

ارزیابی عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پلی الفاولفین آمورف

مقاله علمی - پژوهشی

حامین چویدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج الهی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amelii@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۱۸-۱

چکیده

در این مقاله، برای تهیه قیرهای اصلاح شده، قیر با ۰٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪ پلی الفاولفین آمورف (APAO)، مخلوط شد. بر اساس آزمایش های درجه نفوذ، انعطاف پذیری، نقطه نرمی و تست رئومتر برش دینامیکی (DSR)، میزان ۶٪ APAO به عنوان درصد بهینه از نظر عملکرد قیر تعیین شد. مصالح سنگی با دانه بندی پیوسته با APAO به منظور تهیه مخلوط های اصلاح شده با APAO مخلوط شد. پارامترهای حجمی مخلوط آسفالت با قیر اصلاح شده با APAO آزمایش شدند. آزمایش استحکام مارشال استاندارد، آزمایش مارشال اشباع، آزمایش ترک خوردگی پس از یخبندان و آزمایش استحکام مارشال مخلوط های آسفالت بعد از پیری بر روی مخلوط های آسفالت با قیر اصلاح شده با APAO انجام شد. بر اساس آزمایش استحکام مارشال، آزمون مارشال اشباع و آزمون ترک خوردگی پس از یخبندان، مخلوط آسفالت با ۶٪ APAO عملکرد بهتر در دماهای بالا، مقاومت بیشتر در برابر آسیب رطوبتی و کاهش حداقل استحکام کششی پس از شرایط یخبندان را داشت. استحکام کششی پس از افزودن APAO کاهش یافت. تفاوت استحکام کششی بین مخلوط آسفالت با ۴٪ APAO و ۶٪ APAO تنها قابل چشم پوشی بود. بر اساس استحکام مارشال و نسبت استحکام مارشال (RMSR) مخلوط های آسفالت پس از پیری، میزان بهینه APAO ۶٪ بود. بنابراین، ۶٪ APAO به عنوان میزان بهینه برای هر دو قیر اصلاح شده و مخلوط آسفالتی با APAO تعیین شد.

واژه های کلیدی: APAO، مخلوط آسفالتی، عملکرد روسازی، درصد بهینه

۱- مقدمه

به عنوان مواد افزودنی در قیرها می تواند تأثیرات زیست محیطی و اقتصادی آنها را کاهش دهد. سازمان های عمومی تمایل دارند پروژه ها را با قیرهای اصلاح شده که عمر خدمات بیشتری با هزینه نگهداری کمتری داشته باشند، تامین مالی کنند (chen et al, 2014; wang et al, 2016; xiao et al, 2010; Ge et al, 2016). در جهت بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی جاده، از انواع گوناگونی از ماده های پلیمری استفاده می شود که شامل پلاستومرها (مانند پلی اتیلن) و الاستومرهای ترموپلاستیک (مانند استایرن-بوتادی-ان-استایرن (SBS)) می شوند. پلیمرها به طور عمده برای افزایش سفتی قیر در دماهای بالا جهت مقاومت در

در سال های اخیر، ترافیک و حمل و نقل در سطح جاده ها افزایش یافته است که منجر به نیاز به تغییرات در قیرها برای برآورده کردن شرایط خاص شده است. سفتی قیرها در دماهای خدمات عادی برای افزایش مقاومت در برابر خرابی های مسیر نیاز به بهبود دارد. از سوی دیگر، سفتی قیر در دماهای پایین باید کاهش یابد تا مقاومت در برابر ترک های حرارتی بهبود یابد. همچنین، باید چسبندگی بین قیر و سنگدانه ها جهت کاهش عریان شدگی و سایر آسیب های رطوبتی بهبود یابد. در مناطق آب و هوایی شدید، نیاز به اصلاح قیر برای انطباق با مشخصات قیر وجود دارد. استفاده از مواد ضایعاتی و فرآورده های صنعتی

بخشد. پایداری ذخیره‌سازی قیر اصلاح یافته با APAO بر اساس درصد APAO در قیر اصلاح شده مرتبط است. عملکرد پیری کوتاه مدت قیر پس از افزودن APAO افزایش یافت. با افزودن APAO به قیر اصلاح شده با ضایعات لاستیک، تعامل بین APAO و قیر اصلاح شده با لاستیک مقاومت پیری قیر را بهبود می‌بخشد. APAO با قیر زمانی سازگاری خوبی دارد که محتوای APAO کم باشد (۲-۶ درصد وزنی). زمانی که قیر با استفاده از APAO و استایرن-بوتادیان-استایرن (SBS) اصلاح شده می‌شوند، پایداری در دمای بالا و عملکرد ضد ترک در دمای پایین هر دو بهبود می‌یابند. خصوصیت در دمای بالای APAO و آسفالت تغییر یافته با لاستیک افزایش می‌یابد، در حالی که رئولوژی در دمای پایین کاهش می‌یابد. نسبت به قیر اصلاح شده با SBS، فرآیند تهیه قیر اصلاح شده با APAO ساده‌تر و هزینه تولید آن کمتر است. وی و همکاران در تجزیه و تحلیل‌های جامع‌تری درباره قیرهای اصلاح شده با APAO انجام دادند که شامل آزمایش‌های سنتی، خواص رئولوژیکی و تجزیه و تحلیل مورفولوژی بود. نتایج نشان داد که APAO عملکرد در دمای بالا و حساسیت به دما را در قیر بهبود می‌بخشد (wei et al, 2014; yan et al, 2016; zhao et al, 2018; Ma et al, 2015). پژوهشگران سابق عمدتاً بر ویژگی‌های قیرهای اصلاح شده تمرکز داشتند، در حالی که تحقیقی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیرهای اصلاح شده با APAO صورت نگرفته است (Yan et al, 2015; Lv et al, 2016; Lv et al, 2018). هدف این مقاله بررسی پایداری مارشال، حساسیت به رطوبت و استحکام تحت شرایط مختلف مخلوط‌های آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO است، همچنین ویژگی‌های سنتی قیر اصلاح شده با APAO. بر اساس آزمون‌های نفوذپذیری، انعطاف‌پذیری، نقطه نرمی و آزمون رئومتر برش دینامیکی (DSR)، ویژگی‌های قیر اصلاح شده با APAO تجزیه و تحلیل شدند. دمای اختلاط و دمای تراکم قیر با درصد مختلف APAO با آزمون ویسکومتر چرخنده (RV) تعیین شدند. پارامترهای حجمی، آزمون پایداری مارشال، آزمون مارشال اشباع، آزمون شکست ذوب و یخبندان و پایداری مارشال مخلوط آسفالتی پیر شده برای ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی با قیرهای اصلاح شده با APAO انجام شد. درصد بهینه APAO در مخلوط آسفالتی با قیرهای اصلاح شده با APAO از منظر عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی تعیین شد.

برابر شیارشدگی، افزایش الاستیسیته در دماهای متوسط جهت مقاومت در برابر خستگی و کاهش سفتی در دماهای پایین جهت مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی استفاده می‌شوند. در فرآیند اصلاح، معمولاً مؤلفه‌های سبک قیر توسط پلیمرها متورم می‌شوند که دو فاز پیوسته تولید می‌کند. خواص آسفالت اصلاح شده با پلیمر معمولاً تحت تأثیر ویژگی‌های قیر و پلیمر، درصد پلیمر و فرآیند تولید قرار می‌گیرد. در صورت استفاده از درصد نامناسب پلیمر در فرآیند تغییر پلیمری، تفکیک و سازگاری قیر اصلاح شده با پلیمر را ممکن است تحت تأثیر قرار دهد. قیر اصلاح شده با درصد پلیمر بهینه باید بهبود کلی در عملکرد شامل پایداری ذخیره‌سازی، خواص مکانیکی و اقتصادی داشته باشد. پژوهشگران در استفاده از قیرهای اصلاح شده با پلیمر با چالش‌های اجتناب‌ناپذیری روبرو هستند که شامل هزینه بالا، حساسیت به دمای بالا، عدم پایداری ذخیره‌سازی و مقاومت محدود در برابر پیری می‌شوند. به‌عنوان ماده‌ای که بیشترین استفاده را دارد، قیر اصلاح شده با SBS باعث افزایش ویسکوزیته، مدول پیچیده و پاسخ الاستیک قیر می‌شود. مقاومت در برابر پیری آسفالت اصلاح یافته با SBS به دلیل اکسیداسیون قیر، تفکیک و خاصیت اشباع نشدنی SBS محدود شده است. در برخی شرایط، عملکرد در دماهای پایین قیرها به خاطر افزایش عملکرد در دماهای بالا فدا شده است. برخی از پژوهشگران در اصلاح قیر با دو ماده تلاش کرده‌اند. اصلاح شده با پلی اتیلن و مونومریلونیونیت ارگانوفیلیک ویژگی‌های خوبی از جمله پایداری در دماهای بالا و مقاومت در برابر ترک‌های سرد دارد. تغییر ترکیبی قیر با لاستیک و پلی اتیلن عملکرد در دماهای بالا را بدون فدا کردن خواص در دماهای پایین افزایش می‌دهد (zhu et al, 2014; Zhang et al, 2017; yang et al, 2017; sun et al, 2015; polacco et al, 2013). پلی آلفا آلفین نامنظم (APAO) پلیمرهای کوپلیمر با وزن مولکولی کم و ساختار مولکولی نامنظم است که از طریق پلیمریزاسیون پروپیلن و اتیلن تولید می‌شود. APAO ماده جامد سفید لبنی است که دارای انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر اسید، مقاومت در برابر قلیایی و ضد اکسیداسیون است. به علاوه، APAO می‌تواند برای اصلاح قیرهای روسازی بزرگراه‌ها کاربرد داشته باشد. سازگاری بین APAO و قیر خوب است و زمانی که در آزمایشگاه مخلوط می‌شود، APAO به‌طور کامل در قیر حل می‌شود. APAO می‌تواند به‌طور قابل توجهی پایداری در دمای بالا قیر را بهبود

۲- مواد و مصالح

۲-۱- مواد

در این تحقیق از قیر ۶۰-۷۰ تهیه شده از پالایشگاه نفت مشخصات قیر مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. پاسارگاد جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد.

جدول ۱. خصوصیات قیر خالص استفاده شده

روش آزمایش	قیر ۸۵/۱۰۰	خصوصیات
ASTM D-70	۱/۰۱۴۲	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-5	۶۵	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-36	۵۲,۵	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
ASTM D-113	+۱۰۰	انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-92	۲۷۰	نقطه اشتعال
-	۲۶۵	ویسکوزیته

در این تحقیق از APAO جهت اصلاح قیرهای پایه استفاده شد. مشخصات اصلی APAO در جدول ۲ آورده شده است.

استاندارد اندازه‌گیری شد. عملکرد اولیه سنگدانه و فیلر معدنی در جدول ۳ نمایش داده شده است.

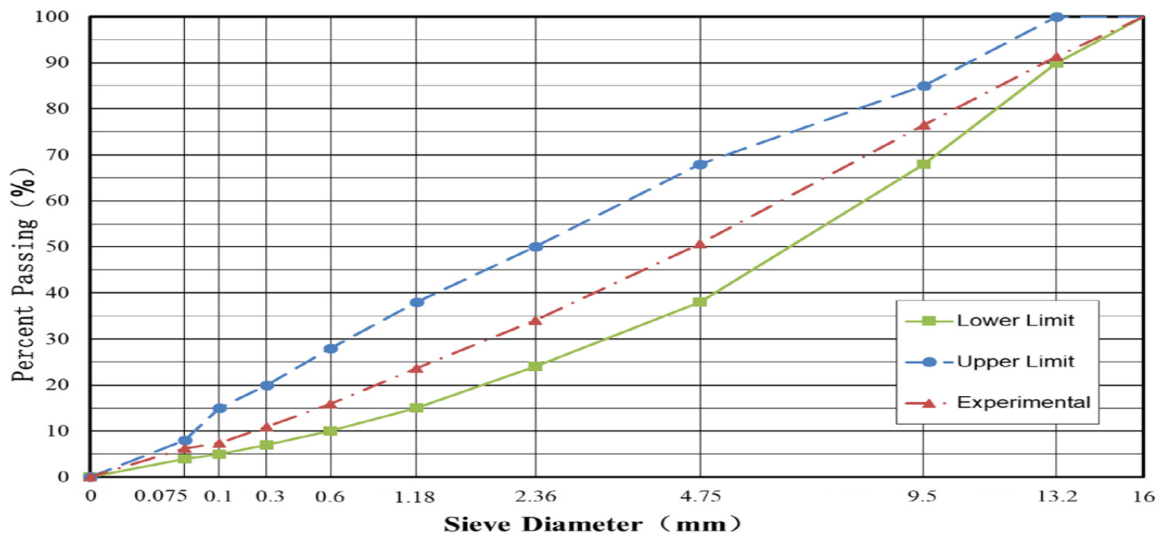
ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌ها و فیلر معدنی تأثیر مستقیمی روی عملکرد سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی و تعامل بین قیر و سنگدانه داشت. ویژگی فیزیکی سنگدانه بر اساس روش آزمون

جدول ۲. مشخصات APAO

نتایج	خصوصیات
۱/۴۱	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
۲۱۰	مقاومت کششی
۹۰۰۰	مدول خمشی
۲۹۵	نقطه ذوب

جدول ۳. مشخصات مصالح سنگی

آزمایشات سنگ	نتایج
وزن مخصوص حقیقی	۲.۷۳۶
سایش مصالح درشت دانه (%)	۲.۲
سایش مصالح ریزدانه (%)	۴.۲
سایش لس آنجلس (%)	۱۶.۷
درصد شکستگی در دو وجهه (%)	۹۴
درصد رطوبت	۰.۴
ضرب هیدروفیلیک	۰.۷۹
شاخص پلاستیسیته	۲.۹



شکل ۱. نمودار دانه بندی مصالح سنگی

نمودار دانه بندی مصالح سنگی در شکل ۱ آورده شده است.

۲-۲- آماده سازی نمونه های قیر حاوی APAO

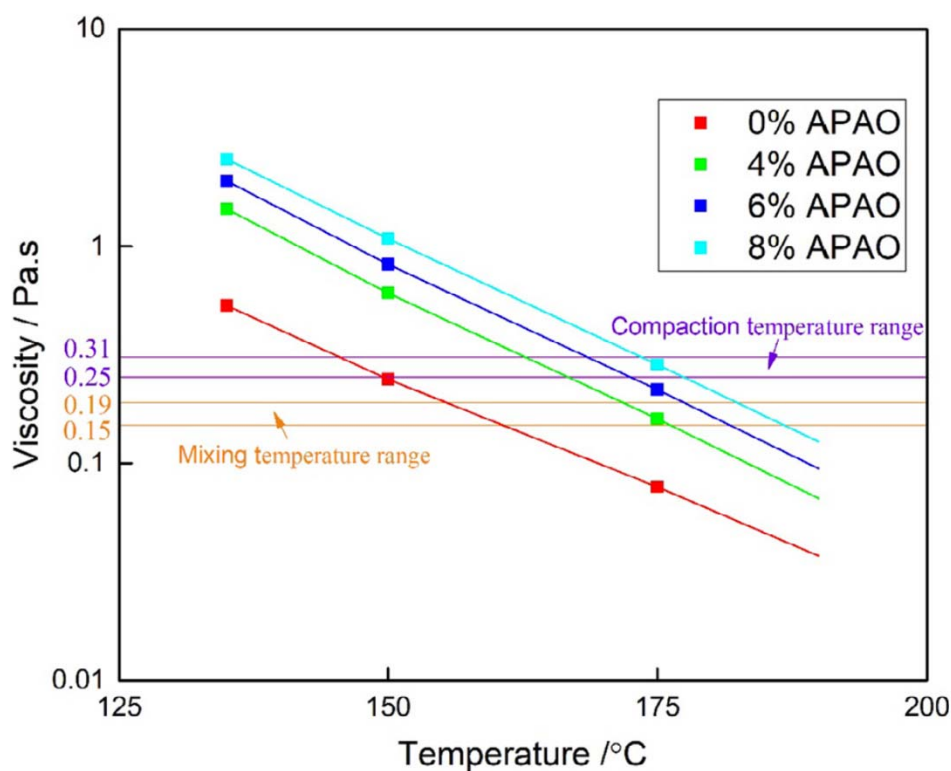
دقیقه در دمای ۱۶۵ درجه سانتیگراد با مخلوط کن با برش بالا مخلوط شدند. نرخ برش در فرآیند مخلوط کردن ۲۰۰۰ دور در دقیقه (RPM) بود. سپس عملکرد آزمایشگاهی قیر اصلاح شده با APAO با استفاده از آزمایش های نفوذپذیری، انعطاف پذیری، نقطه نرمی و آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR) بررسی شد.

برای تهیه قیرهای اصلاح شده با APAO، APAO با قیر مخلوط شد. قیر با ۰٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪ APAO مخلوط شدند. بنابراین، در این مطالعه، این چهار قیر با درصد مختلف APAO مورد بررسی قرار گرفتند. قیر تا دمای ۱۶۵ درجه سانتیگراد گرم شدند، سپس APAO به آرامی اضافه شد. پس از افزودن APAO، APAO و قیر به مدت ۶۰

۲-۳- آماده سازی نمونه های مخلوط آسفالتی حاوی APAO

قبل از آماده سازی مخلوط های آسفالت، آزمون ویسکوزیته چرخشی ° (RV) بر روی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با APAO انجام شد تا دمای اختلاط و تراکم تعیین شود. نتایج آزمون ویسکوزیته چرخشی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با درصد های مختلف APAO در شکل ۲ نمایش داده شده اند. سه دمای آزمون (RV) ۱۳۵ درجه سانتی گراد، ۱۵۰ درجه سانتی گراد و ۱۷۵ درجه سانتی گراد) برای انجام آزمون RV استفاده شد. پس از افزودن APAO، ویسکوزیته مخلوط آسفالتی افزایش یافت. پس از افزودن APAO به مخلوط آسفالتی، دماهای بالاتری برای اختلاط و تراکم نیاز بود. دامنه دمای اختلاط بر اساس مشخصه Superpave تعیین شد، جایی که ویسکوزیته بین ۰,۱۵ پاسکال ثانیه و ۰,۱۹ پاسکال ثانیه متغیر بود. بازه های دما که ویسکوزیته بین ۰,۲۵ پاسکال ثانیه و ۰,۳۱ پاسکال ثانیه متغیر بود، به عنوان دماهای فشرده سازی در نظر گرفته شدند. در این تحقیق، دمایی که ویسکوزیته برابر ۰,۱۷

پاسکال ثانیه است و میانگین مقدار پیشنهادی استاندارد، به عنوان دمای اختلاط انتخاب شد. دمایی که ویسکوزیته برابر ۰,۲۸ پاسکال ثانیه است و میانگین مقدار پیشنهادی استاندارد، به عنوان دمای تراکم انتخاب شد. جزئیات دمای اختلاط و دمای تراکم مخلوط آسفالتی با درصد مختلف APAO در جدول ۴ نمایش داده شده اند. دمای اختلاط و دمای تراکم پس از افزودن ۸٪ APAO حدود ۳۰ درجه سانتی گراد افزایش یافت. نمونه های استاندارد مارشال با استفاده از چکش مارشال آماده شدند؛ زمان های ضربه متفاوتی برای نمونه های آزمون مختلف انتخاب شد. قبل از آماده سازی نمونه های مخلوط، نسبت قیر-سنگدانه ۴,۸٪ برای تمام نمونه ها انتخاب شد تا عملکرد مخلوط های آسفالتی با محتوای مختلف APAO را مقایسه کرد. مخلوط آسفالتی اصلاح شده با APAO آماده شد و عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با APAO آزمایش شد.



شکل ۲. نمودار ویسکوزیته-دما برای نمونه های مختلف

جدول ۴. دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی

دمای تراکم	دمای اختلاط	درصد افزودنی (%)
۱۴۷	۱۵۷	۰
۱۶۳	۱۷۴	۴
۱۷۰	۱۸۱	۶
۱۷۶	۱۸۸	۸

۳- روش آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش قیر

گرفتند. یک دستگاه آزمایش فشار هیدرولیکی با نرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر در دقیقه مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایش‌های درجه نفوذ، شکل‌پذیری و نقطه نرمی قیر به ترتیب بر اساس ASTM D36، ASTM D113، ASTM D5 مورد آزمایش قرار گرفتند. ویژگی رئولوژیکی بایندر آسفالت با استفاده از DSR بر اساس ASTM D7552 مورد آزمایش قرار گرفت.

۳-۳- آزمایش مارشال اشباع

برای ارزیابی حساسیت مخلوط‌های آسفالتی فشرده شده به رطوبت، آزمون غوطه‌وری مارشال استفاده شد. این آزمون از طریق اثر آب بر مخلوط آسفالتی فشرده شده، از تلف استحکام مارشال را اندازه‌گیری می‌کند. یک شاخص عددی از استحکام مارشال کاهش یافته با مقایسه استحکام مارشال نمونه‌های تازه فرم‌گرفته و درمان شده با استحکام مارشال نمونه‌های تکراری که در شرایط خاصی در آب غوطه‌ور شده‌اند، به دست می‌آید. نمونه با چکش مارشال با ۷۵ ضربه در هر طرف فشرده شده است. نمونه آزمایشی ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آب غوطه‌ور شد و سپس نمونه به مدت ۲ ساعت در حمام آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت قبل از آزمون. شاخص استحکام باقی‌مانده IRS^6 به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$IRS = MS_2 / MS_1 * 100$$

MS_1 = استحکام مارشال نمونه بدون شرایط

MS_2 = استحکام مارشال نمونه تحت شرایط

۳-۲- آزمایش استقامت مارشال

استحکام مارشال و مقدار جریان، ویژگی‌های مخلوط آسفالتی هستند که از طریق آزمون استحکام مارشال بر روی نمونه‌های فشرده شده تعیین می‌شوند. استحکام مارشال و مقدار جریان، نمایانگر نحوه نمونه‌برداری، ترکیب دانه‌ای نمونه و محتوای ماده پیوسته آسفالتی هستند. طراحی مخلوط مارشال برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون استحکام مارشال استفاده شد. نمونه‌ها با استفاده از ۷۵ ضربه در هر طرف با چکش مارشال فشرده شدند. پس از آماده‌سازی مخلوط آسفالتی، نمونه‌های مخلوط آسفالتی در حمام آب به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار

۳-۴- آزمایش حساسیت رطوبتی

نمونه‌های تحت شرایط یخبندان با نمونه‌های خشک برای استحکام کششی غیرمستقیم مقایسه شدند. نمونه‌های یخبندان ابتدا به مدت ۱۵ دقیقه در فشار مطلق ۹۷،۳-۹۸،۷ کیلوپاسکال نگهداری شدند و سپس ۳۰ دقیقه پس از برداشتن واکنش، در آب

آزمون حساسیت رطوبتی برای اندازه‌گیری تغییرات استحکام کششی ناشی از اثرات اشباع آب و شرایط آبی تسریع شده، یعنی یک چرخه یخبندان، بر مخلوط آسفالتی فشرده شده استفاده شد. نمونه با ۵۰ ضربه در هر طرف با چکش مارشال فشرده شد.

انجام شد و نرخ بارگذاری در ۵۰ میلی متر در دقیقه نگهداری شد. نسبت استحکام کششی^۷ (TSR) به عنوان نسبت استحکام کششی بدون شرایط به استحکام کششی غیرمستقیم باقی مانده پس از شرایط آبی، طبق رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \times 100$$

فشرده شد. نمونه استاندارد مارشال به مدت ۶ ساعت در دمای ۱۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت. سرعت بارگذاری روی ۵۰ میلی متر در دقیقه تنظیم شد.

$$RMSR = \frac{MS_3}{MS_1} \times 100$$

قابلیت انعطاف قیر با افزایش محتوای APAO به طور چشمگیری کاهش یافت. خاصیت کششی قیر با افزودن APAO کاهش یافت. خاصیت کششی قیر با افزایش درصد APAO کاهش یافت. نقطه نرمی نشان دهنده تمایل قیر به جریان در دماهای بالا است. نقطه نرمی قیر با درصد متفاوتی از APAO در شکل ۵ نمایش داده شده است. نقطه نرمی قیر با افزایش درصد APAO افزایش یافت. قیر با افزودن APAO سفت تر شد و این نشان می دهد که قیر با درصد بالاتر APAO می تواند برای مناطق گرم تر استفاده شود.

قرار گرفتند. سپس نمونه به مدت ۱۶ ساعت در یخچال در دمای منفی ۱۸ درجه سانتیگراد قرار گرفت و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد خیسانده شد. تمام نمونه ها به مدت ۲ ساعت در حمام آب در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد شرایط دهی شدند، قبل از آزمون استحکام کششی غیرمستقیم. آزمون ترک خوردگی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

S_1 = مقاومت کششی نمونه غیراشباع

S_2 = مقاومت کششی نمونه اشباع شده

۳-۵- آزمایش کشش غیر مستقیم در دماهای پایین

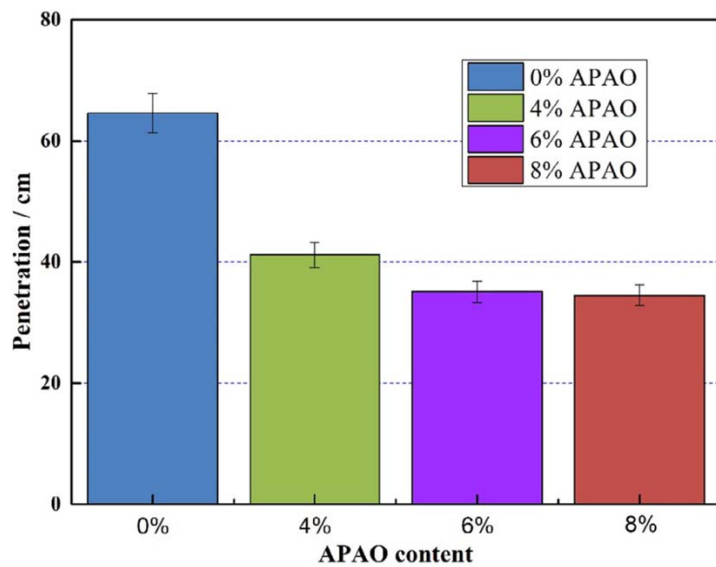
آزمایش کشش غیرمستقیم می تواند کیفیت مخلوط آسفالتی و طراحی مخلوط آزمایشگاهی را ارزیابی کند. آزمایش در دمای پایین برای ارزیابی عملکرد ترک حرارتی در دمای پایین مخلوط استفاده می شود. نمونه با ۷۵ ضربه در هر طرف با چکش مارشال

MS_1 = مقاومت مارشال نمونه بدون عمل آوری

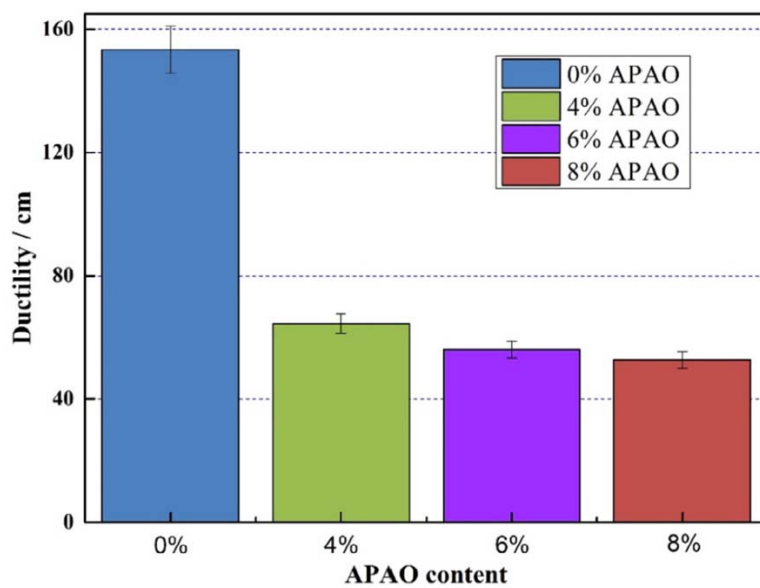
MS_3 = پایداری مارشال نمونه مسن

۴- نتایج آزمایشات قیر اصلاح شده با APAO

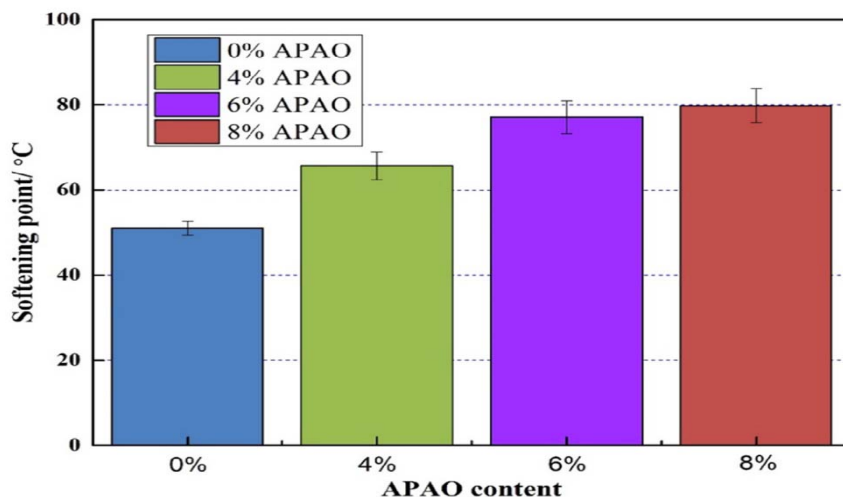
آزمایش درجه نفوذ برای ارزیابی میزان سختی قیر پس از اصلاح استفاده شد؛ هر چه مقدار نفوذ قیر بیشتر باشد، سختی قیر کمتر است. درجه نفوذ قیر با درصد متفاوتی از APAO در شکل ۳ نمایش داده شده است. درجه نفوذ قیر با افزایش درصد APAO کاهش یافت. قیر با APAO سفت تر شده است. درجه نفوذ قیر با ۶٪ APAO و ۸٪ APAO مشابه بود. قیر با درصد بالاتر APAO می تواند برای مناطق گرمتری استفاده شود که نیاز به قیر با سفتی بیشتر دارند. آزمون قابلیت انعطاف نشان دهنده قابلیت کششی قیر بدون شکستگی است. قابلیت انعطاف قیر با درصد متفاوتی از APAO در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. آزمایش درجه نفوذ قیر



شکل ۴. خاصیت انگی قیر

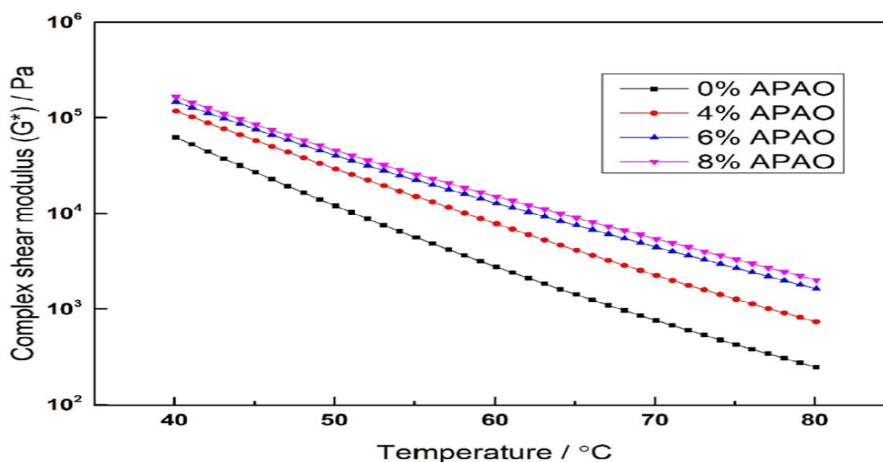


شکل ۵. آزمایش نقطه نرمی قیر

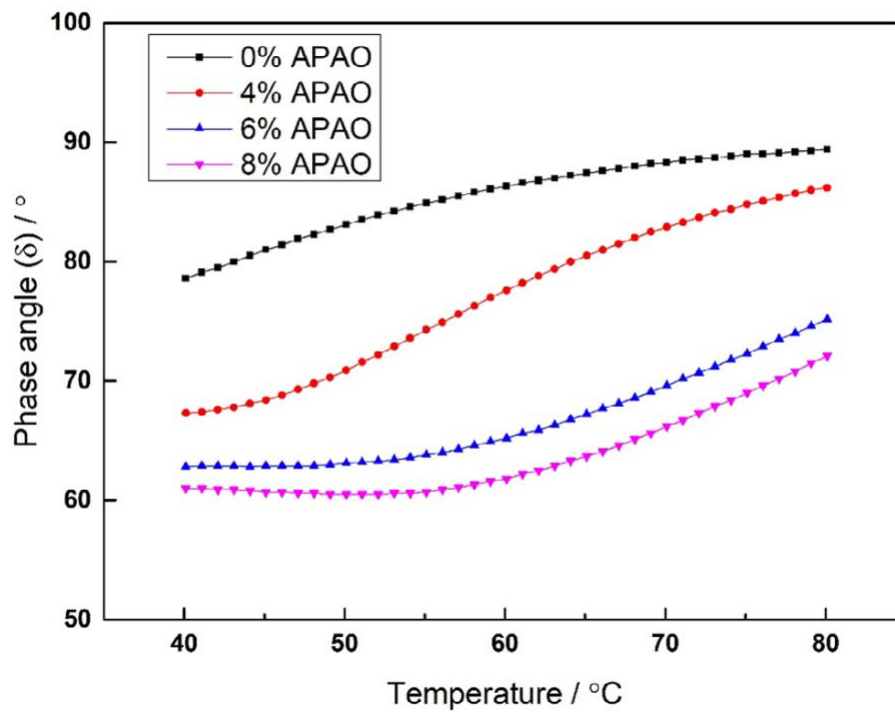
۴-۲- نتایج آزمایش DSR

۶٪ و ۸٪ APAO مقاومت پیچشی مشابهی داشتند. مقدار d قیر با درصد مختلف APAO در شکل ۷ نشان داده شده است. مقدار d قیر با افزایش درصد APAO کاهش یافت. برای درصد کم (۰٪ APAO و ۴٪ APAO)، مقدار d قیر با افزایش دما افزایش یافت. برای درصد بالا (۶٪ APAO و ۸٪ APAO)، مقدار d کمی افزایش یافت زمانی که دمای آزمایش کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد بود. این رفتار به دلیل تشکیل ساختار شبکه APAO هنگام ترکیب با قیر بود. زاویه فاز قیر با محتوای ۶٪ و ۸٪ APAO تغییرات مشابهی با افزایش دما داشت.

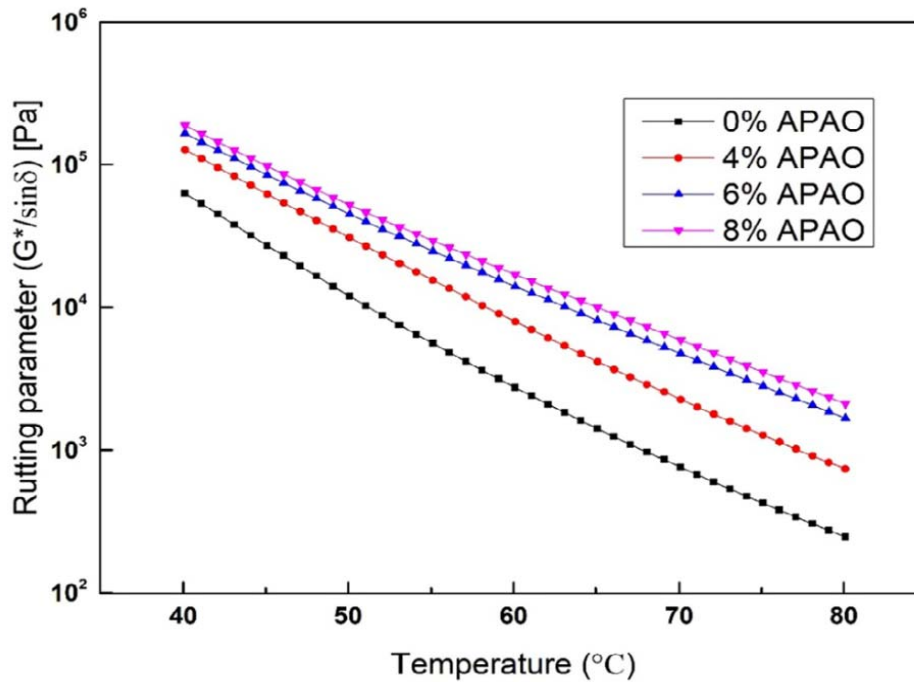
ویژگی رئولوژیکی قیر با درصد متفاوتی از APAO با استفاده از رئومتر برش دینامیکی (DSR) تعیین شد. مدول برشی پیچشی پیچیده (*G) و زاویه فاز (d) آزمایش شدند. مدول برشی پیچشی (*G) مقاومت پیچشی آسفالت تحت بار را نشان می‌دهد و زاویه فاز (d) تأخیر بین تنش پیچشی اعمالی و کرنش ناشی از آن را تعریف می‌کند. مقدار *G قیر با درصد مختلف APAO در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار *G قیر با افزایش دما کاهش یافت و با افزایش درصد APAO افزایش یافت. مقاومت پیچشی قیر با افزودن APAO افزایش یافت. تفاوت قابل‌چشمی بین مقدار *G قیر با ۶٪ و ۸٪ APAO وجود نداشت. قیر با



شکل ۶. نتایج مدول برشی مختلط نمونه‌ها



شکل ۷. نتایج زاویه فاز نمونه‌ها



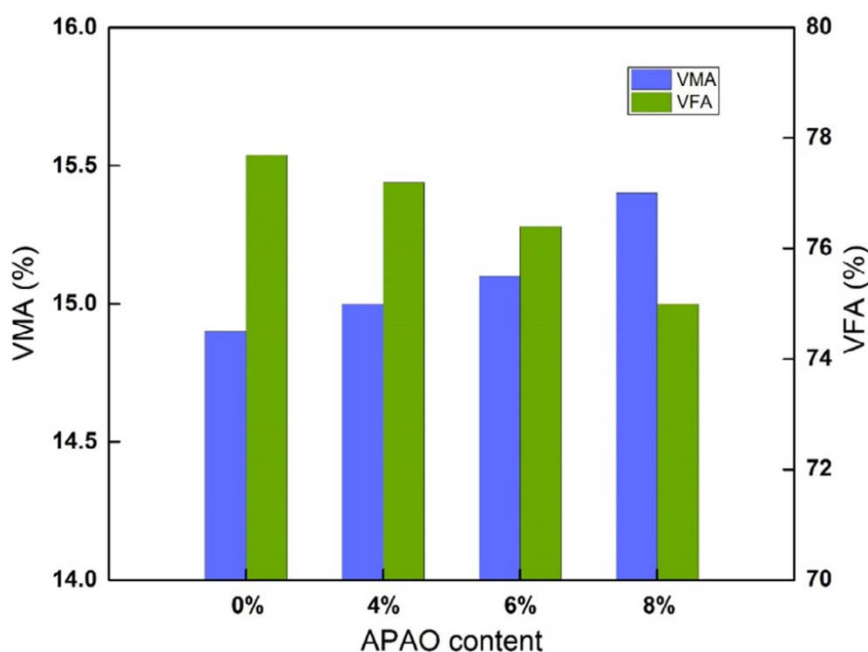
شکل ۸. نتایج پارامتر شیارشدگی قیرها

پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin d$) آسفالت با درصد متفاوتی از APAO در شکل ۸ نشان داده شده است. مقدار $G^*/\sin d$ قیر روند مشابه ای با مقدار G^* قیر در دماهای بالا داشت. مقدار $G^*/\sin d$ با افزایش دما کاهش یافت و قیر در دماهای بالا نرم تر شد. مقدار $G^*/\sin d$ قیر با افزایش درصد APAO افزایش یافت. آسفالت با درصد بالاتر APAO در دماهای پایینتر مقاومت بیشتری در برابر شیارشدگی دارد. افزودن APAO مقاومت قیر در برابر شیارشدگی را افزایش می‌دهد و ۶٪ و ۸٪ APAO تأثیر مشابهی داشتند. بر اساس آزمون درجه نفوذ، انعطاف‌پذیری، نقطه نرمی و آزمون DSR، قیر با ۶٪ APAO عملکرد کیفی مشابهی با قیر با ۸٪ APAO داشت، اما با درصد کمتری از APAO. میزان ۶٪ APAO به نظر بهینه‌ترین مقدار در عملکرد قیر و هزینه مواد است.

۳-۴- خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی APAO

۳-۴-۱- خصوصیات حجمی

پارامترهای حجمی مخلوط‌های آسفالتی با درصد مختلف APAO ارزیابی شد. درصد حفره‌های پر شده با قیر (VFA) و حفره‌های موجود در مصالح سنگی (VMA) برای مخلوط آسفالتی با درصد متفاوت از APAO در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. با افزایش درصد APAO، VMA افزایش یافت و VFA کاهش یافت. افزودن APAO به مخلوط باعث افزایش نسبت قیر مؤثر در مخلوط آسفالتی شده و این امر منجر به کاهش درصد آسفالت بوده و در نتیجه هزینه تولید را کاهش می‌دهد.



شکل ۹. خصوصیات حجمی مخلوط

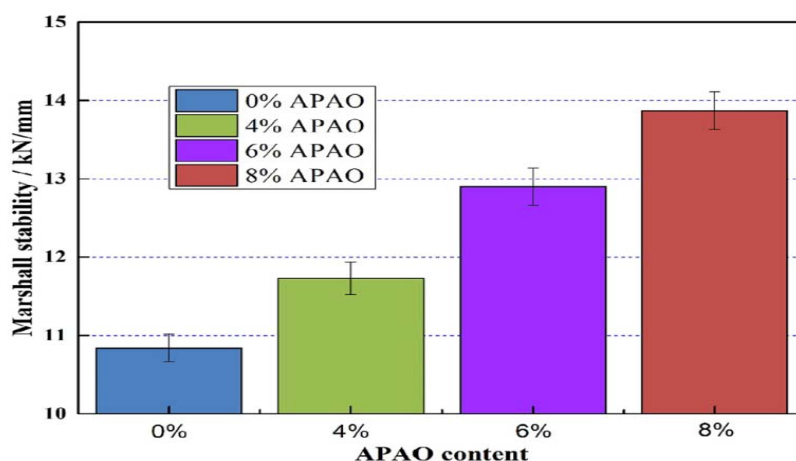
۳-۴-۲- نتایج آزمایش مقاومت مارشال

در شکل ۱۰ نشان داده شده است. پایداری مارشال با افزایش درصد APAO به صورت خطی افزایش یافت. بار بیشینه تحمل شده توسط نمونه آزمون با افزودن APAO در مخلوط آسفالتی افزایش یافت. مخلوط آسفالتی با درصد بالای APAO عملکرد بهتری در دمای بالا داشت. مقدار روانی مارشال نشان‌دهنده

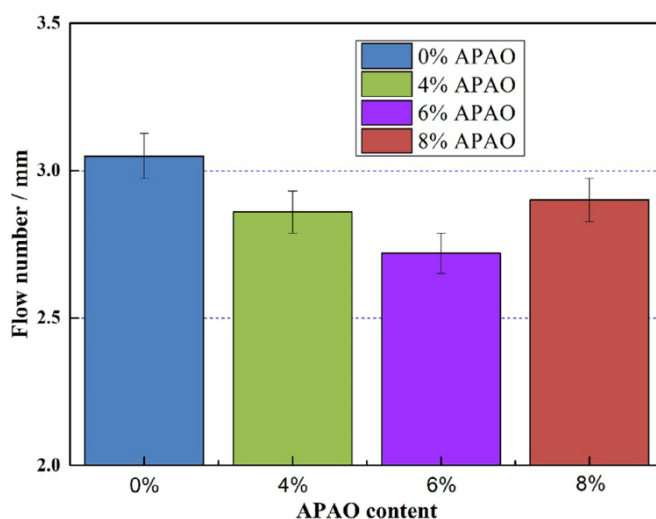
برای ارزیابی عملکرد در دمای بالا مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO، آزمون پایداری مارشال انجام شد. پایداری مارشال، بار مقاومت نهایی است که در طول توالی بارگذاری با نرخ یکنواخت تغییر شکل بدست می‌آید. پایداری مارشال مخلوط آسفالتی اصلاح شده با درصد متفاوت APAO

مارشال نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی از پایداری مارشال و جریان مارشال مخلوط آسفالتی است. سختی مارشال مخلوط آسفالتی تغییر یافته با محتوای متفاوت APAO در شکل ۱۲ نشان داده شده است. سختی مارشال با افزایش درصد APAO افزایش یافت. سختی مارشال مخلوط آسفالتی با ۶٪ APAO مشابه مخلوط آسفالتی با ۸٪ APAO بود. مخلوط آسفالت با ۶٪ APAO عملکرد کیفی مشابهی با آسفالت با ۸٪ APAO داشت، اما با درصد کمتر APAO. براساس پایداری مارشال، روانی مارشال و سختی مارشال، محتوای ۶٪ APAO بهترین دوز برای اصلاح عملکرد مخلوط آسفالتی است.

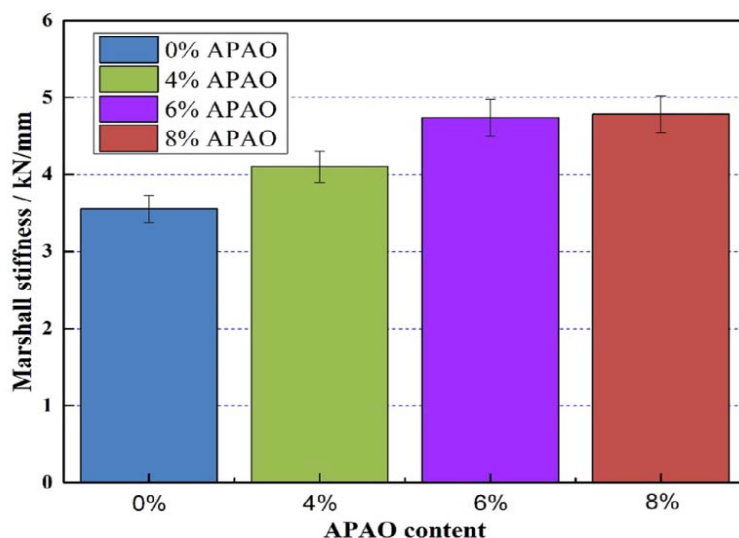
تغییرات الاستیک و پلاستیک مخلوط آسفالتی در طول آزمون پایداری است. مخلوط‌های آسفالتی با مقدار جریان بیش از حد بالای قابل قبول بیش از حد پلاستیک و ناپایدار بودند. مخلوط‌های آسفالتی با مقدار روانی کمتر از حد پایین قابل قبول بیش از حد شکننده بودند. مقدار روانی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با درصد متفاوت APAO در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مقدار روانی با افزایش درصد APAO از ۰٪ تا ۶٪ کاهش یافت و سپس با افزایش درصد APAO از ۶٪ تا ۸٪ افزایش یافت. مخلوط آسفالتی با ۶٪ APAO دارای پایداری بالا و مقدار روانی پایین بود که نشان‌دهنده مخلوطی با سختی بیشتر و توانایی بزرگتر در انتقال بار و مقاومت در برابر تغییر شکل است. سختی



شکل ۱۰. مقاومت مارشال نمونه‌ها



شکل ۱۱. روانی مارشال نمونه‌ها



شکل ۱۲. سختی مارشال نمونه‌ها

۳-۴-۳- آزمایش مارشال غوطه ور

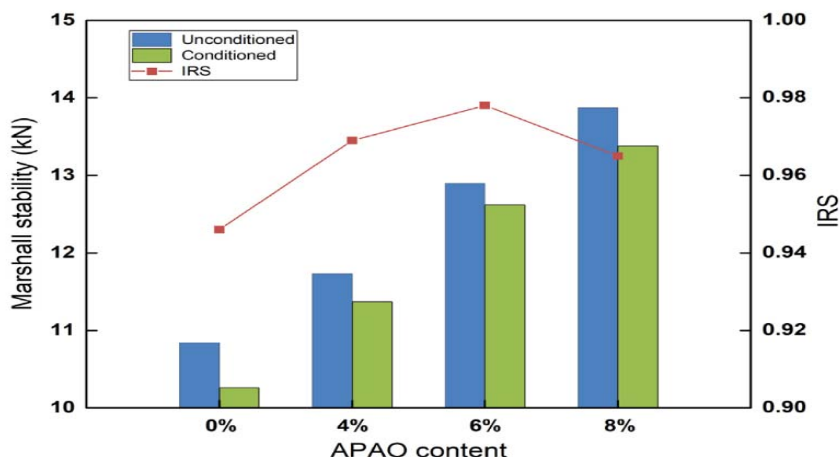
۱۳ نشان داده شده است. پایداری مارشال پس از شرایط غوطه‌وری با افزایش درصد APAO افزایش یافت. پایداری باقی‌مانده با استفاده از IRS در شکل ۱۳ ارزیابی شد. با افزایش درصد APAO از ۰٪ تا ۶٪ افزایش یافت و با افزایش درصد APAO از ۶٪ تا ۸٪ کاهش یافت. مخلوط آسفالتی با ۶٪ APAO بالاترین مقدار IRS و مقاومت در برابر آسیب رطوبتی را داشت

حساسیت رطوبتی یکی از مهم‌ترین مسائل در راه‌سازی است. خرابی عریان شدگی تحت تأثیر رطوبت قرار گرفته و اتصال بین قیر و سنگدانه را تضعیف می‌کند که منجر به ترک خوردگی، شیارشدگی و ترک خوردگی خستگی می‌شود. آزمون غوطه‌وری مارشال و آزمایش شکست ذوب و یخ برای ارزیابی مقاومت در برابر آسیب رطوبتی مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO انجام شد. آزمون غوطه‌وری مارشال مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با درصد مختلف APAO در شکل

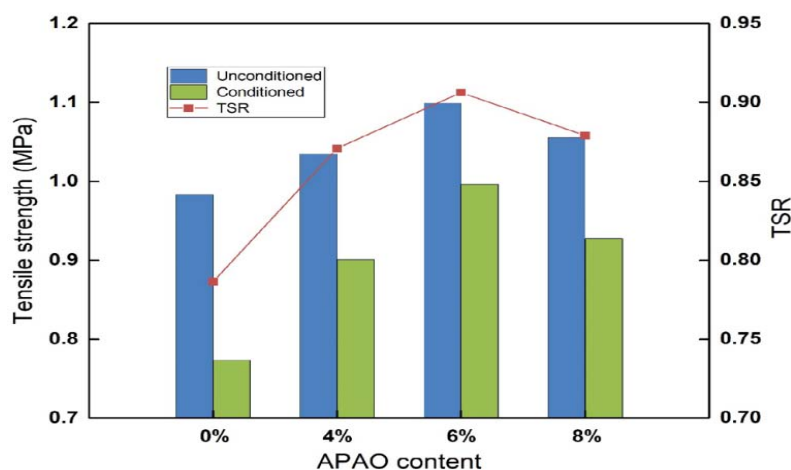
۳-۴-۴- آزمایش حساسیت رطوبتی

نشان می‌دهد. TSR با مقدار مقاومت تقسیمی شکست برای درصد متفاوت APAO در مخلوط آسفالتی همان روند را داشت. مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با ۶٪ APAO کمترین مقاومت شکست را پس از شرایط یخزدگی داشت. مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با ۶٪ APAO بیشترین مقاومت شکست را در شرایط بدون شرایط و با شرایط یخزدگی و کمترین تلفات مقاومت شکست پس از شرایط یخزدگی داشت، که نشان می‌دهد مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با ۶٪ APAO بهترین مقاومت در برابر آب را داشت.

برای ارزیابی مقاومت در برابر آب مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO، آزمایش شکست مقاومت کششی نمونه‌های اشباع و غیر اشباع و در حالت چرخه ذوب و یخبندان انجام شد. نسبت مقاومت شکست مخلوط آسفالتی بدون حالت اشباع و یا حالت اشباع در شکل ۱۴ نشان داده شده است. نسبت مقاومت شکست با افزایش درصد APAO از ۰٪ تا ۶٪ افزایش یافت و با افزایش درصد APAO از ۶٪ تا ۸٪ کاهش یافت. مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با ۶٪ APAO برای نمونه‌های بدون شرایط و با شرایط یخزدگی بالاترین مقاومت تقسیمی شکست را داشت. نسبت مقاومت شتابزده (TSR) مقاومت را



شکل ۱۳. نتایج آزمایش مارشال شناور



شکل ۱۴. نتایج حساسیت رطوبتی نمونه‌ها

۳-۴-۵- آزمایش مقاومت کششی در دمای پایین

آزمون کششی غیرمستقیم در دماهای پایین، عملکرد شکست حرارتی در دماهای پایین مخلوط آسفالتی را ارزیابی می‌کند. مقاومت کششی مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO در دمای ۱۰ درجه سلسیوس در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مقاومت کششی پس از افزودن APAO کاهش می‌یابد. عملکرد شکست حرارتی در دماهای پایین مخلوط آسفالتی با افزودن APAO کاهش کمی پیدا می‌کند. با این حال، تفاوت مقاومت کششی بین مخلوط آسفالتی با ۴٪ APAO و ۶٪ APAO اندک است. مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با ۶٪ APAO عملکرد قابل اعتماد در برابر شکست حرارتی در

دماهای پایین را داراست.

۳-۴-۶- پیرشدگی درازمدت

مقایسه پایداری مارشال بین قیر تازه و قیر پیرشده، تأثیر پیری بر عملکرد مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO را نشان می‌دهد. پایداری مارشال مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO پس از پیری در شکل ۱۶ نشان داده شده است. پایداری مارشال مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO پس از پیری افزایش یافت، که نشان می‌دهد پیری می‌تواند مقاومت تغییرشکل را افزایش دهد. پایداری مارشال مخلوط

غیرمستقیم در دماهای پایین و پایداری مارشال مخلوط آسفالتی پیر بر روی مخلوط آسفالتی با قیر تغییر یافته با APAO انجام شد. براساس نتایج تجربی، نتیجه‌ها به شرح زیر خلاصه می‌شوند: -بر اساس آزمون‌های نفوذ، انعطاف‌پذیری، نقطه نرم‌شدگی و DSR، APAO ۶٪ به لحاظ عملکرد بایندر آسفالت، دز بهینه بود. -بر اساس پایداری مارشال، روانی مارشال و سختی مارشال، APAO ۶٪ بهترین درصد بود در هنگام تغییر عملکرد مخلوط آسفالتی. مخلوط آسفالتی با بایندر آسفالتی تغییر یافته با APAO ۶٪ عملکرد بهتری در دمای بالا داشت.

- نسبت مقاومت مخلوط آسفالتی با APAO ۶٪ بیشترین مقدار را داشت. مخلوط آسفالتی با APAO ۶٪ مقاومت بیشتری در برابر آسیب رطوبتی داشت.

-مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO ۶٪ کمترین کاهش مقاومت کششی پس از تحت شرایط یخزدگی و گذر از دوره‌های یخزدگی داشت.

- مقاومت کششی پس از افزودن APAO کاهش یافت. تنها تفاوت کمتری در مقاومت کششی بین مخلوط آسفالتی با ۴٪ APAO و APAO ۶٪ مشاهده شد.

- بر اساس پایداری مارشال و RMSR مخلوط آسفالتی پس از پیری، درصد بهینه APAO ۶٪ است. APAO ۶٪ درصد بهینه برای هر دو قیر اصلاح شده و مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO بود.

آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO پیر شده کاهش یافت هنگامی که درصد APAO از ۰٪ تا ۶٪ افزایش یافت و افزایش یافت هنگامی که درصد APAO از ۶٪ تا ۸٪ افزایش یافت. مخلوط آسفالتی با APAO ۶٪ کمترین پایداری مارشال را داشت، که نشان می‌دهد پیری کمترین تأثیر را بر عملکرد مخلوط آسفالتی داشته است. RMSR پتانسیل پیری مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با APAO را ارزیابی می‌کند. مخلوط آسفالتی با RMSR بالاتر مقاومت کمتری در برابر پیری داشت. RMSR با افزایش درصد APAO کاهش یافت، که نشان می‌دهد مقاومت پیری مخلوط آسفالتی با افزایش درصد APAO افزایش می‌یابد. بر اساس پایداری مارشال و RMSR مخلوط آسفالتی پس از پیری، درصد بهینه 6% APAO بود. هرچند این مشاهده بر اساس نمونه‌ها و آزمون‌های محدود است، برای تأیید چنین رابطه‌ای لازم است تحقیقات بیشتری انجام شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، قیر با مقادیر ۰٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪ APAO ترکیب شده است تا قیر اصلاح شده تهیه شود. سنگدانه با قیر اصلاح شده با APAO مخلوط شده تا مخلوط آسفالتی اصلاح شده با APAO تهیه شود. عملکرد آزمایشگاهی قیر اصلاح شده با APAO با استفاده از آزمون‌های درجه نفوذ، انعطاف‌پذیری، نقطه نرمی و DSR ارزیابی شد. پارامترهای حجمی، پایداری مارشال، مارشال غوطه‌وری، تقسیم شدگی یخزدگی، آزمون کششی

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Amorphous Poly Alpha Olefins
- 2- Dynamic Shear Rheometer
- 3- Retained Marshall Stability Ratio
- 4- Styrene-Butadiene-Styrene
- 5- Rotational Viscosity
- 6- Index Of Retained Stability
- 7- Tensile Strength Ratio
- 8- Void In Minerall Aggregate
- 9- Void Filled With Asphalt

۷- مراجع

- Wei. J.M., Y.N. Li, F.Q. Dong, H. Feng, Y.Z. Zhang. (2014). Study on the amorphous poly alpha olefin (APAO) modified asphalt binders, *Constr. Build. Mater.* 66, 105–112.
- Xiao. F., W. Zhao, T. Gandhi, S.N. Amirkhanian, (2010). Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures, *J. Mater. Civ. Eng.* 22 (10), 1047–1055.
- Yang. X., Z. You, M.R.M. Hasan, A. Diab, H. Shao, S. Chen, D. Ge. (2017). Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm, *J. Cleaner Prod.* 159, 346–358.
- Yan. K., D. Ge, L. You, X. Wang. (2015). Laboratory investigation of the characteristics of SMA mixtures under freeze–thaw cycles, *Cold Reg. Sci. Technol.* 119, 68–74.
- Yan. K.Z., W.L. He, M. Chen, W.Y. Liu. (2016). Laboratory investigation of waste tire rubber and amorphous ploy alpha olefin modified asphalt, *Constr. Build. Mater.* 129, 256–265.
- Zhu. J.Q., B. Birgisson, N. Kringos. (2014). Polymer modification of bitumen: advances and challenges, *Eur. Polym. J.* 54, 18–38.
- Zhang. R., H. Wang, J. Gao, X. Yang, Z. You. (2017). Comprehensive performance evaluation and cost analysis of SBS-modified bio asphalt binders and mixtures, *J. Mater. Civ. Eng.* 29 (12), 04017232.
- Zhao. X., K. Yan, S. Yang, H. Peng. (2018). Laboratory research on the properties of warm amorphous poly alpha olefin-modified asphalt mixture using Sasobit and Deurex, *J. Mater. Civ. Eng.* 30 (5), 04018076.
- Chen. M., F. Xiao, B. Putman, B. Leng, S. Wu. (2014). High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils, *Constr. Build. Mater.* 59, 10–16.
- Ge. D., K. Yan, Z. You, H. Xu. (2016). Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene, *Constr. Build. Mater.* 126, 66–76.
- Lv. S., C. Liu, H. Yao, J. Zheng. (2018). Comparisons of synchronous measurement methods on various moduli of asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.* 158, 1035–1045.
- Lv. S., C. Liu, J. Zheng, Z. You, L. You. (2018). Viscoelastic fatigue damage properties of asphalt mixture with different aging degrees, *KSCE J. Civ. Eng.* 22 (6), 2073–2081.
- Ma. T., Y. Zhao, X. Huang, Y. Zhang. (2015). Using RAP material in high modulus asphalt mixture, *J. Test. Eval.* 44 (2), 781–787.
- Polacco. G., S. Filippi, F. Merusi, G. Stastna,. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: asphalt/polymer interactions and principles of compatibility, *Adv. Colloid Interface Sci.* 224, 72–112.
- Sun. D.Q., L.W. Zhang. (2013). A quantitative determination of polymer content in SBS modified asphalt. Part I: state of the art, *Pet. Sci. Technol.* 31 (24), 2636–2642.
- Wang. H., C. Zhang, L. Li, Z. You, A. Diab. (2016). Characterization of low temperature crack resistance of crumb rubber modified asphalt mixtures using semi-circular bending tests, *J. Test. Eval.* 44 (2), 847–855.

Performance Evaluation of Asphalt Binder and Mixture Modified by Amorphous Poly Alpha Olefins (APAO)

Hamin Chobdar, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

E-mail: ameli@gmail.com

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

In this paper, to prepare modified bitumen, bitumen was mixed with 0%, 4%, 6% and 8% amorphous poly alpha olefin (APAO). Based on the tests of penetration degree, flexibility, softening point and dynamic shear rheometer test (DSR), the amount of 6% APAO was determined as the optimal percentage in terms of bitumen performance. Continuously graded stone materials were mixed with APAO in order to prepare mixtures modified with APAO. The volumetric parameters of asphalt mixture with bitumen modified with APAO were tested. Standard Marshall Strength test, saturated Marshall Test, post-frost cracking test and Marshall Strength test of asphalt mixtures after aging were performed on asphalt mixtures with bitumen modified with APAO. Based on the Marshall Strength test, saturated Marshall Test and post-frost cracking test, the asphalt mixture with 6% APAO had better performance at high temperatures, more resistance to moisture damage and reduced minimum tensile strength after frost conditions. Tensile strength decreased after adding APAO. The difference in tensile strength between asphalt mixture with 4% APAO and 6% APAO was only negligible. Based on the Marshall Strength and Marshall Strength ratio (RMSR) 3 of the asphalt mixtures after aging, the optimal amount of APAO was 6%. Therefore, 6% APAO was determined as the optimum amount for both modified bitumen and asphalt mixture with APAO.

Keywords: Mixture, APAO, Rutting, Bitumen, Modified Binder