

بررسی آزمایشگاهی تأثیر گوگرد اصلاح شده با پلیمر (گوگاس) بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی

مقاله علمی - پژوهشی

محمودرضا کی منش*، دانشیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

جلال ایوبی نژاد، استادیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

مجتبی ترابی میرزائی، دانشجوی دکتری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

صفحه ۱۴۴-۱۳۳

چکیده

امروزه اکثر قیرهای راهسازی در دنیا به دلیل وجود بعضی از ضعف‌های ذاتی قیر و نیز لزوم افزایش محدوده کاربری آنها، با کمک انواع مواد افزودنی اصلاح می‌شوند. در این راستا گوگرد پلیمری به عنوان افزودنی اصلاح کننده آسفالت، تأثیرات مستقیمی در بالا بردن مقاومت آسفالت و نیز بهبود رفتار خستگی آن دارد. افزودن گوگرد به قیر، سبب اصلاح خواص رئولوژیکی قیر و تغییر در ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی می‌شود. در این تحقیق به منظور ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های حاوی گوگرد پلیمری با انواع دیگر مخلوط‌های آسفالتی متداول، از مقادیر مختلف گوگرد پلیمری (۳۰ درصد، ۴۰ درصد و ۵۰ درصد) برای ساخت نمونه‌های آزمایش استفاده شده است و برای آزمایشات خستگی حالت بارگذاری تغییر شکل کنترل شده با موج بارگذاری سینوسی به منظور ارزیابی عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی مطابق استاندارد AASHTO-T321 انتخاب شد. در نهایت نتایج این مطالعات بیانگر آن است که عمر خستگی (N_f50) نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد پلیمری ۴۹۹۶۰ سیکل و عمر خستگی نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد، ۱۹۵۰۰ سیکل در سطح کرنش ۶۰۰ میکرو استرین می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت پایه گوگردی، عمر خستگی، گوگرد پلیمری، آزمایش خستگی

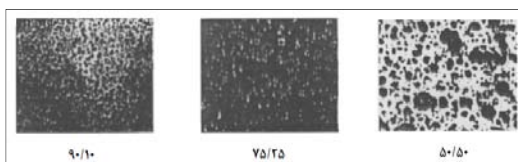
۱- مقدمه

اجرای این نوع آسفالت به هیچ گونه فناوری پیچیده‌ای احتیاج ندارد. اما چون استفاده مستقیم گوگرد در آسفالت، مشکلات عدیده‌ای همچون متصاعد شدن گاز H_2S و تهدید سلامتی اکیپ‌های تولید و پخش آسفالت بدنبال داشت، بنابراین جهت رفع این مشکلات، مطالعات گسترده‌ای در تغییر شکل گوگرد به موادی ترکیب شده از گوگرد و افزودنی‌های خاص صورت گرفت که این افزودنی‌ها در حین فرآیندهای مخلوط‌سازی با آسفالت، حمل و پخش آسفالت عاری از هرگونه بخارهای مضر باشد. از طرفی تحقیقات نشان داده است که استفاده از گوگرد با

امروزه اکثر قیرهای راهسازی به دلیل بعضی از ضعف‌های ذاتی قیر و نیز لزوم افزایش محدوده کاربری آنها، با کمک مواد افزودنی مانند گوگرد اصلاح می‌شوند. از طرفی با توجه به منابع فراوان گوگرد در کشور و تغییر در قیمت نسبی گوگرد و قیر باعث شده است تا ساخت آسفالت گوگردی توجیه اقتصادی یافته و تمایل به ساخت آسفالت گوگردی افزایش یابد. ساخت آسفالت گوگردی با تغییرات نسبتاً ساده‌ای در کارخانه‌های معمولی آسفالت امکان پذیر بوده و حمل و نقل، پخش و کوبیدن آن با روش‌های متداول انجام پذیر است. بنابراین ساخت و

مولکول‌های حلقه‌ای یا زنجیره‌ای S_x (که مقدار x از ۲ تا چند صد هزار اتم متغیر است) دارند. خواص فیزیکی و شیمیایی گوگرد به طور قابل ملاحظه‌ای به مقدار x بستگی دارد (Schmidt, 2017). گوگرد در ترکیب قیر و گوگرد به سه شکل می‌باشد:

۱. گوگرد وارد واکنش شده با قیر^۴
 ۲. گوگرد حل شده در قیر^۵
 ۳. ذرات گوگرد متبلور شده^۶ که عموماً به شکل بخش‌های کوچک جدا شده از هم در قیر هستند.
- مسلماً بخشی از گوگرد اضافه شده به صورت شیمیایی با قیر واکنش می‌دهد و نتایج متفاوتی برای درصد گوگرد واکنش داده با قیر وجود دارد که این اختلافات به احتمال زیاد به دلیل ترکیبات مختلف قیر و دمای واکنش و زمان انجام واکنش است. همچنین گوگرد به مقدار حدود ۲۰ درصد و قدری بیشتر از آن قابلیت ذوب شدن در اکثر قیرها را در دمای بین ۱۳۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد دارد (McBee, Sullivan, 2012).



شکل ۱. مقادیر نسبی گوگرد بلوری و حل شده در قیر

پلی سولفیدهایی که دارای قابلیت واکنش در دماهای بالای ۱۲۰ درجه سانتیگراد هستند تا حدی گوگرد واکنش نداده را حل می‌کنند. انحلال پذیری گوگرد به نوع قیر و منشأ آن بستگی دارد و هنگامی که مخلوط قیر-گوگرد در دمای محیط سرد می‌شود، تبلور مجدد گوگردهای حل شده را می‌توان مشاهده کرد. با این وجود امکان جلوگیری و یا کاهش تبلور مجدد از طریق بالا بردن زمان اختلاط امکان پذیر است. مقادیر نسبی گوگرد بلوری و حل شده در قیر در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

در نهایت گوگرد اضافی که در قیر حل نمی‌شود به صورت بلور (کریستال) ظاهر می‌شود. گوگرد بلوری به صورت ریز در قیر پراکنده شده (هر چند کشش سطحی هر دو ماده کاملاً متفاوت است) و به عنوان فیلر یا سنگدانه در مخلوط ایفای نقش می‌کند. مطالعات میکروسکوپی مخلوط قیر-گوگرد نشان می‌دهد که تفاوت‌های ظاهری در پراکندگی گوگرد متبلور شده وابسته به غلظت گوگرد است (Papirer, 2015).

نسبت وزنی ۳۰ تا ۴۰ درصد منجر به کاهش تغییر شکل در حدود نصف شرایط معمولی شده و مقاومت قابل توجه مخلوط‌های اصلاح شده با گوگرد، امکان کاهش ضخامت لایه روسازی تا ۲۰ درصد و در نتیجه امکان استفاده از مصالح با کیفیت پایین‌تر را می‌دهد و علاوه بر صرفه جویی در مصرف قیر، باعث جبران نقیصه مصالح سنگی نامرغوب برای تهیه مخلوط آسفالتی با کیفیت بالا می‌شود (Bissada and Al-Hashimi, 2005).

در نهایت با مطالعات صورت گرفته، محصول افزودنی اصلاح کننده آسفالت با عنوان گوگرد اصلاح شده با پلیمر (گوگرد پلیمری) پیشنهاد گردید که می‌تواند به نسبت‌های توصیه شده در ترکیب آسفالت به جای قیر جایگزین گردد و سبب ارتقاء و بهبود کیفیت و مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالتی شود. به همین منظور در این تحقیق به بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر سولفور پلیمر (گوگاس) بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است. برای انجام تحقیق و قبل از اقدام به انجام آزمایش‌ها، ابتدا با همکاری یکی از کارخانه آسفالت‌های استان یزد، مصالح سنگی، قیر و فیلر تهیه و برای انجام آزمایش‌های مربوطه مطابق آیین نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) آماده شدند. آزمایشات متداول مصالح سنگی و قیر بر روی آن‌ها صورت گرفت و با ضوابط موجود در آیین نامه کنترل گردید و نمودار دانه بندی مصالح سنگی طبق دانه بندی شماره ۴ انتخاب شد. از آنجا که در طرح‌های اجرایی آسفالتی از روش مارشال استفاده می‌شود؛ طرح مخلوط آسفالت و تعیین مقدار قیر بهینه با ساخت نمونه‌های مارشال انجام گردید که در ادامه تشریح می‌گردد.

۲- عکس العمل متقابل قیر و گوگرد^۱

خصوصیات شیمیایی و فیزیکی منحصر به فرد گوگرد عامل اصلی توجیه استفاده از آن در روسازی‌های آسفالتی است. مولکول‌های گوگرد در حالت جامد، در ساختمان‌های قائم الزاویه^۲ به صورت بلور هستند و تا حدود دمای ۹۵/۵ درجه سانتیگراد پایدارند و در این دما آنها تبدیل به کریستال‌های مونوکلینیک^۳ می‌شوند. گوگرد ذوب شده از حلقه‌های ۸ عضوی تشکیل شده است و در دمای بیشتر از ۱۳۰ درجه سانتیگراد حلقه‌ها دستخوش یک تجزیه جزئی می‌شوند. اتم‌های گوگرد تمایل به ترکیب با یکدیگر برای تشکیل یک سیستم پیچیده‌ی

هنگامی که مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با گوگرد داغ در زیر دمای ۱۴۹ درجه سانتیگراد نگه داشته شوند، گازهای مضر متصاعد شده و آلاینده‌ها (شامل SO_3 , SO_2 , H_2S) در محدوده مجاز قرار می‌گیرند. بنابراین حداکثر دمای مجاز توصیه شده برای کار با قیر اصلاح شده با گوگرد یا افزودنی‌های گوگردی ۱۴۹ درجه سانتیگراد است.

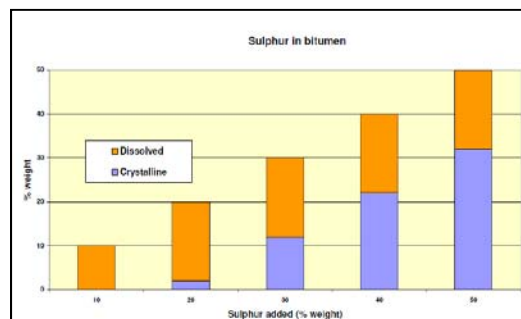
۳- مفهوم خستگی در مخلوط آسفالت

در هر نقطه مشخص از روسازی زیر بار چرخ، تغییر شکلی در لایه بتن آسفالتی ایجاد می‌شود، این تغییر شکل در اثر تنش و کرنش کششی ایجاد شده در زیر لایه آسفالتی حادث می‌شود. با عبور بار چرخ وسایل نقلیه از روی روسازی، در سطح روسازی تنش فشاری و در زیر لایه آسفالتی تنش و کرنش کششی به وجود می‌آید. چنانچه تنش‌ها و کرنش‌های کششی ناشی از تکرار بارگذاری، از تنش‌ها و کرنش‌های مجاز کششی لایه آسفالتی تجاوز نماید، منجر به ایجاد ترک‌هایی در زیر لایه آسفالتی می‌گردد که نهایتاً به سطح روسازی انتقال می‌یابند (NCHRP Report 646, 2010). به عبارت دیگر در هنگام عبور وسایل نقلیه از روی روسازی، حرکت بارهای چرخ وسایل نقلیه باعث می‌شوند که تنش قسمت‌های بالا و پایین لایه رویه روسازی به سرعت از حالت کشش به فشار و بالعکس تغییر نماید و بنابراین تکرار این روند، منجر به ایجاد ترک‌های خستگی^۸ می‌گردد. از تجمع و به هم پیوستن این ترک‌ها در سطح روسازی، ترک‌های موسوم به ترک‌های پوست سوسماری به وجود می‌آید. بررسی خستگی در روسازی‌های انعطاف پذیر نشان داده است که گسیختگی در روسازی‌های آسفالتی تحت کرنشی کوچک در حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ با گذشت چند میلیون بار ترافیکی اتفاق می‌افتد. بر این اساس محققین به این نتیجه رسیدند که بروز ترک علاوه بر مقدار بار به تعداد بار نیز وابسته است. در اینجا لازم به ذکر است که همواره نمی‌توان پیش بینی دقیق و درستی از عمر خستگی ارائه کرد و دلیل این موضوع این است که در آزمایشگاه اعمال همزمان تمامی شرایط محیطی میسر نیست. از جمله این شرایط می‌توان به پیرشدگی قیر، تراکم شدن مجدد بر اثر عبور ترافیک، تغییرات درجه حرارت، حساسیت‌های رطوبتی، نوع تراکم و ... اشاره کرد. لذا تغییرات در این موارد مسلماً می‌تواند اثرات بسیار زیادی را بر روی عمر خستگی بگذارد و تفاوت با مدل آزمایشگاهی بیشتر شود.

مطابق تصاویر فتومیکروگرافی^۷ که در شکل (۲) نشان داده شده است، در ترکیب ۹۰/۱۰ (نسبت گوگرد به قیر) ذرات گوگرد با قطری حدود ۱-۲ میکرومتر به صورت همگن در سراسر قیر پراکنده شده است. زمانیکه غلظت گوگرد در مخلوط قیر-گوگرد به ۲۵ درصد افزایش می‌یابد، غیریکنواختی در ساختار آنها قابل مشاهده است و میانگین اندازه ذرات به ۶ میکرومتر می‌رسد. در ترکیب ۵۰/۵۰ غیریکنواختی و پراکندگی کاملاً آشکار است (Courval, 2014). در نهایت می‌توان به منظور تولید آسفالت گوگردی، به دو صورت گوگرد را به مخلوط آسفالتی اضافه کرد.

۱. اختلاط قبلی قیر و گوگرد

قیر-گوگرد به سنگدانه‌های داغ در مخلوط‌کن آسفالت افزوده می‌شود. بطوریکه اختلاط قیر داغ و گوگرد مذاب توسط تجهیزاتی مانند آسیاب کلونیدی، همزن پره‌ای یا اختلاط در مسیر انجام پذیرد یا مخلوط قیر داغ و گوگرد جامد، به صورتیکه گوگرد جامد به مخزن قیر مذاب وارد شده و پس از تماس با قیر مذاب و مایع شدن، با همزن‌های قوی به خوبی در داخل قیر توزیع می‌شود و در نهایت قیر گوگرددار به طرف مخلوط‌کن آسفالت هدایت می‌شود.



شکل ۲. تصاویر فتومیکروگرافی از ترکیبات مختلف قیر و گوگرد

۲. افزودن مستقیم گوگرد به مخلوط‌کن آسفالت

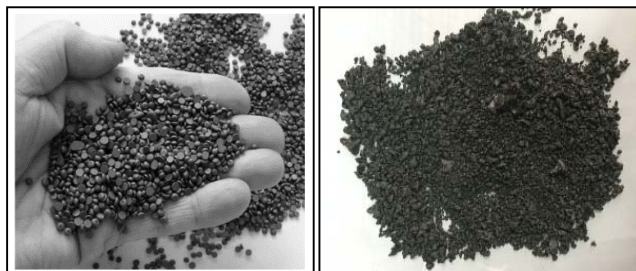
در این روش گوگرد مایع یا جامد مستقیماً به داخل مخلوط‌کن آسفالت تزریق می‌شود. بدین وسیله مخازن گوگرد مایع یا پیش اختلاط قیر و گوگرد (که منجر به تولید H_2S می‌شود) حذف شده و به این ترتیب ضمن کمتر شدن آلودگی‌های احتمالی، سهولت بیشتری نیز در کار ایجاد خواهد شد. طبق مطالعات انجام شده، روش اختلاط مستقیم به دلیل ایجاد آلودگی کمتر، مورد توجه بیشتری قرار دارد (FHWA-DP-54, 2002).

۴- طرح اختلاط آسفالت اصلاح شده با گوگرد

پلیمری

محصول گوگرد پلیمری به عنوان افزودنی اصلاح کننده آسفالت کاربرد داشته و می تواند به نسبت های توصیه شده در ترکیب آسفالت به جای قیر جایگزین گردد. تأثیرات مستقیم این افزودنی در آسفالت، بالا بردن مقاومت آسفالت و دوام آن است.

این محصول اصلاح کننده پایه گوگردی بوده و از ترکیب گوگرد با افزودنی های تغییر دهنده دامنه ذوب و تبخیر، نرم کننده ها و پلاستیسایزرها تشکیل گردیده است. شکل (۳) نمونه ای از گوگرد اصلاح شده با پلیمر با نام تجاری گوگاس که در مشهد تولید می شود را نشان می دهد. این محصول از نظر ظاهر مشابه گوگرد پلیمری تولیدی شرکت شل است.



ب

الف

شکل ۳. گوگرد پلیمری (الف) ساخته شده در مشهد (ب) تولیدی شرکت شل (SEA)

مراحل آزمایشات صورت گرفته

برای انجام تحقیق و قبل از اقدام به انجام آزمایش ها، ابتدا با همکاری یکی از کارخانه های آسفالت استان یزد مصالح سنگی، قیر و فیلر تهیه و برای انجام آزمایش های مربوطه طبق آیین نامه روسازی راه های ایران آماده شدند. آزمایشات متداول مصالح سنگی و قیر بر روی آنها صورت گرفت و با ضوابط موجود در آیین نامه کنترل گردید. نمودار دانه بندی مصالح سنگی طبق دانه بندی شماره ۴ جدول ۹-۱ آیین نامه روسازی راه های آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴) انتخاب گردید. از آنجا که در طرح های اجرایی آسفالتی از روش مارشال استفاده می شود؛ طرح مخلوط آسفالت با ساخت نمونه های مارشال انجام و مقدار قیر بهینه بدست آمد. در این تحقیق برای ساخت نمونه های آزمایش، مقادیر مختلف گوگرد پلیمری (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) استفاده شد و روش تیر خمشی چهار نقطه ای به دلیل شبیه سازی بیشتر شرایط واقعی جاده انتخاب گردید. در نهایت برای آزمایشات خستگی حالت بارگذاری تغییر شکل کنترل شده با موج بارگذاری سینوسی به منظور ارزیابی عمر خستگی نمونه های آسفالتی مطابق استاندارد (AASHTO T321) انتخاب شد. شکل (۴) طرح واره و چهارچوب مراحل تحقیق را به طور خلاصه نشان می دهد.

درصد مجاز گوگرد پلیمری در قیر بستگی به ویژگی های قیر دارد (Beatty and Weber, 2007) و تقریباً در زمان طولانی ۲۰ درصد به صورت حل شده در قیر باقی می ماند و یا به عنوان بخشی از قیر در آن پراکنده می شود ولی گوگرد آزاد، معمولاً در بیش از ۲۰ درصد وزنی به صورت بلوری یکپارچه می شود (Kennepohl and Bean, 2015). البته جایگزینی قیر با گوگرد بر اساس حجم معادل صورت می گیرد و اصولاً یک محاسبه برای وزن مخصوص بالای گوگرد جهت حفظ استانداردهای موجود نفوذپذیری و دوام مخلوط ها لازم است (Imants Deme, 2012). از معادله (۱) می توان در تعیین درصد کل قیر برای یک مخلوط آسفالت معمولی و اصلاح شده با گوگرد استفاده کرد. این معادله بر مبنای تحقیقات دفتر معادن آمریکا^۹ در رابطه ۱ می باشد (McBee and Izatt, 1980).

$$\% = A \left\{ \frac{100R}{100R - P_s(R - G_{asphalt})} \right\} \quad (1)$$

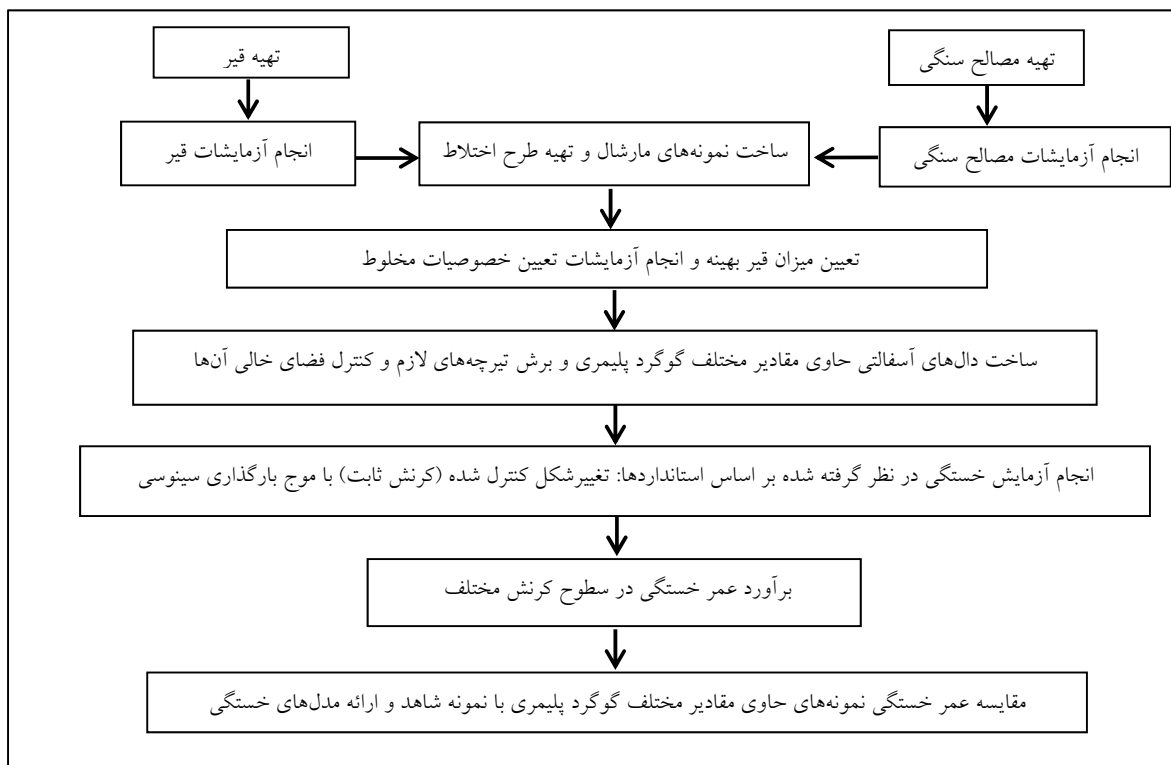
$G_{asphalt}$: وزن مخصوص قیر

R : درصد گوگرد پلیمری در قیر اصلاح شده

P_s : نسبت وزن مخصوص گوگرد به قیر

A : درصد قیر در مخلوط آسفالت معمولی (مخلوط حاوی قیر

خالص)



شکل ۴. طرح واره مراحل انجام تحقیق

آزمایش‌های مصالح سنگی

آزمایش‌های سلامت مصالح سنگی از جمله ارزش ماسه‌ای، شکل دانه‌ها، درصد شکستگی و همچنین وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی در حالت اشباع با سطح خشک و وزن مخصوص ظاهری مصالح سنگی و درصد جذب آب مصالح و نیز دیگر خصوصیات مربوط به مرغوبیت مصالح سنگی (درشت دانه و ریزدانه) نظیر درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس، حدود اتربرگ، درصد تطویل و تورق و درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج در جدول (۱) آورده شده است.

در این تحقیق از دانه‌بندی شماره ۴ مخلوط‌های آسفالتی توپر آیین‌نامه ۲۳۴ برای تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی استفاده شد. از آنجا که تفاوت در دانه‌بندی بر رفتار خستگی مخلوط تأثیر دارد و نیز برای اینکه بتوان نمونه‌ها را با دقت بیشتر بررسی کرد، همه مصالح سنگی در آزمایشگاه الک شدند تا از نظر دانه‌بندی تفاوتی بین نمونه‌ها وجود نداشته باشد؛ و لذا تنها متغیر موجود، مقادیر مختلف گوگرد پلیمری می باشد که می‌تواند جایگزین بخشی از فیلر یا مصالح سنگی شود.

آزمایش‌های قیر خالص

انتخاب نوع قیر که در تهیه مخلوط‌های آسفالتی به کار می‌رود با توجه به چند عامل مهم انجام می‌گیرد. به این منظور عواملی چون شرایط جوی محل، نوع و شدت ترافیک، نوع روسازی، جنس و دانه بندی مصالح سنگی و نحوه اجرای روسازی در این

فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال بیست و یکم، دوره چهارم، شماره ۸۱، زمستان ۱۴۰۳

ارتباط در نظر گرفته می‌شوند. به این ترتیب که هرچه درجه حرارت متوسط سالیانه منطقه ای بالاتر باشد و از جهت ترافیکی تعداد و وزن وسایل نقلیه افزایش یابد، برای ساختن مخلوط آسفالتی به قیر کندرواتری احتیاج است. قیر مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع قیر با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ تولید پالایشگاه اصفهان است که بیشتر در نواحی با آب و هوای گرم و معتدل مورد استفاده قرار می‌گیرد که نتایج آزمایشات فیزیکی انجام شده روی قیر در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایشات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد آزمایش		نتایج آزمایش			مشخصه
ASTM	AASHTO	فیلر مصالح	مخلوط ریزدانه	مخلوط درشت دانه	
-	T176	-	۷۰	-	ارزش ماسه‌ای (درصد)
-	T96	-	-	B	نوع دانه‌بندی
		-	-	۵۰۰	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس
		-	-	۲۰	درصد سایش
-	T90,89	N.P	N.P	-	دامنه خمیری (PI)
		-	-	-	حد خمیری (PL)
		غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	-	حد روانی (LL)
D5821	-			۱۰۰	درصد شکستگی مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۴
-	T182			بیش از ۹۵	درصد اندود قیر به مصالح سنگی
-	-			۱۶	درصد تطویل و تورق (BS-812)
-	-			۹	
-	T104		۰/۷	۰/۵	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم
-	T85	درصد جذب آب	حقیقی	ظاهری	وزن مخصوص مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸ (گرم بر سانتی متر مکعب)
		۰/۶	۲/۶۴۸	۲/۶۹۱	
-	T84	۱/۲	۲/۶۳۳	۲/۷۱۷	وزن مخصوص مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰ (گرم بر سانتی متر مکعب)
-	T100	-	۲/۷۱۲		وزن مخصوص مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰ (گرم بر سانتی متر مکعب)

جدول ۲. نتایج آزمایشات فیزیکی انجام شده، قیر ۷۰-۶۰ تولید پالایشگاه اصفهان

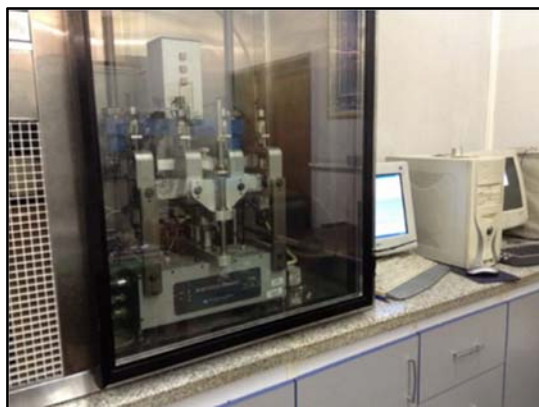
محدوده استاندارد قیر خالص (۶۰-۷۰)		نتایج	روش آزمایش		آزمایشات
حداکثر	حداقل		AASHTO	ASTM	
-	-	۱/۰۱۸	T228	D70	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (گرم بر سانتی متر مکعب)
۷۰	۶۰	۶۴	T49	D5	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰ گرم-۵ ثانیه) بر حسب ۰/۱ میلی‌متر
۵۶	۴۹	۵۰/۵	T53	D36	نقطه نرمی (ساجمه - حلقه) بر حسب درجه سانتی‌گراد
-	۱۰۰	بیشتر از ۱۰۰	T51	D113	مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر حسب سانتی‌متر

-	۹۹	۹۹/۷	T44	D2042	حلالیت در تتراکلرید کربن بر حسب درصد
-	۲۳۲	۲۹۲	T48	D92	(روپاز-کلوند) بر حسب درجه سانتی گراد درجه اشتعال
-	-	۵۷۶	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۲۰ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)
-	-	۳۲۶	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)
-	-	۱۳۷	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۶۰ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)
-	-	-	T179	D1754	لعاب نازک قیر (۱۶۳ درجه سانتی گراد- پنج ساعت)
۰/۸	-	۰/۰۳	-	-	افت حرارت بر حسب درصد
-	-	۴۴	-	-	درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی بر حسب ۰/۱ میلیمتر
-	۵۴	۶۸/۷۵	-	-	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه
-	۵۰	بیشتر از ۱۰۰	-	-	مقدار کشتش قیر بعد از آزمایش در ۲۵ درجه سانتی گراد بر حسب سانتیمتر
-	-	-۰/۴۸	-	-	(بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و نقطه نرمی قیر)
-	-	-۱/۰۰	-	-	(بر حسب درجه نفوذ ۲۵ و غلظت بر حسب سانتی استوکس در ۱۳۵ درجه سانتی گراد)
					حساسیت
					حرارتی قیر

ساخت دال ها و تیرچه های آسفالتی

خستگی مخلوط های آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. محاسبات جهت تعیین مقدار مخلوط آسفالتی جهت ریختن در قالب دال آسفالتی بر اساس وزن مخصوص مخلوط در ۶ درصد فضای خالی صورت گرفت. برای تهیه دال آسفالتی، قالب حداقل ۱ ساعت در دمای نزدیک به دمای اختلاط مربوط به هر نمونه قرار گرفت. لازم به توضیح است که قبل از شروع ساخت دال ها، تعدادی دال آسفالتی اضافی به منظور تعیین تعداد دورهای غلتک دستی برای رسیدن به فضای خالی ۶ درصد ساخته شد. پس از تهیه دال های مورد نظر با ابعاد ۳۰ در ۴۴ سانتیمتر با استفاده از دستگاه برش موجود در آزمایشگاه دال ها برش داده شد و تیرچه-هایی با ابعاد ۴۰۰×۶۳×۵۰ میلی متر تهیه شدند. شکل (۵) مراحل ساخت دال آسفالتی و تهیه تیرچه ها را نشان می دهد. دستگاه مورد استفاده در این تحقیق برای تعیین عمر خستگی، دستگاه UTM ساخت شرکت IPC کشور استرالیا بود که قابلیت بارگذاری پالسی با شکل موج های مختلف را دارد. نمای کلی این دستگاه در شکل (۶) قابل مشاهده است.

برای اضافه کردن گوگرد پلیمری به مخلوط آسفالتی در آزمایشگاه، از روش خشک استفاده شد و به منظور بررسی تأثیر گوگرد پلیمری بر خواص خستگی مخلوط های آسفالتی، ساخت مخلوط های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف گوگرد پلیمری انجام شد. همچنین جهت افزایش دقت کار و اطمینان از ارزیابی صحیح رفتار خستگی مخلوط های آسفالتی، سعی شد شرایط تراکم شبیه شرایط واقعی باشد، برای این منظور دال های مورد نظر با استفاده از غلتک دستی متراکم شدند. دال آسفالتی مربوط به هر یک از مقادیر گوگرد پلیمری، در یک نوع دانه بندی، یک نوع مصالح سنگی، یک روش تراکم، یک میزان درصد فضای خالی و یک دمای اختلاط ساخته شد. بنابراین تنها تمایز بین دال ها، میزان گوگرد پلیمری در آن ها بود. به این طریق تأثیر سایر پارامترهای مخلوط آسفالتی که در رفتار خستگی اثر دارند، کنترل شد و تنها تأثیر تغییر ایجاد شده در مقدار گوگرد پلیمری در رفتار



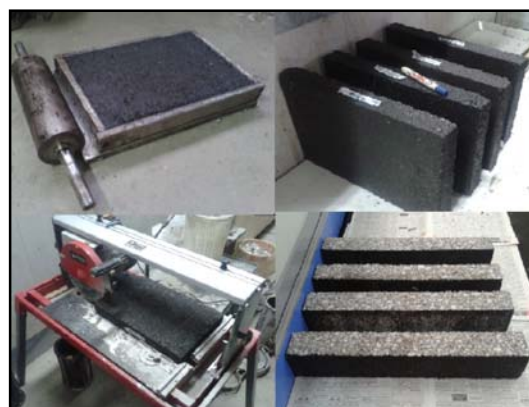
شکل ۶. دستگاه آزمایش خستگی تیرچه‌های آسفالتی

به صورت عددی قابل دسترسی است. زمان آزمایش، بار اعمال شده، خیز تیرچه، تنش و کرنش کششی، دمای محفظه و مغزه نمونه، زاویه فاز، تعداد دفعات اعمال بار، سختی خمشی، انرژی تلف شده در هر دوره بارگذاری و کل انرژی تلف شده، تمام متغیرهای خروجی از ابتدا تا انتهای این آزمایش هستند.

تمامی تنظیمات دستگاه از نظر نحوه و مقدار بارگذاری و کلیه محاسبات در طول زمان انجام آزمایش توسط سیستم جمع آوری و کنترل اطلاعات^{۱۲} و یک کامپیوتر صورت می‌پذیرد. به این صورت که تمام اندازه گیری‌ها از طریق دو گیج صورت می‌پذیرد؛ گیج اول داخل سیستم اعمال بار دستگاه قرار گرفته و نیروی اعمال شده در هر پالس را اندازه گیری می‌کند و گیج دوم یک تغییر شکل سنج است که بر روی نمونه نصب شده و خیز نمونه را در نقطه وسط تیرچه پس از هر اعمال بارگذاری اندازه گیری می‌کند (Khavandi and ameri, 2014). سپس نرم افزار مربوطه مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های حداکثر، سختی، مدول کشسانی، زاویه فاز، انرژی تلف شده و در انتها عمر خستگی تیرچه را از طریق مقادیر اندازه گیری شده توسط این دو گیج محاسبه می‌کند نتایج محاسبات در ضخامت نهایی روسازی نیز تاثیر دارد (Ghasemzade and Ghanizade, 2012).

تحلیل نتایج آزمایش‌های خستگی

پس از تعیین مقدار قیر بهینه، مقادیر ۳۰ درصد و ۴۰ درصد گوگرد پلیمری و نیز تعیین درصد بهینه پودر لاستیک، دال‌هایی برای مخلوط‌های حاوی این افزودنی ساخته شدند و تیرچه‌های مورد نظر از این دال‌ها بریده شدند و سپس آزمایش خستگی با استفاده از دستگاه آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای انجام گرفت.



شکل ۵. مراحل ساخت تیرچه‌های آسفالتی

در این دستگاه آزمون خستگی به روش خمش ساده سه نقطه‌ای (اعمال بارگذاری در یک سوم دهانه) صورت می‌پذیرد. این دستگاه شامل یک بدنه اصلی چهار سیستم گرهی، یک سیستم اعمال بار^۱ و یک تغییر شکل سنج^{۱۱} است. بر روی دستگاه سیستم‌های الکترونیکی جهت تنظیم عملکرد دستگاه در داخل آن قرار دارد و از طریق کلیدهای تعبیه شده بر روی بدنه دستگاه قابلیت تنظیم آن فراهم گردیده است. چهار نقطه گرهی کنترلی در دستگاه تعبیه شده که دو گره واقع در دو انتهای دستگاه نقش تکیه گاهی تیرچه را دارند و از طریق دو گره داخلی بارگذاری به صورت پالسی بر روی نمونه آسفالتی اعمال می‌گردد. در این استاندارد یک خمش ساده به صورت تکراری بر روی تیرچه آسفالتی اعمال گردیده و خیز ناشی از اعمال نیرو توسط یک کرنش سنج که روی نمونه قرار می‌گیرد، اندازه گیری می‌شود. اعمال بارگذاری در فرکانس‌های بین ۵ تا ۱۰ هرتز صورت می‌گرفت. دستگاه یک سیستم کنترلی کامپیوتری دارد که قابلیت انجام آزمایش در دو حالت کرنش کنترل شده و تنش کنترل شده را فراهم می‌سازد. در حالت تنش کنترل شده میزان بار به صورت ثابت وارد می‌شود و کرنش‌های ناشی از این بارگذاری ثابت در هر چرخه بارگذاری و باربرداری ثبت می‌گردد. در حالت تغییر شکل کنترل شده، در طی هر چرخه بارگذاری خیز تیرچه اندازه گیری شده و کرنش تیرچه محاسبه می‌گردد، سپس بار به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نمونه در هر چرخه بارگذاری، کرنش ثابتی را تجربه کند. شکل موج بارگذاری توسط این دستگاه به صورت سینوسی یا نیمه سینوسی (سینوسی مثبت) با فرکانس‌های مختلف و زمان استراحت‌های متفاوت، قابل تنظیم است. تمام اطلاعات بدست آمده از آزمایش از طریق رایانه متصل به دستگاه خستگی

(۸) نشان داده شده است. همچنین نمودار خستگی خمشی در مقابل تعداد سیکل برای نمونه شاهد و نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد پلیمری (کرنش ۷۰۰ میکرو استرین) در اشکال (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

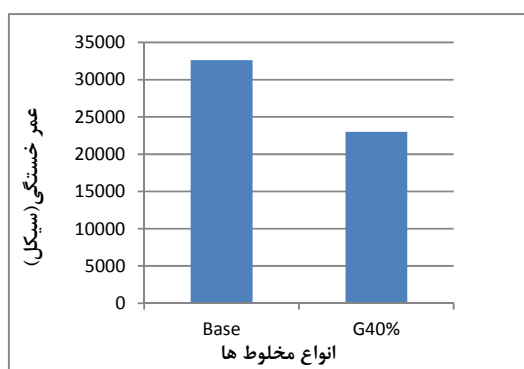
این آزمایش برای یک سطح کرنش (۶۰۰ میکرو استرین) برای تمامی نمونه‌ها و یک سطح کرنش دیگر (۷۰۰ میکرو استرین) برای دو نمونه شاهد و نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد پلیمری در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام گرفت. نتایج آزمایش در جداول (۳) و (۴) آورده شده است. نمودار این جداول در اشکال (۷) و

جدول ۳. نتایج آزمایش خستگی انواع مخلوط‌های آسفالتی

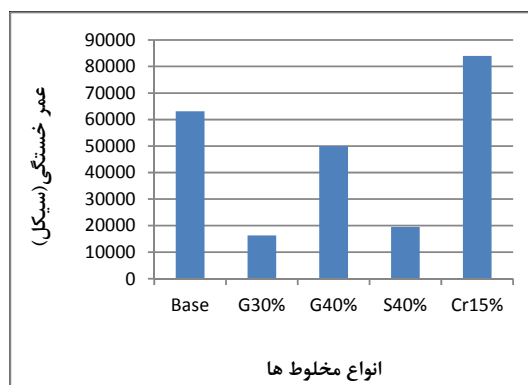
دما (°C)	عمر خستگی (سیکل) N_{FS0}	سطح کرنش (μ Strain)	مشخصات نوع مخلوط
۲۰/۷	۱۶۲۶۰	۶۰۰	نمونه حاوی ۳۰ درصد گوگرد پلیمری
۲۰/۸	۱۹۵۰۰	۶۰۰	نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد
۲۰/۸	۴۹۹۶۰	۶۰۰	نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد پلیمری
۲۰/۸	۶۳۰۹۰	۶۰۰	نمونه شاهد
۲۰/۷	۸۳۹۹۰	۶۰۰	نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک

جدول ۴. نتایج آزمایش خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۴۰ درصد گوگرد پلیمری و نمونه شاهد

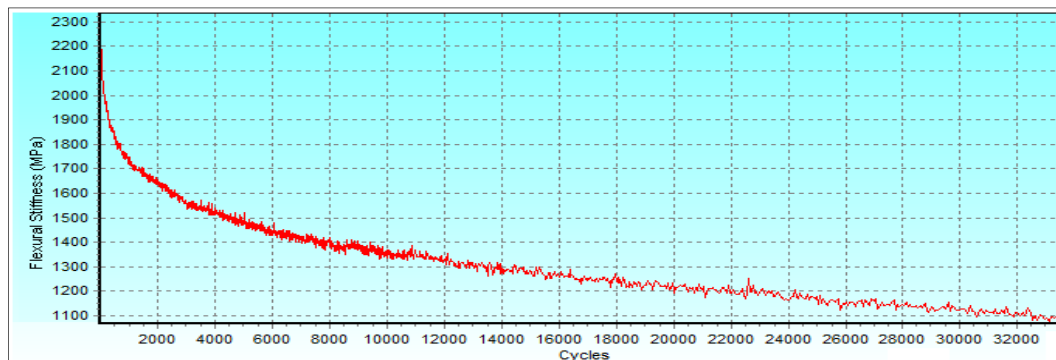
دما (°C)	عمر خستگی (سیکل) N_{FS0}	سطح کرنش (μ Strain)	مشخصات نوع مخلوط
۲۰/۷	۲۳۰۰۰	۷۰۰	نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد پلیمری
۲۰/۶	۳۳۶۲۰	۷۰۰	نمونه شاهد



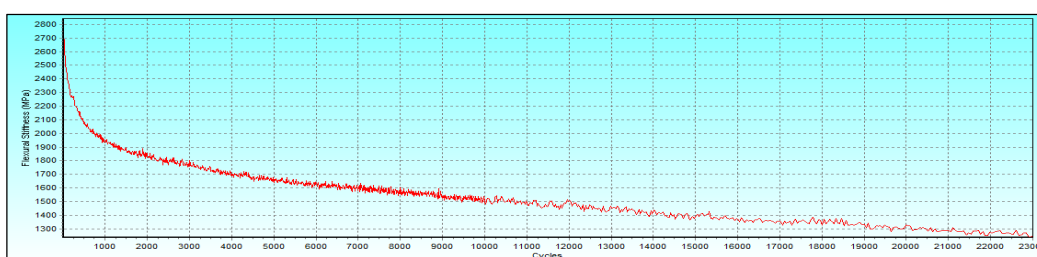
شکل ۸. نمودار عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی برای سطح کرنش ۷۰۰ میکرو استرین



شکل ۷. نمودار عمر خستگی انواع مخلوط‌های آسفالتی برای سطح کرنش ۶۰۰ میکرو استرین



شکل ۹. نمودار خستگی خمشی در مقابل تعداد سیکل برای نمونه شاهد و کرنش ۷۰۰ میکرواسترین



شکل ۱۰. نمودار خستگی خمشی در مقابل تعداد سیکل برای نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد پلیمری و کرنش ۷۰۰ میکرو استرین

۵- نتیجه گیری

کنش قیر و گوگرد می‌باشند که تعیین میزان دقیق تأثیرگذاری این عوامل مختلف در بهبود و ارتقا رفتار مخلوط‌های آسفالتی به تحقیقات بیشتر نیاز دارد. در این تحقیق با توجه به محدوده بارگذاری آزمایش‌های انجام شده در خصوص تأثیر گوگرد پلیمری بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی نتایج ذیل بدست آمده است.

(۱) نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد به مراتب عمر خستگی کمتری از نمونه حاوی ۴۰ درصد گوگرد پلیمری دارد. که این نتیجه قابل انتظار بود (گوگرد پلیمری همانطور که از اسمش مشخص است گوگرد اصلاح شده با پلیمر بوده و پلیمر در افزایش عمر خستگی مخلوط‌ها تأثیر بسزایی دارد).

(۲) عمر خستگی نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک به طور قابل ملاحظه‌ای از تمامی نمونه‌ها بیشتر بود.

(۳) عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی برای مخلوط‌های حاوی گوگرد پلیمری کمتر از نمونه شاهد بوده است و این تفاوت در عمر خستگی می‌توان مربوط به این باشد که مخلوط‌های حاوی گوگرد پلیمری مخلوط‌های سخت‌تری نسبت به مخلوط شاهد بوده و همین امر باعث ایجاد فضای خالی بیشتری (به دلیل تراکم به وسیله غلتک دستی) در مخلوط‌های حاوی گوگرد پلیمری

یکی از افزودنی‌های قیر در جهت بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، گوگرد پلیمری می‌باشد که با توجه به منابع مازاد تولید آن، کاربرد وسیعی در تهیه مخلوط‌های آسفالتی پیدا کرده است. ارتقا و بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی و کاهش هزینه‌های تهیه آسفالت، دو دلیل اساسی برای استفاده از گوگرد پلیمری در ساخت روسازی‌های آسفالتی راه‌ها می‌باشد. بطوریکه دلیل دوم به نسبت قیمت گوگرد به قیر بستگی دارد که قیمت قیر حداقل پنج برابر قیمت گوگرد است. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی منحصر به فرد گوگرد و قیر باعث گردیده است تا عوامل مختلفی بر ویژگی مخلوط‌های آسفالتی تأثیرگذار باشند. تحقیقات صورت گرفته در زمینه تأثیر گوگرد بر قیر و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد که عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگرد پلیمری افزایش می‌یابد. انحلال پذیری گوگرد به نوع قیر و منشأ آن بستگی دارد و هنگامی که مخلوط قیر-گوگرد در دمای محیط سرد می‌شود، تبلور مجدد گوگرد‌های حل شده را می‌توان مشاهده کرد. با این وجود امکان جلوگیری و یا کاهش تبلور مجدد از طریق بالا بردن زمان اختلاط امکان پذیر است. نوع و میزان ماده افزودنی و نیز تأثیر گوگرد پلیمری بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی قیر از جمله عوامل موثر در اندر

8. Fatigue Cracks
9. Bureau of Mines
10. Actuator
11. Linear Variable Differential Transducer
12. Control and Data Acquisition System

۷- مراجع

- خاوندی، علیرضا و عامری، محمود (۱۳۹۳). تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در کرنش‌های کم با استفاده از آزمایش تیر خمشی با فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز. *فصلنامه مهندسی حمل و نقل*، دوره ۵، شماره ۴، ۴۹۴-۴۸۵.

- قاسم زاده، حسن و غنی زاده، علیرضا (۱۳۹۱). بررسی تأثیر خطای برآورد ورودی‌های طراحی روسازی بر روی خطای پیش‌بینی عمر روسازی با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی مونت کارلو. *نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی*، مشهد، سال ۲۳، شماره ۲.

-T.L.Beatty, K.Dunn, E.T.Harrigan, K.Stuart, and H.Weber, (2007). Field Evaluation of SulfurExtended Asphalt Pavements. Transportation Research Record 1115, *Journal of the Transportation Research Board*, 161-170.

- Kennepohl, G.J., Logan, A. and Bean, D.C., (2015). Conventional paving mixes with sulfur-asphalt binders Proc. *Association Asphalt Paving Technology*, 44: 485.

- Imants Deme., (2012). Sulfur as an Asphalt Diluent and a Mix Filler. *Advances in Chemistry Series, American Chemical Society*, Vol.4, No. 165.

-W.C. McBee, T.A. Sullivan, and J.O. Izatt., (1980). State-of-the-Art Guideline Manual for Design, Quality Control, and Construction of Sulfur-Extended Asphalt (SEA) Pavements. FHWA IP-80-14, *Implementation Package, Prepared by US Department of Interior Bureau of Mines with The Sulphur Institute*.

می‌شود. از آنجا که درصد فضای خالی عامل بسیار مهمی در تعیین عمر خستگی است، بنابراین دقت زیادی لازم است تا تمامی نمونه‌ها دارای فضای خالی یکسانی باشند. در ضمن کرنش‌های انتخابی نسبتاً بالا بوده و برای بدست آوردن نتایج بهتری جهت مقایسه عمر خستگی نیاز به انجام آزمایش در سطح کرنش‌های پایین‌تر است. نکته دیگر این است که تعداد نمونه‌های آزمایش شده محدود است و با این تعداد محدود نمی‌توان قضاوت مهندسی مناسبی انجام داد.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Sulphur-Asphalt Interaction
2. Orthorhombic
3. Monoclinic
4. Chemically bonded sulphur
5. Dissolved in asphalt
6. Crystalline sulphur
7. Photomicrograph

- Bissada, A., Al-Hashimi, K. and Abushihada, A., (2005). Prediction of pavement deformation in sulphur extended asphalt pavements using the shell creep test. Proc. 1st Arabic Regional Conf. *Sulphur its Usages in Arabic World*, Safat, Kuwait, 241.

-Schmidt, M. (2017). The scientific basis for practical applications of elemental sulfur. *Symposium Sulfur Utilization*, New Orlean.

-McBee, W.C. and Sullivan, T.A., (2012). Sulfur utilization in asphalt paving materials. *New Uses of sulphur II*, Advances in Chemistry Series, 165: 135.

-Papirer, E. and Fritschy, G. (2015). Modification of the surface properties of bitumen and asphaltenes following treatment with sulfur at 140°C. *Fuel Research Board*, 60: 670.

-Courval, G.J. and Akili. W. (2014). Sulfur asphalt binder properties by the sliding plate rheometer. *Association Asphalt Paving Technology*, 51: 222.

-G.L. Crawford and W.F. Boles (2002). Sulfur-Extended Asphalt Close-out Summary of Project Activities. *FHWA-DP-54*, Demonstration Project No. 54.

-NCHRP,(2010). Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt. *Transportation Research Board*, NCHRP Report 646.

Experimental Reviews the Effects of Sulfur Polymer on Fatigue Behavior Mixed Asphalt

Mahmoudreza Keymanesh, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Jalal Ayoubinejad, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Mojtaba Torabi Mirzaei, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

E-mail: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTREACT

Today, most road bitumens in the world are modified with the help of various additives due to some inherent weaknesses of bitumen and the need to increase their range of use. In this regard, Sulfur polymer as an additive for asphalt modifier direct effect of increasing the strength of asphalt and improve its fatigue behavior. Adding sulfur to the Bitumen, causing changes in the mechanical properties of modified rheological properties of bitumen and asphalt mixtures. In this study, to evaluate fatigue behavior mixture of sulfur-containing polymer with other types of asphalt mixtures typical of different amounts of sulfur polymer (30%, 40% and 50%) to build a prototype, and is used for testing fatigue loading deformation control Upload a sine wave to determine the fatigue life of the asphalt According to standard (AASHTO-T321) was selected. Finally, the results of this study indicate that the fatigue life (Nf50) of the sample with 40% sulfur polymer is 49,960 cycles and the life of the sample with 40% sulfur is 19,500 cycles at the strain level of 600 microstrain.

Keywords: Sulfur Base Asphalt, Fatigue Life, Sulfur Polymer, Fatigue Testing