بررسی رفتار خزشی آسفالت‌های گوگردی با پوشش پلیمری

محمود جدیدی

شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

چکیده

در پژوهش پیش‌رو به معرفی و بررسی رفتار خزشی آسفالت‌های گوگردی با پوشش پلیمری پرداخته‌شده است. برای این منظور، میزان اثر بخشی افزودن گوگرد با پوشش پلیمری بر خواص خزشی مخلوط‌های آسفالتی، به کمک آزمایش خزش دینامیکی، مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد جایگزینی بخشی از قیر با گوگردِ پلیمری، علاوه بر افزایش چشمگیر مقاومت خزشی، هزینه‌های تهیه مصالح و ساخت روسازی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد، به گونه‌ای که میزان مقاومت برای نمونه شاهد ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری و برای نمونه گوگردی ۲۰،۰۰۰ سیکل بارگذاری بدست آمد.

۱- مقدمه

از جمله بخش‌های مهم در راهسازی، لایه‌های مخلوط‌های آسفالتی است که سهم بزرگی از هزینه‌های ساخت یک راه را شامل می‌شود. این موضوع با توجه به افزایش قیمت مشتقات نفتی از جمله قیر در سال‌های اخیر و میزان قیر مصرفی در ساخت آسفالت اهمیت بیشتری یافته است. همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری و ترمیم خرابی‌های رایج روسازی با توجه به افزایش میزان آمد و شد و بار محوری سنگین بر میزان هزینه‌ها می‌افزاید [۱]. لذا در سالیان اخیر تحقیقات زیادی به منظور کاهش هزینه‌های مذکور از طریق افزودن و یا جایگزین کردن مصالح غیرقیری ارزانتر و با مشخصات فنی بهتر انجام گرفته است تا ضمن افزایش دوام مخلوط‌های آسفالتی، هزینه‌های اولیه تهیه مصالح، ساخت و اجرای مخلوط‌های آسفالتی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری، با به تعویق افتادن زمان خرابی، به حداقل برسد [۲].

یکی از مصالح جایگزین قیر گوگرد است. ترکیبات گوگرد نوعی پسماند در فرآیند استخراج و پالایش نفت خام و گاز طبیعی است. ذخیره سازی و انتقال گوگرد از مشکلات پالایشگاه‌ها و معضلات مهم زیست محیطی است، چون علاوه بر آلایندگی، میزان گوگرد حاصل، بیش از مصرف آن است و برای سایر مصارف می‌بایست به نقاط دوردست حمل شود که این عمل فاقد توجیه اقتصادی است. امروزه تحقیقات زیادی در جهت کنترل آلایندگی گوگرد مورد نیاز در مصارف راهسازی صورت گرفته است. فرآوری گوگرد با پلیمر و برخی افزودنی‌های جاذب گازهای آلاینده متصاعد شده از گوگرد در دماهای بالا یکی از راهکارهای کنترل آلایندگی گوگرد است که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱].

۲- تاریخچه

آسفالت‌های گوگردی با پوشش پلیمری SEAM[1]، نوعی آسفالت گرم با دانه‌بندی پیوسته است که در آن بخشی از قیر با گوگرد جایگزین شده است که این درصد جایگزینی از ۱۰ تا ٤۰ و در مواردی تا ۵۰ درصد می‌باشد [۳]. علیرغم بهبود ویژگی‌های آسفالت‌های حاوی گوگرد نسبت به مخلوط‌های آسفالتی معمولی، اختلاف قیمت قیر و گوگرد، استفاده از گوگرد در ساخت آسفالت را غیراقتصادی می‌ساخت [٤]. با افزایش قیمت قیر از ابتدای دهه ۱۹۷۰ و حذف کاربردهای صنعتی گوگرد به سبب مسائل زیست محیطی و کاهش قیمت آن، استفاده از گوگرد به واسطه مزیت زیاد اقتصادی آن در روسازی آسفالتی مجدداً مورد مطالعه قرار گرفت. در این بازه زمانی مخلوط‌های آسفالتی SEAM با استفاده از گوگرد مایع تولید می‌شد. گوگرد مایع در دماهای بالا مقدار قابل توجهی دود و بوی ناخوشایند ایجاد می‌کند و این امر باعث می‌شود سلامت کارگران و افرادی که در معرض کار با گوگرد مایع هستند به خطر بیفتد [۵].

استفاده از قرص‌های جامد گوگردی، تحت عنوان آسفالت‌های گوگردی با پوشش پلیمری (SEAM) جایگزین گوگرد مایع گرمِ بکاربرده شده در تولید مخلوط آسفالتی گردید. در سال ۱۹۹۰ شرکت شل با ایجاد اصلاح در ساختار قرص‌های جامد گوگردی ماده‌ای تحت عنوان تایوپیو شل تولید کرد. تایوپیو یک بسط دهنده قیر و یک اصلاح کننده مخلوط آسفالتی است. گزارش‌های منتشر شده از تولید کننده این محصول حاکی از این است که تایوپیو قادر است عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشد، هزینه‌های ساخت و دماهای تولید را کاهش دهد و شرایط مساعدی را برای مخلوط‌های آسفالتی فراهم آورد [٦].

۳- هدف پژوهش

هدف از این پژوهش بررسی رفتار خزشی آسفالت‌های گوگردی با پوشش پلیمری است. برای این منظور، میزان اثر بخشی افزودن گوگرد با پوشش پلیمری بر خواص خزشی مخلوط‌های آسفالتی، به کمک آزمایش خزش دینامیکی، مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

۴- مصالح مورد استفاده

این مصالح شامل سنگدانه‌ها، فیلر، قیر، گوگرد و گوگرد با پوشش پلیمری (SPC[2]) است. آزمایش‌های مصالح استفاده شده در این مطالعه طبق استانداردهای ASTM در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان یزد انجام شده است.

۴-۱- سنگدانه

سنگدانه‌های بکار گرفته شده در این مطالعه از نوع شکسته کوهی با ماهیت آهکی بوده که از معادن سنگ استان یزد تهیه شده است. سنگدانه‌ها شامل شن ۱۲ تا ۱۹ میلی‌متر (بادامی)، شن ٦ تا ۱۲ میلی‌متر (نخودی) و ماسه شکسته است. مشخصات مرغوبیت و وزن مخصوص مصالح سنگی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

۴-۲- قیر

بر اساس نشریه ۲۳٤ طبقه‌بندی قیرها جهت تولید مخلوط آسفالتی بر مبنای ترافیک عبوری، منطقه آب و هوایی و نوع کاربری می‌باشد. قیر مصرفی در این پژوهش قیر با درجه نفوذ ۷۰-٦۰ بوده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف روی قیر مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

[1] Sulfur Extended Asphalt Mixture

[2] Sulfur with Polymer Coating

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی [۸]

مشخصه		نتایج آزمایش		
		مخلوط درشت‌دانه	مخلوط ریزدانه	فیلر مصالح
ارزش ماسه‌ای (AASHTO T 176) (قبل از تغذیه به کارخانه)		–	۷۰	–
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس (AASHTO T 96)	نوع دانه‌بندی	B	–	–
	تعداد دور	۵۰۰	–	–
	درصد سایش	۲۰	–	–
حدود اتربرگ (AASHTO T 89, T 90)	دامنه خمیری (PI)	–	N.P	N.P
	روانی خمیری (LL)	–	–	–
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ٤ (ASTM D5821)	در دو جبهه	۱۰۰	–	–
درصد اندود قیر به مصالح سنگی (AASHTO T 182)		بیش از ۹۵	–	–
درصد تطویل و تورق (BS 812)	تطویل	۱٦	–	–
	تورق	۹	–	–
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO T 104)		۰/۵	۰/۷	–

جدول ۲- وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی [۸]

مشخصه	وزن مخصوص		درصد جذب آب
	ظاهری	حقیقی	
مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸	۲/٦۹۱	۲/٦٤۸	۰/٦
مصالح سنگی عبوری از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰	۲/۷۱۷	۲/٦۳۳	۱/۲
وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی، Gsb	۲/٦٤٦		

۴-۳- گوگرد و گوگرد SPC

گوگرد مصرفی در این مطالعه از نوع گوگرد معمولی است و محصول پسماند پالایشگاه نفت تهران می‌باشد. مشخصات گوگرد مصرفی در جدول ٤ آورده شده است. گوگرد SPC به عنوان اصلاح کننده مخلوط‌های آسفالتی در این مطالعه بکار گرفته شده است. طبق ادعای تولید کننده، این محصول ترکیبی از گوگرد، پلیمر و مواد جاذب H_2S و SO_2 می‌باشد. از آنجا که گوگرد در دماهای بالای ۱۲۰ درجه سانتیگراد گازهای سمی H_2S و SO_2 تولید می‌کند، در این محصول با افزودن مواد جاذب این گازها، سعی شده است تا به میزان قابل توجهی از میزان آلایندگی کاسته شود. همچنین پلیمر افزوده شده به این ترکیب با تشکیل شبکه میکروسکوپی باعث بهبود خواص مخلوط آسفالتی می‌شود. از آنجاکه این محصول تجاری و تولید داخل است، جزئیات آن در دسترس نیست، ولی مشخصات آن از قبیل وزن مخصوص و نقطه ذوب، همانند گوگرد است و از نظر شکل ظاهری بصورت دانه‌های ریز و به رنگ نقره‌ای می‌باشد. تصویر این افزودنی در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱- دانه‌های گوگرد SPC

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های قیر [۸]

آزمایش‌های قیر خالص	روش آزمایش		نتایج	مشخصات استاندارد قیرهای خالص (گروه ٦٠ - ٧٠)	
	ASTM	AASHTO		حداقل	حداکثر
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتیگراد	D70	T 228	۱/۰۱۸	–	–
درجه نفوذ در ۲۵ درجه (۱۰۰گرم – ۵ ثانیه) بر حسب ۰/۱ میلی‌متر	D5	T 49	٦٤	٦٠	٧٠
نقطه نرمی (ساچمه - حلقه) بر حسب درجه سانتیگراد	D36	T 53	۵۰/۵	٤٩	٥٦
مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتیگراد بر حسب سانتیمتر	D113	T 51	بیشتر از ۱۰۰	۱۰۰	–
حلالیت در تترا کلرید کربن بر حسب درصد	D2042	T 44	۹۹/۷	۹۹	–
درجه اشتعال (روباز) بر حسب درجه سانتیگراد	D92	T 48	۲۹۲	۲۳۲	–
کندروانی کینماتیک در ۱۲۰ درجه سانتیگراد (سانتی‌استوکس)	D2170	T 201	۵۷٦	–	–
کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ درجه سانتیگراد (سانتی‌استوکس)			۳۲٦	–	–
کندروانی کینماتیک در ۱٦۰ درجه سانتیگراد (سانتی‌استوکس)			۱۳۷	–	–
لعاب نازک قیر (۱٦۳ درجه سانتیگراد - ۵ ساعت)	D1754	T 179	–	–	–
افت حرارت بر حسب درصد			۰/۰۳	–	۰/۸
درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی بر حسب ۰/۱ میلی‌متر			٤٤	–	–
نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه			٦٨/٧٥	٥٤	–
مقدار کشش قیر بعد از آزمایش ۲۵ درجه سانتیگراد (سانتیمتر)			بیشتر از ۱۰۰	۵۰	–
حساسیت حرارتی قیر			–		
PI– (برحسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد و نقطه نرمی)			۰/٤٨		
PVN (۱۳۵-۲۵) – (بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد و غلظت بر حسب سانتی استوکس در ۱۳۵ درجه سانتیگراد)			۱/۰۰		
PVN(٦۰-۲۵) – (بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد و غلظت بر حسب پواز در ٦۰ درجه سانتیگراد)			–		

جدول ٤- مشخصات گوگرد مصرفی [۸]

دانسیته در ۲۰ °C (kg/m^3)	نقطه ذوب (سانتیگراد)	رنگ	حالت استاندارد
۲۰۱۰	۱۱٦	زرد	پودر

۵- انجام آزمایش

متغیر این پژوهش درصد گوگرد SPC جایگزین قیر پایه است. معمولا درصد بهینه گوگرد و گوگرد SPC در تحقیقات قبلی کمتر از ۵۰ درصد وزنی نسبت به قیر اعلام شده است [۵]. برای بررسی تغییرات خواص، درصدهای وزنی گوگرد SPC، ۳۰، ٤۰ و ۵۰ انتخاب گردید. جهت مقایسه تأثیر افزودن گوگرد SPC و گوگرد بر مخلوط‌های آسفالتی، یک نمونه مخلوط آسفالتی حاوی قیر گوگردی، شامل ٤۰ درصد وزنی گوگرد نسبت به قیر نیز انتخاب شد. در این مطالعه از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۱۳۵ میلی‌متر (طبق NCHRP 465) جهت انجام آزمایش خزش دینامیکی استفاده شده است. یکی از عوامل مهم در

تعیین ویژگی‌های رفتاری مخلوط‌های آسفالتی درصد فضای خالی نمونه‌های ساخته شده است [۷]. بطوریکه در یک آزمایش مشخص با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، نتایج حاصل از دو نمونه با درصد فضای خالی مختلف (مثلا ۳/۵ و ٤/۵) اختلاف زیادی دارند. در این پژوهش جهت داشتن درصد فضای خالی ثابت، با حداقل تغییرات (حداکثر ۰/۱± درصد)، در ساخت نمونه‌ها حداکثر دقت لحاظ شده است. بنابراین در آزمایش‌های خزش دینامیکی درصد فضای خالی ۰/۱± ۷ انتخاب گردید.

۵-۱- انتخاب دانه‌بندی

دانه‌بندی طبق جدول ۹-۱ نشریه ۲۳٤ ستون مربوط به دانه‌بندی با بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر، انتخاب شده است.

در شکل ۲ دانه‌بندی طرح و حدود بالا و پایین دانه‌بندی‌های پیشنهادی نشریه ۲۳٤ آورده شده است.

۵-۲- اختلاط قیر و مصالح سنگی

برای تولید مخلوط‌های آسفالتی گوگردی دو روش وجود دارد: روش تر و روش خشک [۵]. در روش تر ابتدا مواد گوگردی با قیر به نسبت مورد نظر در همزن مخلوط و مخلوط قیر- گوگرد به سنگدانه‌ها اضافه می‌گردد. در روش خشک مواد گوگردی به‌عنوان فیلر همزمان با افزودن قیر به سنگدانه‌های داغ افزوده می‌شود. در این مطالعه از روش تر جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. جهت ساخت نمونه‌ها همزن با دور بالا بکار گرفته شده است. طبق توصیه شل دمای اختلاط برای مخلوط‌های آسفالتی تایوپیو و گوگردی حداکثر ۱٤۵ درجه سانتیگراد انتخاب شده است، زیرا علاوه بر کاهش میزان انرژی مصرفی، مقدار آلایندگی گوگرد موجود در ترکیب تایوپیو و عنصر گوگرد محدود می‌شود. از آنجا که وزن مخصوص گوگرد در حدود ۲ برابر وزن مخصوص قیر است جایگزینی قیر با گوگرد یا گوگرد SPC بر اساس حجم معادل صورت می‌گیرد. جهت تبدیل یک طرح مخلوط معمولی به یک حجم معادل قیر- گوگرد از روابط ۱ و ۲ استفاده می‌شود [۱۰]:

$$m = \left(\frac{10000R}{10000R - 100 \times P_s \times (R-1) + a \times P_s \times (R-1)} \right) \quad (۱)$$

که در آن m وزن قیر گوگردی معادل به گرم، a وزن قیر خالص بهینه، R نسبت وزن مخصوص گوگرد (یا گوگرد SPC) به وزن مخصوص قیر است (طبق پیشنهاد تولید کننده معادل ۲ درنظر گرفته شده است) و P_s درصد گوگرد (یا گوگرد SPC) جایگزین قیر خالص است.

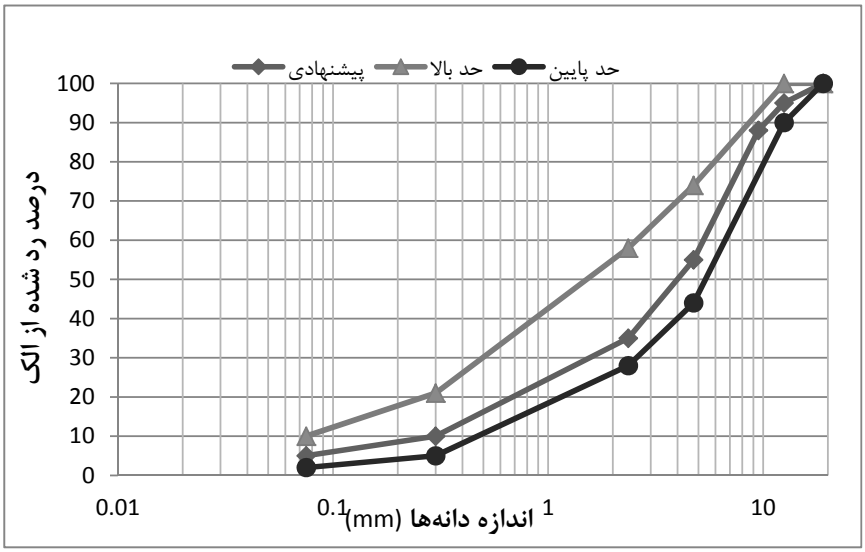
$$M_b = \left(M_{agg} + M_b \right) \times \frac{P_b}{100} \quad (۲)$$

که در آن M_b وزن قیر خالص بهینه و M_{agg} وزن سنگدانه بر حسب گرم و P_b درصد قیر بهینه است. جدول ۵ میزان قیر گوگردی بهینه کل و سهم گوگرد و قیر خالص را با توجه به روابط ۱ و ۲ ارائه داده است.

در روش تر از آنجاکه قیر و افزودنی از قبل با هم ترکیب شده‌اند، کافیست بعد از کنترل وزن سنگدانه، قیر گوگردیِ از پیش آماده شده متناظر با نوع افزودنی به سنگدانه‌ها افزوده شده و اختلاط شروع شود.

با افزایش درصد افزودنی گوگرد (یا گوگرد SPC) از میزان قیر کاسته می‌شود. این امر موجب کاهش کارایی در مرحله اختلاط می‌شود. جهت افزیش سهولت اختلاط و پوشیده شدن سطح تمام سنگدانه‌ها با قیر، ابتدا مصالح درشت‌دانه با اندازه ۱۹-٦ میلی‌متر با قیر پایه و گوگرد (قیر گوگردی) مخلوط شد و در انتها مصالح ریزدانه با اندازه ٦-۰ میلی‌متر به آن افزوده شدند. این کار مخلوط یکنواخت‌تری را نتیجه خواهد داد. بمنظور عمل‌آوری نمونه‌ها، مخلوط بمدت ۲ ساعت در گرمکن نگهداری شد.

جهت رسیدن به مخلوط یکنواخت و عاری از سنگدانه‌های بدون پوشش قیر، اختلاط در چند مرحله با فواصل زمانی ۲۰-۱۵ دقیقه و هر بار حدود ۳ دقیقه انجام شد. محصول نهایی یک مخلوط کاملاً همگن و یکنواخت شد. وزن مخصوص نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف افزودنی در جدول ٦ آورده شده است.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر

جدول ۵- مقدار قیر بهینه و سهم قیر و گوگرد برای ساخت نمونه‌ها

نمونه	مقدار افزودنی (R_s)	درصد قیر بهینه کل	مقدار قیر بهینه کل m	سهم قیر	سهم گوگرد SPC
	٪	٪	گرم	گرم	گرم
پایه	۰	٤/۳	۱۰۸	۱۰۸	۰
گوگرد SPC، ۳۰ درصد	۳۰	٤/۹	۱۲٤	۸۷	۳۷
گوگرد SPC، ٤۰ درصد	٤۰	۵/۲	۱۳۰	۷۸	۵۲
گوگرد SPC، ۵۰ درصد	۵۰	۵/۵	۱۳۷	٦۸	٦۸
گوگرد ٤۰ درصد	٤۰	۵/۲	۱۳۰	۷۸	۵۲

جدول ٦- وزن مخصوص مخلوط‌های آسفالتی مختلف

ردیف	افزودنی	درصد افزودنی	وزن مخصوص (kg/m^3)
۱	-	۰	۲۵۰۹
۲	گوگرد SPC	۳۰	۲۵۱۳
۳		٤۰	۲۵٤۰
٤		۵۰	۲۵۵٦
۵	گوگرد	٤۰	۲۵۳۷

۵-۳- تراکم نمونه

جهت تراکم نمونه‌ها از روش تراکم چرخشی به وسیله دستگاه ژیراتوری استفاده شد، مشخصات روش تراکم در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- مشخصات روش تراکم با دستگاه ژیراتوری

فشار اعمالی	زاویه چرخش	سرعت چرخش
۶۰۰ کیلوپاسکال	۱/۲۵ درجه	۳۰ دور در دقیقه

۵-۴- شرح آزمایش خزش دینامیکی

یکی از راه‌های ارزیابی استعداد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم، آزمایش خزش دینامیکی است [۱۱] که در این مطالعه بکار گرفته شده است. مهمترین پارامتر به‌دست‌آمده از این آزمایش، تغییرشکل دائمی یا کرنش تجمعی است که با مقاومت در برابر شیارشدگی مرتبط است. هرچند تغییرشکل دائمی و یا کرنش تجمعی را نمی‌توان به‌عنوان عمق شیارشدگی و یا تعیین مستقیم عمق شیار در نظر گرفت، اما می‌توان از آن به‌عنوان مقایسه عملکرد و تغییرشکل‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد [۱۲].

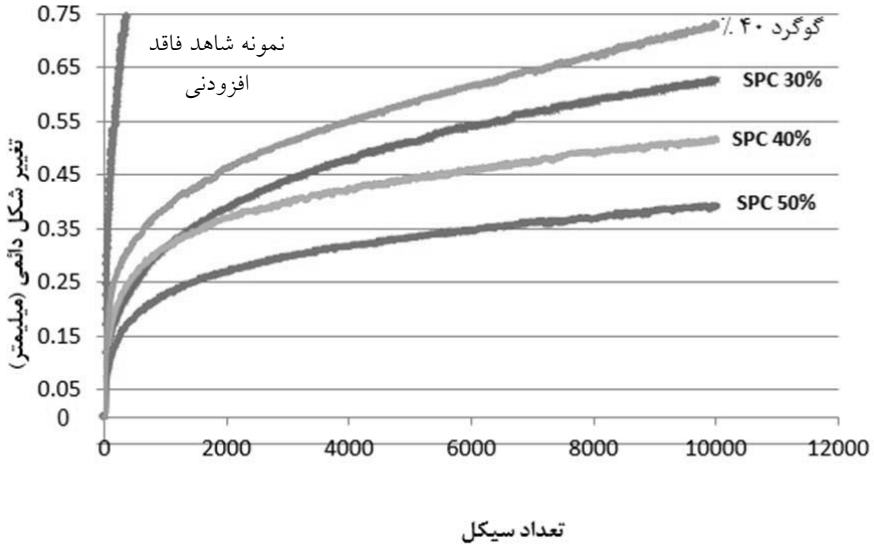
جهت بررسی رفتار خزشی و مقاومت در برابر شیارشدگی ۵ آزمایش بر روی ۵ نمونه در دمای ۵۴/۵ درجه سانتیگراد انجام شد. با توجه به توصیه NCHRP 465 محدوده تنش‌های اعمالی به نمونه‌ها (۲۰۷-۶۹ کیلوپاسکال) سطح تنش ۱۹۰ کیلوپاسکال انتخاب شد. در این آزمایش از یک بار دینامیکی نیم سینوسی با مدت زمان اعمال بار ۰/۱ ثانیه و مدت زمان استراحت ۰/۹ ثانیه استفاده شد. شرط خاتمه آزمایش رسیدن به عدد جریان و یا رسیدن به ۱۰،۰۰۰ سیکل بارگذاری، هرکدام زودتر رخ دهد، قرار داده شد. این آزمایش طبق توصیه NCHRP 9-19 برای نمونه‌های محصورنشده انجام شد. از جمله معایب این روش می‌توان به اندازه گرفتن کرنش‌ها در محلی غیر از فاصله میانی نمونه و وارد نکردن فشار محیطی یا فراهم نبودن شرایط محصورشدگی اشاره کرد [۱۱] و [۱۳].

۵-۵- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

در انجام آزمایش تحت تنش ۱۹۰ کیلوپاسکال طبق نمودارهای شکل ۳، هیچ یک از نمونه‌های حاوی افزودنی وارد مرحله سوم و حد جاری شدن نرسید. لذا معیار مقایسه طبق توصیه NCHRP 456، شیب خط منحنی در ناحیه دوم و مقدار تغییرشکل دائمی در سیکل ۱۰۰۰۰ ام قرار داده شد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار گوگرد SPC مقدار تغییرشکل و شیب منحنی در ناحیه دوم کاهش یافته است. بطوریکه برای مخلوط حاوی ۵۰ درصد گوگرد SPC کمترین مقدار تغییرشکل و برای نمونه شاهد بیشترین تغییرشکل شیب منحنی در ناحیه دوم حاصل شده است. جهت مقایسه تفاوت تأثیر گوگرد و گوگرد SPC، مخلوط حاوی ۴۰ درصد گوگرد خالص نیز تحت آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد تغییرشکل نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد نه تنها نسبت به نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد SPC دارای تغییرشکل بیشتری است، بلکه تغییرشکل بیشتری در مقایسه با نمونه حاوی ۳۰ درصد گوگرد SPC از خود نشان داده است. این موضوع نشان دهنده افزایش مقاومت در مقابل تغییرشکل دائمی نمونه‌های گوگرد SPC، برای درصدهای مشابه و حتی درصدهای پایین‌تر نسبت به نمونه‌های گوگردی است.

نکته قابل توجه در نمودارهای شکل ۳ اختلاف زمان و تعداد سیکل‌ها تا لحظه جاری شدن نمونه‌های حاوی گوگرد و نمونه شاهد است. بطوریکه نمونه شاهد فاقد افزودنی، تحت تنش ۱۹۰ کیلوپاسکال بعد از حدود ۱۰۰۰ سیکل وارد ناحیه سوم شد، درحالیکه نمونه‌های حاوی گوگرد (خالص و SPC) حتی پس از ۱۰۰۰۰ سیکل وارد ناحیه سوم نشد و همچنان به مقاومت ادامه داد. این نشانه

تأثیر بسیار زیاد گوگرد در بهبود عملکرد مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی است.



شکل ۳- نمودار خزش دینامیکی (سطح تنش ۱۹۰ کیلوپاسکال)

۶- نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش خزش دینامیکی چنین برمی‌آید که افزودن گوگرد و گوگرد با پوشش پلیمری برای تمام درصدها باعث افزایش چشمگیری در مقاومت در برابر شیارشدگی (کاهش تغییرشکل‌های دائمی) می‌شود. بطوریکه با افزایش مقدار افزودنی گوگرد و گوگرد با پوشش پلیمری، مقدار تغییرشکل تجمعی ایجاد شده در مخلوط کاهش می‌یابد. این کاهش تغییرشکل دائمی برای مخلوط حاوی ۵۰ درصد گوگرد با پوشش پلیمری بیشترین مقدار و برای نمونه شاهد (فاقد افزودنی) کمترین مقدار بوده است.

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی برای نمونه‌های حاوی گوگرد و گوگرد با پوشش پلیمری نشان دهنده افزایش مقاومت در مقابل تغییرشکل دائمی نمونه‌های گوگردی با پوشش پلیمری، برای درصدهای مشابه و درصدهای پایین‌تر نسبت به نمونه‌های گوگردی، است.

۷- مراجع

1. N. Tran, A. Taylor, D. Timm, M. Robbins, B. Powell, and R. Dongre, “Evaluation of mixtureperformance and structural capacity of pavements using ShellThiopave (NCAT report no. 10-05).” 2010.
2. D. Timm, N. Tran, A. Taylor, M. Robbins, and B. Powell, “Evaluation of mixture performance and structural capacity of pavements using ShellThiopave (NCAT report no. 09-05),” Auburn: NationalCenter for Asphalt Technology, Auburn University, 2009.
3. J. A. Dubbs, “Manufacturing asphaltum.” US. Patent, 468,867, Feb-1892.
4. J. Benzowitz and E. S. Boe, “Effect of sulfur upon some of the properties of asphalt,” in Proc. ASTM, 1938, vol. 38, p. 539.
5. I. Gawel, “Sulphur-modified asphalts,” Dev. Pet. Sci., no. in: Asphaltenes and asphalts, Vol. 2. Ed. by Teh Fu Yen, George V. Chilingarian, pp. 515–535, 2000.
6. D. Strickland, J. Colange, P. Shaw, and N. Pugh, “A Study of the Low-Temperature Properties of Sulphur Extended Asphalt Mixtures,” in Canadian Technical Asphalt Association, 2008.
7. F. L. Roberts, P. S. Kandhal, E. R. Brown, D.-Y. Lee, and T. W. Kennedy, “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and construction. SECOND EDITION,” 1996.

۸. آزمایشگاه مکانیک خاک استان یزد، "طرح اختلاط آسفالت بیندر (۰ - ۱۹ میلی‌متر) بهسازی محور اردکان - عقدا کارخانه آسفالت شرکت سطح راهان،" آزمایشگاه مکانیک خاک استان یزد. ۱۳۹۰.

۹. وزارت راه و شهرسازی ,آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران .موسسه قیر و آسفالت ایران - پژوهشکده حمل و نقل، نشریه شماره ۲۳٤, ۱۳۹۰.

10. FHWA, "An Alternative Asphalt Binder, Sulfur-Extended Asphalt (SEA)." Office of Pavement Technology FHWA-HIF-12-037 May, 2012.

11. F. Zhou and T. Scullion, "Discussion: Three Stages of Permanent Deformation Curve and Rutting Model," Int. J. Pavement Eng., vol. 3, no. 4, pp. 251–260, Dec. 2002.

12. C. L. Monismith, N. Ogawa, and C. Freeme, "Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading." Transportation Research Record 537 (1975).

13. M. Witczak and K. Kaloush, "Performance evaluation of asphalt modified mixtures using superpave and P-401 mix gradings," University of Maryland, pp. 89-92, 1998.