Archive of SID

احیای روسازی پیرشده توسط جوان‌سازها و بررسی تغییرات خواص آن

مسعود تقوی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
سعید حسامی*، استادیار گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
ابراهیم حسامی، استادیار گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

Email: s.hesami@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۲ - پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۴

چکیده

خواص مخلوط آسفالتی در طول زمان تحت شرایط مختلف تغییر می‌یابد که این تغییرات به طور مستقیم بر عملکرد مخلوط آسفالتی اثر می‌گذارد. این امر نیاز به نگهداری از این راه‌ها را گوشزد می‌کند. یکی از روش‌های نگهداری از راه‌ها برای جلوگیری از خرابی‌های بزرگتر، استفاده از مواد جوان‌ساز برای اصلاح خواص رئولوژیک و مکانیکی قیر پیرشده موجود در روسازی می‌باشد تا روسازی دچار ترک‌خوردگی‌های مختلف نشده و با حفظ یکپارچگی خود از خرابی‌های اساسی بعدی جلوگیری کند. با توجه به میدانی بودن مطالعه‌ی پیش‌رو و هدف اصلی پژوهش، که اثبات تأثیر استفاده از مواد جوان‌ساز بر خواص پیرشدگی مخلوط آسفالتی است، از این مواد احیاگر به صورت میدانی و در محل استفاده شد. بدین منظور، چهار ترکیب به عنوان جوان‌ساز ساخته شده و روی روسازی پیرشده موجود پاشیده شدند. پس از استخراج قیر از ۱/۵ سانتی-متری سطح روسازی، آزمایش‌های DSR، درجه نفوذ و نقطه نرمی، قبل و بعد از اعمال مواد جوان‌ساز، انجام شد. با توجه به اینکه یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های متخصصین در استفاده از مواد جوان‌ساز پاششی و به صورت در محل، کاهش چشم‌گیر اصطکاک سطح پس از اعمال این مواد می‌باشد، لذا آزمایش آونگ انگلیسی نیز جهت اطمینان از اصطکاک سطح جهت بازگشایی ترافیک انجام شد. نتایج اثبات کرد که در مورد آزمایش‌های درجه نفوذ، DSR و نقطه نرمی، تمامی ترکیبات مشخصات را بهبود بخشیدند و تفاوت چشم‌گیری بین آن‌ها نبود. نتایج آزمایش آونگ انگلیسی نیز حاکی از عملکرد مناسب این مواد از حیث اصطکاک سطح روسازی پس از اعمال مواد جوان‌ساز بود.

واژه‌های کلیدی: پیرشدگی، جوان‌ساز، خواص رئولوژیک، خواص مکانیکی، اصطکاک سطح

۱. مقدمه

خواص مخلوط آسفالتی در طول زمان تحت شرایط مختلف تغییر می‌کند. این تغییرات به طور مستقیم بر عملکرد مخلوط آسفالتی اثر می‌گذارد. یکی از مواردی که سبب تغییر خواص آسفالت در طول عمر روسازی می-شود، سخت‌شدگی[۱] آسفالت می‌باشد. این پدیده در منابع علمی با نام پیرشدگی[۲] مخلوط آسفالتی بیان می‌شود. پیرشدگی مخلوط آسفالتی پدیده‌ای غیر قابل برگشت است که کیفیت روسازی را کاهش داده و در طرف مقابل،

۱Hardening

۲Aging

www.SID.ir

Archive of SID

هزینه تعمیر و نگهداری را افزایش می‌دهد. پیرشدگی به عوامل مختلفی وابسته است که از جمله آن می‌توان شرایط محیطی، خواص فیزیکی و شیمیایی قیر، میزان عبور و مرور ترافیک و مورفولوژی مخلوط آسفالتی شامل ترکیب سنگدانه‌ها، تخلخل و توزیع فضای خالی در مخلوط آسفالتی را نام برد.

در اثر پیرشدگی، دوام مخلوط آسفالتی کاهش یافته و استعداد رخ دادن خرابی‌های دیگر، از جمله ایجاد ترک[1] جداشدن دانه‌ها[2] و خرابی رطوبتی[3] افزایش می‌یابد. با وجود اینکه قیر فقط بخش کوچکی از مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد، ولی عملکرد مخلوط آسفالتی تا حد زیادی به خواص ویسکوالاستیک قیر بستگی دارد (آلن و همکاران، ۲۰۱۲). مکانیسم‌های مختلفی برای پیرشدگی مخلوط آسفالتی وجود دارد که واکنش با اکسیژن موجود در اتمسفر، تبخیر روغن‌های فرار، جدایی بین فاز قیر و سنگدانه و تغییر ساختمان مولکولی قیر از مهم‌ترین آنها به شمار می‌آید (یوهانسن، ۱۹۹۸). اکسیژن موجود در اتمسفر می‌تواند درون قیر نفوذ کند و با هیدروکربن‌های موجود در ساختار قیر واکنش دهد. میزان این نفوذ با دمای محیط رابطه‌ی مستقیم دارد. نتیجه‌ی این واکنش، تولید موادی است که سبب تغییر در مشخصات ویسکوالاستیک قیر و سخت شدن آن می‌شود. این پدیده با نام پیری- اکسیداسیون[4] شناخته می‌شود. اگرچه این سخت شدن موجب کاهش رخ دادن پدیده‌ی شیارشدگی روسازی در دمای زیاد می‌شود، ولی موجب بالارفتن میزان خستگی، افزایش احتمال ترک دمای کم و بالارفتن حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی شده که در نتیجه عمر روسازی کاهش می‌یابد و سبب افزایش هزینه‌های ترمیم و بازسازی روسازی می‌شود (وو و همکاران، ۲۰۰۸). این مسائل بیش از پیش نیاز به نگهداری راه‌ها را گوشزد می‌نماید.

نگهداری راه‌ها به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود که برخلاف تعمیرات اساسی، به طور منظم صورت می‌پذیرند تا روسازی، شانه‌ها، شیب‌ها، تأسیسات زهکشی و تمامی سازه‌های حاشیه راه تا حد امکان به مشخصات زمان ساخت خود یا وضعیت نو برسند. هدف از نگهداری، به روز کردن دارایی‌ها نیست؛ بلکه حفظ آن‌هاست (اتحادیه راه‌های جهان پیارک، ۲۰۱۴). این مقوله، شامل تعمیرات کوچکی است که باعث حذف عیوب شده و ما را از عملیات تکراری و اضافی نگهداری راه بی‌نیاز می‌کند.

عملیات نگهداری و مدیریت راه‌ها به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند (بورنینگهام و استانکویچ، ۲۰۰۵): نگهداری معمولی یا روتین[5]، نگهداری دوره‌ای[6] و نگهداری اورژانسی[7].

۲. جوان‌سازها[8]

یکی از روش‌های نگهداری از راه‌ها، برای جلوگیری از خرابی‌های بزرگتر، استفاده از مواد جوان‌ساز برای اصلاح خواص رئولوژیک و مکانیکی قیر پیرشده موجود در روسازی می‌باشد تا روسازی دچار ترک‌خوردگی‌های مختلف نشده و یکپارچگی خود را حفظ کرده تا دچار خرابی‌های اساسی بعدی نگردد. جوان‌سازها مواد نفتی برپایه مالتن می‌باشند که قابلیت نفوذ در روسازی بتن آسفالتی را داشته و خواص از دست رفته قیر موجود در روسازی، که بر اثر گذشت زمان، اکسیداسیون و تبخیر روغن‌های فرار رخ می‌دهد را به قیر بازمی‌گردانند. همچنین، استفاده از این مواد جوان‌ساز، به‌دلیل وجود خواص آب‌بندی آنها، باعث جلوگیری از ورود آب به روسازی می‌شود (بویر، ۲۰۰۰).

روند پیرشدگی به صورت دو مرحله است: پیری کوتاه‌مدت، که عمدتاً به‌خاطر از دست دادن روغن قیر در حین حمل، اختلاط و تراکم روسازی است، و پیری بلند-مدت که در طول عمر روسازی رخ می‌دهد. پیری کوتاه-مدت مخلوط آسفالتی در زمان کم و با سرعت زیاد رخ می‌دهد. به طوری که در طول فرآیند پیری کوتاه‌مدت، ویسکوزیته قیر حدود ۱/۵ تا ۴ برابر افزایش می‌یابد. ولی پیری بلندمدت با سرعت کم تا مدت‌ها پس از ساخت

---

۱ Crack
۲ Stripping
۳ Moisture failure
۴ Oxidative aging
۵ Regular maintenance
۶ Periodic maintenance
۷ Emergency maintenance
۸ Rejuvenator

www.SID.ir

Archive of SID

مخلوط آسفالتی و در طول عمر روسازی، بیشتر در لایه-های فوقانی، رخ می‌دهد و به شرایط آب و هوایی، طرح اختلاط، ضخامت قیر و تخلخل بستگی دارد. علت رخ دادن پیری کوتاه‌مدت، فرار روغن موجود در قیر در اثر گرما و اکسیداسیون سریع قیر می‌باشد. در حالی که علت رخ دادن پیری بلندمدت، قرار گرفتن در معرض بار و اکسیژن در طول زمان می‌باشد که به شرایط محیطی، از جمله دما و فشار، وابسته است (تقوی و همکاران، ۱۳۹۵).

قیر شامل دو بخش اصلی آسفالتن[۱] و مالتن[۲] است. بخش جامد قیر و تشکیل‌دهنده ساختمان آن، آسفالتن‌ها هستند. مالتن‌ها از ترکیبات آروماتیک، رزین‌ها و هیدروکربن‌های اشباع (پارافین) تشکیل شده‌اند. برخلاف آسفالتن‌ها، مالتن‌ها تشکیل‌دهنده بخش ویسکوز قیر هستند و به نوعی، شکل‌پذیری قیرها به این بخش بستگی دارد (فرناندز و همکاران، ۲۰۱۳).

روند پدیده‌ی پیرشدگی به این صورت است که آروماتیک‌ها به رزین تبدیل شده و با ادامه پیدا کردن فرآیند، رزین‌ها به آسفالتن تبدیل می‌شوند (گریلی و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به اینکه ترکیبات اشباع تمایل کمی به واکنش دارند، مقدار آن در طول واکنش ثابت باقی می‌ماند (بلومبرگ و همکاران، ۲۰۱۶). آسفالتن ناشی از اکسیداسیون قیر با آسفالتن‌های ابتدایی موجود در ساختار قیر کمی متفاوت هستند.

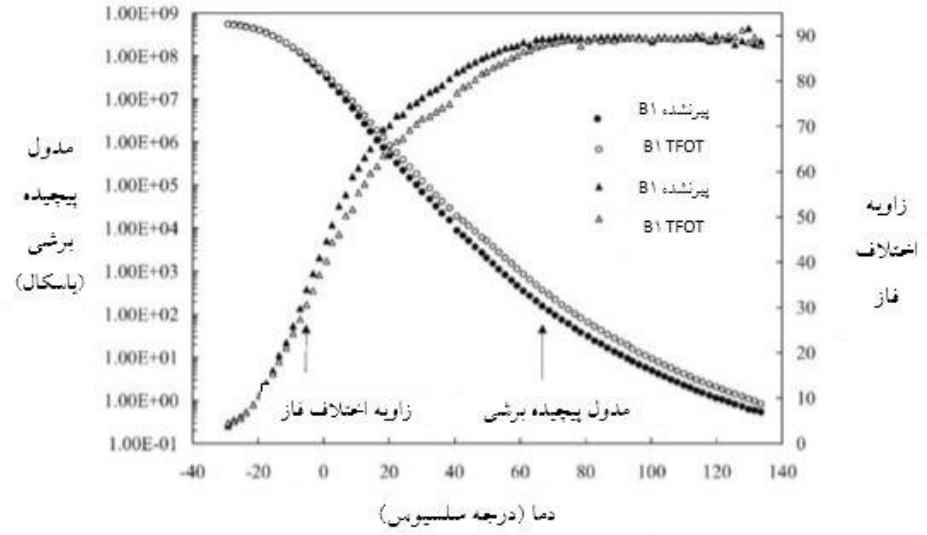
۳. مروری بر منابع

در مطالعه‌ای، هفت قیر که با آزمایش‌های RTFO[۳] و TFO[۴] پیر شدند، مورد بررسی قرار گرفتند. رفتار این قیرها با کروماتوگرافی، اسپکتروسکوپی مادون قرمز و آنالیز مکانیکی شاخص‌دهی شد و از این طریق ارتباط آماری بین پارامترهای مختلف و همچنین ارتباط بین پارامترهای شیمیایی و رئولوژی بررسی گردید. بدین ترتیب، مشخص شد که پیرشدگی تأثیر چشمگیری بر رئولوژی و شیمی قیر دارد. با توجه به افزایش مدول پیچیده و کاهش در زاویه اختلاف فاز در نتیجه تغییرات شیمیایی مشخصات مکانیکی قیرهای پیر شده به سمت مواد شبه‌جامد رفت (لو و ایساکسون، ۲۰۰۲).در شکل ۱، نمودار تغییرات مدول پیچیده برشی(G^*[۵]) و همچنین زاویه اختلاف فاز[۶](δ) در مقابل دمای آزمایش آورده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که قیر پیرشده در تمامی دماها مقدار مدول برشی بیشتر و زاویه اختلاف فاز کمتری نسبت به قیر سالم دارد. همچنین، با افزایش دما، قیر رفتار ویسکوزتری از خود نشان می‌دهد و نرم‌تر است و در مقابل هرچه دما کاهش پیدا می‌کند، قیر رفتار جامدتر و الاستیک‌تری را ارائه می‌دهد.

۱Asphaltene
۲Maltene
۳Rolling thin film oven
۴Thin film oven
۵Complex shear modolus
۶Phase angle

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. نمودار تغییرات مدول پیچیده برشی و زاویه اختلاف فاز در مقابل دما (لو و ایساکسون، ۲۰۰۲)

در یک تحقیق روی پیرشدگی قیر و جوان‌سازی، اثر چرخه‌های استفاده دوباره از قیر جوان‌شده روی مشخصات قیر بررسی شد. قیر مورد استفاده از نوع ۷۰/۱۰۰ و اصلاح نشده بود و در آزمایشگاه و با استفاده از دستگاه RTFOT و PAV[۱] پیر شده بود. از قیر کات بک[۲] ۶۵۰/۹۰۰ نیز به عنوان جوان‌ساز استفاده شد. قیر مورد آزمایش برای چهار چرخه پیر و جوان شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار سخت شدگی قیر تحت اثر پیری در سیکل اول رخ داد. مشخصات فیزیکی قیر در هر سیکل می‌توانست به حالت اولیه‌ی خود نزدیک شود. همچنین، تعادل اجزاط الاستیک و ویسکوز در هر سیکل به سمت رفتار الاستیک تغییر می‌کرد (بلومبرگ و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج نشان می‌دهد که در هر سیکل جوان‌سازی، زاویه اختلاف فاز به آرامی نسبت به مقدار مشابه در سیکل جوان‌سازی قبلی، کاهش پیدا می‌کند و مقدار پارامتر مدول پیچیده برشی نیز به آرامی افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه، جوان‌ساز در هر مرحله نمی‌تواند رفتار ویسکوز از دست رفته قیر را بدان بازگرداند. به بیان دیگر، این مقدار کم کاهش رفتار ویسکوز در هر مرحله، قابل برگشت نمی‌باشد.

در یک تحقیق، از پسماند روغن خوراکی[۳](WCO) به عنوان جوان‌ساز استفاده شد. قیرهای اصلی، پیرشده و جوان‌شده توسط آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و ویسکوزیته بروکفیلد[۴]با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که هنگامی که WCO به عنوان جوان‌ساز به قیر پیر شده اضافه می‌شود، با تغییر مشخصات مکانیکی قیر پیرشده باعث جوان شدن آن گشته و آن را شبیه به قیر ۸۰/۱۰۰ می‌کند. نتایج این مطالعه، مقدار بهینه استفاده از WCO به عنوان جوان‌ساز برای قیرهای با مشخصات مشابه قیر ۳۰/۴۰، ۴۰/۵۰ و ۵۰/۶۰ را به‌ترتیب ۵-۴، ۴-۳ و ۱ درصد اعلام می‌کند. آنالیز آماری و آزمایش ویسکوزیته بروکفیلد نشان داد که فرق قابل توجهی بین مشخصات قیر اصلی (دست نخورده) و قیر پیرشده وجود نداشت (فرناندز و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از روغن پسماند به عنوان جوان‌ساز باعث به دست آمدن قیر نرم‌تر می‌شود که دلیل این امر تغییر نسبت مالتن‌ها به آسفالتن‌ها است (گارسیا و همکاران، ۲۰۱۱).

در یک مطالعه با هدف افزایش مقدار مصالح RA[۵] (آسفالت احیا شده) در طرح اختلاط روسازی، افزودنی-های بازیافت‌کننده به عنوان جوان‌ساز مورد استفاده قرار

۱Pressure air vessel
۲Cutback asphalt
۳Waste cooking oil (WCO)
۴Brookfield viscosity
۵Reclaimed asphalt

www.SID.ir

Archive of SID

گرفت. بدین منظور، یک ماده جوان‌ساز خاص به مصالح RA اضافه شد و تأثیر آن روی مشخصات مکانیکی این مصالح مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با اضافه کردن این ماده جوان‌ساز، تأثیر فرآیند پیرشدگی کاهش یافت. همچنین، با اینکه این تحقیق ثابت کرد که تأثیر پیرشدگی روی قیر جوان‌شده (قیر اصلاح شده با جوان‌ساز) نسبت به قیر دست نخوده، بیشتر است، اما در کل، از لحاظ پیر شدن تفاوت چشم‌گیری بین قیر دست نخورده و قیر جوان‌شده دیده نشد (گریلی و همکاران، ۲۰۱۷).

در یک تحقیق، انتشار جوان‌ساز در چسبنده قیری با دو روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، از دو نوع قیر به نام‌های A7 و A11 که به ترتیب از نوع ۶۰/۸۰ و ۱۰۰/۱۲۰ بودند، استفاده شد. برای جوان‌ساز از دو نوع ترکیب به نام‌های RA که حاوی ۹۰٪ روغن آروماتیک آلکیلی[1] و ۱۰٪ روغن اشباع[2] بود و RS که حاوی ۹۰٪ روغن اشباع و ۱۰٪ روغن آروماتیک آلکیلی بود، استفاده شد. نتایج نشان داد که هرچه نسبت جوان‌ساز بیشتر باشد، عدد مربوط به انتشار نیز بیشتر خواهد بود. همچنین، جوان‌ساز RA انتشار بهتری از خود نشان داد. آزمایش‌ها نشان داد که مقدار انتشار روی قیر نمونه A11 بیشتر بود. این بدان دلیل است که هرچه مقدار آسفالتین و رزین موجود در قیر بیشتر باشد مقدار انتشار کاهش می‌یابد (لی و همکاران، ۲۰۱۳).

با توجه به مطالعات صورت گرفته و پی بردن به اثربخشی قابل قبول ترکیبات جوان‌ساز، لزوم انجام این پژوهش واضح‌تر گردید. هیچ‌کدام از تحقیقات قبلی روی استفاده از مواد جوان‌ساز به صورت در محل انجام نشده و همچنین تأثیر واقعی این ترکیبات بر مشخصات روسازی را مورد توجه قرار نداده بودند. لذا، نیاز به انجام مطالعه‌ای میدانی و در محل را بیش از پیش آشکار می‌سازد. از طرفی، در تمامی تحقیقات قبلی از نمونه‌های ساخته‌شده در آزمایشگاه استفاده شده است. در صورتی که این نمونه‌ها نمی‌توانند شرایط واقعی را به طور کامل شبیه‌سازی نمایند. بنابراین، انجام مطالعه و بررسی روی نمونه‌های میدانی موجود، نتایج را بسیار به واقعیت نزدیک می‌کند و می‌تواند تصویر مناسبی از تأثیر واقعی جوان‌سازها را در عمل ارائه دهد.

۴. روش تحقیق

در این پژوهش، به‌جای ساختن نمونه در آزمایشگاه، نمونه های روسازی موجود در محل مورد استفاده قرار گرفت. به بیانی دیگر، یک مطالعه میدانی و در محل صورت پذیرفت. دلایل اتخاذ این روش برای به‌دست آوردن نمونه جهت تکمیل تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- تعداد زیادی از تحقیقات گذشته روی نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه تمرکز داشته‌اند که این رویکرد نمی تواند به طور کامل شرایط واقعی محل را شبیه‌سازی کند. همچنین، این مطالعات، مشخصات دیگری از مخلوط آسفالتی را از طریق آزمایش‌های دیگر مورد بررسی قرار داده‌اند (اصلی و همکاران، ۲۰۱۲؛ بلومبرگ و همکاران، ۲۰۱۶).
- در پژوهش‌های پیشین، غالباً دلیل اصلی بررسی مواد جوان‌ساز بالابردن درصد استفاده از مصالح RAP در آسفالت بازیافتی بوده است. اما در این تحقیق، با توجه به اینکه مشخصاً، هدف تحقیق، اصلاح خواص مکانیکی و رئولوژیک روسازی موجود است، استفاده از نمونه‌های برداشت شده از روسازی موجود ترجیح داده شده است (گریلی و همکاران، ۲۰۱۷).
- معدود مطالعات انجام شده در راستای استفاده از مواد جوان‌ساز به صورت میدانی و در محل دارای مشکل بازگشایی ترافیک و همچنین اصطکاک سطح بودند.

۴-۱. نمونه‌برداری

با توجه به مقدمه ذکر شده، نمونه‌های دال روسازی آسفالتی از روسازی اجرا شده برداشت شد. محل برداشت واقع در استان خراسان رضوی، حد فاصل روستای حسن آباد تا روستای ریگی، از توابع شهرستان نیشابور انتخاب شد.

شش عدد دال به ابعاد مختلف ۴۰*۴۰، ۵۰*۵۰ و ۶۰*۶۰ بوده است که به منظور تشابه مشخصات نمونه‌ها تمامی آنها از یک محدوده از روسازی برداشت شدند. پس

[1] Alkaline aromatic oil

[2] Saturated oil

www.SID.ir

Archive of SID

از برداشت نمونه‌های دالی شکل و حمل آن‌ها، نمونه‌ها برای تست‌های مختلف به ابعاد مورد نیاز برش داده شدند.

به طور کلی، در تعیین مقادیر و درصد مواد تشکیل-دهنده ترکیبات جوان‌ساز، الویت‌های زیر مورد نظر قرار گرفت:

۱- زمان بازگشایی در دما، سرعت، باد و رطوبت حداکثر محل، یک ساعت در نظر گرفته شد.

۲- ترکیبات در مدت زمان تعیین شده، حداقل تا عمق ۱/۵ تا ۲ سانتی‌متر نفوذ کنند.

قبل از زمان بازگشایی، اصطکاک سطح جاده به وضعیت قبل از استفاده از ترکیبات جوان‌ساز برگردد تا از لحاظ ایمنی نیز استانداردها رعایت شده باشند.

۴-۲. انتخاب مواد روغنی

آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی به منظور بررسی چگونگی اثرگذاری دو نوع روغن پسماند بر قیر پیرشده صورت گرفت. از روغن‌های پسماند در ساخت ترکیبات جوان‌ساز استفاده شد تا نه تنها این مواد خطری از نظر زیست‌محیطی نداشته باشند، بلکه از ورود مواد پسماند به شکل زباله به طبیعت جلوگیری شود. در ابتدا، یک نمونه قیر ۶۰/۷۰ از پالایشگاه جی اصفهان تهیه شد. سپس، این نمونه قیری تحت آزمایش RTFO و سپس PAV قرار گرفت تا پیرشدگی بلندمدت قیر شبیه‌سازی گردد. این کار به منظور یافتن حدود درجه نفوذ و نقطه نرمی یک قیر با پیرشدگی بلندمدت صورت گرفت.

نتایج حاصل از آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی روی قیر سالم و پیرشده در حالت‌های کوتاه‌مدت و بلند-مدت در جدول ۱ قابل مشاهده است. همچنین، نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی پس از استفاده از مواد روغنی روی نمونه قیر پیرشده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی نمونه قیری

نمونه	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)	نقطه نرمی (سلسیوس)
قیر دست‌نخورده	۶۴	۵۲
قیر با پیرشدگی کوتاه‌مدت (RTFO)	۵۳	۵۷
قیر با پیرشدگی بلندمدت (RTFO+PAV)	۳۶	۵۹

جدول ۲. نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی نمونه قیری+ مواد روغنی مختلف

نمونه	پیرشده بلندمدت+۳٪ روغن پسماند نوع ۱	پیرشده بلندمدت+۵٪ روغن پسماند نوع ۱	پیرشده بلندمدت+۷٪ روغن پسماند نوع ۱	پیرشده بلندمدت+۱٪ روغن پسماند نوع ۲	پیرشده بلندمدت+۳٪ روغن پسماند نوع ۲	پیرشده بلندمدت+۵٪ روغن پسماند نوع ۲
درجه نفوذ	۶۳	۶۴	۷۵	۴۴	۵۴	۶۵
نقطه نرمی	۵۷	۵۶	۵۲	۵۹	۵۷	۵۴

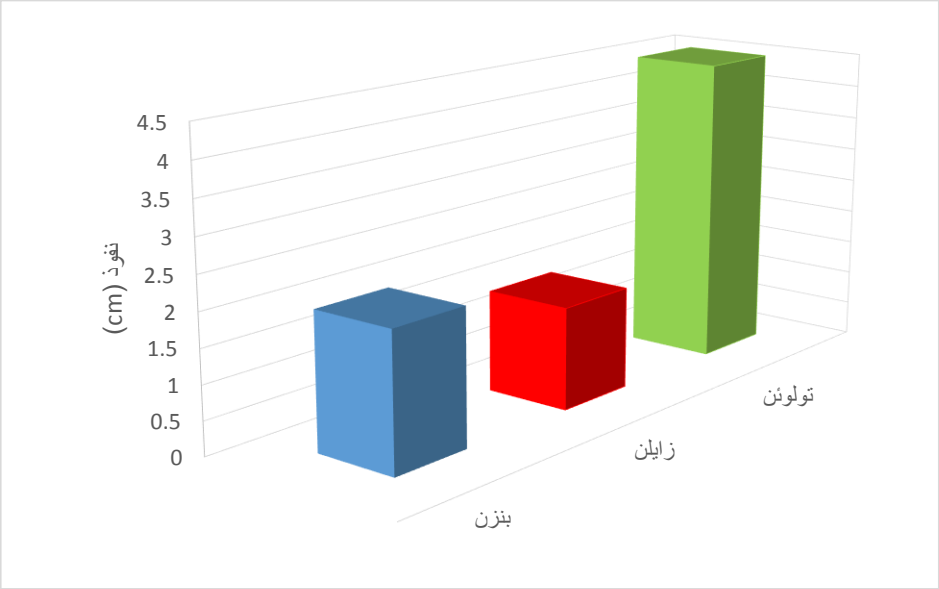
با توجه به نتایج جدول ۲ و اینکه بیودیزل و پارافین مایع قابلیت استفاده در ترکیب جوان‌ساز مورد نظر را نداشتند، پس روغن‌های پسماند به عنوان قسمت جوان-کننده و همچنین جایگزین مالتن‌های از دست‌رفته قیر مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به این موضوع که میزان استفاده از روغن‌های پسماند در ترکیب به میزان ٪۵ بهترین عملکرد را از خود نشان داد و همچنین تحقیقات قبلی نیز استفاده از این میزان روغن پسماند را مفید دانسته و بهترین عملکرد را برای این درصد از استفاده در نظر گرفته‌اند (اصلی و همکاران، ۲۰۱۲)، تصمیم گرفته شد تا به همین میزان از روغن‌های پسماند مورد نظر در ترکیب جوان‌ساز استفاده شود.

www.SID.ir

Archive of SID

۴-۳. انتخاب نوع حلال

مرحله بعد، انتخاب حلال مناسب است. با توجه به اینکه طبق تحقیقات پیشین، بیشترین مقدار پیرشدگی در ۰/۵ اینچ بالایی رخ می‌دهد (لی و همکاران، ۲۰۱۳) و هدف این تحقیق نیز اصلاح وضعیت قیر موجود در این ناحیه می‌باشد، بنابراین، انجام آزمایش نفوذ برای حلال‌های مورد نظر اهمیت خواهد داشت. در نتیجه، برای انتخاب حلال آروماتیک موجود در ترکیب جوان‌ساز، سه حلال مورد آزمایش قرار گرفتند. معیارهای انتخاب این سه حلال از بین حلال‌های مختلف آروماتیک عبارت است از در دسترس بودن، قیمت ارزان‌تر و خطر کمتر برای سلامتی و محیط‌زیست. دلیل کلی انتخاب حلال‌های آروماتیک از بین انواع مختلف حلال‌ها، قابلیت شکستن ترکیبات ساخته شده در قیر در فرآیند پیرشدگی (ترکیبات حاصل از کریستالیزه شدن قیر و همچنین تبدیل مالتن‌ها به آسفالتن‌ها) این نوع از حلال‌ها بوده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نفوذ حلال‌ها در شکل ۲ قابل مشاهده است. با توجه به نتایج حاصل از اندازه-گیری نفوذ این حلال‌ها و فاکتورهای حائز اهمیت، تصمیم گرفته شد تا در این پژوهش از تولوئن به عنوان بخش حلال آروماتیک ترکیب جوان‌ساز استفاده شود.



شکل ۲. نمودار مقدار نفوذ حلال‌های مختلف

۴-۴. زمان خشک شدن سطح نمونه

ابتدا، مدت زمان خشک شدن سطح نمونه به منظور بازگشایی ترافیک مورد آزمایش قرار گرفت. این بررسی، برای یافتن بهترین ترکیبی انجام پذیرفت که هم حداقل-های قبلی را تأمین کند و هم در مدت کمتر از یک ساعت خشک شود تا ترافیک قابلیت بازگشایی داشته باشد. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۳ قابل مشاهده است. با توجه به جدول ۳، نمونه‌های ۱۳، ۱۴، ۱۷ و ۱۸ به عنوان ترکیبات مناسب جوان‌ساز که تمامی محدودیت‌ها را رعایت کرده بودند برای انجام آزمایش‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفتند، که در ادامه، به‌ترتیب به عنوان ترکیبات A، B، C و D از آن‌ها نام برده شده است. یکی از نگرانی‌های تمامی متخصصین راه در مورد استفاده از جوان‌ساز، لغزندگی سطح راه پس از بازگشایی راه می-باشد. به‌منظور حصول اطمینان از عملکرد ترکیبات از نقطه نظر ایمنی، آزمایش آونگ انگلیسی به عنوان آزمایش سنجش میزان اصطکاک سطح قبل و بعد از اعمال ترکیبات جوان‌ساز انتخاب شد. روش آزمایش به این صورت بود که هر نمونه قبل از اعمال ترکیب جوان‌ساز، بلافاصله بعد از اعمال، ۳۰ دقیقه بعد از اعمال ترکیب جوان‌ساز و پس از خشک شدن کامل سطح

www.SID.ir

Archive of SID

(حدوداً ۱/۵ ساعت) مورد آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفته است (آزمایشگاه تحقیقاتی راه و ترابری HMSO، ۱۹۶۹). طبق استاندارد، مقادیر مقاومت لغزندگی اندازه-گیری شده با دستگاه آونگ انگلیسی نباید از مقادیر درج شده برای حالت‌های مختلف در جدول ۴ کمتر باشد.

جدول ۳. مدت زمان خشک شدن سطح نمونه

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
مدت*	۱۲	۱۱	۱۱	۱۰	۸	۷	۳/۸	۲/۷۵	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱/۲	(A)۱	(B)۱	-	-	(C)۱	(D)۱	۰/۷۵	۰/۷۵

*: مدت زمان خشک شدن ترکیب جوان‌ساز (ساعت)

جدول ۴. کمینه مقادیر مقاومت لغزندگی اندازه‌گیری شده با دستگاه آونگ انگلیسی

طبقه بندی سایت	نوع سایت	حداقل اصطکاک
A	موقعیت‌های خطرناک	۶۵
B	جاده‌های ماشین‌رو، جاده‌های اصلی و طبقه ۱ و جاده‌ها با ترافیک سنگین در نواحی شهری (بیش از ۲۰۰۰ وسیله نقلیه در روز)	۵۵
C	سایت‌های دیگر	۴۵

در نهایت، چهار ترکیب از بین چند آزمایش اولیه که تمامی حداقل‌ها توسط آن‌ها تأمین می‌شد، انتخاب گردید و برای آزمایش‌های نهایی مورد استفاده قرار گرفت. مواد تشکیل دهنده این چهار ترکیب به صورت کلی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. ترکیب تشکیل‌دهنده جوان‌سازها به تفکیک درصد تشکیل‌دهنده

شماره ترکیب	**روغن‌های پایه مالتن** (٪)	**تولوئن** (٪)	**ترکیبات فرار** (٪)	**قیر** (٪)
A	شرکت خارجی			
B	۱۰	۲۰	۲۰	۵۰
C	۵	۲۰	۲۵ (دارای آنتراسن)	۵۰
D	۵	۲۰	۲۵	(اصلاح شده با پلیمر)

www.SID.ir

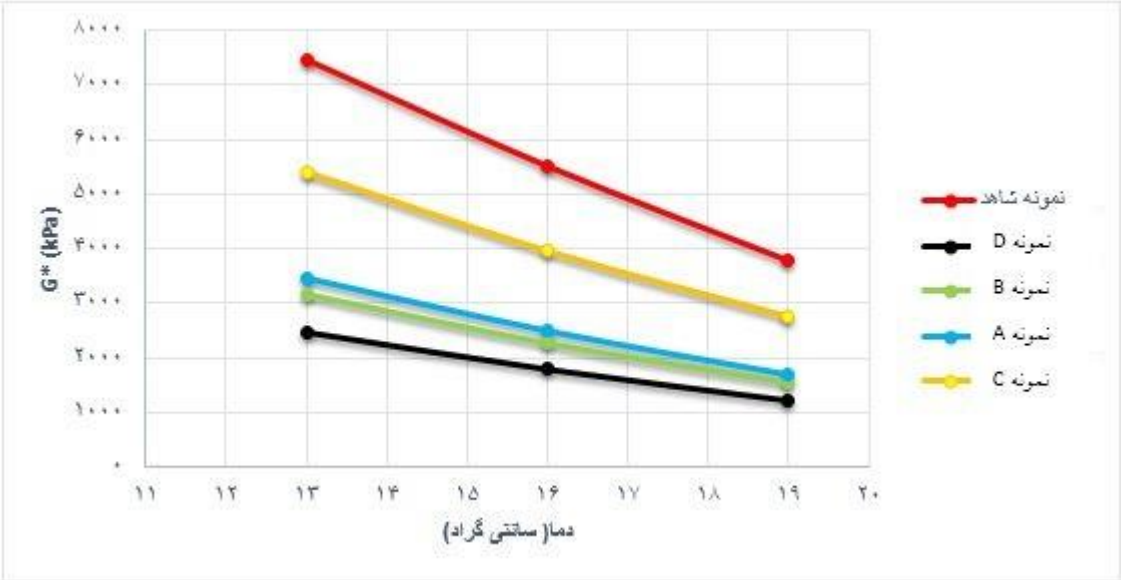
Archive of SID

آزمایش DSR به منظور تعیین رفتار قیر موجود در روسازی در دمای متوسط بهره‌برداری و در دماهای ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۹ درجه سلسیوس انجام شد. این آزمایش، شاخص خوبی از میزان مقاومت قیر در برابر ترک‌های خستگی را نیز در دمای متوسط ارائه می‌دهد.

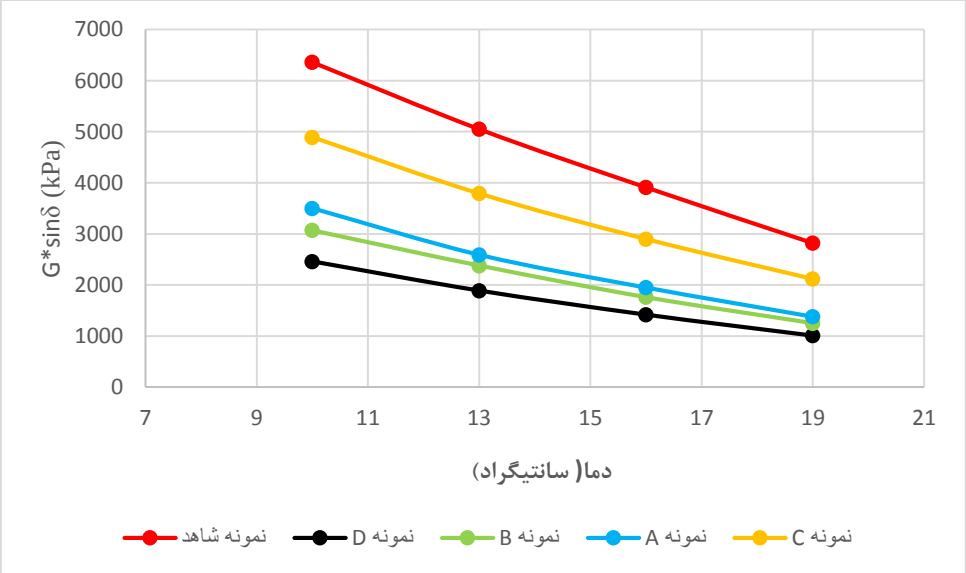
۵. نتایج و بحث

۵-۱ نتایج آزمایش DSR

نتایج آزمایش DSR روی نمونه شاهد و چهار نمونه‌ای که از جوان‌ساز برای بهبود خواص آن‌ها استفاده شده بود در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. به طور کلی، کاهش پارامترهای مدول پیچیده برشی (G*) و زاویه اختلاف فاز (δ) نشان‌دهنده نرم‌تر شدن قیر، کاهش سفتی و در نتیجه عملکرد بهتر از نقطه نظر ترک‌های خستگی می‌باشد.



شکل ۳. نمودار G* در دماهای مختلف



www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۴. نمودار G*sinδ در دماهای مختلف

مقادیر G* برای تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کمتر شده، که نشان‌دهنده عملکرد مناسب تمامی ترکیبات جوان‌ساز در نرم‌تر کردن قیر می‌باشد. در شکل ۳، قابل مشاهده است که همانند آزمایش‌های دیگر، ترکیب D نسبت به دیگر ترکیبات، کاهش بیشتری در مقدار G* ایجاد کرده است. این موضوع به دلیل استفاده از پلیمر به عنوان اصلاح‌کننده‌ی مواد جوان‌ساز تأثیر بسیار مثبتی در کاهش سفتی قیر پیرشده داشته است. می‌توان گفت که تمامی ترکیبات جوان‌ساز از نقطه نظر کاهش پارامتر G* عملکرد بسیار نزدیکی به یکدیگر داشته‌اند.

برای حداقل کردن ترک‌های ناشی از خستگی روسازی آسفالتی در سیستم روسازی ممتاز، مقدار G*sinδ برای قیر پیرشده باید حداکثر ۵۰۰۰ کیلوپاسکال باشد. به عبارت دیگر، حداکثر مقداری که می‌توان گفت نمونه قیری در برابر ترک‌های خستگی دماهای کم تا متوسط مقاومت خوبی دارد، ۵۰۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. لذا مقادیر کم G* و δ از نقطه نظر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی روسازی مناسب می‌باشد.

در شکل ۴، میزان پارامتر G*sinδ در چهار دما نشان داده شده است. پارامتر G*sinδ در تمامی نمودارهای نمونه‌هایی که با جوان‌ساز اصلاح شده بودند، کمتر از مقدار ۵۰۰۰ کیلوپاسکال نمونه D بود که بهترین عملکرد را در بین تمامی نمونه‌ها داشته است و پس از آن نمونه‌های B، A و C در رده‌های بعدی قرار دارند. نمونه D توسط پلیمر اصلاح شده بود که می‌توان این موضوع را دلیل عملکرد بهتر این ترکیب نسبت به بقیه ترکیبات دانست.

بررسی روند تمامی نمودارها نشان می‌دهد که هرچه دمای آزمایش افزایش می‌یابد، عملکرد تمامی نمونه‌ها از نقطه نظر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی افزایش می‌یابد. از دمای ۱۶ درجه سلسیوس به بالا، نمونه پیرشده نیز مقدار G*sinδ کمتر از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال داشته و عملکرد قابل قبولی از خود به نمایش می‌گذارد. اما در دماهای کمتر، پیرشدگی روی این موضوع تأثیر منفی گذاشته است. شیب نمودار نمونه‌های مختلف و روند تغییرات نشان می‌دهد که هرچه دما افزایش می‌یابد، رفتار نمونه‌های مختلف به هم شبیه‌تر شده و عملکرد یکسان‌تری خواهند داشت.

۵-۲. نتایج آزمایش آونگ انگلیسی

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، تمامی چهار ترکیب، به‌جز ترکیب A، حداقل لازم را که جدول آن در بخش قبلی آمده بود، فراهم کردند.

جدول ۶. نتایج آزمایش آونگ انگلیسی

نمونه	قبل از اعمال ترکیب	بلافاصله بعد از اعمال ترکیب	۳۰ دقیقه پس از اعمال ترکیب	پس از خشک شدن کامل سطح
A	۴۶	۱۸	۲۹	۴۸
B	۴۶	۲۰	۳۵	۵۹
C	۴۶	۲۳	۴۲	۶۰
D	۴۶	۲۸	۴۹	۶۱

www.SID.ir

Archive of SID

۵-۳ . نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی

آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی برای بررسی رفتار رئولوژیک قیر انجام پذیرفت. نتایج این آزمایش‌ها و همچنین مقادیر حساسیت دمایی و شاخص نفوذ در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷. نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی

نمونه	درجه نفوذ	نقطه نرمی	حساسیت دمایی	PI
شاهد	۳۸	۵۷/۸	۰/۰۴۰۳	-۰/۰۵
A	۵۳	۵۵	۰/۰۳۹۲۹	۰/۱۲
B	۵۸	۵۷	۰/۰۳۵۶۱	۰/۷۹
C	۵۵	۵۸	۰/۰۳۵۲۳	۰/۸۶
D	۶۱	۶۳	۰/۰۲۹۴	۲/۱۵

با توجه به جدول ۷، نمونه D بهترین عملکرد را در رابطه با افزایش درجه نفوذ قیر پیرشده و در نتیجه اصلاح خواص رئولوژیک داشته است. به طوری که درجه نفوذ قیر پیرشده را که به ۳۸ رسیده بود به ۶۱ تغییر داد. این مقدار بسیار به درجه نفوذ یک قیر ۶۰/۷۰ دست‌نخورده نزدیک می‌باشد. نکته قابل توجه بعدی، مقدار حساسیت دمایی کم نمونه D نسبت به باقی نمونه‌ها می‌باشد که به دلیل اصلاح قیر موجود در آن توسط مواد پلیمری این موضوع قابل انتظار است. در عملکرد باقی نمونه‌ها، اختلاف چشم‌گیری قابل مشاهده نیست و به طور کلی می‌توان گفت تمامی نمونه‌ها عملکرد مناسبی داشته‌اندف هرچند که مقدار درجه نفوذ قیر را به مقدار مشابه برای قیر ۶۰/۷۰ سالم نرسانده‌اند.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان نتایج زیر را استنباط کرد:

الف) هر چهار ترکیب جوان‌ساز در بهبود عملکرد قیر پیرشده از نقطه نظر رئولوژی و مکانیکی موفق عمل کرده‌اند.

ب) استفاده از روغن پسماند به عنوان جایگزین روغن‌های از دست رفته قیر (مالتن‌ها) در ترکیب جوان‌ساز تأثیر مثبتی در بهبود خواص قیر دارد.

ج) اصلاح پلیمری مواد موجود در ترکیب جوان‌ساز تأثیر این ترکیبات در بهبود خواص قیر را بیشتر می‌کند.

د) در استفاده از ترکیبات جوان‌ساز به صورت برجا باید به مسئله اصطکاک سطح پس از بازگشایی ترافیک توجه شود که در این تحقیق تمامی ترکیبات این محدودیت را ارضا کردند.

ه) با توجه به نتایج آزمایش DSR می‌توان دریافت که با استفاده از این ترکیبات جوان‌ساز می‌توان مقاومت روسازی را در مقابل ترک‌های خستگی دماهای متوسط افزایش داد.

و) اصلاح پلیمری مواد جوان‌ساز، حساسیت دمایی قیر حوان‌شده را کاهش می‌دهد.

ز) با استفاده از ترکیبات جوان‌ساز، به طور کلی قیر نرم‌تر شده و رفتار ویسکوزتری از خود نشان می‌دهد.

۷. مراجع

تقوی, م.، حسامی، س. و حسامی، ا. ۱۳۹۵. "مروری بر پیرشدگی در مخلوط‌های آسفالتی، عوامل مؤثر بر آن و مدل‌های شبیه‌سازی آن در شرایط مختلف". همایش ملی پژوهش‌های کاربردی در افق‌های نوین عمران و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر.

www.SID.ir

Archive of SID

2. Allen, R.G., Little, D.N. and Bhasin, A. 2012. "Structural characterization of micromechanical properties in asphalt using atomic force microscopy". J. Mater. Civ. Eng., 24(10): 1317-1327.
3. Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M. and Karim, M.R. 2012. "Investigation on physical properties of waste cooking oil-rejuvenated bitumen binder". Constr. Build. Mater., 37: 398-405.
4. Blomberg, T., Makowska, M. and Pellinen, T. 2016. "Laboratory simulation of bitumen aging and rejuvenation to mimic multiple cycles of reuse". Transport. Res. Proc., 14: 694-703.
5. Boyer, R.E. and Engineer, P.S.D. 2000. "Asphalt rejuvenators "fact, or fable". Transportation Systems 2000 (TS2K) Workshop, San Antonio, Texas, Feb. 28-Mar. 3.
6. Burningham, S. and Stankevich, N. 2005. "Why road maintenance is important and how to get it done". Transport Notes Series No. TRN 4, Washington, DC.
7. Cong, P., Hao, H., Zhang, Y., Luo, W. and Yao, D. 2016. "Investigation of diffusion of rejuvenator in aged asphalt". Int. J. Pavement Res. Technol., 9(4): 280-288.
8. Fernández-Gomez, W. D., Rondón, H. and Fredy, R.L. 2013. "A review of asphalt and asphalt mixture aging". Rev. Ingeniería e Investigación, 33(1): 5-12.
9. García, Á., Schlangen, E. and Van de Ven, M. 2011. "Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete". Fuel, 90(2): 583-591.
10. Grilli, A., Gnisci, M.I. and Bocci, M. 2017. "Effect of ageing process on bitumen and rejuvenated bitumen". Constr. Build. Mater., 136: 474-481.
11. Johansson, L.S. 1998. "Bitumen ageing and hydrated lime". Doctoral Thesis, Institutionen för Infrastruktur Och Samhällsplanering.
12. Lee, J., Li, S., Kim, Y. and Lee, J. 2013. "Effectiveness of asphalt rejuvenator". J. Test. Eval., 41(3): 433-440.
13. Lu, X. and Isacsson, U. 2002. "Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology". Constr. Build. Mater., 16(1): 15-22.
14. Ongel, A. and Hugener, M. 2015. "Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen". Constr. Build. Mater., 94: 467-474.
15. Poulikakos, L.D., Hofko, B., Porot, L., Lu, X., Fischer, H. and Kringos, N. 2016. "Impact of temperature on short-and long-term aging of asphalt binders". RILEM Tech. Lett., 1: 6-9.
16. Siddiqui, M.N. and Ali, M.F. 1999. "Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts". Fuel, 78(9): 1005-1015.
17. Transport and Road Research Laboratory HMSO. 1969. "Instructions for using the portable skid resistance tester". Road Note 27.
18. Woo, W., Chowdhury, A. and Glover, C. 2008. "Field aging of unmodified asphalt binder in three Texas long-term performance pavements". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 2051: 15-22.
19. World Road Association (PIARC). 2014. "The importance of road maintenance". Report 2014R02EN.

www.SID.ir