

بررسی تأثیر همزمان اضافه کردن PPA و EBS

بر عملکرد دمای بالا و پایین قیر

مقاله علمی - پژوهشی

محمد راهی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، مدیر واحد تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، تهران، ایران
بهزاد رسولی اسفنجانی، دانش آموخته کارشناسی، مدیر کنترل کیفی آزمایشگاه، شرکت نفت پاسارگاد، تبریز، ایران
یوسف یوسفی مزرعه، دانش آموخته کارشناسی، کارشناس آزمایشگاه، شرکت نفت پاسارگاد، تبریز، ایران
پوریا حاجی کریمی*، استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: phajikarimi@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

صفحه ۲۴۲-۲۳۳

چکیده

کاربرد بیس استتارامید اتیلن در قیر موجب کاهش دمای اختلاط و دمای تراکم آن و بالتبع کاهش مصرف انرژی در تولید مخلوط آسفالتی می‌شود. در این پژوهش، پلی فسفریک اسید (PPA) به منظور جبران اثرات مخرب EBS بر رفتار دمای پایین قیر مورد استفاده قرار گرفته و تأثیر آن بر رفتار دمای بالای قیر با استفاده از پروتکل سوپریو و همچنین آزمایش MSCR ارزیابی شده است. به این منظور PPA در سه درصد مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی به قیر حاوی ۳ درصد وزنی بیس استتارامید اتیلن اضافه شده و با استفاده از رئومتر برشی دینامیکی (DSR) آزمایش متداول پروتکل سوپریو و نیز آزمایش خزش - بازگشت در سطوح تنش چندگانه (MSCR) روی آن انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است اضافه کردن ۰/۵ درصد وزنی پلی فسفریک اسید در حالی که دمای اختلاط و تراکم قیر حاوی بیس استتارامید اتیلن را به طرز محسوسی افزایش نداده منجر به حفظ نسبی و مطلوب دمای بالای عملکردی قیر در مقایسه با صرفاً استفاده از PPA شده است. با این حال نتایج آزمایش MSCR نشان داده است که می‌بایست در این خصوص محافظه کارانه‌تر برخورد نمود زیرا در سطوح ترافیکی موردنظر استاندارد قیر حاوی ۳ درصد وزنی EBS و ۰/۵ درصد PPA نتایج مناسبی نظیر آنچه در معیار رده‌بندی عملکردی پیشین گزارش میشود ارائه نکرده است.

واژه‌های کلیدی: بیس استتارامید اتیلن، پلی فسفریک اسید، خزش - بازگشت، دمای عملکردی بالا و پایین، MSCR

۱- مقدمه

مختلف در طی فرایند تولید را برابر با ۳۰ تا ۴۰ درصد برای CO₂ (کربن دی اکسید) و SO₂ (سولفور دی اکسید)، ۵۰ درصد برای VOC (ترکیبات فرار ارگانیک)، ۱۰ تا ۳۰ درصد برای CO (کربن مونوکسید)، ۶۰ تا ۷۰ درصد برای NO_x (اکسیدهای نیتروژن) و ۲۵ تا ۵۵ درصد برای گرد و غبار گزارش نموده است. کاهش این آلاینده‌ها علاوه بر تأثیرات زیست محیطی مثبت، تأثیر جانبی قابل توجهی بر روی

کاهش دمای اختلاط و تراکم در مخلوط‌های آسفالتی ولرم (WMA) نسبت به مخلوط‌های آسفالتی گرم مزایای زیست محیطی متعددی را در بر دارد. این موضوع در کنار کاهش قابل توجه مصرف انرژی موجب شده که استفاده از مخلوط‌های آسفالتی ولرم به طور گسترده در کشورهای اروپایی و همچنین ایالات متحده آمریکا مورد توجه و استفاده قرار گیرد. ارزیابی انجام شده در تعدادی از کشورهای اروپایی کاهش آلاینده‌های

در حضور افزودنی‌های مورد استفاده در تولید مخلوط‌های آسفالتی ولرم یکی از دغدغه‌های اصلی محققین است زیرا هدف اصلی اضافه کردن این افزودنی‌ها کاهش دمای اختلاط و تراکم بوده و می‌بایست اثرات جانبی روی دماهای بالا و پایین به دقت بررسی شود.

پلیفسفریک اسید (PPA) یکی از افزودنی‌های شناخته شده در جهت بهبود رفتار مخلوط‌های آسفالتی است. اضافه کردن PPA به قیر موجب افزایش ویسکوزیته و نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ قیر می‌شود. اخیراً تحقیقات متعددی به بررسی تأثیر اضافه کردن PPA بر ویژگی‌های رئولوژیکی و مکانیکی قیر خالص اختصاص یافته است. این تحقیقات نشان داده‌اند که اصلاح قیر خالص با اضافه کردن پلی‌فسفریک اسید موجب بهبود رفتار دمای بالای قیر می‌گردد (Aflaki & Tabatabaee, 2009; Shin-Che et al., 2011). افلاکی و حاجی‌کریمی (۲۰۱۲) نشان دادند که اصلاح قیر با PPA (با درصد‌های وزنی ۰/۵، ۱/۳، ۱/۶) بر رفتار دمای پایین آن تأثیر منفی دارد. بالدینو و همکارانش (۲۰۱۲) تحقیق آزمایشگاهی گسترده‌ای روی ویژگی‌های رئولوژیکی دمای پایین قیرهای اصلاح شده با پلی‌فسفریک اسید انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که تأثیر اضافه کردن PPA بر خصوصیات دمای پایین قیر به طور قابل توجهی وابسته به مقدار وکس و آسفالتن قیر خالص مورد استفاده یا به عبارتی منبع قیر خالص مورد استفاده است. ایشان همچنین گزارش نمودند که افزایش مدول برشی پیچیده و کاهش دمای انتقال شیشه‌ای دو نتیجه مهم اضافه کردن PPA به قیر خالص در دماهای پایین است. دی‌آنجلو (۲۰۱۰) نیز به این نتیجه رسید که اضافه کردن PPA موجب سفت‌تر شدن قیر شده و این سخت‌شدگی وابسته به نوع نفت خامی است که قیر از آن استحصال شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اضافه کردن PPA به قیر حاوی EBS (با درصد وکس متفاوت نسبت به قیر خالص) می‌تواند منجر به تغییراتی در ساختار و رفتار قیر شود. تأثیر همزمان پلی‌فسفریک اسید و بیس‌استئرامید اتیلن تا کنون بر رفتار دمای بالای قیر با استفاده از روش آزمایش MSCR مورد بررسی قرار نگرفته است. این بررسی به ویژه از این نظر حائز اهمیت است که روی قیر خالص تولید ایران صورت می‌پذیرد. زیرا همانطور که پیش‌تر ذکر گردید تأثیر PPA روی قیر خالص به مشخصات نفت خام مورد استفاده در تولید آن نیز وابسته است و استفاده از قیر ایران در پژوهش حاضر موجب درک بهتر از رفتار قیر اصلاح‌شده با استفاده همزمان از PPA و EBS خواهد شد. آزمایش خزش - بازگشت در سطوح تنش متفاوت (MSCR) به عنوان یک آزمایش دقیق جهت ارزیابی رفتار دمای بالای قیر

سلامت کارگران در کارخانه‌های تولید مخلوط آسفالتی نیز دارد (Rubio et al., 2012). به منظور تولید مخلوط‌های آسفالتی ولرم، سه تکنولوژی متفاوت قابل استفاده است که عبارتند از: (۱) استفاده از واکس‌ها و مواد ارگانیک، (۲) کف‌دار کردن شامل کف کردن مکانیکی و مواد معدنی حامل آب، و (۳) استفاده از افزودنی‌های شیمیایی. استفاده از افزودنی‌های ارگانیک با افزودن یک واکس ارگانیک به قیر یا اختلاط آن با مخلوط آسفالتی انجام می‌شود که منجر به کاهش ویسکوزیته قیر میشود. بدیهی است که این پدیده در طی مراحل اختلاط و تراکم انجام می‌شود. هنگامی که آسفالت سرد شود، افزودنی شکل گرفته و یک ساختمان لاتیک از ذرات میکروسکوپی را تشکیل می‌دهد که سختی قیر و مقاومت آن در برابر تغییر شکل را افزایش می‌دهد. این نوع از افزودنی‌ها در دمای اتاق جامد هستند و نقطه‌ی ذوب آنها به طور معمول حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد است (Li et al., 2016). متداول‌ترین محصول تجاری در دسترس در این دسته ساسوبیت است که از گازهای طبیعی با استفاده از فرایند معروف فیشر- تروپش تولید می‌شود. با این وجود برخی از مراجع در مورد افزودنی‌های ارگانیک جایگزین مانند Asphaltan-B که ترکیبی از واکس به دست آمده از استخراج حلال لیگنیت یا زغال سنگ قهوه‌ای و آمید اسیدی چرب است صحبت کرده‌اند (Lei et al., 2016; Wu & Li, 2017).

در تولید مخلوط‌های آسفالتی ولرم، افزودنی‌های شیمیایی متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این افزودنی‌ها قابلیت کاهش دمای اختلاط و تراکم تا حدود ۳۰ درجه سانتیگراد را دارند (Lei et al., 2016). ساسوبیت، بیس‌استئرامید اتیلن (EBS) و پلی‌اتیلن وکس از جمله افزودنی‌هایی هستند که در تولید مخلوط‌های آسفالتی ولرم مورد توجه قرار گرفته‌اند. نخعی و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر اضافه کردن EBS به عنوان افزودنی مخلوط آسفالتی ولرم را مورد بررسی قرار داده‌اند. به این منظور دو درصد متفاوت ۲ و ۳٪ (نسبت به وزن قیر خالص) از این افزودنی را به قیر خالص اضافه کرده و علاوه بر آزمایش‌های کلاسیک آزمایش‌های ویسکومتر چرخشی و رئومتر برش دینامیکی را بر روی نمونه‌های قیر اصلاح‌شده و آزمایش ارزیابی حساسیت رطوبتی (TSR) را روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح‌شده انجام داده‌اند. ایشان در طی تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که قیرهای حاوی این افزودنی دمای اختلاط و تراکم کمتری نسبت به قیر خالص دارند. ایشان همچنین گزارش نمودند که اضافه کردن بیس‌استئرامید اتیلن به قیر خالص موجب افزایش ۱۰ درصدی مقاومت نمونه‌های مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت می‌شود. بررسی عملکرد دمای بالا و دمای پایین قیر و مخلوط آسفالتی

۲-۱-۲- پلی فسفریک اسید (PPA)

پلی فسفریک اسید پلیمر معدنی مایع با فرمول عمومی $H_{n+2}P_nO_{3n+1}$ است. در سال ۱۹۷۲، شرکت نفت شیپل پلی فسفریک اسید را به عنوان اصلاح کننده ویژگی های قیر معرفی نمود. در این تحقیق از PPA تولید شرکت مرک استفاده شده است. مشخصات PPA استفاده شده در جدول ۲ نشان داده شده است. افزودنی PPA در سه درصد وزنی ۱/۵ و ۱ و ۱/۵ (بر اساس وزن قیر خالص) مورد استفاده قرار گرفته است. انتخاب درصدهای استفاده از PPA مبتنی بر تحقیقات قبلی نویسندگان و نیز متکی بر مرور ادبیات در سطح بین المللی بوده است. امتزاج PPA با قیر توسط همزن دور کند (۵۰ دور در دقیقه) در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۴۵ دقیقه صورت پذیرفته است.

۲-۱-۳- بیس استنارامید اتیلن (EBS)

بیس استنارامید اتیلن یک جامد براق سفید است که به صورت پودر یا تکه ای در مقیاس وسیع به منظورهای مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. فرمول این ترکیب ارگانیک $(CH_2NHC(O)C_{17}H_{35})_2$ است. EBS استفاده شده در این تحقیق و ساختار مولکولی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. بیس استنارامید اتیلن در حقیقت از واکنش اتیلن دی آمین و اسید استناریک به دست می آید. در این پژوهش افزودنی EBS به میزان ۳ درصد وزنی به قیر خالص اضافه شده است. انتخاب ۳ درصد وزنی EBS جهت اضافه کردن به قیر خالص بر اساس تحقیقات قبلی بوده است. امتزاج EBS با قیر خالص توسط همزن دور بالا (۲۵۰۰ دور در دقیقه) در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد طی مدت زمان ۳۰ دقیقه صورت پذیرفته است.

در روش رده بندی عملکردی پیشرفته قیرها مورد استفاده قرار گرفته است. سه درصد مختلف PPA (۱/۵، ۱ و ۱/۵) به نمونه حاوی ۳ درصد وزنی EBS (به عنوان درصد بهینه استفاده از این افزودنی) اضافه شده و مشخصات دمای بالا و پایین قیر اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی تأثیر مشخصات دمای بالای قیر با هدف انتخاب درصد مناسب PPA در راستای تشدید عملکرد بهتر دمای بالای قیر در عین عدم افزایش دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی صورت پذیرفته است.

۲- مصالح و روش های آزمایش

در این بخش مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل قیر خالص، پلی فسفریک اسید (PPA) و بیس استنارامید اتیلن (EBS) معرفی شده و مهمترین مشخصات آنها ذکر گردیده است. همچنین روش آزمایش مورد استفاده در این پژوهش، آزمایش خزش - بازگشت در سطوح تنش متفاوت (MSCR) نیز معرفی شده است.

۲-۱- مواد و مصالح

۲-۱-۱- قیر خالص

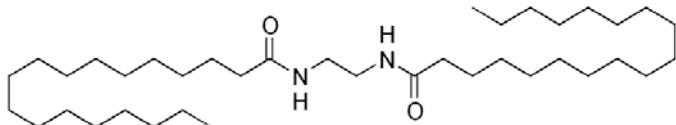
در این پژوهش قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و رده بندی عملکردی PG58-22 مورد استفاده قرار گرفته است. علت انتخاب این نوع قیر خالص فراوانی مصرف آن در سطح کشور در استان های مختلف است. قیر مورد استفاده در این تحقیق توسط کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد تأمین شده است. جدول ۱ مشخصات معمول قیر خالص استفاده شده را نشان داده است.

جدول ۱. خواص متعارف قیر خالص مورد استفاده در این مطالعه

| مقدار | استاندارد | آزمایش |
|-------|-----------|---|
| ۱/۰۳ | ASTM D7 | جرم حجمی (در ۲۵ درجه سانتی گراد)، گرم بر سانتی متر مکعب |
| ۶۸ | ASTM D5 | درجه نفوذ (۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه، ۲۵ درجه سانتی گراد)، ۰٫۱ میلی متر |
| ۵۴ | ASTM D36 | نقطه نرمی، درجه سانتی گراد |
| >۱۰۰ | ASTM D113 | شکل پذیری (۲۵ درجه سانتی گراد، ۵ سانتی متر بر دقیقه)، سانتی متر |
| ۲۷۵ | ASTM D92 | نقطه اشتعال، درجه سانتی گراد |

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پلی فسفریک اسید (PPA)

| مشخصات پلیمر | مقدار | توضیحات |
|---------------------------------|----------|--------------------------------------|
| جرم حجمی، گرم بر سانتی‌متر مکعب | ۲/۰۶ | در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد |
| نقطه جوش، درجه سانتی‌گراد | ۵۳۰ | تحت فشار ۱۰۱۱۳۰۰ پاسکال |
| عیار اسیدی | ۸۷ - ۸۳٪ | بر حسب P ₂ O ₅ |
| فشار بخار، پاسکال | ۲۰۰ | در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد |



(ب)



(الف)

شکل ۱. (الف) بیس استنارامید اتیلن (EBS) مورد استفاده در این پژوهش و (ب) ساختار مولکولی آن

سیکل بارگذاری و استراحت به نمونه، توسط دستگاه وارد می‌شود. پارامتر J_{nr} در هر سطح تنش نسبتی از کرنش باقی‌مانده در پایان سیکل نهم به سطح تنش آن می‌باشد (شکل ۲). در این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D7405 برای هر سیکل در سطح تنش مربوطه، مقادیر کرنش در مرحله خزش و استراحت مطابق روابط زیر به دست می‌آید.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \quad (2)$$

که در این روابط:

ε_0 : کرنش اولیه در ابتدای خزش

ε_c : کرنش نهایی در مرحله خزش

ε_r : کرنش نهایی در انتهای مرحله بازگشت (پس از گذشت ۱۰ ثانیه)

t : زمان آزمایش بر حسب ثانیه

برای هر سیکل مقدار درصد بازگشت پذیری در هر سطح تنش مطابق رابطه‌های زیر تعیین می‌شود.

$$\varepsilon_r(100, N) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \times 100}{\varepsilon_1}, \quad N = 1 \text{ to } 10 \quad (3)$$

$$\varepsilon_r(3200, N) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \times 100}{\varepsilon_1}, \quad N = 1 \text{ to } 10 \quad (4)$$

۲-۲- آزمایش خزش - بازگشت در سطوح تنش

متفاوت (MSCR)

در حال حاضر معیارهای رده‌بندی عملکردی قیرها بر اساس استاندارد AASHTO M320 جهت نام‌گذاری قیرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این درحالی است که پارامتر سوپریو $G^*/\sin\delta$ برای ارزیابی و نام‌گذاری دمای بالا قیر در مطالعات گسترده‌ای توسط برخی محققان به چالش کشیده شده است (D'ANGELO & Dongr, 2002; Dongre & D'Angelo, 2003). در این تحقیقات، این پارامتر را، پارامتری نامناسب برای مرتبط ساختن مقاومت قیر در دماهای عملکردی بالا در برابر تغییر شکل‌های ماندگار و خرابی شیار شدگی دانستند. در سال ۲۰۰۶ با توجه به تقاضای زیاد قیرهای پلیمری در ایالات شمالی آمریکا، و همچنین عدم درستی کافی معیار سوپریو برای قیرهای اصلاح‌شده، آزمایش جدیدی طرح‌ریزی شد (D'Angelo, 2009). در سال ۲۰۰۷ آزمایش MSCR در قالب استانداردهای AASHTO و ASTM D7405 ارائه شد. پارامتر J_{nr} جایگزین پارامتر سوپریو معرفی گردید. این پارامتر که به سطح تنش، نحوه بارگذاری و باربرداری وابسته است به عنوان پارامتری کارا برای تبیین مقاومت قیر بدون محدودیت اصلاح‌کننده‌ها عنوان شد.

در این آزمایش، یک ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه استراحت در دو سطح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال که در هر سطح تنش ۱۰

$$J_{nr}(100, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{100}, \quad N = 1 \text{ to } 10 \quad (7)$$

$$J_{nr}(3200, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{3200}, \quad N = 1 \text{ to } 10 \quad (8)$$

سپس پارامتر J_{nr} برای هر سطح تنش با میانگین گیری از مقادیر J_{nr} از ده سیکل تعیین می شود.

$$J_{nr}(100) = \frac{\sum_{N=1}^{10} J_{nr}(100, N)}{10} \quad (9)$$

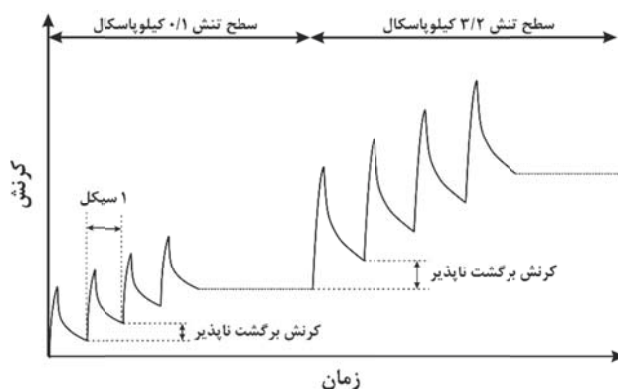
$$J_{nr}(3200) = \frac{\sum_{N=1}^{10} J_{nr}(3200, N)}{10} \quad (10)$$

سپس درصد بازگشت پذیری برای هر سطح تنش با میانگین گیری از مقدار درصد بازگشت پذیری از ده سیکل تعیین می شود.

$$R100 = \frac{\sum_{N=1}^{10} \varepsilon_r(100, N)}{10} \quad (5)$$

$$R3200 = \frac{\sum_{N=1}^{10} \varepsilon_r(3200, N)}{10} \quad (6)$$

به منظور تعیین پارامتر J_{nr} همان طور که در شکل ۲ هم نشان داده شده است، برای هر سیکل مقدار درصد بازگشت پذیری در هر سطح تنش مطابق رابطه های زیر تعیین می شود.



شکل ۲. طریقه تعیین J_{nr} و کرنش برگشت ناپذیر در آزمایش خزش - بازگشت در سطوح تنش چندگانه MSCR

تحت تنش های پایین تر و ثانیاً بررسی تفاوت بین مقدار این پارامتر در دو سطح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلوپاسکال است که درصد اختلاف این دو نسبت به مقدار J_{nr} در سطح تنش ۰/۱ کیلوپاسکال نباید بیشتر از ۷۵٪ باشد. لازم به ذکر است که برخی مراجع توجه به این حداکثر درصد اختلاف را ضروری ندانسته و عنوان نموده اند که میتوان از آن چشم پوشی نمود زیرا رفتار قیرهای اصلاح شده تحت تنش های بسیار زیاد بسیار متفاوت از رفتار آنها در تنش های پایین است.

محاسبه J_{nr} در سطح تنش ۳/۲ کیلوپاسکال به منظور تعیین بار ترافیکی قابل تحمل توسط روسازی انجام می پذیرد. چهار دسته بارگذاری ترافیکی استاندارد (S)، سنگین (H)، خیلی سنگین (V) و به شدت سنگین (E) تعریف می شود. در صورتی که مقدار نرمی خزشی برگشت ناپذیر در سطح تنش ۳/۲ کیلوپاسکال، $J_{nr} < 0.5$ باشد به این معنی است که روسازی قابلیت تحمیل ترافیک به شدت سنگین (E) را دارد، در صورتی که $J_{nr} < 1.0$ باشد روسازی قابلیت تحمیل ترافیک خیلی سنگین را دارد، در صورتی که $J_{nr} < 2.0$ باشد روسازی قابلیت تحمیل ترافیک سنگین را دارد و برای $J_{nr} < 4.0$ روسازی قابلیت تحمیل ترافیک استاندارد را دارد.

باید توجه داشت که علت معرفی و محاسبه J_{nr} در سطح تنش ۰/۱ کیلوپاسکال در وهله اول بررسی رفتار خطی قیر

۲-۳- آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

اندرسون و همکاران (۱۹۹۰) در سال ۱۹۹۰ در جریان انجام پروژه‌ای تحت عنوان «رفتار قیر در دمای پایین بهره‌برداری» که سفارش اداره راه فدرال ایالات متحده آمریکا انجام می‌شد ابزار آزمایش تیر خمشی را به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های خزشی قیر معرفی کردند. در سال ۱۹۹۲، بهیا و همکاران (۱۹۹۲) در چارچوب برنامه تحقیقات استراتژیک راه‌ها (SHRP) نسخه جدیدی از دستگاه معرفی شده توسط اندرسون را توسعه دادند که کاملاً قابل برنامه‌ریزی و دقت آن به مراتب بالاتر از دقت دستگاه پیشین بود. پاسخ خزشی قیر شامل سختی خزشی خمشی، نرمی خزشی و نرخ خزش است و در همین راستا سختی خزشی خمشی، S ، و نرخ خزش، m ، دو خروجی اصلی آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR) می‌باشند. در این آزمایش بار ثابت 980 ± 50 میلی نیوتن به صورت متمرکز به مدت ۲۴۰ ثانیه به وسط دهانه تیرچه قیری با ابعاد مشخص وارد می‌گردد و تغییر مکان عمودی وسط دهانه تیر در بازه‌های زمانی ۰/۵ ثانیه‌ای ثبت می‌گردد ((ASTM-D6648-08, 2001). با توجه به آنچه در ادبیات مرتبط با تئوری ویسکوالاستیسیته کاملاً شناخته شده است، خروجی آزمایش خزش به صورت نرمی خزشی قابل محاسبه می‌باشد. بنابراین به منظور محاسبه سختی خزشی خمشی، اصل مطابقت الاستیک - ویسکوالاستیک مورد استفاده قرار گرفته و پس از ساده‌سازی روابط معادله (۱۱) به منظور محاسبه سختی خزشی خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad (11)$$

که در این رابطه $\delta(t)$ تغییر مکان وسط دهانه (بر حسب میلی‌متر)، P بار متمرکز ثابت وسط دهانه (نیوتن)، L طول دهانه تیر (میلی‌متر) و b و h به ترتیب عرض و ارتفاع تیرچه (میلی‌متر) و t زمان (ثانیه) است.

نرخ خزش، m ، قدرمطلق شیب نمودار $\log[S(t)]$ بر حسب $\log(t)$ است که توسط رابطه (۱۲) قابل محاسبه است.

$$m = \left| \frac{d\{\log[S(t)]\}}{d[\log(t)]} \right| \quad (12)$$

مقادیر S و m در زمان $t = 60$ s تعیین می‌شوند و به منظور تعیین دمای عملکردی پایین استفاده می‌شود. دمای عملکردی پایین ده درجه سانتیگراد پایین‌تر از حداکثر دمایی است که در آن $S(t = 60 \text{ s}) < 300 \text{ MPa}$ و $m(t = 60 \text{ s}) > 0.3$ باشد.

۳- نتایج و بحث

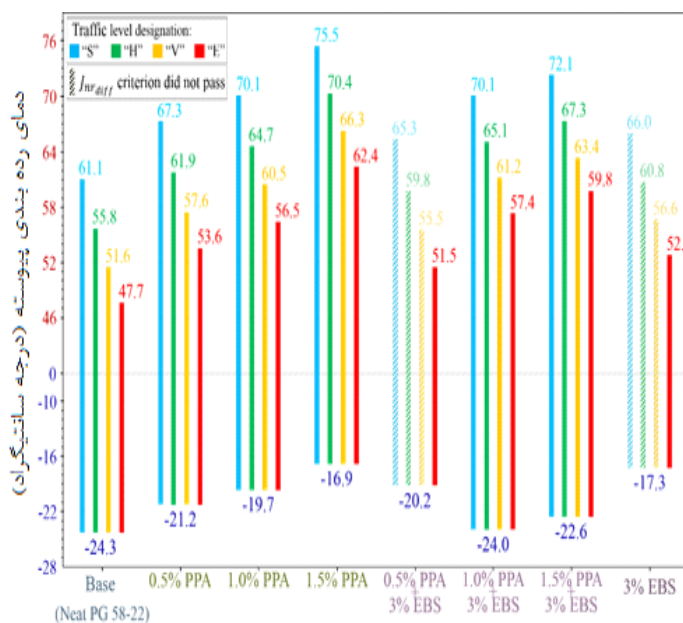
جدول ۳ رده‌بندی عملکردی دمای بالا و پایین کلیه نمونه‌ها را بر اساس پارامتر $G^*/\sin\delta$ (پروتکل سوپرپیو) و آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR) نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن PPA به قیر خالص موجب افزایش دمای عملکردی بالای قیر به میزان ۲۰/۴ درجه سانتیگراد شده است. این در حالی است که افزودن ۳ درصد وزنی EBS به قیر خالص موجب افزایش دمای عملکردی بالا از ۶۱/۸ به ۷۳/۹ درجه سانتیگراد شده است. ملاحظه می‌شود که اضافه کردن ۳ درصد EBS به نمونه‌های حاوی PPA موجب تأثیر فزاینده افزودنی در ۰/۵ درصد وزنی PPA شده است به نحوی که دمای عملکردی بالای قیر حاوی ۰/۵ درصد وزنی PPA در حضور ۳ درصد وزنی EBS از ۶۸/۹ به ۷۶/۲ درجه سانتیگراد افزایش پیدا کرده است و در عین حال دمای اختلاط و تراکم این نمونه قیر بر اساس پژوهش‌های قبلی کمتر از نمونه صرفاً حاوی PPA است. این تأثیر EBS روی دو نمونه دیگر حاوی PPA مشاهده نمی‌شود. بنابراین از منظر بررسی همزمان دمای عملکردی بالا و نقش EBS به عنوان افزودنی مخلوط آسفالتی ولرم می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب ۰/۵ درصد PPA و ۳ درصد EBS ترکیبی موثر و بهینه می‌باشد که در عین اثربخشی جهت کاهش مصرف انرژی شرایط مناسبی برای دمای عملکردی بالا (سه رده بالاتر نسبت به قیر خالص) دارد.

جدول ۳. دمای عملکردی بالا و پایین بر اساس معیار پروتکل سوپرپیو ($G^*/\sin\delta$) و آزمایش BBR

| کد نمونه | دمای عملکردی بالا (درجه سانتی‌گراد) | بهبود دمای عملکردی بالا (درجه سانتی‌گراد) | دمای عملکردی پایین (درجه سانتی‌گراد) | افت دمای عملکردی (پایین درجه سانتی‌گراد) |
|-----------------|--|--|---|---|
| Base (PG58-22) | ۶۱/۸ | - | -۲۴/۳ | - |
| 0.5% PPA | ۶۸/۹ | ۷/۱ | -۲۱/۲ | ۳/۱ |
| 1% PPA | ۷۴/۵ | ۱۲/۷ | -۱۹/۷ | ۴/۶ |
| 1.5% PPA | ۸۲/۲ | ۲۰/۴ | -۱۶/۹ | ۷/۴ |
| 0.5% PPA+3% EBS | ۷۶/۲ | ۱۴/۴ | -۲۰/۲ | ۴/۱ |
| 1% PPA+3% EBS | ۷۰/۶ | ۸/۸ | -۲۴/۰ | ۰/۳ |
| 1.5% PPA+3% EBS | ۷۱/۳ | ۹/۵ | -۲۲/۶ | ۱/۷ |
| 3% EBS | ۷۳/۹ | ۱۲/۱ | -۱۷/۳ | ۷/۰ |

درصد EBS به نمونه قیر خالص شده است که از این منظر نتیجه‌ای بسیار قابل توجه است. شکل ۳ نتایج حاصل از آزمایش MSCR را در کنار نتایج رده‌بندی عملکردی دمای پایین به عنوان دمای رده‌بندی عملکردی پیوسته نمایش داده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود به منظور تأمین مقاومت کافی در برابر شیارافتادگی برای ترافی‌کهای سنگینتر، دماهای عملکردی پایین‌تری نسبت به قیر خالص به دست آمده است.

بررسی دماهای پایین عملکردی نشان‌دهنده این موضوع است که اضافه کردن PPA موجب افت دمای عملکردی پایین قیر شده است. اضافه کردن ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد PPA به قیر موجب افت دمای عملکردی پایین قیر به میزان ۳/۱، ۴/۶ و ۷/۴ درجه سانتیگراد شده است. اما در عین حال علیرغم اینکه اضافه کردن ۳٪ از EBS موجب افت دمای عملکردی پایین به میزان ۷ درجه سانتیگراد شده است، اضافه شده همزمان PPA و EBS موجب بهبود رفتار دمای پایین قیر و نزدیک شدن دمای پایین عملکردی در نمونه حاوی ۱ درصد PPA و ۳



شکل ۳. نتایج رده‌بندی عملکردی دمای بالا بر اساس آزمایش MSCR و دمای پایین عملکردی برای کلیه نمونه‌ها

اتیلن و قیرهای حاوی بیس استنارامید اتیلن و PPA انجام شده است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر به دست آمده است:

- اضافه کردن EBS باعث افزایش دمای بالای بهره‌برداری قیر خالص و اضافه کردن PPA به نمونه‌های حاوی EBS باعث تشدید افزایش دمای بالای بهره‌برداری شده است.

- اضافه کردن PPA و EBS به تنهایی موجب افت دمای پایین عملکردی قیر می‌شود ولی اضافه کردن توأمان این دو ماده افزودنی به قیر خالص موجب کم‌رنگ شدن اثر مخرب هر یک از آنها بر رفتار دمای پایین قیر می‌شود. دمای پایین عملکردی نمونه حاوی ۱٪ پلی‌فسفریک اسید و ۳ درصد EBS به دمای پایین عملکردی قیر خالص بسیار نزدیک است. این در حالی است که دمای بالای عملکردی آن نسبت به قیر خالص بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است.

- بر اساس نتایج پروتکل سوپریو اضافه کردن ۳ درصد EBS به نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد PPA بیشترین اثربخشی را در بهبود دمای عملکردی بالا داشته است.

- بر اساس نتایج آزمایش MSCR نمونه حاوی ۳ درصد EBS و ۰/۵ درصد PPA جهت استفاده در سطوح ترافیک S, H و V مناسب نیست. بنابراین ضروری است همزمان مقدار کاهش دمای اختلاط و تراکم در کنار تأثیر بر دمای عملکردی بالا جهت انتخاب مقدار بهینه PPA در نظر گرفته شود.

بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با لحاظ نمودن تأثیر افزودنی EBS بر کاهش دمای اختلاط و تراکم قیر، اضافه کردن این نوع افزودنی در کنار پلی‌فسفریک اسید، با توجه به تأثیر مثبتی که بر رفتار دمای بالای قیر دارد می‌تواند گزینه مناسبی برای تولید رده‌بندی‌های عملکردی PG76-16 و PG82-10 باشد که در حال حاضر به صورت متعارف توسط کارخانجات تولید قیر قابلیت تولید آن وجود ندارد. با این حال توجه به هزینه‌های اصلاح قیر در حضور این دو نوع افزودنی و مقایسه آن با سایر افزودنی‌ها و همچنین عملکرد قیر اصلاح‌شده توسط PPA و EBS در مخلوط آسفالتی می‌بایست در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد تا دید کامل‌تری نسبت به استفاده از این دو نوع افزودنی حاصل شود.

همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود نتایج رده‌بندی عملکردی دمای بالا بر حسب آزمایش MSCR متفاوت با نتایج رده‌بندی عملکردی دمای بالا بر حسب پارامتر $G^*/\sin\delta$ است. در این شکل دمای بالای قابل تحمل توسط روسازی وابستگی مستقیم به بار ترافیکی وارد بر آن دارد به این شکل که با افزایش بار ترافیکی از حالت S به حالت E، دمای بالای قابل تحمل توسط روسازی کاهش پیدا می‌کند. در واقع نمی‌توان یک دمای بالای عملکردی مشخص برای روسازی گزارش نمود و تعیین دمای بالای عملکردی مستقیماً وابسته به سطح ترافیکی مورد انتظار روسازی است.

بر اساس شکل ۳ دمای قابل تحمل برای شدیدترین بار ترافیکی (سطح ترافیکی E) نسبت به قیر خالص افزایشی معادل ۱۴/۷ درجه سانتیگراد داشته است. در نمونه‌هایی که توأمان حاوی PPA و EBS هستند بیشترین دمای عملکردی مربوط به نمونه حاوی ۱/۵ درصد PPA است ولی در عین حال این نمونه دمای پایین بیشتری نسبت به نمونه حاوی ۱ درصد PPA و ۳ درصد EBS دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که نمونه حاوی ۱ درصد PPA و ۳ درصد EBS شرایط مطلوب‌تری در مجموع نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. این در حالی است که چنانچه معیار پروتکل سوپریو ($G^*/\sin\delta$) مبنای کار قرار گیرد، نمونه حاوی ۰/۵ درصد PPA و ۳ درصد EBS نمونه مناسب و بهینه شناخته خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت بهره‌برداری از مزایای بیس استنارامید اتیلن (EBS) به عنوان افزودنی مخلوط آسفالتی ولرم، از این افزودنی جهت کاهش دمای اختلاط و تراکم قیر خالص استفاده شده است. علاوه بر این از آنجا که اضافه کردن EBS مقدار وکس موجود در قیر را دستخوش تغییر می‌کند، پلی‌فسفریک اسید به عنوان یک افزودنی پلیمری که اثربخشی آن ارتباط مستقیمی با مقدار وکس موجود در قیر دارد در سه درصد وزنی مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد به قیر حاوی ۳ درصد EBS اضافه شده است. سپس آزمایش متداول پروتکل سوپریو جهت تعیین دمای بالا و پایین عملکردی و نیز آزمایش خزش - بازگشت در سطوح تنش چندگانه (MSCR) جهت تعیین دمای بالای بهره‌برداری وابسته به سطوح ترافیکی مختلف روی نمونه‌های قیر خالص، قیر حاوی بیس استنارامید

۵- مراجع

- Dongre, R., & D'Angelo, J. (2003). Evaluation Of Different Parameters For Superpave High Temperature Binder Specification Based On Rutting Performance In The Accelerated Loading Facility At FHWA. *Transportation Research Record, TRB*.
- Lei, Z., Tian-Shuai, L., Fei, G., & Yi-Qiu, T. (2016). Rheological And Physical Properties Of Asphalt Mixed With Warm Compaction Modifier. *Construction And Building Materials, 123*, 309–316.
Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2016.07.021
- Li, X., Zhou, Z., & You, Z. (2016). Compaction Temperatures Of Sasobit Produced Warm Mix Asphalt Mixtures Modified With SBS. *Construction And Building Materials, 123*, 357–364.
Doi.Org/Https://Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2016.07.015
- Nakhaei, M., Naderi, K., Nasrekani, A. A., & Timm, D. H. (2018). Moisture Resistance Study On PE-Wax And EBS-Wax Modified Warm Mix Asphalt Using Chemical And Mechanical Procedures. *Construction And Building Materials, 189*, 882–889.
Doi.Org/Https://Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2018.08.216
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm Mix Asphalt: An Overview. *Journal of Cleaner Production, 24*, 76–84.
Doi.Org/Https://Doi.Org/10.1016/J.Jclepro.2011.11.053
- Shin-Che, H., P., M. F., William, S., Stephen, S., Michael, F., & Ryan, B. (2011). Rheological And Chemical Properties Of Hydrated Lime And Polyphosphoric Acid-Modified Asphalts With Long-Term Aging. *Journal Of Materials In Civil Engineering, 23(5)*, 628–637.
Doi.Org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000219
- Wu, S., & Li, X. (2017). Evaluation Of Effect Of Curing Time On Mixture Performance Of Advera Warm Mix Asphalt. *Construction and Building Materials, 145*, 62–67.
Doi.Org/Https://Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2017.03.240
- Aflaki, S., & Hajikarimi, P. (2012). Implementing Viscoelastic Rheological Methods to Evaluate Low Temperature Performance of Modified Asphalt Binders. *Construction and Building Materials, 36*, 110–118.
- Aflaki, S., & Tabatabaee, N. (2009). Proposals For Modification of Iranian Bitumen To Meet The Climatic Requirements of Iran. *Construction And Building Materials. Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2008.12.014*
- Anderson, D. A., Christensen, D. W., Dongre, R., Sharma, M. G., Runt, J., & Jordhal, P. (1990). Asphalt behavior at low service temperatures. final report.
- ASTM-D6648-08. (2001). Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using The Bending Beam Rheometer (BBR).
- Bahia, H. U., Anderson, D. A., & Christensen, D. W. (1992). The Bending Beam Rheometer; A Simple Device For Measuring Low-Temperature Rheology Of Asphalt Binders (With Discussion). *Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists, 61*.
- Baldino, N., Gabriele, D., Rossi, C. O., Seta, L., Lupi, F. R., & Caputo, P. (2012). Low Temperature Rheology Of Polyphosphoric Acid (PPA) Added Bitumen. *Construction And Building Materials, 36*, 592–596.
Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2012.06.011
- D'Angelo, J. A. (2009). The Relationship Of The MSCR Test To Rutting. *Road Materials And Pavement Design, 10(Sup1)*, 61–80.
Doi.Org/10.1080/14680629.2009.9690236
- D'Angelo, J. A. (2010). Effect Of Poly Phosphoric Acid On Asphalt Binder Properties. *Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists, 79*.
- D'ANGELO, J., & Dongr, R. (2002). Superpave Binder Specifications And Their Performance Relationship To Modified Binders. Proceedings of The Forty-Seventh Annual Conference of The Canadian Technical Asphalt Association (CTAA): Calgary, Alberta.

Investigation on the Mutual Effect of PPA and EBS on High- and Low-Temperature Performance of Bitumen

*Mohammad Rahi, M.Sc., Grad., Director of Department of Research & Development,
Pasargad Oil Company, Tehran, Iran.*

*Behzad Rasouli Esfanjani, B.Sc., Grad., Quality-Control Supervisor of Laboratory,
Pasargad Oil Company, Tabriz, Iran.*

*Yousef Yousefi Mazrae, B.Sc., Grad., Laboratory Expert, Pasargad Oil Company,
Tabriz, Iran.*

*Pouria Hajikarimi, Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering,
Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.*

E-mail: phajikarimi@aut.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

Using Ethylene Bis(Stearamide) (EBS) decreases mixing and compaction temperature of bitumen and consequently decreases energy consumption of asphalt mixture production. In this study, polyphosphoric acid (PPA) is added to EBS-modified bitumen to mitigate low-temperature deterioration of EBS. Also, the effect of adding PPA and EBS on high-temperature behavior of bitumen is investigated using superpave protocol and multiple stress creep and recovery (MSCR) test. For this purpose, PPA is added to EBS-modified bitumen (having 3% of EBS) in three different dosages of 0.5, 1, and 1.5% (based on the original bitumen weight). Then, using a dynamic shear rheometer, both superpave protocol test and the MSCR test are performed on all samples at high temperatures. Also, using a bending beam rheometer, the low-temperature behavior of all samples is evaluated. The results showed that while adding 0.5% of PPA did not change mixing and compaction temperature of EBS-modified bitumen significantly, it can improve high-temperature behavior of bitumen. However, MSCR results showed that it is required to consider the high-temperature behavior of modified bitumen conservatively as the bitumen modified with 0.5% PPA and 3% EBS cannot meet standard requirement for three traffic categories.

Keywords: Polyphosphoric Acid, Ethylene Bis(Stearamide), Creep-Recovery, High and Low Performance Temperature, MSCR