

ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط های آسفالتی فرودگاهی حاوی گوگرد

سید فرهاد چاوشیان نائینی^۱، محمد گلستانه^{۲*}، فریدون خسروی^۳

۱- کارشناس ارشد راه و ترابری دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲- مربی و پژوهشگر، ۳- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۶/۰۵/۰۳، پذیرش: ۹۶/۰۷/۱۶)

چکیده

صنعت حمل و نقل هوایی به ویژه در بخش نظامی به عنوان یکی از این مراکز حساس جهت انجام عملیات کمک‌رسانی و دفع حملات دشمن از تسهیلات ضروری در مدیریت بحران به شمار می‌رود که از جمله این تسهیلات، کارایی مناسب روسازی باند فرودگاه به منظور نشست و برخاست به موقع هواپیماها می‌باشد. با توجه به این که تخریب روسازی باند فرودگاه‌ها جهت اختلال در پروازها، از جمله اهداف اولیه دشمن به منظور تهاجمات بعدی است، در این تحقیق با هدف تعمیر سریع روسازی آسفالتی، از گوگرد به عنوان جایگزین بخشی از قیر در آسفالت استفاده شده و عملکرد مخلوط در مقابل خرابی شیارشدگی در زمان‌های کوتاه معینی پس از ساخت مخلوط مورد ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که گوگرد به دلیل خصوصیت ویژه‌ای که دارد به مرور زمان در پی کاهش دما به سرعت موجب گیرش مخلوط شده و مقاومت شیارشدگی را به شدت افزایش دهد.

کلید واژه‌ها: پدافند غیرعامل، تعمیر سریع، مخلوط آسفالتی، گوگرد، شیارشدگی

Evaluation of Rutting Performance of Airport Sulfur-Containing Asphalt

S. F. Chavoshian Naini, M. Golestaneh*, F. Khosravi

Imam Hossein University

(Received: 25/07/2017; Accepted: 08/10/2017)

Abstract

The air transport industry, especially in the military sector, as one of these critical centers for carrying out operations to help and repel enemy attacks is considered as an essential facility for crisis management. One of these facilities is the proper performance of airport runway pavement for timely landing and takeoff of airplanes. Since the destruction of the airport runway pavement to disrupt the flights is one of the primary goals of the enemy for the next attacks, in this research, sulfur is used as a substitute for bitumen in asphalt with the aim of quickly repairing of asphalt pavement. The performance of the mixture against rutting damage has been evaluated in a certain short time after making the mixture. The evaluations show that sulfur, due to having special characteristics, causes the rapid preparation and hardening of the mixture by temperature drop. It increases the rutting resistance sharply.

Keywords: Passive Defense, Rapid Repair, Asphalt Mixture, Sulfur, Rutting

۱. مقدمه

توسعه پایدار نیازمند سرمایه‌گذاری هوشمند بر مبنای واقعیت‌های موجود است که بخش اعظمی از این واقعیت‌ها به دلیل عدم قطعیت، ریسک محسوب می‌شوند. در طراحی‌های مهندسی، ریسک حوادث طبیعی و مخاطرات ذاتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد اما از واقعیت غیر قابل انکاری به نام جنگ غفلت می‌گردد و به اصول پدافند غیرعامل که ضامن پایداری و حفظ کبان ملی است، توجه کافی نمی‌شود. پدافند غیرعامل مجموعه اقدامات غیر مسلحانه‌ای است که موجب کاهش آسیب‌پذیری نیروی انسانی، ساختمان‌ها، تأسیسات و تجهیزات موجود در مقابل عملیات خصمانه و مخرب دشمن می‌شود [۱].

در راستای پیشبرد اهداف بعدی دشمن، فرودگاه‌ها به عنوان مراکز حیاتی کشور در اغلب جنگ‌های نظامی مورد هدف قرار گرفته می‌شوند. روسازی باند فرودگاه به عنوان بستر مناسب جهت نشست و برخاست هواپیماها، نقش مهمی در کارایی این مرکز ایفا خواهد نمود و با وجود آنکه در طراحی‌ها، روسازی فرودگاهی از ضخامت بالایی برخوردار می‌شوند، ولی این عمل موجب عدم آسیب‌پذیری و تخریب آن در برابر حملات دشمن نخواهد شد و در اکثر تهدیدات، دچار خرابی‌هایی از نوع چاله و ترک‌خوردگی می‌شوند [۲]. از جمله اقدامات اولیه پس از حمله دشمن، آماده‌سازی باند تخریب شده جهت بهره‌برداری مجدد از فرودگاه خواهد بود که پس از جنگ جهانی دوم تحقیقات زیادی را متوجه خود ساخت. اکثر این تحقیقات امروزه در قالب فرآیندهای تعمیر سریع جمع‌آوری شده و از آنجا که در این فرآیندها، مدت زمان انجام کار از اولویت بالایی برخوردار است، تلاش محققین بر آن است تا با انتخاب روش تعمیر مناسب، علاوه بر فراهم نمودن مقاومت کافی، زمان مورد نیاز برای اتمام تعمیرات را به حداقل ممکن کاهش دهند [۳]. نیروی هوایی ایالات متحده آمریکا حداکثر زمان بسته شدن باند تا بازگشایی مجدد آن جهت نشست و برخاست هواپیما را چهار ساعت معین نموده است [۴].

نخستین تلاش‌های برای تعمیر باند پرواز فرودگاه در قالب یک روش ساخت سریع فرودگاه نظامی بود که در آن از الوار فولادی سوراخ شده به جای دال بتنی پیش ساخته، استفاده می‌شد که به دلیل عملکرد نامناسب آن، این طرح با شکست مواجه گردید [۵]. در سال ۲۰۰۵ نیروی هوایی ایالات متحده طی آزمایش تحقیقاتی به منظور تعمیر سریع باند فرودگاهی از روکش‌های پلیمری تقویت شده^۱ و روکش‌های فایبرگلاس^۲ در یکی از فرودگاه‌های کالیفرنیا و چند فرودگاه دیگر استفاده نمود.

پس ارزیابی عملکرد خزشی به وسیله بارگذاری معادل هواپیماهای نظامی، ضمن اعلام عملکرد مقاومتی تقریباً یکسان برای هر دو پوشش، سبک‌تر بودن و زمان کمتر جهت بهره‌برداری را مهم‌ترین مزایای روکش‌های پلیمری تقویت شده نسبت به فایبرگلاس معرفی نمود [۶]. کرایوس و وایمن [۲] رزین‌ها را به عنوان افزودنی جهت ترمیم سریع ترک‌ها و نواحی پوسته‌شدگی آسفالت معرفی کردند. رزین پلی اورتان در متوسط زمانی دو ساعت مسیر را برای عبور ترافیک آماده می‌نماید. مهندسين ارتش آمریکا از آسفالت سرد جهت تعمیر چاله‌های کوچک باند پرواز فرودگاه با استفاده از هفت نوع ماده متفاوت به منظور بهبود خواص چسبندگی در مخلوط خرده آسفالت موجود، استفاده کردند. با انجام آزمایش‌های شیار شدگی و خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده در آزمایشگاه، به بررسی عملکرد مقاومتی آن‌ها در برابر این خرابی پرداخته و سپس آزمایش شیار شدگی را با ماشین معادل شده بارگذاری هواپیما در باند فرودگاه انجام دادند. مخلوط‌های آسفالت سرد حاوی افزودنی، بهترین عملکرد را در برابر این خرابی از خود نشان دادند، ولی در حالت کلی استفاده از این نوع مخلوط، برای تعمیر فرودگاه توصیه نشد [۷].

در زمینه تعمیر سریع روسازی‌های بتنی نیز روش‌هایی از جمله استفاده از دال بتنی پیش ساخته، افزودنی‌های زودگیر کننده سیمان، پوزولان و... توسط محققین مطرح شده است [۸-۱۰]. جیمی گرین و همکاران از محققین دانشگاه تگزاس آمریکا از انواع رزین‌های پلیمری شامل پلی اورتان آروماتیک، پلی اورتان آلیفاتیک، رزین فوران، پلیمر سدیم سیلیکات، رزین پلی‌استر و پلی اورتان به منظور کاهش زمان تعمیرات خرابی فرودگاهی در کنار داشتن کارایی مناسب بتن، استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که در به‌کارگیری بتن پلیمری علی‌رغم ایجاد کاهش زمان کارایی، مزیت‌هایی همچون انعطاف‌پذیری و کاهش زمان تعمیر به وجود آمده است. زمان تعمیر لازم با استفاده از پلیمر پلی اورتان به نسبت سایر افزودنی‌های پلیمری کمتر بود [۴].

از آنجا که روسازی‌های فرودگاهی تحت بارهای سنگین قرار می‌گیرند، عمده نگرانی مهندسين در به وجود آمدن خرابی شیار شدگی است. تحقیقات در زمینه روش تعمیر سریع روسازی، عمدتاً بر پایه مقایسه مقاومت شیار شدگی استوار می‌باشد [۷]. در این تحقیق به منظور افزایش سختی روسازی آسفالتی و به تبع بهبود مقاومت شیار شدگی از گوگرد به عنوان جایگزین بخشی از چسباننده آسفالت (قیر) استفاده شده است. مهم‌ترین دلیل انتخاب گوگرد آن است که به سبب ویژگی ذاتی خود، هنگامی که دمای آن از ۱۱۸ درجه سلسیوس بیشتر شود، فوراً ذوب شده

^۱ Fiber Reinforced Polymer

^۲ Folded Fiberglass Mat

شاهد و ۸/۵ برابر نمونه پلیمری نشان داد. همچنین نتایج آزمون تیر خستگی و کشش غیر مستقیم نیز نشان داد که مخلوط حاوی گوگرد عملکرد مناسبی در مقابل این دو پدیده داشته و در حساسیت رطوبتی بهتر از سایر نمونه‌ها عمل می‌کند [۱۴]. گوگرد را می‌توان به صورت مستقیم به مخلوط کن قیر و سنگ‌دانه افزود و با ماشین‌آلات متداول راه‌سازی پخش نمود و به منظور جلوگیری از تولید گاز هیدروژن سولفور می‌بایست حداکثر دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس در هنگام تولید و پخش، رعایت گردد. گوگرد در ماسه آسفالت جهت فراهم آوردن سختی بیشتر استفاده می‌شود. این ماده قابلیت افزایش مدول برجهنگی، مقاومت در برابر ترک خستگی، ترک حرارتی، شیار شدگی و لغزندگی چرخ‌ها را دارد [۱۱]. با وجود فناوری تولید آسفالت با دمای پایین‌تر (آسفالت گرم) علاوه بر کاهش مصرف انرژی، سرعت بازگشایی مسیر بر روی ترافیک نیز افزایش می‌یابد [۱۵]. از آنجا که گوگرد قابلیت کاهش ویسکوزیته قیر و در نتیجه فراهم‌سازی بهبود توان پوشش دهی قیر بر مصالح سنگی را دارد، در این تحقیق به منظور افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پایدار و همچنین تولید آسفالت با دمای پایین‌تر و در پی آن تسریع در خنک‌سازی و گیرش مخلوط پخش شده، آسفالت گرم اصلاح شده با گوگرد تولید و ارزیابی‌های لازم، با در نظرگیری اهداف پروژه انجام گردید.

۲. روش تحقیق

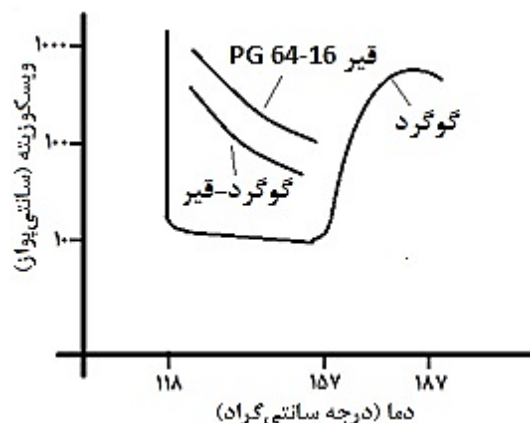
۲-۱. مصالح مصرفی (قیر-گوگرد-سنگ‌دانه)

قیر مصرفی از نوع قیر خالص PG64-16 (درجه نفوذ ۷۰-۶۰) است که مشخصات فیزیکی آن مطابق جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی قیر خالص مصرفی

| مقدار | حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴ | روش آزمایش | خصوصیت |
|-------|-------------------------|------------|---|
| ۱/۰۳ | --- | ASTM D-۷۰ | وزن مخصوص در دما ۲۵°C (گرم بر سانتی‌متر مکعب) |
| ۶۴ | ۶۰-۷۰ | ASTM D-۵ | درجه نفوذ (دهم میلی‌متر) |
| ۵۴ | ۴۹-۵۶ | ASTM D-۳۶ | نقطه نرمی (درجه سلسیوس) |
| ۱۰۲ | حداقل ۱۰۰ | ASTM D-۱۱۳ | انگمی (سانتی‌متر) |
| ۳۰۵ | حداقل ۲۳۲ | ASTM D-۹۲ | نقطه اشتعال (درجه سلسیوس) |
| ۳۱۷ | --- | ASTM D-۷۰ | نقطه احتراق (درجه سلسیوس) |

و ساختمان شیمیایی آن شکسته می‌شود و قابلیت ترکیب آن با هیدروکربن‌های اشباع نشده قیرها، به شدت افزایش می‌یابد و کندروانی تا رسیدن به دمای ۱۵۷ درجه سلسیوس کاهش و در دمای بالاتر از ۱۵۷ درجه سلسیوس، تولید هیدروژن سولفور موجب افزایش ناگهانی ویسکوزیته می‌شود (شکل ۱). این خصوصیت گوگرد باعث شده تا وقتی این ماده در دمایی بین ۱۱۸ تا ۱۵۷ درجه سلسیوس به قیر اضافه می‌شود، با کاهش کندروانی و افزایش قدرت پوشش دهی سنگ‌دانه‌ها توسط قیر گشته و به تبع مصرف قیر را کاهش دهد. از طرفی وقتی دمای مخلوط از ۱۱۸ درجه سلسیوس کمتر شود، گوگرد با سرعت بیشتری سفت شده و منجر به افزایش سختی آسفالت گردد [۱۱]. استفاده از این ویژگی می‌تواند باعث کاهش زمان تعمیر و از طرفی افزایش مقاومت خزشی (شیارشدهگی) لازم در روسازی آسفالتی فرودگاه‌ها شود. امروزه به لحاظ زیست‌محیطی و انتشار گازهای سمی در هنگام ذوب گوگرد، نظیر هیدروژن سولفید، گوگرد دی‌اکسید و...، استفاده از این ماده در روسازی آسفالتی محدود گشته است [۱۲].

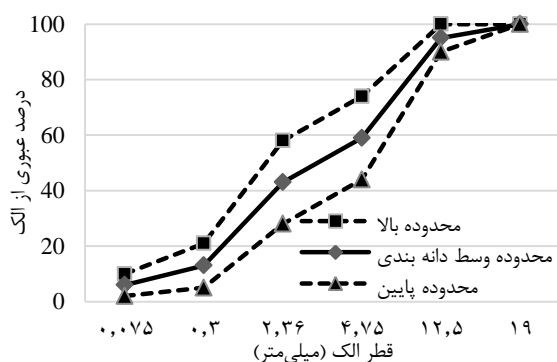


شکل ۱. گرانروی قیر، گوگرد و ترکیب هر دو-دما [۱۱]

ویتالالی و همکاران [۱۳] مقادیر ۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد گوگرد نسبت به وزن قیر را به آسفالت افزودند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار گوگرد مقاومت شیارشدگی مخلوط افزایش داشته و مقادیر عمق شیارشدگی مخلوط حاوی ۴۰ درصد گوگرد روند تقریباً ثابتی را در تعداد سیکل‌های بالا از خود نشان می‌دهد. در تحقیق دیگری از گوگرد به میزان ۴۰ درصد وزنی قیر در آسفالت نیم گرم استفاده نمودند و عملکرد این آسفالت با دو نوع آسفالت داغ تهیه شده با قیر خالص و پلیمر استارین بوتادین استارین به عنوان یکی از بهترین افزودنی‌های پلیمری شناخته شده، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج آزمون تغییر شکل پایدار، مقاومت شیارشدگی مخلوط حاوی گوگرد را ۱۷ برابر مخلوط

جدول ۳. مشخصات مصالح سنگی مصرفی

| مقدار | حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴ | | روش آزمایش | خصوصیت |
|-------|-------------------------|------|------------|---|
| | رویه | آستر | | |
| ۲۲/۳ | ۴۰ | ۳۰ | AASHTO T۹۶ | حداکثر سایش به روش لوس آنجلس (درصد) |
| ۱۶ | ۳۰ | ۲۵ | BS ۸۱۲ | حداکثر ضریب تورق (درصد) |
| ۹۳ | ۸۰ | ۹۰ | ASTM D۵۸۲۱ | حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴ (درصد) |
| ۲/۲ | ۲/۵ | ۲/۵ | AASHTO T۸۵ | حداکثر جذب آب مصالح درشت‌دانه (درصد) |
| ۲/۴ | ۲/۸ | ۲/۵ | AASHTO T۸۴ | حداکثر جذب آب مصالح ریزدانه (درصد) |
| ۲/۵۹ | - | - | ASTM C۱۲۷ | وزن مخصوص واقعی مصالح درشت‌دانه (گرم بر سانتی‌متر مکعب) |
| ۲/۳۲ | - | - | ASTM C۱۲۸ | وزن مخصوص واقعی مصالح ریزدانه (گرم بر سانتی‌متر مکعب) |



شکل ۲. نمودار حدود بالا، پایین و وسط دانه‌بندی شماره ۴

۲-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها و شرح آزمایش‌ها

طرح اختلاط نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D1599 انجام گردید. سنگ‌دانه‌ها با دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس در گرم‌خانه حرارت داده شده تا کاملاً خشک شوند. با توجه به بررسی‌های انجام شده در تجربیات استفاده از گوگرد، در این تحقیق نیز با هدف افزایش مقاومت شیارشدگی، گوگرد از مقادیر مختلفی تا میزان ۷۰ درصد جایگزین قیر شده است. در این راستا جهت تعیین قیر بهینه، ترکیب قیر-گوگرد در درصدهای ۵/۵، ۶، ۶/۵، ۷ و ۷/۵ نسبت به وزن مخلوط آسفالتی با مقادیر ۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد وزن چسباننده از گوگرد جایگزین قیر گشته و با سنگ‌دانه در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس مخلوط و در داخل استوانه استاندارد مارشال با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶/۲۵ سانتی‌متر متراکم می‌شوند. تعداد ضربات برای شبیه‌سازی ترافیک سنگین ۷۵ ضربه در هر دو طرف نمونه است. مقادیر قیر

از گوگرد به عنوان افزودنی آسفالت بهبود دهنده مخلوط استفاده شد که خصوصیات آن در جدول (۲) قابل مشاهده است. اندرکنش بین گوگرد و قیر در دمای بالا موجب هیدروژن زدایی شده و سخت شدن قیر می‌شود. در این شرایط گوگرد سبب زنجیره‌ای شدن قیر (پلیمریزاسیون) به صورت الاستومر (پلی سولفور) و در نتیجه ارتجاعی شدن آن می‌گردد. به این صورت که وقتی اتم گوگرد در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس وارد ساختار شیمیایی مولکول می‌شود، با گروه نفتن آروماتیک‌های موجود در قیر، ترکیب و باعث تشکیل پلی‌سولفید می‌گردد. پلی‌سولفیدها از نظر قطبیت در گروه آروماتیک‌ها جای می‌گیرند. این عمل موجب نرم‌تر شدن قیر و افزایش خاصیت الاستیسیته خواهد شد. بنابراین، این مخلوط در دمای پایین شکنندگی قیرهای خالص را ندارد [۱۶].

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی گوگرد مصرفی

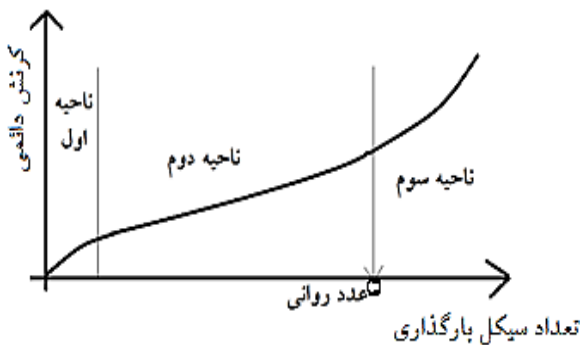
| مقادیر | خصوصیات |
|----------|-----------------------------------|
| ۱۱۸ | نقطه ذوب (درجه سلسیوس) |
| ۱/۹۲ | وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب) |
| ۲۱/۲ | سطح مخصوص (مترمربع بر گرم) |
| جامد | حالت |
| زرد روشن | رنگ |

مصالح سنگی ۹۰ تا ۹۵ درصد وزنی و ۷۵ تا ۸۵ درصد حجمی مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد. ویژگی‌های فیزیکی و معدنی مصالح سنگی در مقاومت شیارشدگی و تغییر شکل دائم مخلوط‌های آسفالتی تأثیر زیادی دارد. فیلرهای معدنی به شکل موسوم در مخلوط آسفالت، به عنوان پرکننده فضای خالی بین مصالح سنگی استفاده می‌شوند، ولی باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط می‌شوند. افزودن سیمان به عنوان فیلر در آسفالت، مقاومت خزشی آن را افزایش داده و با افزایش درصد این ماده در آسفالت این مقاومت نیز روند افزایشی می‌یابد [۱۷]. در این تحقیق بر اساس تجربیات سایر تحقیقات، از سیمان پرتلند تیپ دو به میزان ۶ درصد وزن مصالح سنگی استفاده شده است [۱۸ و ۱۹]. خصوصیات سیمان مصرفی در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد. مصالح سنگی مصرفی، از نوع شکسته آهکی معدن اسب‌چران، واقع در شرق شهرستان تهران تهیه شده است که مشخصات آن به شرح جدول (۴) می‌باشد. جهت دانه‌بندی مصالح سنگی نیز از منحنی دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران برای آستر و رویه، استفاده شده است (شکل (۲)).



شکل ۵. انجام آزمایش مدول برجهندگی بر روی نمونه‌ها

به منظور ارزیابی مقاومت شیار شدگی، آزمایش خزش دینامیکی به وسیله دستگاه UTM5 بر روی نمونه‌های آسفالتی تازه ساخت انجام گرفت که در آن نمونه‌های ساخته شده بلافاصله پس از ساخت به مدت زمان ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری شده و تحت آزمایش خزش دینامیکی قرار گرفتند. جهت مقایسه عملکرد شیار شدگی در شرایط دمای پایین‌تر، این آزمایش پس از عمل‌آوری ۶۰ دقیقه‌ای بلافاصله بعد از ساخت، در دمای ۲۵ درجه نیز انجام گردید. بارگذاری از نوع نیمه سینوسی با اعمال تنش ۴۵۰ کیلو پاسکال به صورت ۰/۵ ثانیه بارگذاری و ۱/۵ ثانیه استراحت انجام شد [۲۱]. خروجی این آزمایش به صورت منحنی کرنش تجمعی در برابر سیکل‌های بارگذاری مطابق شکل (۶) ارائه و به ۳ ناحیه تقسیم می‌شود. در ناحیه اول تغییر مکان‌های دائم به طور ناگهانی روی هم انباشته می‌شوند، در ناحیه دوم شیب نمودار به مقدار ثابتی می‌رسد و در ناحیه سوم دوباره شیب تغییر مکان دائم افزایش می‌یابد و مقدار تغییر مکان دائم به شدت روی هم انباشته می‌شود. تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عدد روانی شناخته می‌شود که معیاری برای مقایسه مقاومت شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی است [۲۲].



شکل ۶. کرنش تجمعی کل - سیکل بارگذاری

بهینه یافت شده از این آزمایش برای نمونه‌های ۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد گوگرد، به ترتیب برابر ۴/۹، ۶/۴، ۷، ۷/۳ و ۷/۴ درصد حاصل شد. به منظور اظهار نظر اولیه در مورد مقاومت تغییر شکل دائم مخلوط، مقاومت مارشال نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با قیر بهینه نیز ارائه می‌شود. برای شبیه‌سازی بهتر تراکم غلتکی در کارگاه، نمونه‌هایی استوانه‌ای در درصد‌های قیر بهینه به دست آمده، با استفاده از دستگاه ژیراتوری روسازی ممتاز ساخته شدند (شکل ۳)، [۲۰]. با توجه به آنکه هدف اصلی این طرح کاهش زمان تعمیر روسازی می‌باشد، استفاده از آسفالت با ضخامت کمتر می‌تواند موجب کاهش زمان لازم جهت سرد شدن آسفالت و جایگزینی بخشی از آسفالت با مصالح موجود در اساس باشد. از آنجا که مدول برجهندگی یکی از پارامترهای اصلی طراحی ضخامت روسازی آسفالتی است، می‌توان با استفاده از گوگرد در آسفالت و ارزیابی این پارامتر، به طراح کمک نمود تا آسفالت با ضخامت کمتری در نظر گیرد. مدول برجهندگی نمونه‌های ساخته شده مطابق با استاندارد ASTM D-۸۲ 4123، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و با اعمال بار نیمه سینوسی ۴۰۰ کیلو نیوتن و دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه (۰/۹ ثانیه استراحت)، اندازه‌گیری شد. این آزمایش با دستگاه UTM5 انجام گردید (شکل ۵).

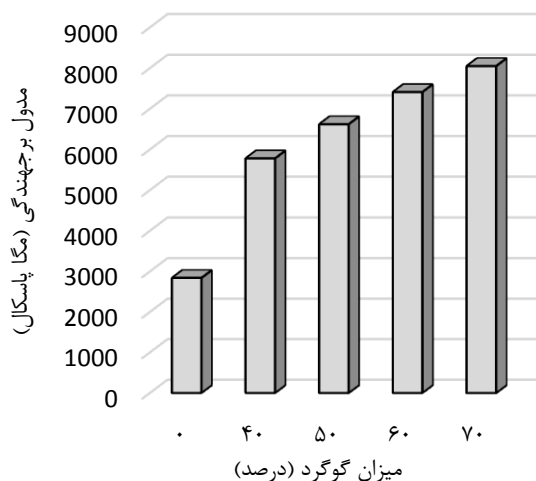


شکل ۳. نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده توسط دستگاه ژیراتوری



شکل ۴. انجام آزمایش مقاومت مارشال بر روی نمونه‌ها

پلی‌سولفید در قیر موجب افزایش خاصیت الایسیسته و در نهایت مدول برجهندگی گشته است. بنابراین به منظور تسریع در بازگشایی باند فرودگاه، می‌توان از آسفالت با ضخامت کمتری استفاده کرد.



شکل ۸. مدول برجهندگی

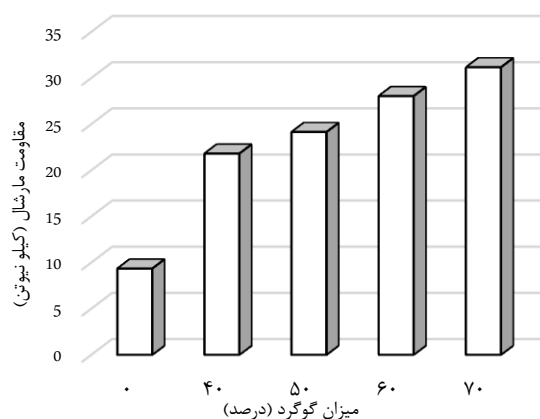
۳-۳. خزش دینامیکی

در این آزمایش مخلوط‌های آسفالتی از شرایط مهار جانبی واقعی بهره نمی‌برد، بنابراین، تغییر مکان بیشتری در مقابل اعمال بار از خود نشان می‌دهد [۱۴]. شکل‌های (۹ و ۱۰) خروجی دستگاه آزمایش خزش دینامیکی و جدول (۴)، عدد روانی مستخرج از نمودارهای مذکور را نشان می‌دهد. با افزایش زمان عمل‌آوری مخلوط شروع به سخت شدن می‌کند، بنابراین، نسبت مقاومت شیارشدگی نمونه‌های گوگرددار در دمای ۵۰ درجه سلسیوس پس از گذشت دو ساعت و نیم ساعت پس از ساخت، ۳۰ تا ۳۵ درصد افزایش می‌یابد. با مقایسه نتایج حاصل از عمل‌آوری ۶۰ دقیقه در دماهای ۲۵ و ۵۰ درجه سلسیوس می‌توان دریافت که دمای محیط تأثیر زیادی بر مقاومت شیارشدگی مخلوط‌ها خواهد داشت، به گونه‌ای که به طور مثال در میزان ۴۰ درصد گوگرد، گیرش سریع ترکیب قیر و گوگرد در دمای ۲۵ درجه موجب شده نسبت مقاومت در دو دما بیش از سه برابر شود و برای سایر درصد‌های به دلیل توقف دستگاه در میزان ۲۰,۰۰۰ سیکل معین شده، عدد روانی تعیین نگردیده است. همچنین با مقایسه دو مخلوط ۰ و ۴۰ درصد گوگرد در دمای ۲۵ درجه سلسیوس می‌توان دریافت که گوگرد باعث ۵/۷ برابری این مقاومت شده و این نسبت برای درصد‌های بالاتر به تبع بیشتر از این مقدار خواهد بود، چرا که گوگرد روند افزایشی را برای این مقاومت ایجاد نموده است (جدول ۵).

۳. نتایج و بحث

۳-۱. مقاومت مارشال

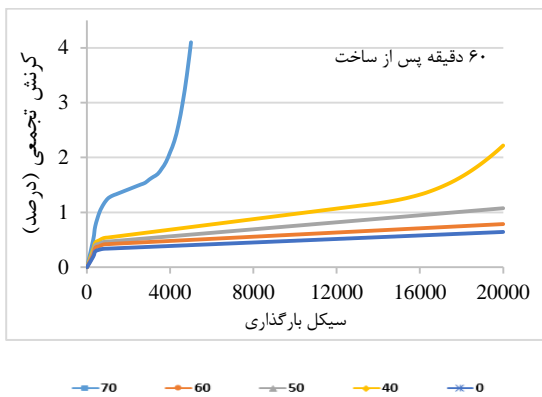
نتایج حاصل از مقاومت مارشال در نمودار شکل (۷) ارائه شده است. افزودن گوگرد موجب ایجاد روند افزایشی در مقاومت شیارشدگی شده، به طوری که در نمونه‌های حاوی ۴۰ و ۷۰ درصد گوگرد، مقاومت مارشال نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲/۳ و ۳/۳ برابر شده است. گوگرد موجود در قیر به سبب ویژگی ذاتی خود، در دمای پایین‌تر از ۱۱۸ درجه سلسیوس موجب سخت‌شدگی قیر و در نهایت مخلوط آسفالتی می‌گردد. این سخت‌شدگی موجب افزایش مقاومت مارشال نیز می‌شود و همان‌طور که در نتایج قابل مشاهده است، با افزایش این افزودنی سختی و مقاومت مارشال بیشتر شده و در نتیجه موجب افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل دائم (شیارشده) می‌گردد [۱۲]. حداقل مقاومت مارشال برای نمونه‌های آزمایشگاهی ۸ کیلو نیوتن می‌باشد [۲۳] که در تمامی نمونه‌ها این مقاومت بالاتر از مقدار مذکور است.



شکل ۷. استقامت مارشال

۳-۲. مدول برجهندگی

مدول برجهندگی پاسخ روسازی برحسب تنش‌های مکانیکی و کرنش‌های متناظر است و متغیر بسیار مهمی در رویکردهای طراحی مکانیکی برای سازه روسازی است که با استفاده از آن ضخامت لایه‌های آسفالتی تعیین می‌شود. هر چه مدول برجهندگی مقدار بالاتری را داشته باشد، ضخامت لایه آسفالتی کاهش می‌یابد [۲۰]. نتایج مدول برجهندگی در شکل (۸) نشان می‌دهد که گوگرد موجب افزایش مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی می‌گردد، به طوری که در بالاترین میزان استفاده از این ماده مدول برجهندگی ۲/۸ برابر شده است. گوگرد با تولید



شکل ۱۰. نتایج خزش دینامیکی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

جدول ۴. عدد روانی

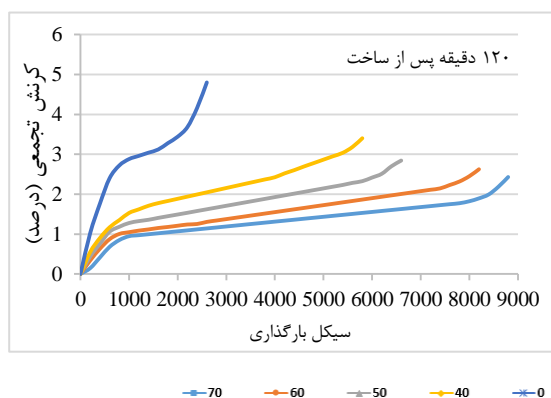
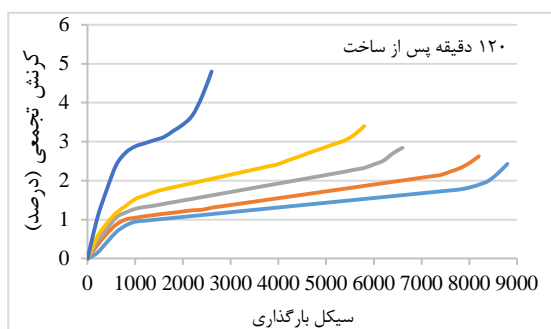
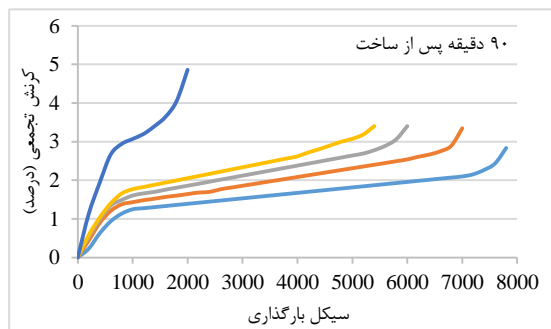
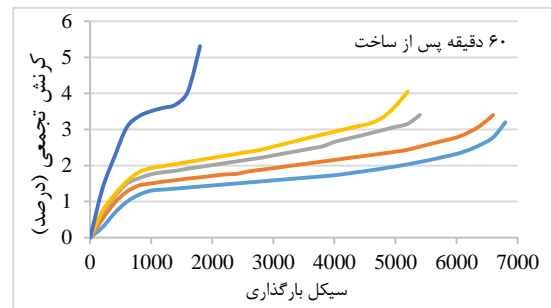
| ۷۰ | ۶۰ | ۵۰ | ۴۰ | ۰ | درصد گوگرد | |
|------|------|------|-------|------|--------------|-------------------|
| | | | | | زمان (دقیقه) | دما (درجه سلسیوس) |
| ۵۸۰۰ | ۵۲۹۰ | ۴۵۸۰ | ۴۰۵۰ | ۸۹۰ | ۳۰ | ۵۰ |
| ۶۸۳۹ | ۶۱۵۵ | ۵۴۰۰ | ۴۸۱۰ | ۱۰۳۰ | ۶۰ | |
| ۷۵۲۴ | ۶۷۸۳ | ۵۷۰۰ | ۵۱۴۰ | ۱۰۸۰ | ۹۰ | |
| ۸۱۵۲ | ۷۴۱۱ | ۶۱۰۰ | ۵۴۸۰ | ۱۱۵۰ | ۱۲۰ | |
| - | - | - | ۱۵۸۰۰ | ۲۷۶۰ | ۶۰ | ۲۵ |

جدول ۵. نسبت عدد روانی نمونه‌های حاوی گوگرد به فاقد افزودنی

| ۷۰ | ۶۰ | ۵۰ | ۴۰ | ۰ | درصد گوگرد | |
|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|-------------------|
| | | | | | زمان (دقیقه) | دما (درجه سلسیوس) |
| ۶/۵ | ۵/۹ | ۵/۱ | ۴/۶ | ۱/۰ | ۳۰ | ۵۰ |
| ۶/۶ | ۶ | ۵/۲ | ۴/۷ | ۱/۰ | ۶۰ | |
| ۷ | ۶/۳ | ۵/۳ | ۴/۸ | ۱/۰ | ۹۰ | |
| ۷/۱ | ۶/۴ | ۵/۳ | ۴/۸ | ۱/۰ | ۱۲۰ | |
| - | - | - | ۵/۷ | ۱/۰ | ۶۰ | ۲۵ |

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف کاهش زمان تعمیر روسازی باند فرودگاه، اثر گوگرد بر مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از متغیرهای زمان عمل‌آوری پس از ساخت، دمای محیط و میزان گوگرد در مخلوط، استفاده شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که گوگرد در دمای بالاتر از ۱۱۸ درجه سلسیوس قادر به کاهش ویسکوزیته قیر و در نهایت افزایش قدرت پوشش‌دهی سنگ‌دانه توسط چسباننده بوده و همان‌طور که در نتایج قیر بهینه آزمون مارشال مشاهده شد، این امر موجب کاهش مصرف قیر شده است. نتایج آزمایش مارشال نشان داد که گوگرد توانایی افزایش مقاومت آسفالت در برابر تغییر شکل دائم را خواهد داشت و این ماده در پی خاصیت ذاتی خود در دمای این آزمایش، با سخت‌کنندگی مخلوط موجب روند افزایشی در



شکل ۹. نتایج خزش دینامیکی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس

- [6] Rushing, J. F.; Floyd, W. C.; Rushing, T. W.; Garcia, L.; Garruth, W. D.; Tingle, J. S.; Rutland, C. A. "Validation of FRP Matting Requirements"; ERDC/GSL TR-16-22. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineering Research and Development Center, 2016.
- [7] Mejias-Santiago, M.; Valle-Roldan, F. D.; Priddy, L. P. "Certification Tests on Cold Patch Asphalt Repair Materials for Use in Airfield Pavements"; ERDC/GSL TR-10-14. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineering Research and Development Center, 2010.
- [8] Justnes, H. "Rapid Repair of Airfield Runway in Cold Weather Using CAC Mortar"; Avignon 2008, 30, 72-365.
- [9] Mann, T. A.; Freeman, R. B.; Anderton, G. L. "Grout Impregnation of Pre-Placed Recycled Concrete Pavement (RCP) for Rapid Repair of Deteriorated Portland Cement Concrete Airfield Pavement"; ERDC/GSL TR-07-9. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineering Research and Development Center, 2007.
- [10] Jung, K. C.; Roh, I. T.; Chang, S. H. "Evaluation of Mechanical Properties of Polymer Concretes for the Rapid Repair of Runways"; Composites Part B: Engineering 2014, 60-352.
- [11] Tabataba, A. M. "Application of Sulfur in Asphaltic Pavement"; Tehran University, 1985.
- [12] Kennepohl, G. J.; Miller, L. J. "Sulfur-asphalt Binder Technology for Pavements"; Abstr. Pap. Am. Chem. Soc. 1978.
- [13] Gladkikh, V.; Korolev, E.; Smirnov, V.; Sukhachev, I. "Modeling the Rutting Kinetics of the Sulfur-Extended Asphalt"; Procedia Eng. 2016, 1417-1423.
- [14] Cooper, S. B.; Mohammad, L. N.; Elseifi, M. A. "Laboratory Performance Characteristics of Sulfur-modified Warm-mix Asphalt"; J. Mater. Civil Eng. 2011, 1338-1345.
- [15] Vahora, S. I.; Mishra, C. B. "Investigating the Performance of Warm Mix Additives"; Int. J. of Current Eng. and Tech., BVM Engineering Coll, Anand, India, 2017.
- [16] Javadi Y. "Investigating Sulfur Applications in Asphalt Reinforcement and Strength and its Production Process"; National Oil Refining and Distribution Company, Technical Unit of Human Resource, 2017.
- [17] Ameri, M., Nobakht; S., Bemana, K.; Vamegh, M.; Rooholamini, H. "Effects of Nanoclay on Hot Mix Asphalt Performance"; Pet. Sci. Tech. 2016, 747-753.
- [18] Oruc, S.; Celik, F.; Akpınar, M. V. "Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures"; J. Mater. Eng. Perform. 2007, 578-583.
- [19] Shi, X.; Mukhopadhyay, A.; Liu, K. W. "Mix Design Formulation and Evaluation of Portland Cement Concrete Paving Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement"; Constr. Build. Mater. 2017, 756-768.
- [20] Imaninasab, R.; Joodaki S. "Performance Evaluation of Polyamine Anti-stripping Additives"; Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials 2016, 1-9.
- [21] Australian Standard "Determination of the Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt Dynamic Creep Test"; Standard Australian, Sydney, Australia, 2015.
- [22] Witzczak, M. W. "Simple Performance Test for Superpave Mix Design"; NCHRP Report 465, 2002.
- [23] European Asphalt Pavement Association. "Airfield Uses of Asphalt"; Breukelen, Netherlands, 2003.

مقاومت مارشال شده است. همچنین مشخص شد که افزودن گوگرد به آسفالت موجب افزایش مدول برجهندگی می‌شود، به طوری که در میزان ۷۰ درصد از این ماده، این مدول ۲/۸ برابر نمونه فاقد افزودنی می‌گردد. بنابراین، از این آسفالت اصلاح شده به ضخامت کمتری می‌توان استفاده نمود که در نتیجه موجب کاهش زمان مورد نیاز تولید آسفالت، استفاده از مصالح محلی جایگزین و در نهایت کاهش زمان تعمیر خواهد شد. افزایش میزان گوگرد موجب افزایش مقاومت شیارشدگی شده و در درصدهای بالاتر از این ماده، این روند افزایشی بیشتر خود را نشان داده است به طوری که در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و پس از گذشت دو ساعت در نمونه ۷۰ درصد از گوگرد، مقاومت شیارشدگی به بیش از ۴ برابر نمونه فاقد افزودنی می‌رسد. از طرف دیگر، تأثیر زمان در گیرش آسفالت نیز قابل توجه است، به طوری که با گذشت زمان و کاهش دمای آسفالت از ۱۱۸ درجه سلسیوس، گوگرد در ابتدا به طور ناگهانی موجب افزایش ویسکوزیته قیر شده و سپس به طور تدریجی موجب افزایش مقاومت بیشتری نسبت به نمونه فاقد افزودنی می‌گردد. تأثیر دمای محیط بر مقاومت شیار شدگی نیز نشان داد که گوگرد در دمای محیط پایین‌تر، قدرت افزایش سختی بیشتری خواهد داشت، به گونه‌ای که در میزان ۴۰ درصد از آن، نسبت این مقاومت در دو دمای ۲۵ و ۵۰ درجه سلسیوس، بیشتر از سه برابر شده است. با گذشت زمان از ساخت نمونه، آسفالت به آرامی دچار سخت‌شدگی می‌گردد و مقاومت شیارشدگی آن افزایش می‌یابد. گوگرد با خاصیت ذاتی خود به این سخت‌شدگی سرعت می‌بخشد. از این خاصیت گوگرد می‌توان به عنوان افزودنی در تعمیر سریع چاله‌های ایجاد شده در روسازی فرودگاه‌های نظامی با هدف تسریع در بهره‌برداری از باندهای فرودگاه، به ویژه باند پرواز در مواقع حمله دشمن استفاده نمود.

۵. مراجع

- [1] Yousefi, Y.; Golestaneh, M. "Applying Passive Defense Strategies for Runway Safety (A Case Study: Mehrabad International Airport)"; Passive Defense Quarterly 2017, 30, 63-73.
- [2] Krauss, P. D.; Ransome, W. "Rapid Curing Polymers Reduce Repair Time and Improve Pavement Performance"; First Int. Conf. on Pavement Preservation California Department of Transportation FHWA Foundation for Pavement Preservation, 2010.
- [3] Duncan, D. J. "Rapid Runway Repair (RRR): an Optimization for Minimum Operating Strip Selection"; Air Force Inst. of Tech. Wright-Patterson AFB Ohio School of Eng. and Management, 2007.
- [4] Greene, J.; Iyer, S.; Hammons, M. I.; Mellerski, R. C. "Airfield Damage Repair (ADR): Polymer Repair of Airfields Summary of Research"; Applied Research Associates Inc Tyndall AFB FL. 2007.
- [5] Anderson, M.; Riley, M. "PaveMend as a Solution for Rapid Runway Repair"; Designing, Constructing, Maintaining, and Financing Today's Airport Projects, 2002, 1-10.