Archive of SID

بررسی اثر واکس‌های ساسوبیت و پارافین بر خصوصیات رئولوژی قیر

محسن ابوطالبی اصفهانی*، استادیار، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
احمد گلی خوراسگانی، استادیار، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
مجید هارونی جمالوئی، دانش آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۴/۰۶- پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵
صفحه ۱۶۰-۱۴۵

چکیده

باوجودِ کاربردهای زیاد و خواص مناسب قیر در مصارف راه‌سازی؛ خرابی‌ها و معایب مخلوط‌های آسفالتی موجود، ازجمله شیارافتادگی و ترک‌خوردگی خستگی باعث لزوم اصلاحِ قیر مورد استفاده در راه‌سازی با استفاده از افزودنی‌ها می‌گردد. برخی افزودنی‌ها با کاهش دمای اختلاط و تراکم، از سخت شدن قیر جلوگیری کرده و منجر به اصلاح رفتار مخلوط آسفالتی در مقابل بارها شده که علاوه بر این، کاهش آلاینده‌های هوا و مصرف انرژی را نیز، سبب می‌شوند. بنابراین هدف این پژوهش بررسی و مقایسه خواص رئولوژی قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت و واکس پارافین با قیر اصلاح نشده و همچنین ترکیب آنها با توجه به تأثیر این افزودنی‌های بر پیرشدگی و دمای عملکردی است. بدین منظور قیر پایه AC60-70 انتخاب و از روش آزمایشگاهی مبتنی بر آزمایش‌های متداول قیر که شامل درجه نفوذ و نقطه نرمی است و آزمایش‌های شارپ که شامل رئومتر برش دینامیکی، ویسکوزیته دورانی و آزمایش‌های پیرشدگی است، استفاده شده است. نتایج آزمایشات حاکی از مؤثر بودن واکس‌های ذکرشده در افزایش کارایی قیر به دلیل کاهش ویسکوزیته، بوده است. در این حالت می‌توان دمای اختلاط و تراکم را کاهش داد که باعث کاهش پیرشدگی و سخت شدگی قیر می‌شود. همچنین استفاده از ترکیب واکس‌های ساسوبیت و پارافین می‌تواند دمای عملکردی بالای قیر را در مقایسه با نمونه حاوی فقط واکس پارافین بهبود بخشیده و با مقایسه تأثیرات این ترکیب با واکس‌های دیگر، می‌توان با در نظر گرفتن میزان تأثیر و هزینه، انتخاب مناسبی به منظور بهبود خواص و رفتار قیر داشت.

واژه‌های کلیدی: آزمایشهای شارپ، اصلاح‌کننده‌های قیر، پارافین، رئولوژی قیر، ساسوبیت

۱- مقدمه

اندیشیدن در خصوص مسایل روسازی‌های انعطاف‌پذیر (آسفالتی) با توجه به این که جزئی از سرمایه ملی کشورها است به جهت افزایش عمر بیشتر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خرابی‌ها و معایب متداول مخلوط‌های آسفالتی داغ نظیر شیارشدگی در دمای بالا و ترک‌های دمای پایین که ناشی از عملکرد قیرهاست منجر به تلاش‌های بسیاری جهت بهبود خواص قیر در چند دهه اخیر شده است. به همین دلیل طیف گسترده‌ای از مواد اصلاح‌کننده مانند پلیمرها و الیاف‌ها و همچنین مواد افزودنی به‌منظور بهبود خواص و رفتار قیر، مورد استفاده قرار گرفته‌اند که میزان و تأثیرات متفاوتی در تغییرات رفتاری روسازی‌های انعطاف‌پذیر داشته‌اند. جهت کارایی قیر در مخلوط آسفالتی نیاز به دمای بالا جهت اختلاط و تراکم است. دمای بالا منجر به پیرشدگی و سخت شدگی قیر شده که وظایف عملکردی قیر و خواص رئولوژی را تحت الشعاع قرار داده و موجب بروز برخی خرابی‌های در مخلوط آسفالتی می‌شود. علاوه بر این استفاده از دمای بالا باعث افزایش مصرف انرژی و آلاینده‌های هوا می‌شود. در صورتیکه بتوان کارایی قیر یا به عبارت دیگر ویسکوزیته قیر را در دمای پایین در سطح دمای بالا نگه داشت، وظایف عملکردی قیر در مخلوط آسفالتی بهبود می‌یابد. بنابراین مسئله پژوهش چگونگی کاهش دمای تولید آسفالت با حفظ کارایی و خواص رئولوژی قیر،

www.SID.ir

Archive of SID

می‌باشد. جهت جبران آثار منفی دمای بالای تولید روی قیرها، پلیمرها به علت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مطلوب، بیشترین کاربرد را در این زمینه داشته‌اند. اما قیرهای پلیمری به دلیل افزایش هزینه‌های تولید و تعمیر و نگهداری، کمتر مورد توجه واقع شده‌اند. لذا کاهش درجه حرارت تولید با استفاده از افزودنی‌ها با در نظر گرفتن هزینه‌های مربوطه، بیشتر مورد توجه است. بدین منظور افزودنی‌هایی نظیر واکس‌ها ارایه شده که منجر به افزایش ویسکوزیته قیر شده است. لذا می‌توان با استفاده از آنها قیرها را اصلاح و دمای تولید را کاهش داد که منجر به بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک خوردگی می‌شود. اهمیت بررسی اثر واکس در قیر را می‌توان به امکان تغییر خواص قیر بر اثر افزودن واکس مرتبط دانست که با افزایش مقدار واکس احتمال بروز ترک‌خوردگی و یا تغییر شکل پلاستیک در روسازی آسفالتی افزایش می‌یابد. همچنین امکان دارد افزایش واکس باعث افزایش حساسیت دمایی قیر شده که خود باعث افزایش شیارافتادگی در دمای بالا و ترک‌خوردگی در دمای پایین شود. بنابراین لازم است خواص رئولوژی قیر اصلاح شده با افزودن واکس‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. در غیر این صورت ممکن است در طول زمان و تحت شرایط بهره‌برداری عملکرد تغییر نماید؛ لذا از این جا ضرورت انجام پژوهش مشخص می‌شود. بنابراین هدف این پژوهش بررسی خواص رئولوژی قیر اصلاح‌شده با افزودنی‌های واکس پارافین[1]، ساسوبیت[2] و ترکیب واکس‌های ساسوبیت و پارافین می‌باشد. در این راستا قیر AC60-70 به عنوان قیر پایه انتخاب و افزودنی‌های فوق و ترکیبی از آنها به قیر اضافه و روی آنها آزمایش‌هایی نظیر نقطه نرمی، درجه نفوذ و برخی از آزمایش‌های شارپ به‌منظور مقایسه عملکرد قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده انجام شده است. لازم به توضیح است که واکس ساسوبیت در این خصوص عملکرد خوبی داشته ولی واکس پارافین دارای اشکالاتی است. اما قیمت واکس پارافین تقریبا یک دهم ساسوبیت بوده، لذا در این تحقیق ممکن است بتوان به ترکیبی از این دو نوع واکس رسید که ضمن تامین مشخصات لازم، هزینه تمام شده نیز مناسب باشد. بنابراین پرسش‌های عبارتند از: آیا افزودن واکس‌های ساسوبیت، پارافین و ترکیب آن‌ها می‌تواند باعث بهبود قابلیت کارایی قیر شود؟ چه مقدار از افزودنی‌های فوق در افزایش کارایی موثر هستند؟ آیا واکس‌های ساسوبیت، پارافین و یا ترکیبی از آنها باعث بهبود دمای عملکردی متوسط و بالای نمونه نسبت به قیر پایه می‌شوند؟ آیا ترکیب دو واکس ساسوبیت و پارافین می‌تواند گزینه مناسبی از لحاظ عملکرد و هزینه باشد؟

۲- پیشینه تحقیق

بررسی اثر واکس در قیر از دیرباز مورد توجه بوده و تلاش برای شناخت اثرات واکس‌ها همواره وجود داشته است. ازجمله تحقیقات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به تحقیق واجتا (Vajta & Vajta, 1971) در سال ۱۹۷۱، مکای (McKay & Branthaver, 1995) در سال ۱۹۹۵، گوئل (Gawel, Czechowski, & Baginska, 1996) در سال ۱۹۹۶، کاربنیانی (Carbognani, et al., 1998) در سال ۱۹۹۸ و باتز (Butz, Rahimian, & Hildebrand, 2000) در سال ۲۰۰۰ اشاره کرد.

به‌طورکلی تأثیر منفی واکس در قیر را می‌توان با فرآیند تبلور و خواص ذوب واکس مرتبط دانست، که در این رابطه می‌توان به دمای انتقال شیشه‌ای[3] و متبلور شدن واکس در محدوده این انتقال دمایی اشاره کرد. همچنین وجود بخش کریستالی متفاوت باعث ایجاد نقطه ذوب متفاوت در واکس‌های پارافینی و میکرو کریستال شده است. در این بین واکس‌های میکروکریستالی به دلیل ساختار متراکم و متقارن دارای دمای ذوب بالاتری نسبت به واکس‌های پارافینی هستند با توجه به تأثیر کمتر واکس‌های میکرو کریستالی بر سختی قیر، می‌توان انتظار داشت که قیر حاوی واکس‌های میکرو کریستالی دمای عملکردی پایین‌تری داشته باشند. بنابراین در این حالت محدوده انعطاف‌پذیری قیر یعنی تفاوت بین نقطه نرم شدن تا نقطه شکست تا حدودی افزایش می‌یابد (Oberthuer & Rahimian, 1997). با توجه به وجود صفحات خالی بین زنجیر هیدروکربنی در واکس‌ها که می‌توانند نقطه شروع ترک‌خوردگی در قیر باشند، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن واکس‌های پارافینی به قیر ممکن است منجر به کاهش دمای عملکردی پایین قیر شوند (Butz, Rahimian, & Hildebrand, 2000).

www.SID.ir

Archive of SID

بنابراین به صورت خلاصه اثرات منفی افزودن واکس در قیر به شرح پیوست بیان می شود.

الف) واکس‌ها می‌توانند باعث بر هم زدن ساختار کلوئیدی در قیر از طریق قابلیت تأثیر بر رزین‌ها در فاز مالتن و جهت‌گیری گروه‌های قطبی به سمت آسفالتن شوند (Barth, 1962).

ب) واکس‌ها تأثیری بر خصوصیات چسبندگی قیر نداشته و افزودن آن‌ها به قیر به دلیل این‌که حاوی مولکول‌های قطبی نیستند باعث کاهش انعطاف‌پذیری قیر خواهند شد (Barth, 1962).

ج) وجود واکس در قیر می‌تواند باعث غیریکنواختی و عدم پیوستگی بین آسفالتن و فاز مالتن شود (Rahimian, Sachs, & Butz, 1998).

د) واکس‌های میکروکریستالی نسبت به پارافینی به دلیل ترکیب بهتر با قیر ازلحاظ خصوصیات رئولوژی در ساختار قیر مناسب‌تر هستند اما ممکن است با توجه به تأثیر رقیق‌کنندگی، انسجام قیر را کاهش دهند که باعث افزایش حساسیت برشی در قیر می‌شوند (Oberthuer & Rahimian, 1997).

واکس‌ها با توجه به نوع و مقدار افزوده شده می‌توانند با افزایش سختی، باعث افزایش مقاومت قیر در برابر شیارافتادگی در دمای بالا شوند. بنابراین نوع واکس باید با در نظر گرفتن دمای عملکردی و ترک‌های ناشی از دمای پایین به‌گونه‌ای انتخاب شود تا دارای دمای ذوب بالاتری از محیط باشد (D'Angelo et al., 2008).

تحقیقات انجام‌شده در زمینه مخلوط‌های آسفالتی گرم ازجمله تحقیق هرلی (Hurley & Prowell, 2005) و زامانیس (Zaumanis & Haritonovs, 2010) نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط‌های حاوی واکس در برابر تغییر شکل‌های ناشی از دمای بالا، نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ مرسوم است. این عملکرد را می‌توان به دلیل ساختار شبکه‌ای واکس در قیر در دمای کمتر از نقطه تبلور واکس دانست. پس با توجه به معایب مخلوط آسفالتی داغ استفاده‌شده در مناطق گرم، از جمله شیارافتادگی، می‌توان از واکس‌ها برای تولید مخلوط آسفالتی گرم با مقاومت شیارافتادگی بالاتر استفاده کرد.

از واکس‌ها به عنوان بهبود دهنده جریان قیر با کاهش ویسکوزیته در روسازی‌های آسفالتی و ماستیکی استفاده می‌شود. با افزودن واکس در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر و با کاهش ویسکوزیته، امکان کاهش دمای تولید مخلوط آسفالتی فراهم می‌شود. کاهش احتمال متبلور شدن واکس می‌تواند منجر به افزایش تغییر شکل در آسفالت شود. با وجود معایب زیادی که افزودن واکس به قیر به دنبال دارد با این حال نظرات موافقی نیز درباره افزودن واکس به قیر وجود داشته که بر این اساس، اثرات منفی واکس‌ها ازجمله: ترک خستگی در دمای پایین، حساسیت دمایی، کاهش چسبندگی و غیره در مقابل اثر مثبت افزودن واکس به قیر، یعنی کاهش ویسکوزیته مخلوط قابل‌چشم‌پوشی بوده است (Abraham & Butz, 2002).

ازجمله تحقیقات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به تحقیق ادواردز در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد، که با بررسی تأثیر واکس‌ها (پلی‌اتیلن، ساسوبیت، مونتان واکس و اسلک واکس) و پلی فسفریک اسید بر روی قیر و مخلوط آسفالتی با انجام آزمایش‌های شارپ نظیر رئومتر برش دینامیکی، رئومتر تیرچه خمشی به این نتیجه رسید که مقدار و نوع اثر واکس بر روی خصوصیات رئولوژی قیرها، به قیر پایه و همچنین نوع و مقدار افزودنی بستگی دارد. در این میان ترکیب قیر نقش تعیین‌کننده‌ای می‌تواند داشته باشد. همچنین در تحقیق ادواردز افزودن واکس پلی‌اتیلن باعث افزایش سختی قیر در دمای متوسط و بالا به‌خصوص در قیرهای فاقد افزودنی شد (Edwards, 2005). آکیستی در سال ۲۰۰۸ به بررسی تأثیر ساسوبیت و Aspha-min روی قیرهایی با پنج منبع مختلف و مخلوط آسفالتی با بررسی مدول ترکیبی و مقدار زاویه فاز پرداخت. از نتایج به‌دست‌آمده از افزودن ساسوبیت می‌توان به کاهش مقاومت مخلوط در برابر ترک‌های خستگی، افزایش سفتی قیر و بهبود مقاومت در برابر شیار شدگی اشاره کرد (Akisetty, 2008). در سال ۲۰۰۹ بیرو و همکاران به بررسی مقاومت برشی مخلوط‌های آسفالتی گرم پرداختند و افزایش ویسکوزیته برشی مخلوط‌ها را مطرح نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مواد افزودنی به‌خصوص ساسوبیت باعث افزایش ویسکوزیته برشی مخلوط‌ها خواهد شد و همچنین روش‌های مختلف و پارامترهای آزمایش در ویسکوزیته برشی مخلوط‌ها،

www.SID.ir

Archive of SID

تأثیرگذارنـد (Biro, Gandhi, & Amirkhanian, 2009a). در تحقیق دیگری که توسط بیـرو و همکـاران در سال ۲۰۰۹ به‌منظـور بررسـی خـواص رئولـوژیکی مخلـوط آسفالتی گرم در دمای متوسط انجام شد نشان داده شـد کـه ترکیب قیرهـایی بـا مـواد غیـر آلـی مثـل Aspha-Min در مقایسه با قیرهای معمولی یا تغییری نمی‌کنند و یا تغییراتشان بسیار جزئی است. در مورد مواد کف‌زا نیز بیـان داشـتند کـه چون این مواد حین اختلاط تولید حباب می‌کنند و آب سریعاً تبخیر می‌شود، تأثیرشان روی خواص مـذکور، قابـل‌اغمـاض است اما تأثیر افزودنی‌های آلی مثـل ساسـوبیت بسـیار قابـل توجـه اسـت (Biro, Gandhi, & Amirkhanian, 2009b). در سال ۲۰۰۹ شیائو و همکاران به بررسـی تـأثیر افزودنی‌های مورد استفاده در آسـفالت‌هـای گـرم، در رفتـار خستگی مخلوط‌هـای آسـفالتی لاسـتیکی مـؤثر در بازیافـت لاستیک و صرفه‌جویی در انرژی پرداختند که از نتایج تحقیق آن‌ها می‌توان به تأثیر ساسوبیت در کـاهش دمـای اخـتلاط و تراکم مخلوط آسـفالتی و همچنـین بهبـود عملکـرد مخلـوط آسفالتی حاوی ساسوبیت در مقایسه با آسفالت معمولی اشاره کـرد (Xiao, Zhao, & Amirkhanian, 2009). در سال ۲۰۱۰ سیلوا و همکاران ترکیب‌های متفاوت قیر را برای بهینه کردن مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قـرار دادنـد و به این نتیجه رسیدند که برای حداکثر کاهش دما، بـا در نظـر گرفتن این نکته که بـه خـواص دیگـر مخلـوط آسـیبی وارد نشود باید ترکیب‌هـای مختلـف مـورد بررسـی قـرار گیرنـد (Silva, Oliveira, Peralta, & Zoorob, 2010).

در سال ۲۰۱٤ ایوانسـکی و همکـاران بـه بررسـی تغییـر در خواص رئولوژیکی دو نمونه قیر، با درجه نفـوذ متفـاوت بـا افزودن ساسوبیت قبل و بعد از پیرشدگی بـا آزمـایش لعـاب نازک چرخشی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نوع قیـر در فرآیند پیرشدگی قیر اصلاح‌شده مؤثر اسـت (Iwanski & Mazurek, 2014). در سـال ۲۰۱٦ یـو و همکـاران (Yu, et al., 2016) به بررسـی ویژگـی‌هـای شـیمیایی و رئولوژی آسفالت لاستیکی اصـلاح‌شـده بـا چهـار افزودنـی آسفالت گـرم شـامل: اودرم، ساسـوبیت، پـارافین و ترکیـب ساسوبیت و اودرم با استفاده از آزمایش‌هایی نظیر نقطه نرمی، درجه نفوذ، ویسـکوزیته دورانـی، رئـومتر بـرش دینـامیکی، رئومتر تیرچه خمشی پرداختند.

از نتـایج تحقیـق صـورت گرفتـه مـی‌تـوان بـه مـوارد زیـر اشاره کرد:

- افزودن ساسوبیت باعث افزایش دمای عملکردی بـالای مخلوط آسفالتی شده اسـت امـا تـأثیر کاهشـی نیـز بـر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی داشته است.
- استفاده از افزودنی‌های ترکیبـی مخلـوط آسـفالتی گـرم مانند ۱/۵ درصد ساسوبیت به همراه ۲/۵ درصـد اودرم باعث کاهش مقاومت در برابر خستگی و ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی شده است و بنابراین بـه‌عنـوان گزینـه قابل قبول برای کاهش دمای مخلوط آسفالتی محسـوب نمی‌شود.

در سال ۲۰۱۷ اُنر و سنگُز به بررسی اثرات رئولوژیکی واکس با استفاده از آزمایش‌های ویسکومتر دورانی و رئومتر برشـی دینـامیکی پرداختنـد کـه از نتـایج آن مـی‌تـوان بـه کـاهش ویسکوزیته در دمای بالای قیر اصـلاح‌شـده نسـبت بـه قیـر معمولی اشاره کرد (Oner & Sengoz, 2017).

در تحقیق دیگری به بررسی تأثیر کاستن دمای پخت بر عمـر خستگی مخلوط آسفالتی به روش آزمایشگاهی و در ۳ دمای اختلاط ۱۲۰،۱۰۰ و ۱٤٥ درجه سـانتی‌گـراد، پرداختـه شـده است. برای حفـظ کنـدروانی مناسـب قیـر از افزودنـی‌هـای ساسوبیت و زئولیت استفاده شد. نتایج نشان می دهد که عمر خستگی مخلوط‌هـای آسـفالتی گـرم بیشـتر از مخلـوط‌هـای آسفالتی داغ بوده و نمونه های حاوی ساسوبیت دارای عمـر خستگی بیشتری انسبت به نمونه های حاوی زئولیت هسـتند (Niazy, 2016). همـانطور کـه ملاحظـه شـد بـا وجـود تحقیقات زیاد انجـام‌شـده در زمینـهٔ افزودنـی‌هـای مخلـوط آسفالتی گرم در کشورهای دیگر، مطالعه جامعی در این زمینه در داخل کشور انجام نشده و از طرف دیگر مطالعـه خاصـی در زمینهٔ بررسی اثر ترکیب افزودنی‌هایی ساسوبیت و پارافین صورت نگرفته است. لـذا بـا توجـه خـلاء فـوق لازم اسـت تحقیقی در رابطه با بررسی اثر واکس‌ها و ترکیب آنها، بـرای دمای عملکردی قیر اصلاح‌شده در دمای بالا و متوسط انجام شود تا ضمن بررسی اثرات مثبت و منفی افزودن واکس‌ها به

www.SID.ir

Archive of SID

قیر، امکان انتخاب مناسب واکس مورد نیاز برای اصلاح قیر فراهم شود.

۳- مواد و مصالح

۳-۱- قیر

در این تحقیق از قیر تولیدی شرکت شیمی تجارت نقش‌جهان با درجه نفوذ ٦٠/٧٠ به‌عنوان قیر پایه برای مقایسه با ترکیب‌های حاوی واکس استفاده شد که مشخصات آن طبق جدول ۱ می‌باشد.

۳-۲- مواد افزودنی

مطابق با جدول ۲ در پژوهش حاضر دو واکس ساسوبیت و پارافین برای اصلاح قیر پایه انتخاب شدند. علاوه بر اضافه‌کردن دو واکس ذکرشده، واکس‌های ساسوبیت و پارافین باهم، به‌عنوان یک افزودنی ترکیبی استفاده شدند که درنهایت ترکیب‌های به‌دست‌آمده شامل: ۱- قیر پایه (Bit) با درصدهای متفاوت واکس پارافین (۳ (3%Pa) و ۵ درصد وزنی (5%Pa)) ۲- قیر پایه با ۲/۵ درصد وزنی ساسوبیت (2.5%S) ۳- قیر پایه با ترکیبی از ۱ درصد وزنی ساسوبیت و درصدهای متفاوت واکس پارافین (۳ (1%S+3%Pa) و ۵ درصد وزنی (1%S+5%Pa)) است. درصد هر افزودنی بر اساس توصیه تولیدکنندگان و تحقیقات گذشته از جمله تحقیق ادواردز (Edwards, 2005) و لامپرتی (Lamperti, 2012) انتخاب شده است.

جدول ۱. مشخصات قیر ٦٠/٧٠ مصرفی

قیر	شرکت سازنده	وزن مخصوص	درجه نفوذ	نقطه نرمی	خاصیت انگمی
٦٠-٧٠	شیمی تجارت نقش‌جهان	١/٠٢	٦٥/٤	٤٩/٨	>١٠٠

جدول ۲. مشخصات واکس‌های ساسوبیت و پارافین مورداستفاده

مشخصات	افزودنی‌های مخلوط آسفالتی گرم	
	واکس پارافین	ساسوبیت
اجزاء تشکیل‌دهنده	هیدروکربن‌های اشباع‌شده	هیدروکربن‌های اشباع‌شده
حالت فیزیکی	جامد	جامد
رنگ	سفید	سفید شیری
چگالی (g/cm^3)	٠/٨٥	٠/٦٢٢
نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	٧٢-٧٤	١٠٥-١١٠
حلالیت در آب	نامحلول	نامحلول

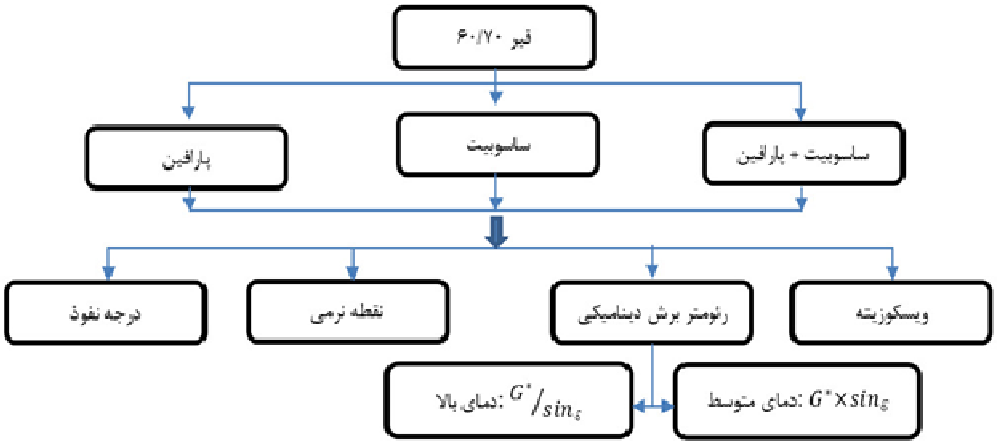
٤- روش تحقیق

مطابق با شکل ۱ در این تحقیق بعد از ترکیب قیر و واکس‌ها و ساخت ٦ نمونه از ترکیب واکس‌های مورد نظر با قیر ٦٠/٧٠، به بررسی و مقایسه قیرهای اصلاح‌شده و پایه با استفاده از آزمایش‌های متداولی مانند نقطه نرمی، درجه نفوذ و آزمایش‌های شارپ به‌منظور بررسی دمای عملکردی بالا و متوسط پرداخته شده است. در این پژوهش تمرکز خاصی بر پدیده پیرشدگی قیر به دلیل تأثیر قابل‌توجه در بسیاری از خرابی‌های روسازی ازجمله شیارافتادگی و ترک‌های خستگی شده است. در این زمینه جهت شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت از آزمایش لعاب نازک چرخشی[٤] و پیرشدگی بلندمدت از آزمایش محفظه تسریع پیری[٥]، استفاده شد و جهت ارزیابی و مقایسه خواص مکانیکی و رئولوژی قیرهای

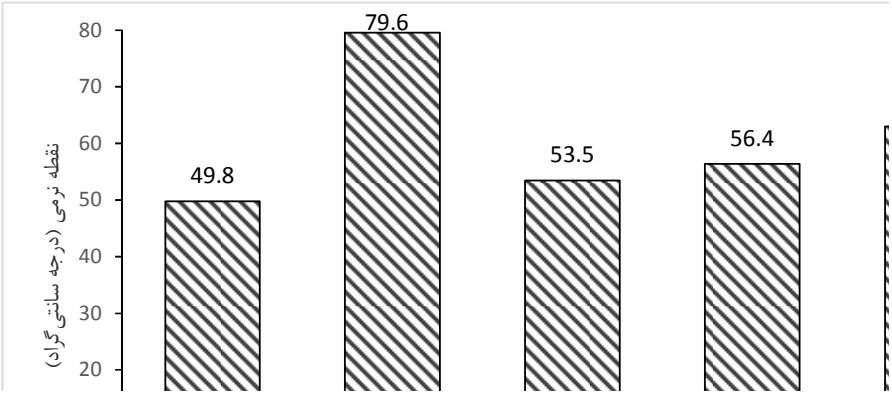
www.SID.ir

Archive of SID

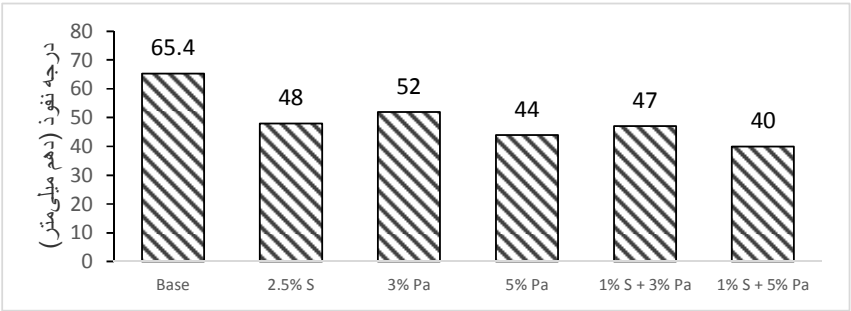
اصلاح‌شده و پدیده پیرشدگی از آزمایش رئومتر برش دینامیکی[۶] به جهت امکان ارزیابی اثرات زمان و دما استفاده شده تا عملکرد ترکیب‌های به‌دست‌آمده در دمای بالا و متوسط مشخص شود.



شکل۱. مراحل و تحقیق و آزمایش‌های مربوطه



شکل۲. تأثیر واکس‌های ساسوبیت و پارافین بر نقطه نرمی



شکل۳. تأثیر واکس‌های ساسوبیت و پارافین بر درجه نفوذ

www.SID.ir

Archive of SID

۵- آزمایش‌ها و نتایج

۵-۱- اختلاط قیر و مواد افزودنی

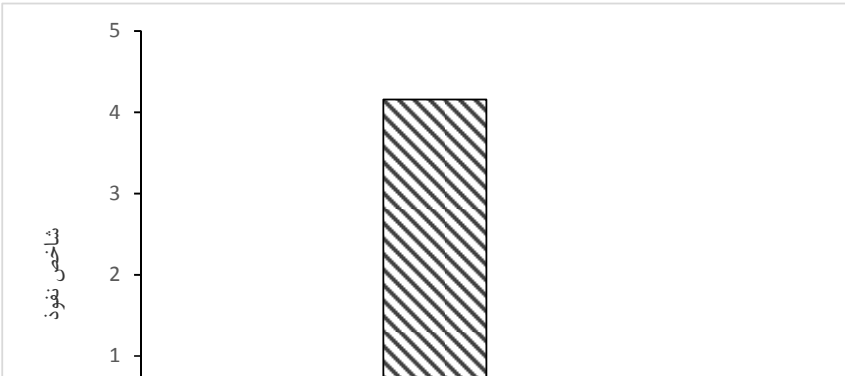
برای اختلاط واکس با قیر از همزن برش پایین استفاده شد. پس از رسیدن دمای قیر و واکس به ۱۲۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، مخلوط توسط همزن برش پایین با سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه ترکیب شد.

۵-۲- تعیین درجه نفوذ و نقطه نرمی

آزمایش نفوذپذیری برای تعیین سختی قیر خالص و اصلاح‌شده با واکس‌ها و آزمایش نقطه نرمی قیر به‌منظور مقایسه حساسیت قیرها نسبت به تغییرات دما مطابق با استانداردهای ASTM-D5 و ASTM-D36 انجام شد. نتایج آزمایش‌های نقطه نرمی و درجه نفوذ در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشخص است، نمونه‌هایی با درجه نفوذ بالاتر دارای نقطه نرمی پایین‌تری هستند. همچنین نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بیانگر افزایش سختی قیر با افزودن واکس‌ها است که با افزایش مقدار واکس موجود در ترکیب، سختی قیر در تمامی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است؛ با این حال مقدار افزایش سختی قیر، به نوع واکس وابسته است. مطابق با تحقیقات گذشته مشاهده می‌شود افزودن ساسوبیت درجه نفوذ را کاهش و نقطه نرمی را نسبت به قیر ۶۰/۷۰ افزایش داده است. همچنین با ترکیب ساسوبیت و پارافین درجه نفوذ کاهش و نقطه نرمی نسبت به قیر حاوی واکس پارافین افزایش داشته است.

۵-۳- شاخص نفوذ قیر

مقدار شاخص نفوذ از حدود عدد ۳- برای قیرهایی با حساسیت دمایی بالا تا حدود ۷+ برای قیرهای دمیده متغیر است. حساسیت دمایی قیر به علامت و بزرگی شاخص نفوذ بستگی دارد که برای قیرهای مورداستفاده در راه‌سازی مقدار مناسب شاخص نفوذ در محدوده ۲ تا ۲- قرار دارد. افزایش شاخص نفوذ بیانگر بهبود حساسیت دمایی قیر است، بنابراین مطابق با شکل ٤ می‌توان نتیجه گرفت که افزودن واکس‌ها به‌خصوص ساسوبیت باعث بهبود حساسیت دمایی قیر شده‌اند. در تمامی مقادیر افزودنی، شاخص نفوذ دارای مقادیری بزرگتر از قیر پایه است که بیانگر حساسیت حرارتی کمتر و عملکرد بهتر قیر در شرایط مختلف دمایی است.



شکل٤. تأثیر واکس‌های افزوده شده بر شاخص نفوذ

۵-٤- ویسکوزیته

آزمایش ویسکومتر دورانی[۷] برای ارزیابی کارایی و تعیین دمای مناسب برای اختلاط به کار می‌رود تا چسبنده‌های قیری به ویژه قیرهای اصلاح‌شده بتوانند در تجهیزات اختلاط گرم، به‌راحتی پمپاژ و یا جابجا شوند و یا در دمای اختلاط به‌خوبی با مصالح سنگی مخلوط شوند. در این تحقیق ویسکوزیته در سه دمای ۱۰۰، ۱۳۵ و ۱٦۰ درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد AASHTO-TP 48 انجام شد. مطابق شکل ۵ افزودن واکس به قیر باعث کاهش ویسکوزیته قیر به خصوص در بازه دمایی ۱۰۰ تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد شده است، بنابراین امکان کاهش دمای تولید و اجرای مخلوط آسفالتی را فراهم می‌کند. همچنین با کاهش ویسکوزیته،

www.SID.ir

Archive of SID

تراکم و کارایی مخلوط آسفالتی بهبود پیدا می‌کند. واکس‌ها در دمای بالاتر از نقطه ذوب خود در قیر کاملاً حل شده و با تغییر حالت واکس به مایع، می‌توانند باعث کاهش ویسکوزیته قیر شوند. با این حال، در دمای کمتر از نقطه ذوب واکس، با حفظ ساختار کریستالی خود مانع حرکت مولکول‌ها شده و باعث تقویت خاصیت ویسکوالاستیک قیر خواهند شد.

۵-۵- دمای اختلاط و تراکم

به منظور تعیین دمای اختلاط و تراکم مناسب، از آزمایش ویسکومتر دورانی در سه دمای ۱۰۰، ۱۳۵ و ۱٦۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. مطابق با استاندارد ASTM D6926-04 ویسکوزیته مناسب قیر برای اختلاط و تراکم به ترتیب باید برابر ۲۰±۱۷۰ و ۳۰±۲۸۰ سانتی استوکس باشد. مطابق با شکل‌های ٦ و ۷، افزودن واکس‌ها به قیر پایه باعث کاهش قابل‌توجه دمای اختلاط و تراکم قیر شده است. از مقایسه دمای اختلاط و تراکم ترکیب‌های حاوی واکس می‌توان نتیجه گرفت که دمای اختلاط این ترکیب‌ها نسبت به قیر پایه حدود ۳ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد و دمای تراکم ترکیب‌های حاوی واکس، حدود ٦ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به قیر پایه کاهش داشته است. از میان ترکیب‌های مورد بررسی، ترکیب ۱ درصد ساسوبیت با ۳ درصد واکس پارافین، با مقدار کمتری واکس، امکان کاهش بیشتر ویسکوزیته را فراهم آورده است. با کاهش دمای اختلاط و تراکم، مصرف انرژی و آلودگی ناشی از تولید مخلوط آسفالتی به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. مقدار کاهش مصرف انرژی را می‌توان مطابق با تحقیقات گذشته، به ازای هر ٦ درجه سانتی‌گراد کاهش دما، ۲ تا ۳ درصد دانست (D'Angelo et al., 2008).

۵-٦- دمای عملکردی

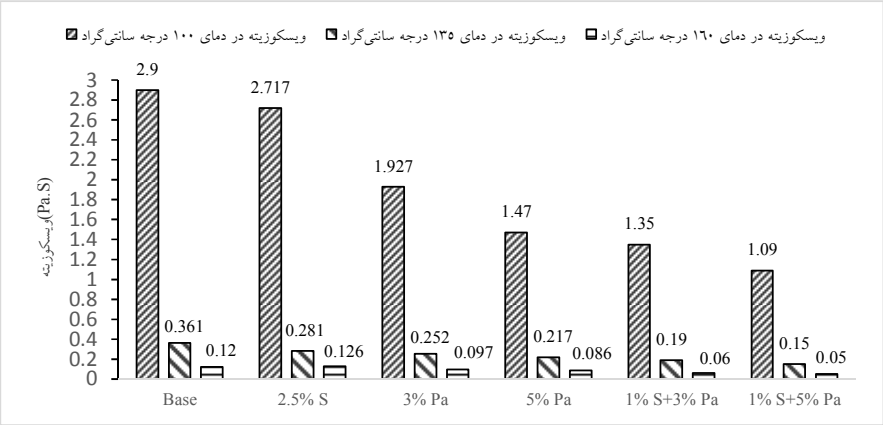
در صورت بررسی عملکرد قیر با آزمایش‌های شارپ و مطابقت نتایج حاصل از این آزمایش‌ها با معیارهای مربوطه امکان وقوع شیارافتادگی، ترک‌های خستگی و ترک‌های ناشی از دمای پایین کاهش می‌یابد؛ بنابراین در ادامه نتایج حاصل از آزمایش‌های شارپ بر اساس دمای عملکردی بالا و متوسط بر روی نمونه‌های خالص و پیر شده ارائه می‌شود تا رفتار قیر حاوی واکس در شرایط مختلف دمایی مورد بررسی قرار گیرد.

۵-٦-۱- دمای عملکردی بالا

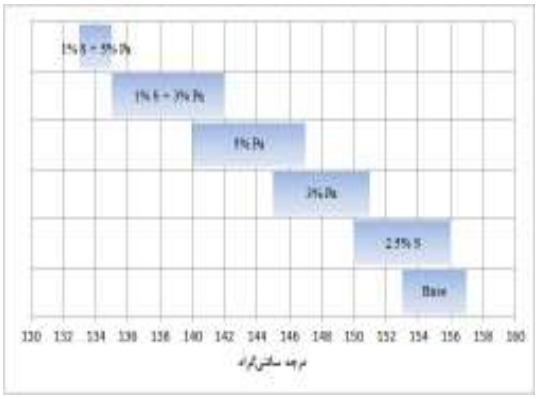
برای بررسی عملکرد قیرهای خالص و اصلاح‌شده با واکس‌ها در دمای بالا از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی بر روی نمونه چسبنده اصلی و پیر شده در آزمایش لعاب نازک چرخشی به قطر ۲ میلی‌متر و با اسپیندل ۲۵ میلی‌متر استفاده شد. آزمایش رئومتر برش دینامیکی از دمای ٤٦ درجه سانتی‌گراد شروع و تا زمانی که پارامتر $G^*/\sin\delta$ برای ماده چسبنده اصلی مطابق با استاندارد AASHTO M 320 بیشتر از ۱۰۰۰ پاسکال و بیشتر از ۲۲۰۰ پاسکال برای قیر پیر شده در آزمایش RTFO بود ادامه داشت و دمای آزمایش به درجه حرارت بعدی با گام ٦ تایی افزایش پیدا می‌کرد. همچنین در هر دما ۱۰ تکرار صورت گرفت. در ادامه به بررسی دمای عملکردی بالای نمونه‌ها بر اساس نوع واکس پرداخته خواهد شد. الف) ساسوبیت: شکل ۸ رابطه بین پارامتر $G^*/\sin\delta$ و دما را برای ماده چسبنده اصلی و پیر شده در آزمایش لعاب نازک چرخشی نشان می‌دهد. به طور کلی افزودن ساسوبیت به قیر پایه با افزایش پارامتر $G^*/\sin\delta$ و افزایش دمای عملکردی بالای قیر پایه (به میزان یک گام) شده و باعث کاهش شیارافتادگی در مخلوط آسفالتی می‌شود. شکل ۹ رابطه بین زاویه فاز و دما را برای ماده چسبنده اصلی و پیر شده در آزمایش لعاب نازک چرخشی نشان می‌دهد. زاویه فاز، نشانه‌ای از مقادیر نسبی تغییر شکل قابل‌برگشت و غیر قابل برگشت است، به این صورت که زاویه فاز کوچک‌تر نشان‌دهنده الاستیک بودن بیشتر ترکیب است. بنابراین افزودن ساسوبیت با کاهش زاویه فاز باعث الاستیک‌تر شدن ترکیب شده است.

www.SID.ir

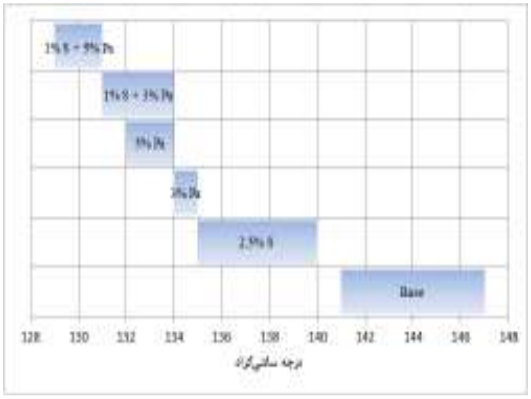
Archive of SID



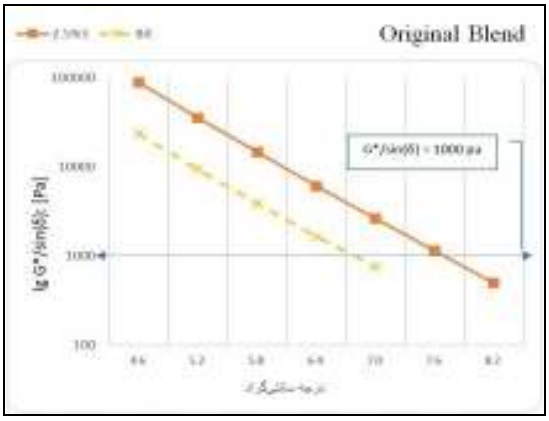
شکل٥. نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی در سه دمای١٠٠، ١٣٥ و ١٦٠ درجه سانتی‌گراد

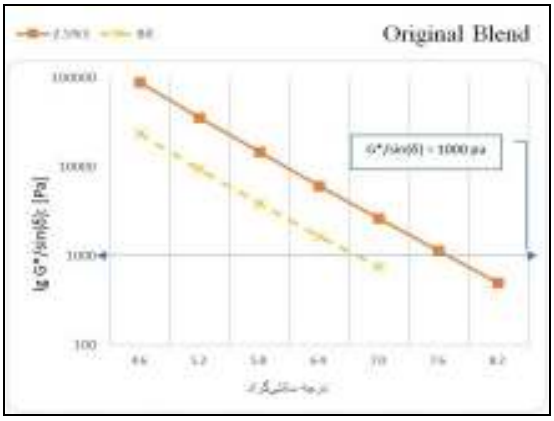


شکل٦. دمای اختلاطِ ترکیب‌های حاوی واکس و قیر پایه



شکل٧. دمای تراکمِ ترکیب‌های حاوی واکس و قیر پایه

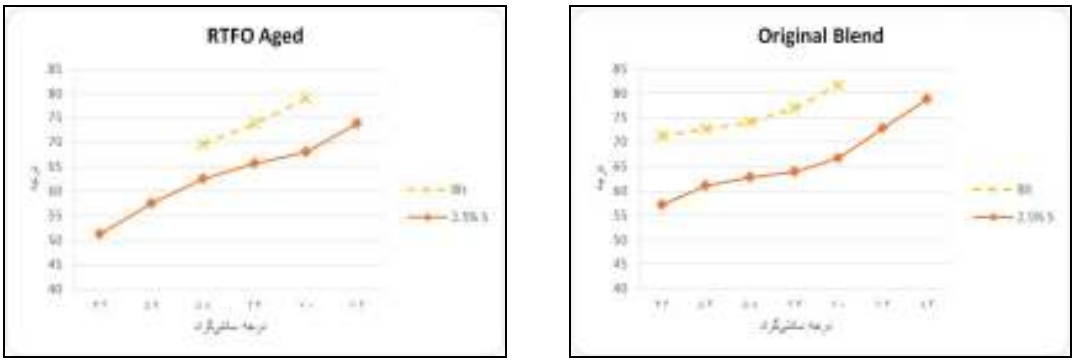




شکل٨. پارامتر $G^*/\sin\delta$ در دما و پیرشدگی‌های مختلفِ قیر حاوی ساسوبیت

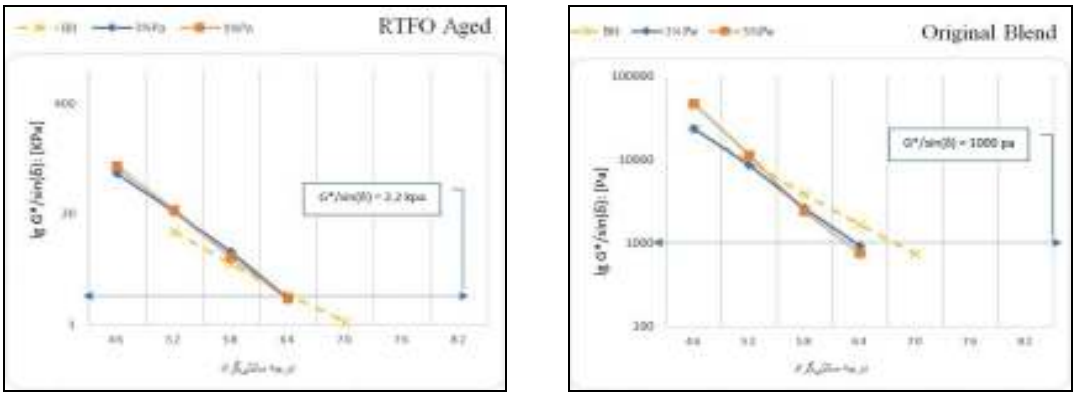
www.SID.ir

Archive of SID

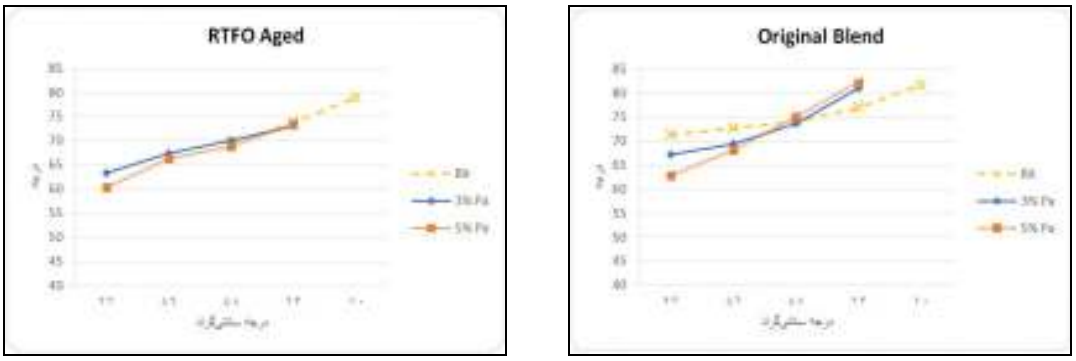


شکل۹. زاویه فاز در دما و پیرشدگی‌های مختلفِ قیر حاوی ساسوبیت

ب) پارافین: مطابق با شکل ۱۰ افزودن واکس پارافین با کاهش پارامتر $G^*/\sin\delta$ در دمای بالا باعث کاهش دمای عملکـردی بـالای قیر شده است. افزایش مقدار واکس پارافین با کاهش دمای عملکردی رابطه مستقیم داشـته و احتمـال شـیارافتادگی در دمـای بـالا را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش مقدار واکس پارافین مطابق با شکل ۱۱ موجب افزایش زاویه فاز قیر در دمای بالا شده است.



شکل۱۰. پارامتر $G^*/\sin\delta$ در دما و پیرشدگی‌های مختلفِ قیر حاوی واکس پارافین

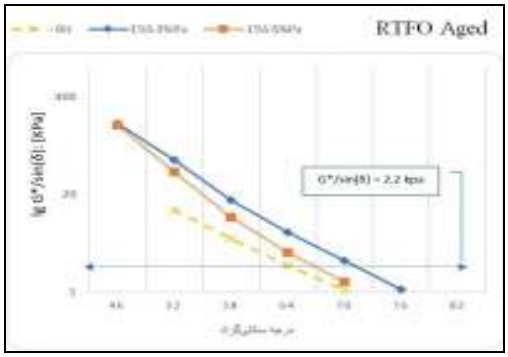


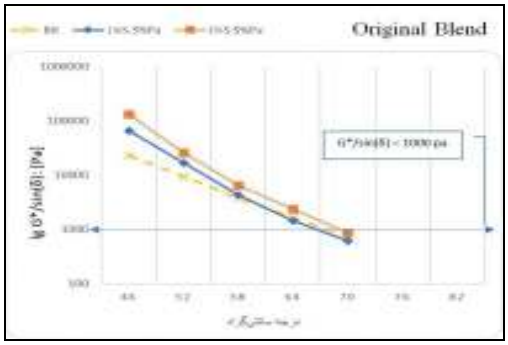
شکل۱۱. زاویه فاز در دما و پیرشدگی‌های مختلفِ قیر حاوی واکس پارافین

ج) ترکیب واکس پارافین و ساسوبیت: شکل ۱۲ اثر افزودن واکس ترکیبی ساسوبیت و پارافین را بر روی شاخص شیارافتادگی قیر در حالت پیر نشده و پیر شده کوتاه‌مدت در آزمایش لعاب نازک چرخشی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزودن واکس ساسوبیت به ترکیب حاوی واکس پارافین، شاخص شیارافتادگی قیر در مقایسه با ترکیب حاوی واکس پارافین افزایش یافته و همچنین مطابق با شکل ۱۳، زاویه فاز نیز کاهش یافته است.

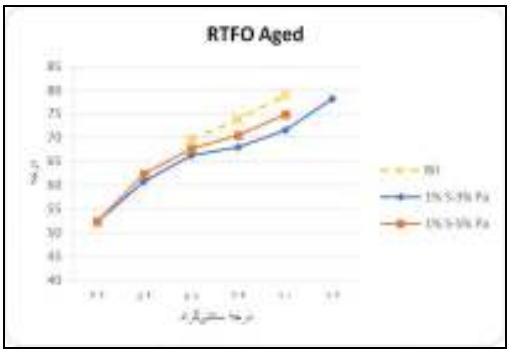
www.SID.ir

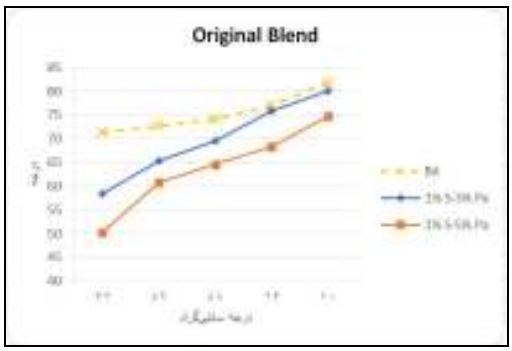
Archive of SID





شکل١٢. پارامتر $G^*/\sin\delta$ در دما و پیرشدگی‌های مختلفِ قیر حاوی ترکیب واکس پارافین و ساسوبیت





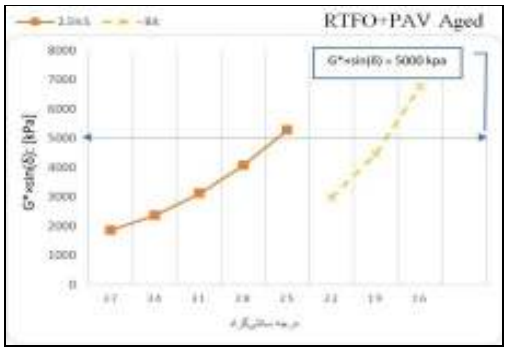
شکل١٣. زاویه فاز در دما و پیرشدگی‌های مختلفِ قیر حاوی ترکیب واکس پارافین و ساسوبیت

٥-٦- ٢ دمای عملکردی متوسط

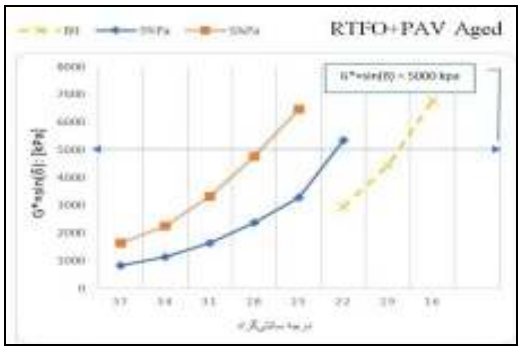
پس از انجام آزمایش PAV، به منظور بررسی دمای عملکردی متوسط هرکدام از ترکیب‌ها از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی استفاده شد. برای شروع آزمایش با توجه به دمای عملکردی بالای نمونه، آزمایش DSR شروع و با فاصله دمایی ٣ درجه سانتی‌گراد تا جایی که پارامتر $G^*\times\sin\delta$ بیشتر از ٥٠٠٠ کیلو پاسکال بود ادامه داشت. این آزمایش برای نمونه‌ای به ضخامت ٢ میلی‌متر و اسپیندلی به قطر ٨ میلی‌متر با ١٠ تکرار در هر دما صورت گرفت. مقدار $G^*\times\sin\delta$ در دمای آزمایش باید حداکثر ٥٠٠٠ کیلو پاسکال باشد تا ترک ناشی از خستگی به حداقل برسد. شکل‌های ١٤ تا ١٦ نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی را برای تمامی ترکیب‌هایی پیر شده در هر دو آزمایش لعاب نازک چرخشی و محفظه تسریع پیری نشان می‌دهند.

www.SID.ir

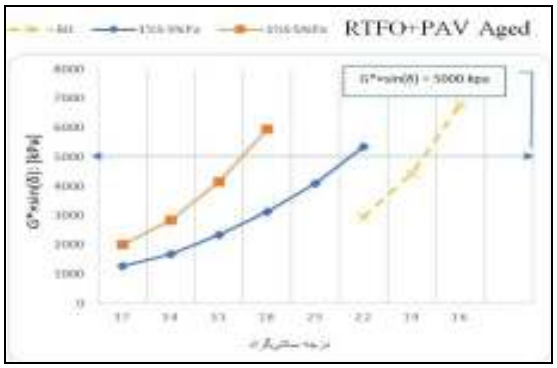
Archive of SID



شکل١٤.پارامتر $G^*\times\sin\delta$ در دماهای مختلف قیر حاوی ساسوبیت



شکل١٥. پارامتر $G^*\times\sin\delta$ در دماهای مختلف قیر حاوی واکس پارافین



شکل١٦. پارامتر $G^*\times\sin\delta$ در دماهای مختلفِ قیر حاوی ترکیب واکس پارافین و ساسوبیت

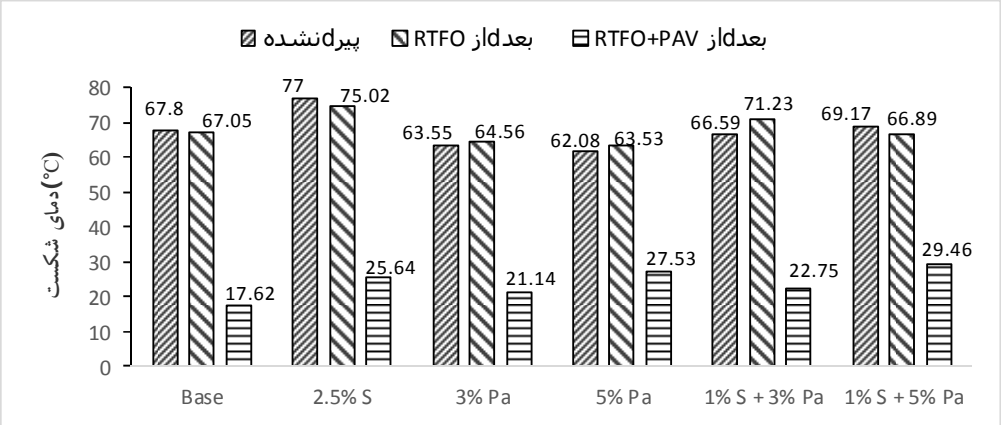
از مقایسه نتایج شکل‌های ١٤ تا ١٦ می‌توان نتیجه گرفت که تمامی واکس‌های مورد بررسی در این تحقیق، تأثیر منفی بر دمای عملکردی متوسط نسبت به قیر پایه داشته‌اند. بنابراین افزودن واکس‌ها با افزایش پارامتر $G^*\times\sin\delta$، تأثیر منفی بر دمای عملکردی متوسط داشته است. از میان واکس‌های افزوده شده به قیر پایه، واکس پارافین به دلیل ساختار ماکروکریستالی و زنجیره کربنی کمتر، تأثیر منفی بیشتری بر روی دمای عملکردی متوسط داشته است.

٥-٧- دمای شکست

مطابق با شکل ١٧، افزودن ساسوبیت باعث بهبود دمای عملکردی بالای قیر پایه شده است. همچنین افزودن ساسوبیت به قیر حاوی واکس پارافین با افزایش پارامتر $G^*/\sin\delta$ باعث بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی قیر نسبت به ترکیب حاوی واکس پارافین شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل١٧. دمای شکست در پیرشدگی‌های مختلفِ قیر حاوی واکس

٥-٨ مقایسه اقتصادی

پارامترهای اقتصادی را می‌توان یکی از عوامل مؤثر در ارزیابی پروژه‌های مهندسی دانست. برای مقایسه اقتصادی قیر اصلاح‌شده با واکس‌ها، مطابق با جدول ٣، با در نظر گرفتن قیمت تقریبی هرکدام از واکس‌ها، قیمت یک کیلو از نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق تعیین شد. در جدول ٤ هزینه هر ترکیب با توجه به درصد اختلاط‌ها ارایه شده است.

جدول ٣. قیمت هر کیلو از قیر پایه و واکس‌های به کار رفته

ماده	قیر ٦٠/٧٠	ساسوبیت	پارافین
قیمت (تومان)	١٠٠٠	٢٣٠٠٠	٣٩٥٠

جدول ٤. قیمت هر کیلو از قیر پایه و واکس‌های به کار رفته

ترکیب	1% S + 5% Pa	1% S + 3% Pa	5% Pa	3% Pa	2.5% S
قیمت (تومان)	١٤٢٧/٥	١٣٤٨/٥	١١٩٧/٥	١١١٨/٥	١٥٧٥

٦- بحث

در این پژوهش به منظور کاهش خرابی‌های شیارشدگی و ترک خوردگی ناشی از دمای بالای تولید از واکس‌های ساسوبیت و پارافین و ترکیب واکس‌های فوق برای کاهش دما به همراه کنترل ویسکوزیته برای حفظ کارایی مخلوط، استفاده شد. در این خصوص لازم است رئولوژی قیر تحت دمای بالا و متوسط نسبت به قیر پایه کنترل گردد. زیرا ممکن است واکس‌ها داری مزیت افزایش ویسکوزیته و کاهش دمای تولید باشند ولی بر رفتار رئولوژی قیر تاثیر منفی داشته باشند. بنابراین با استفاده مجموعه‌ای از آزمایش‌های متداول قیر و آزمایشات شارپ بر روی نمونه قیر با درجه نفوذ ٦٠/٧٠ و قیر اصلاح‌شده با واکس‌های ساسوبیت و پارافین و ترکیب واکس‌های فوق، آزمایشات لازم صورت گرفت تا اثرات افزودنی‌ها نسبت به نمونه فاقد افزودنی مورد بررسی قرار گیرد. از نتایج این بررسی به موارد زیر می‌توان اشاره کرد: الف) تمامی واکس‌های مورد بررسی در این تحقیق مطابق با شکل‌های ٦ و ٧، به دلیل کاهش دمای اختلاط به میزان ٣ تا ٢٠ درجه سانتی‌گراد و کاهش دمای تراکم به میزان ٦ تا ١٢ درجه سانتی‌گراد نسبت به قیر پایه، ضمن بهبود

www.SID.ir

Archive of SID

کارایی قیر، باعث کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های هوا شده‌اند. از دلایل تأثیر واکس‌ها بر کاهش ویسکوزیته می‌توان به تغییر حالت واکس به مایع در دمای بالاتر از نقطه ذوب واکس اشاره کرد. شکل ۵، نشان‌دهنده تأثیر افزودن واکس‌ها بر کاهش ویسکوزیته قیر به‌خصوص در بازه دمایی ۱۰۰ تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد است.

ب) همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده‌شده است، افزودن ساسوبیت به قیر پایه، باعث افزایش دمای شکست بالای قیر به میزان ۸ درجه سانتی‌گراد شده است، بااین‌حال مطابق با شکل ١٤، افزودن ساسوبیت تأثیر منفی بر روی دمای عملکردی متوسط (با کاهش دو گام) نسبت به قیر پایه داشته است.

ج) مطابق با شکل‌های ۱۰ و ۱۵، افزودن واکس پارافین تأثیر منفی بر خواص رئولوژیکی قیر در محدوده‌های مختلف دما داشت. بااین‌حال، ازآنجاکه می‌توان تأثیر منفی واکس پارافین بر روی دمای عملکردی متوسط را با استفاده از سایر افزودنی‌های قیر بهبود داد؛ هنوز هم به‌عنوان یک افزودنی بالقوه برای اصلاح مخلوط آسفالتی گرم در نظر گرفته می‌شود. از دلایل احتمالی تفاوت دو واکس پارافین و ساسوبیت بر روی دمای عملکردی بالا، می‌توان به داشتن زنجیره کربنی طولانی‌تر ساسوبیت نسبت به واکس پارافین اشاره کرد.

د) مطابق با شکل ۱۷، استفاده از ترکیب ۱ درصد ساسوبیت و ۳ درصد واکس پارافین به دلیل افزایش دمای عملکردی بالا (PG 64) نسبت به نمونه حاوی واکس پارافین و تأثیر منفی کمتر بر روی دمای عملکردی متوسط در مقایسه با ساسوبیت، می‌تواند به‌عنوان یک گزینه قابل‌قبول برای اصلاح قیر در نظر گرفته شود. استفاده از ترکیب به‌دست‌آمده علاوه بر بهبود دمای عملکردی، مطابق با شکل‌های ٦ و ۷، با کاهش دمای اختلاط و تراکم به ترتیب به میزان ۱۸ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به قیر پایه، موجب صرفه‌جویی قابل‌توجه در هزینه‌ها می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

مطابق با تحقیقات صورت گرفته در زمینه افزودنی‌های مخلوط آسفالتی گرم و نتایج حاصل از انجام این پژوهش، افزودن واکس‌ها به دلیل کاهش ویسکوزیته می‌تواند باعث کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های هوا شود بنابراین با صرفه‌جویی در هزینه‌ها، عملکرد مخلوط آسفالتی نیز به دلیل تراکم بهتر مخلوط افزایش می‌یابد. اما نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که افزودن واکس‌ها با توجه به مقدار و نوع واکس، می‌تواند باعث کاهش دمای عملکردی متوسط قیر شود؛ بنابراین استفاده جداگانه از واکس‌ها بدون بررسی دمای عملکردی توصیه نمی‌شود. همچنین استفاده از افزودنی‌های ترکیبی مخلوط آسفالتی گرم مانند ترکیب ۱ درصد وزنی ساسوبیت با ۳ درصد وزنی پارافین با توجه به بهبود دمای بالای عملکردی نمونه نسبت به نمونه حاوی پارافین و همچنین تأثیر قابل‌توجه بر ویسکوزیته ترکیب‌ها، می‌تواند به عنوان یک گزینه قابل قبول البته با بررسی دمای عملکردی پایین باشد.

۸- سپاسگزاری

نویسندگان کمال تشکر و قدردانی را از مهندس ابراهیمی مدیر تولید شرکت شیمی تجارت نقش‌جهان برای فراهم آوردن امکان استفاده از بخش آزمایشگاه این شرکت و تمامی کارکنان آزمایشگاه شرکت شیمی تجارت نقش‌جهان به ویژه مهندس صدیقی دارند.

۹- پی‌نوشت‌ها

1. Paraffin Wax
2. Ft Paraffin Wax
3. Glass transitions
4. Rolling Thin Film Oven (RTFO)
5. Pressure Aging Vessel (PAV)
6. Dynamic Shear Rheometer (DSR)
7. Rotational Viscometer (RV)

۱۰- مراجع

-Abraham, J., & Butz, T., (2002), "Asphalt verfluessiger als "intelligenter Fueller" fuer den Heisseinbau-ein neues Kapitel in der Asphaltbauweise. Bitumen, 64(1&2).

-Akisetty, C. K. K., (2008), "Evaluation of Warm Asphalt Additives on Performance Properties of CRM Binders and Mixtures". Clemson University.

www.SID.ir

Archive of SID

-Iwanski, M., & Mazurek, G., (2014), "Analysis of the Effect of Aging Process on Selected FT Wax Modified Bitumen". Paper Presented at the Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering". ICEE.

-Lamperti, R., (2012), "Rheological and Energetic Characterization of Wax-Modified Asphalt Binders".

-McKay, J., & Branthaver, J., (1995), "Isolation of Waxes from Asphalts and the Influence of Waxes on Asphalt Rheological Properties".

-Retrieved from Niazy, Y., (2016), "The Effect of Reducing the Mixing Temperature on Fatigue Life of Asphalt Mixture", Transportation Research, 12(4).

-Oberthuer, U., & Rahimian, I., (1997), "Einfluss der Zugesetzten Paraffine und deren Struktur auf die Eigenschaften von Bitumen". Bitumen, 59(4).

-Oner, J., & Sengoz, B., (2017), "Investigation of Rheological Effects of Waxes on Different Bitumen Sources". Road Materials and Pavement Design, 18(6), pp.1269-1287.

-Rahimian, I., Sachs, J., & Butz, T., (1998), "Untersuchungen zum Ersatz des Paraffingehaltes als Anforderungskriterium an Bitumen". Bitumen, 60(4).

-Silva, H. M., Oliveira, J. R., Peralta, J., & Zoorob, S. E., (2010), "Optimization of Warm Mix Asphalts Using Different Blends of Binders and Synthetic Paraffin Wax Contents". Construction and Building Materials, 24(9), pp.1621-1631.

-Vajta, L., & Vajta, S. (1971), "Strukturuntersuchungen der in Ungarn Erzeugten Bitumen aus Romaschino Erdöl". Bitumen Teere Asphalte Peche, 22(1), pp.20-26.

-Barth, E. J., (1962), "Asphalt; Science and Technology", Gordon and Breach Science Publishers.

-Biro, S., Gandhi, T., & Amirkhanian, S., (2009a), "Determination of Zero Shear Viscosity of Warm Asphalt Binders". Construction and Building Materials, 23(5), pp.2080-2086.

Biro, S., Gandhi, T., & Amirkhanian, S., (2009b), "Midrange Temperature Rheological Properties of Warm Asphalt Binders". Journal of Materials in Civil Engineering, 21(7), pp.316-323.

-Butz, T., Rahimian, I., & Hildebrand, G., (2000), "Modifikation Non Straßenbaubitumen Mit Fischer-Tropsch-Paraffin". Bitumen, 62(3).

-Carbognani, L., Duarte, D., Rosales, J., & Villalobos, J., (1998), "Isolation and Characterization of Paraffinic Components from Venezuelan Aaphalts Effects of Paraffin Dopants on Rheological Properties of some Asphalts". Petroleum science and technology, 16(9-10), pp.1085-1111.

-D'Angelo, J. A., Harm, E. E., Bartoszek, J., C., Baumgardner, G. L., Corrigan, M. R., Cowsert, J. E., Newcomb, D. E. (2008), "Warm-Mix Asphalt: European Practice. Retrieved from Edwards", Y. (2005), Influence of Waxes on Bitumen and Asphalt Concrete Mixture Performance. KTH.

-Gawel, I., Czechowski, F., & Baginska, K., (1996), "Study of Wax Isolated from Bitumen. Paper Presented at the Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasbourg", MAY 1996. Vol. 3. Paper E&E. 5.139, pp. 7-10.

-Hurley, G. C., & Prowell, B. D., (2005), "Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt". NCAT report, 5(06).

www.SID.ir

Archive of SID

-Xiao, F., Zhao, P. W., & Amirkhanian, S. N. (2009), "Fatigue Behavior of Rubberized Asphalt Concrete Mixtures Containing Warm Asphalt Additives". Construction and Building Materials, 23(10), pp.3144-3151.

-Yu, H., Leng, Z., Xiao, F., & Gao, Z. (2016), "Rheological and Chemical Characteristics of Rubberized Binders with Non-Foaming Warm Mix Additives. Construction and Building Materials, 111, pp.671-678.

-Zaumanis, M., & Haritonovs, V. (2010). Research on Properties of Warm Mix Asphalt.

www.SID.ir