705719889985.
- M.A. Notani, F.M. Nejad, A. Khodaii, P. Hajikarimi, (2018). Evaluating fatigue resistance of toner modified asphalt binders using the linear amplitude sweep test, *Road Mater. Pave. Des.* 1-14.
- Masoud Faramarzi, Behnam Golestani, K. Wayne Lee, (2017). Improving moisture sensitivity and mechanical properties of sulfur extended asphalt mixture by nano-antistripping agent, *Construction and Building Materials* 133. 534–542.
- Nazmus Sakib, Md. Amit Bhasin, Kamrul Islam, Kaffayatullah Khan, Muhammad Imran Khan, (2019). A review of the evolution of technologies to use sulphur as a pavement construction material, *International Journal of Pavement Engineering*. 1–12.

Laboratory Investigation of the Effect of Pollution Absorbing NaHCO_3 on the Environmental and Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt Containing Sulfur

Saeed Ahmadi, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Behrooz Babakhani, Lecturer, Islamic Azad University East Tehran Branch, Tehran, Iran.

Ali Akbar Moshiri Amin, M.Sc., Grad., Faculty of Civil Engineering, SADRA Institute of Higher Education, Tehran, Iran.

E-mail: s.ahmadi@ihu.ac.ir

Received: April 2025- Accepted: November 2025

ABSTRACT

Nowadays, low-cost and waste materials in pavement industry have been used by researchers to improve the quality of road pavement. Sulfur is one of the cheap and durable materials that is used in different industries including construction engineering field. This project aimed to assess the characteristics (environmental and mechanical properties) of asphalt mixtures incorporating sulfur, in which the sulfur contains the Sodium Bicarbonate (eliminating the disgusting smell of sulfur). In this regard, the mechanical-strength based tests like rutting, elastic modulus, Marshal stability, moisture susceptibility, fatigue (indirect tensile test) and environmental-related tests about polluting gas emission (CO , SO_2 , H_2S , NO_2) were done on control specimens, sulfur modified asphalt mixture, sulfur modified asphalt mixture containing pollution absorbing additives. The results indicate that the performance tests of the asphalt mixture containing sulfur had a significant increase compared to the control sample; So that the rut depth of sulfur asphalt decreased by 42% compared to the control sample, the modulus of resistance of sulfur asphalt increased by 6%, the fatigue life of sulfur asphalt increased 3.6 times compared to the control asphalt and finally the ratio of indirect tension strength after freeze and thaw cycle, the modified asphalt mixture with sulfur is 20% more than the control asphalt. The outcomes of this research showed that the sulfur enhanced the mechanical properties completely, and the environment-related test also revealed that sulfur modified asphalt mixture can be categorized as standard air and it is possible to use it in the pavement industry. While the effect of sodium bicarbonate on the environmental properties and most mechanical parameters of asphalt containing processed sulfur is positive, but reduces the resistance to the freeze and thaw cycle.

Keywords: Sulfur Asphalt, Pollution Absorbing, Mechanical Properties, Environmental Properties