

بررسی اثر ترکیب پلیمری SBR/PS بر حساسیت رطوبتی و شیارشدگی آسفالت داغ

منصور فخری، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران
ابراهیم شاه ابراهیمی*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی
خواجه نصیر طوسی، تهران

Email: Ebrahim.Shahebrahimi.eng@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۰ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۴

چکیده

نقش مهم کیفیت روسازی بر ایمنی و راحتی استفاده‌کنندگان از مسیر و همچنین کاهش هزینه‌های دوره بهره‌برداری، محققین حوزه روسازی آسفالتی را بر آن داشته است تا با تولید آسفالت اصلاح شده، نسبت به افزایش مقاومت و دوام آن در برابر بار ترافیکی و شرایط آب‌وهوایی اقدام کنند. پلیمرها از جمله افزودنی‌های اصلاح‌کننده قیر هستند که امروزه به‌صورت گسترده‌ای در آسفالت استفاده می‌شوند. در این پژوهش، با هدف ارتقاء مقاومت آسفالت در برابر رطوبت و شیارشدگی، از سه پلیمر استایرن بوتادین استایرن، استایرن بوتادین رابر و پلی‌استایرن استفاده شد. استایرن بوتادین استایرن تجاری مطلوب در بهبود خرابی‌های روسازی بر جای گذاشته است. اما وارداتی بودن و در نتیجه وابستگی قیمت آن به مناسبت‌های سیاسی، محققین این پژوهش را بر آن داشت تا با ترکیب پلیمرهای تولید داخل، آمیخته‌هایی کارآمد و با قیمت مناسب‌تر را جایگزین آن نمایند. در این راستا، دو پلیمر استایرن بوتادین رابر و پلی‌استایرن در نسبت‌های ترکیبی ۲۵/۷۵، ۵۰/۵۰ و ۲۵/۷۵ با یکدیگر مخلوط شده و به میزان ۳ و ۵ درصد وزنی قیر در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شدند. آزمایش‌های مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی و شیارشدگی روی نمونه‌های اصلاح شده با پلیمر و آمیخته پلیمری انجام گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از آمیخته‌های پلیمری به‌مراتب کارآمدتر از به‌کارگیری پلیمرها به‌صورت مجزا بوده و آمیخته پلیمری دارای ۷۵٪ استایرن بوتادین رابر در کنار ۲۵٪ پلی‌استایرن می‌تواند مقاومت رطوبتی و شیارشدگی برابر با پلیمر استایرن بوتادین استایرن ایجاد نماید.

واژه‌های کلیدی: کیفیت روسازی، آمیخته پلیمری، استایرن بوتادین استایرن، استایرن بوتادین رابر، پلی‌استایرن

۱. مقدمه

جمله آنها می‌توان به شرایط آب‌وهوایی و بارهای ترافیکی اشاره نمود. در روسازی‌های آسفالتی، رطوبت، با نفوذ در بین سطح مشترک قیر و سنگ‌دانه، موجب جدایی آن‌ها از یکدیگر می‌شود (کوک و کولوغلو، ۲۰۰۷). حساسیت

یک روسازی خوب می‌بایست برای تأمین امنیت و آرامش رانندگان، دارای سطحی هموار و باکیفیت باشد. عوامل متعددی در به‌وجود آمدن کیفیت این سطح مؤثرند که از

رطوبتی^۱ یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی آسفالتی است که خود عاملی برای شروع سایر خرابی‌ها از جمله شیارشدگی، چاله و ترک خستگی می‌باشد. در حالت کلی، با افزایش رطوبت، میزان و شدت این خرابی‌ها نیز افزایش می‌یابد (گرنفل و همکاران، ۲۰۱۴). خواص قیر و سنگ‌دانه مخلوط نیز بر ایجاد این پدیده و تشدید خرابی‌ها نقش مؤثری دارند (کیگوندو و رابرتز، ۱۹۸۸). در بین اجزای قیر خالص، رزین‌ها و آسفالتن‌های قطبی قیر نسبت به آروماتیک‌های هیدروکربنی تمایل بیشتری به پیوند با سنگ‌دانه دارند (حامدی، ۲۰۱۸). اصلاح قیر خالص روشی است که با آن می‌توان پیوند بین قیر و سنگ‌دانه و مقاومت رطوبتی را بهبود بخشید. گرچه قیر به مقدار کمی در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود، اما اثر مهمی بر عملکرد بهینه، دوام و پایداری آن می‌گذارد (عامری، ۲۰۱۸).

روش‌های گوناگونی برای اصلاح قیر وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به به‌کارگیری افزودنی‌های اصلاح‌کننده پلیمری اشاره نمود. پلیمرها با تأثیر عملکردی بر خواص فیزیکی، شیمیایی و رئولوژیک قیر توانسته‌اند بخش زیادی از آسفالت‌های اصلاح‌شده امروزی را پدید آورند. پلیمر استایرن بوتادین استایرن^۲ که در آن مونومرهای پلی‌استایرن با پلی‌بوتادین به یکدیگر متصل شده‌اند (نسیری و همکاران، ۲۰۱۷)، از جمله معروف‌ترین پلیمرهای مصرفی در صنعت بوده که با افزوده شدن به آسفالت، موجب بهبود حساسیت رطوبتی، شیارشدگی و خستگی آن می‌شود (عبدالجواد، ۲۰۰۶؛ نسیری و همکاران، ۲۰۱۷). طاهرخانی و شفیعی ماتک (۲۰۱۶) دریافته‌اند که این پلیمر با ایجاد سختی و خاصیت ارتجاعی در قیر، موجب افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. اما با وجود مزایای مهم استفاده از این پلیمر در صنعت روسازی، سابقه فراوانی از آن مشاهده نمی‌شود که علت آن می‌تواند عدم صرفه اقتصادی، به دلیل قیمت بالای، این پلیمر باشد (گالویاک و همکاران، ۲۰۱۰).

علی‌رغم تولیدات متنوع پلیمری، تنها تعدادی از آن‌ها برای بهبود خواص قیرها مناسب هستند. البته

تاکنون هیچ پلیمری نتوانسته تمامی شرایط لازم برای مخلوط آسفالتی را برآورده سازد. برای مثال، در مواردی استفاده از یک پلیمر، علی‌رغم تقویت مقاومت در برابر خرابی شیارشدگی، عملکرد مقابله با ترک‌خوردگی در دمای کم را تضعیف نموده است (لو و ایساکسون، ۲۰۰۰؛ ابطحی و همکاران، ۲۰۱۴). امروزه، ایده نوین ترکیب پلیمرها به‌منظور هم‌پوشانی معایب یکدیگر، افزایش سازگاری و پایداری در قیر و ایجاد ترکیبات پلیمری به‌صرفه برای اصلاح قیر استفاده می‌شود. در پژوهشی به‌منظور ارتقاء خواص قیر حاوی خرده لاستیک ضایعاتی، از ترکیب این پلیمر و استایرن بوتادین استایرن استفاده شده است. این اقدام، علاوه بر حفظ محیط‌زیست از ضایعات، موجب افزایش پایداری خرده لاستیک در قیر و بهبود مقاومت شیارشدگی و خواص ارتجاعی آسفالت شد (لیانگ، ۲۰۱۷). شیائو و همکاران (۲۰۱۶) از آمیخته هموپلیمر اتیلن و استایرن بوتادین استایرن به ترتیب به میزان ۱ و ۲ درصد وزنی قیر در آسفالت استفاده نمودند. آن‌ها پس از انجام آزمایش‌های کشش غیرمستقیم و شیار جای چرخ دریافتند که مقاومت رطوبتی و شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی حاوی این ترکیب، به ترتیب ۱۰ و ۵۰ درصد بیشتر از مقاومت در نمونه حاوی ۳/۵ درصد از استایرن بوتادین استایرن است. حبیبی و همکاران (۲۰۱۷) ترکیبات مختلفی از پلی‌اتیلن ترفتلات و خرده تایلر ضایعاتی را به میزان ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی به قیر افزودند. نتایج طرح حاکی از افزایش مقاومت شیارشدگی، به‌خصوص در نمونه‌های آسفالتی حاوی مقدار بیشتری از پلی‌اتیلن ترفتلات، بوده است.

برای کشور ایران، استفاده از پلیمر استایرن بوتادین استایرن در آسفالت، علی‌رغم عملکرد مطلوب، به دلیل وارداتی بودن و وابستگی قیمت آن به مناسبت‌های سیاسی، صرفه اقتصادی ندارد. در این پژوهش، با هدف ارائه ترکیب بهینه و کارآمد از دو پلیمر تولید داخل کشور سعی شده تا از طریق هم‌پوشانی خواص پلیمری در مخلوط‌های آسفالتی، جایگزینی به‌صرفه برای پلیمر استایرن بوتادین استایرن ارائه گردد. در این راستا،

^۱- Moisture sensitivity

^۲- Styrene Butadiene Styrene (SBS)

است (صالح فرد و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش، انتظار می‌رود که ترکیب این دو پلیمر، به سبب همپوشانی خواص یکدیگر، بتواند عملکرد مطلوبی را برای مخلوط آسفالتی پدید آورد. در این راستا، درصد ترکیبی از هر پلیمر و میزان به‌کارگیری آن در مخلوط مطالعه شد. نتایج نشان داد که ترکیبات پلیمری (به‌خصوص ترکیبات حاوی مقدار بیشتری از استایرن بوتادین رابر) می‌توانند همچون پلیمر استایرن بوتادین استایرن عملکرد مطلوبی را برای آسفالت ارائه دهند. در شکل ۱، فلوچارت پژوهش قابل مشاهده است.

۲. مصالح مصرفی

۲-۱. سنگ‌دانه

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از نوع سیلیسی است و مطابق با منحنی شماره ۴ دانه‌بندی پیوسته آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران مورد استفاده قرار گرفته است. خصوصیات این مصالح به شرح جدول ۱ است.

آمیخته‌هایی از ترکیب دو پلیمر استایرن بوتادین رابر^۱ و پلی‌استایرن^۲ تهیه شده و در مقادیر مختلف وزنی به مخلوط آسفالتی اضافه شدند. جهت ارزیابی بهتر عملکرد آمیخته‌ها نیز نمونه‌های آسفالتی مجزا از هر یک از پلیمرها تهیه شد. آزمایش‌های تعیین میزان حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی روی تمامی نمونه‌ها صورت پذیرفت.

لاستیک استایرن بوتادین رابر نوعی پلیمر الاستومر^۳ است که با خاصیت الاستیک و چسبندگی که در قیر ایجاد می‌کند، مقاومت در برابر ترک‌های خستگی و حرارتی را افزایش می‌دهد (لی و همکاران، ۲۰۱۷؛ عبدالموجود و تانون، ۲۰۱۵). این پلیمر، با افزایش انرژی آزاد پیوستگی و کاهش انرژی آزاد شده سیستم در رخداد خرابی رطوبتی، موجب کاهش تمایل سیستم به عریان‌شدگی می‌گردد (حامدی، ۲۰۱۸). پلیمر پلی‌استایرن نوعی پلاستیک گرمانرم^۴ است که خاصیت انحلال‌پذیری زیادی در قیر دارد و به‌کارگیری آن در مخلوط آسفالتی به سبب ایجاد خاصیت پلاستیک در مخلوط، موجب تردی آن می‌گردد. برای این پلیمر، تحقیقات اندکی انجام گرفته

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی

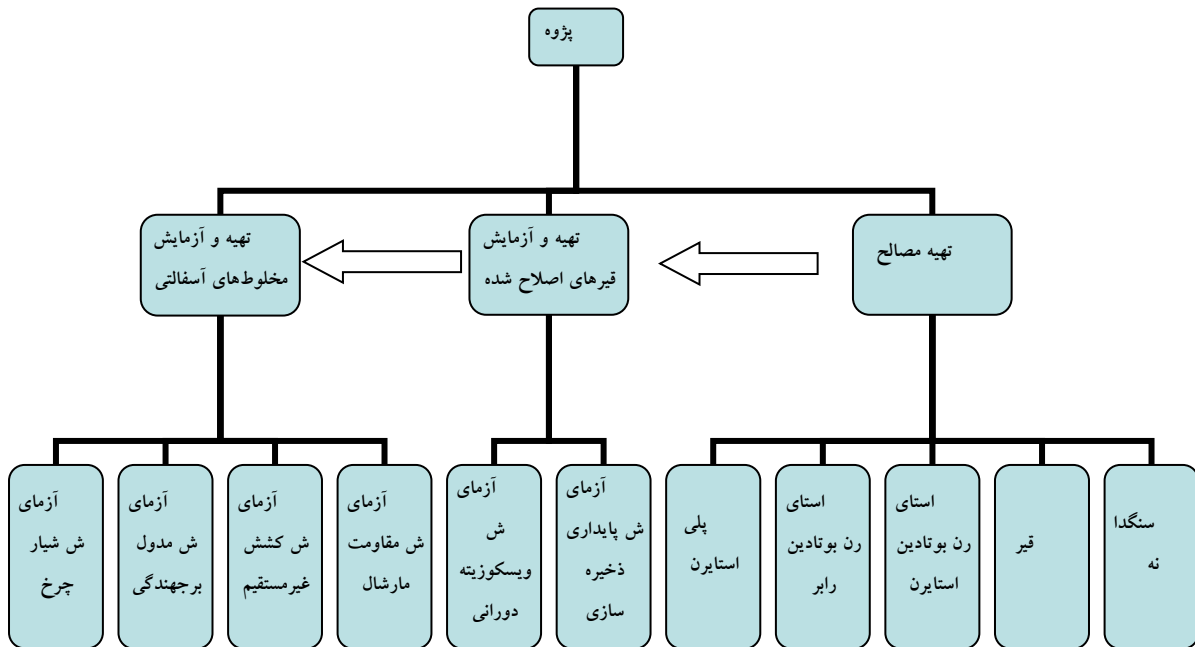
استاندارد	مقدار مجاز برای رویه	مقدار	مشخصات
AASHTO T96	۳۰	۱۹	حداکثر درصد سایش به روش لوس آنجلس
BS 812	۲۵	۱۸	حداکثر درصد ضریب تورق
ASTM D5821	۹۰	۹۴	حداقل درصد شکستگی در دو وجه
ASTM C128	-	۲/۳	وزن مخصوص ریزدانه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

^۱- Styrene Butadiene Rubber (SBR)

^۲- PolyStyrene (PS)

^۳- Elastomer

^۴- Thermoplastic



شکل ۱. فلوچارت پژوهش

۲-۲. قیر

قیر مصرفی از نوع خالص ۶۰-۷۰ تولیدی پالایشگاه نفت پاسارگاد تهران بوده و مشخصات آن در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی قیر خالص

مشخصات	مقدار	روش آزمایش
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس	۱/۰۳	ASTM D-70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس	۶۴	ASTM D-5
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	۵۴	ASTM D-36
انگمی در ۲۵ درجه سلسیوس	۱۰۲	ASTM D-113
نقطه اشتعال	۳۰۵	ASTM D-92

۲-۳. افزودنی‌ها

جزء مالتن قیر سازگارتر بوده و با شرکت در الاستیسیته، قیر را منعطف‌تر می‌سازد. در حالی که مونومر سخت استایرن، سختی و نقطه نرمی قیر را افزایش می‌دهد (راسمن، ۲۰۰۷). پلیمر پلی‌استایرن به دلیل آروماتیک بودن با آسفالتن قیر سازگاری بهتری داشته و از ته‌نشین شدن آسفالتن به دلیل کاهش فاز مالتن و جذب آن توسط استایرن بوتادین رابر جلوگیری می‌کند.

این سه پلیمر با نام‌های اختصاری SBS، SBR و PS به ترتیب تولیدی کارخانه LG کره، پتروشیمی بندر امام خمینی (ره) و شرکت پتروشیمی تبریز بوده و مشخصات آن‌ها در جدول ۳ آمده است.

پلیمر استایرن بوتادین استایرن یک کوپلیمر سه بلوکه است که در آن بلوک‌های استایرن به‌وسیله یک بلوک بوتادین از یکدیگر جدا شده‌اند. ترکیب این پلیمر با قیر توانایی ایجاد یک شبکه الاستیک سه‌بعدی از فاز پلی‌استایرن را دارد که به‌وسیله فاز پلی‌بوتادین به یکدیگر متصل شده‌اند. این قابلیت موجب بهبود خواص دمای کم (۳۸ درجه سلسیوس) و زیاد (۱۳۰ درجه سلسیوس) قیر می‌گردد (برزگری و همکاران، ۲۰۰۲). پلیمر استایرن بوتادین رابر از کوپلیمریزاسیون استایرن و بوتادین تولید می‌شود. مونومر نرم بوتادین به دلیل پارافینی بودن، با

جدول ۳. مشخصات پلیمرهای مصرفی

SBS 501		PS 1540		SBR1502	
مقدار	خصوصیت	مقدار	خصوصیت	مقدار	خصوصیت
۳۱	مقدار استایرن (درصد وزنی)	۵۰۰	حداکثر مقدار استایرن (واحد در میلیون)	۲۲/۲۴-۵/۵	مقدار استایرن (درصد وزنی)
۱۰۰ و ۶۷-	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سلسیوس)	+۱۰۰	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سلسیوس)	-۳۰	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سلسیوس)
۵۵	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)	۲	ازدیاد طول تا پارگی (درصد)	۳۵۰	ازدیاد طول تا پارگی (درصد)
۱۶۰۰	ویسکوزیته در ۱۶۰ درجه سلسیوس (سلسیوس پواز)	۴۵	استحکام کششی (مگا پاسکال)	۲۴/۵	استحکام کششی (مگا پاسکال)
۱۱۵	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	۸۹/۵	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	۴/۷-۷۵	ارگانیک اسید (درصد وزنی)
۰/۸۷	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۳۰۰۰	مدول خمشی (مگا پاسکال)	۰/۹۸۲	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

پایداری پلیمر و عدم ته‌نشینی آن در قیر (به‌خصوص برای قیرهای حاوی آمیخته پلیمری)، از آزمایش پایداری ذخیره‌سازی استفاده شده است.

۳-۲. آزمایش پایداری ذخیره‌سازی

با افزودن پلیمر به قیر، تعادل فازها از بین رفته و به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت که دو گروه پلیمر و آسفالتن برای حل نمودن فاز مالتن قیر رقابت می‌کنند و در صورت ناسازگاری پلیمر با آسفالتن به‌صورت جذب کامل مالتن، آسفالتن قیر و پلیمر دو فاز جدا را تشکیل داده و مخلوطی غیریکنواخت ایجاد می‌نمایند (برزگری و همکاران، ۲۰۰۲). در این آزمایش، مطابق با ASTM D 5976، نمونه‌های قیر اصلاح شده درون استوانه‌ای به قطر ۳۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۶۰ میلی‌متر ریخته شده و سپس به‌طور عمودی به مدت ۴۸ ساعت در داخل یک گرم‌کن با دمای ۱۶۳ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. پس از آن به مدت ۴ ساعت در دمای ۵ درجه سلسیوس زیر صفر و در نهایت نمونه‌ها سرد شده و از طول به سه قسمت مساوی برش زده می‌شوند. اختلاف نقاط نرمی قسمت بالایی و پایینی نمونه اندازه‌گیری شده و این اختلاف باید

۳. روش تهیه و انجام آزمایش قیرهای اصلاح شده

۳-۱. تهیه قیرهای اصلاح شده

قیرهای اصلاح شده در این پژوهش با استفاده از پلیمرها به‌صورت مستقل و ترکیبی تهیه شده‌اند. سه پلیمر استایرن بوتادین استایرن، استایرن بوتادین رابر و پلی‌استایرن به‌صورت جداگانه و به میزان ۵٪ وزنی قیر مورد استفاده قرار گرفتند. برای تهیه قیرهای حاوی آمیخته پلیمری، ابتدا دو پلیمر استایرن بوتادین رابر و پلی‌استایرن در نسبت‌های وزنی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد نسبت به یکدیگر ترکیب (سه نوع ترکیب پلیمری تهیه شده است) و تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس گرم شده و سپس در حالت مذاب به میزان ۳ و ۵ درصد وزنی به قیر هم‌دمای اضافه شدند. مطابق با تحقیقات پیشین (وامق و همکاران، ۲۰۱۹؛ جبرئیل و فنگ، ۲۰۱۷) که روی پلیمرها و آمیخته‌های پلیمری انجام گرفته، عمل اختلاط قیر و افزودنی به مدت یک ساعت و با سرعت ۶۰۰۰ دور بر دقیقه با دستگاه مخلوط‌کن با دور برشی بالا^۱ صورت پذیرفت. سپس، بنا به توصیه محققین مؤسسه پلیمر و پتروشیمی ایران (یوسفی، ۲۰۰۴)، به‌منظور کنترل

^۱- High-shear mixer

کمتر از ۲/۵ درجه سلسیوس باشد تا نمونه از لحاظ پایداری تضمین گردد.

۴. روش تهیه و انجام آزمایش مخلوط‌های آسفالتی

۳-۳. آزمایش ویسکوزیته دورانی

آزمایش ویسکوزیته دورانی مطابق استاندارد AASHTO T316 و به منظور ارزیابی کارایی قیرهای اصلاح شده در محدوده دمایی زیاد و کنترل روانی قیر برای پمپاژ، جابجا شدن و اختلاط با مصالح سنگی انجام گرفت. بر این اساس، حداکثر مقدار ویسکوزیته قیر در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس به ۳ Pa.s محدود می‌شود تا ضمن حفظ کارایی مخلوط، پوشش حداکثری سنگدانه‌ها نیز انجام گیرد.

۴-۱. تهیه نمونه‌های آسفالتی

به منظور تهیه نمونه‌های استوانه‌ای شکل از مخلوط‌های آسفالتی، در ابتدا مقدار قیر بهینه مخلوط‌ها مطابق با ASTM D1599 مشخص گردید که نتایج آن در جدول ۴ قابل مشاهده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها، کلمه AC نام نمونه فاقد افزودنی و برای سایر نام‌ها اعداد ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد پلیمر در آمیخته و اعداد ۳ و ۵ درصد وزنی به کارگیری افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی است. برای مثال، ۵٪ (75SBR+25PS) نام نمونه آسفالتی است که در آن به میزان ۵٪ وزنی قیر، آمیخته پلیمری دارای ۷۵٪ استایرن بوتادین رابر و ۲۵٪ پلی‌استایرن استفاده شده است. پس از یافتن مقدار قیر بهینه، نمونه‌های آسفالت استوانه‌ای شکل برای انجام سایر آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده چرخشی تهیه شدند.

جدول ۴. مقدار قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی

نوع مخلوط	AC	PS5%	SBR5%	SBS5%	(25SBR+75PS)3%	(25SBR+75PS)5%	(50SBR+50PS)3%	(50SBR+50PS)5%	(75SBR+25PS)3%	(75SBR+25PS)5%
مقدار قیر بهینه (درصد)	۴/۸	۵/۱	۵/۴	۵/۶	۵/۱	۵/۲	۵/۲	۵/۳	۵/۳	۵/۴

۴-۲. آزمایش مقاومت مارشال

نسبت مقاومت مارشال نمونه‌های آسفالتی در حالت تر به خشک، شاخصی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی است. برای انجام این آزمایش، ابتدا نمونه‌ها در حالت خشک و تر به ترتیب به مدت ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری شده و سپس توسط دستگاه مارشال تحت بارگذاری با سرعت ثابت ۵۱ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفته و مقدار استحکام مارشال نمونه‌ها قرائت شد.

۴-۳. آزمایش کشش غیرمستقیم^۱ لاتمن

اصلاح شده

برای انجام آزمایش کشش غیرمستقیم مطابق با AASHTO T283، نمونه‌های آسفالتی دارای درصد فضای خالی مشخص تحت عمل‌آوری و بارگذاری قرار گرفتند. در این راستا، نیمی از نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد، به وسیله پمپ خلأ تحت فشار ۳۵ کیلوپاسکال قرار گرفته و سپس درون پلاستیک

^۱- Indirect tensile strength

به‌وسیله دستگاه ویل تراک با فشار چرخ حدود ۱۰ کیلوگرم بر سلسیوس متر مربع انجام گرفت. فرکانس بارگذاری یک هرتز بوده و در مجموع هر نمونه تحت ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفته و در انتها عمق شیار به وجود آمده در هر نمونه اندازه‌گیری شده است.

۵. نتایج و تفسیر آن‌ها

۵-۱. نتایج آزمایش پایداری ذخیره‌سازی

گرانش، کشش بین ذرات و شناوری از نیروی‌هایی هستند که بر سیستم تعادل تأثیر می‌گذارند. در هنگام ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح شده، به دلیل اختلاف در پارامتر حلالیت و چگالی بین قیر و پلیمر، جدایی فازها اتفاق می‌افتد (گالویاک و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج کنترل پایداری ذرات پلیمری در قیر در شکل ۲ قابل مشاهده است. تنها در نمونه حاوی پلی‌استایرن مستقل و دو نمونه حاوی ۳ و ۵ درصد از آمیخته دارای ۷۵٪ پلی‌استایرن، اختلاف نقاط نرمی کمی بیشتر از ۲/۵ درجه سلسیوس است و در سایر نمونه‌ها این پارامتر کمتر از مقدار حداکثر ۲/۵ درجه سلسیوس است. این بدان معنیست که پلیمرها از نظر یکنواختی به‌خوبی در مخلوط پخش و ترکیبی همگن ایجاد شده و اختلاف نقاط نرمی اندازه‌گیری شده در قطعه بالایی و پایینی نمونه به حداقل ممکن رسیده است. با افزایش مقدار استایرن بوتادین رابر در مخلوط‌ها، شاخص پایداری در وضعیت مناسب‌تری قرار می‌گیرد. این امر می‌تواند به دلیل وجود مونومر نرم بوتادین سازگار با اجزای قیر باشد. لیکن مونومر سخت استایرن موجود در پلیمرها با آسفالتن قیر ناسازگار است و می‌تواند بر شاخص پایداری تأثیرات نامطلوبی بگذارد. از این‌رو، در به‌کارگیری پلیمر پلی‌استایرن به‌صورت مستقل و یا به مقدار زیاد (۷۵٪) در آمیخته‌ها، افزایش اختلاف نقاط نرمی قابل مشاهده است.

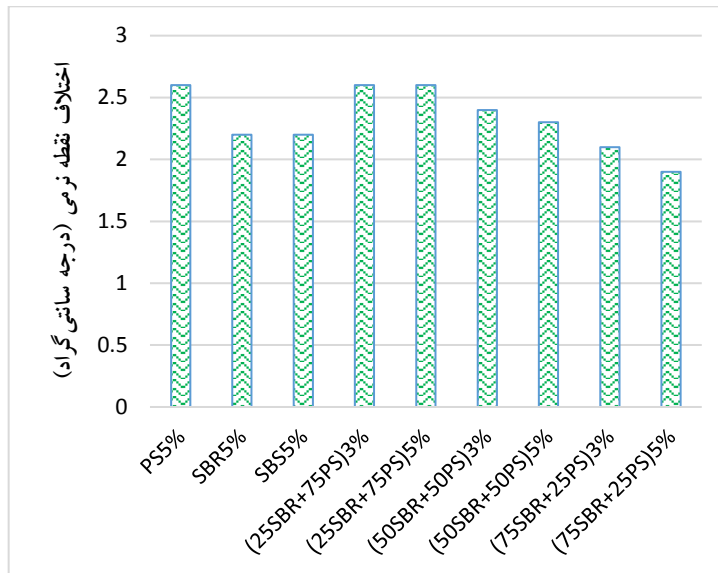
حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب و در یخ‌زن با دمای ۱۸- درجه سلسیوس منجمد شدند. پس از یک دوره انجماد ۱۶ ساعته، نمونه‌ها در حمام آب ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت و پس از آن با کاهش دمای حمام به ۲۵ درجه سلسیوس، به مدت ۲ ساعت نگهداری و آماده بارگذاری در حالت اشباع شدند. برای عمل‌آوری نمونه‌های حالت خشک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند. بارگذاری نمونه‌ها به‌وسیله دو تیغه دستگاه و با سرعت ثابت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.

۴-۴. آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی به‌طور مستقیم تحت تأثیر میزان چسبندگی و پیوستگی مخلوط قرار دارد. در طرح اختلاط به روش روسازی ممتاز از نسبت مدول برجهندگی حالت تر و خشک می‌توان به‌جای مقدار نسبت مقاومت کششی استفاده نمود و حداقل مقدار آن به ۷۰٪ محدود می‌گردد (هاینیک و وینسون، ۱۹۸۸). در این آزمایش، که مطابق با استاندارد ASTM D 4123-82 انجام گرفت، نمونه‌های آسفالتی همانند شرایط عمل‌آوری نمونه‌های کشش غیرمستقیم آماده بارگذاری شده و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تحت بارگذاری نیمه سینوسی با دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه (۰/۹ ثانیه استراحت) قرار گرفتند.

۴-۵. آزمایش شیار چرخ

از میان دو آزمایش خزش دینامیک و شیار جای چرخ که برای ارزیابی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، آزمایش شیار جای چرخ به دلیل ایجاد مهار جانبی برای نمونه تحت بارگذاری، تطابق بیشتر با شرایط واقعی نمونه دارد (گاربا، ۲۰۰۲). پیش از انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری شده و سپس بارگذاری

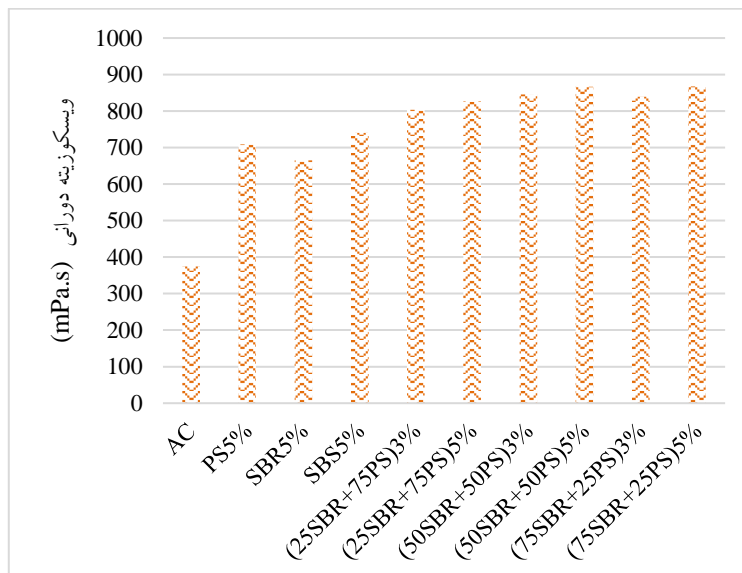


شکل ۲. عملکرد پایداری ذرات پلیمر در قیر

از ۳۰۰۰ میلی‌پاسکال ثانیه یا ۳ پاسکال ثانیه است. بنابراین، در صورت اجرای صحیح عملیات اختلاط آسفالت، ضمن پوشش مناسبی از سنگ‌دانه‌ها، در بخش کارایی مخلوط حین پخش و تراکم نیز عملکرد مخلوط مطلوب خواهد بود.

۵-۲. نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی

نتایج حاصل از انجام آزمایش ویسکوزیته دورانی در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس در شکل ۳ قابل مشاهده است. با افزودن پلیمرها به قیر، مقدار ویسکوزیته قیر افزایش یافته است. لیکن در تمامی نمونه‌ها مقدار این ویسکوزیته کمتر



شکل ۳. عملکرد ویسکوزیته دورانی

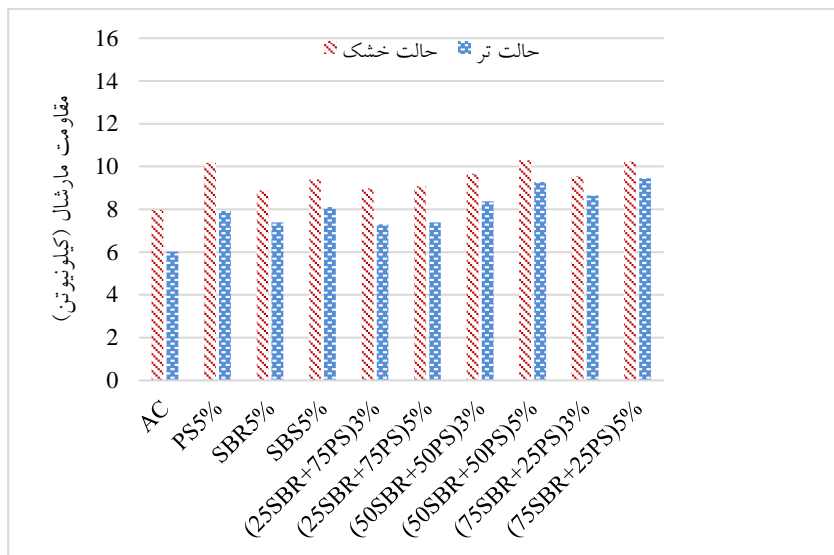
آسفالتی حاوی پلیمر موجب افزایش سختی نمونه شده و مقاومت مارشال را افزایش داده است. این عامل در مخلوط‌های حاوی استایرن بوتادین استایرن و پلی‌استایرن نفوذ بیشتری دارد. در شکل ۵ و جدول ۵، به ترتیب نسبت مقاومت مارشال و تحلیل آماری Tukey این

۵-۳. نتایج آزمایش مقاومت مارشال

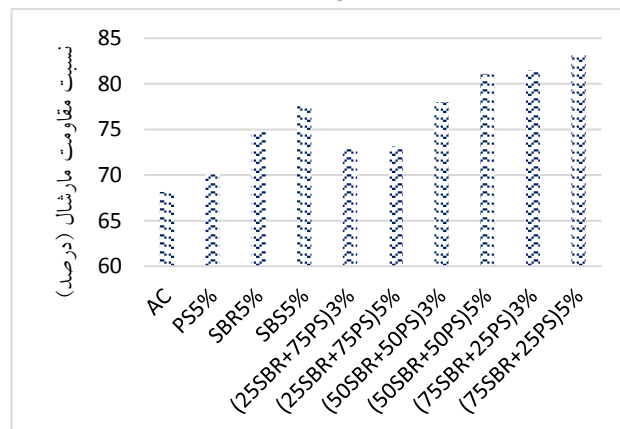
در شکل ۴، میانگین مقاومت مارشال نمونه‌ها در حالت خشک و تر قابل مشاهده است. مقاومت مارشال نمونه شاهد در هر دو حالت خشک و تر از سایر نمونه‌ها کمتر است. مونومر سخت استایرن موجود در مخلوط‌های

SBS در مقاومت مارشال داشته باشد. دو نمونه دارای ۳ و ۵ درصد از آمیخته دارای ۷۵٪ استایرن بوتادین رابر تفاوت معنی داری نداشته و بنابراین استفاده از این آمیخته به میزان ۳٪ به سبب مصرف کمتر پلیمرها، اقتصادی تر به نظر می‌رسد. ساختار تقریباً مشابه دو پلیمر استایرن بوتادین رابر و استایرن بوتادین استایرن توانسته است منجر به ایجاد عملکرد مشابهی در مخلوط‌های آسفالتی گردد. در پلیمر استایرن بوتادین رابر، مونومر نرم بوتادین در قیر حل شده و منتج به سازگاری با قیر و مونومر رابر نیز در الاستیسیته قیر شرکت نموده است و این دو موجب بهبود مقاومت رطوبتی مخلوط گشته‌اند. این در حالی است که بهبود مقاومت رطوبتی در نمونه‌های حاوی استایرن بوتادین استایرن ناشی از تشکیل یک شبکه پلیمری در قیر و حفظ انسجام مخلوط است.

مقادیر نشان داده شده است. این تحلیل، امکان مقایسه دوبه‌دو مقادیر مقاومت نمونه‌ها را فراهم می‌آورد. مطابق با جدول ۲، در تمامی نمونه‌های دارای افزودنی، به جز نمونه حاوی ۵٪ پلی‌استایرن، افزایش نسبت مقاومت مارشال در مقایسه با نمونه فاقد افزودنی قابل توجه است. همان‌طور که در شکل و نتایج تحلیل آماری می‌توان مشاهده کرد، با افزایش مقدار پلیمر استایرن بوتادین رابر در مخلوط‌های آسفالتی، مقدار نسبت مقاومت مارشال افزایش قابل توجهی می‌یابد. این افزایش به گونه‌ای است که نسبت مقاومت مارشال در سه نمونه (50SBR+50PS)5%، (75SBR+25PS)3% و (75SBR+25PS)5% در مقایسه با نمونه دارای استایرن بوتادین استایرن اختلاف معنی داری دارد و می‌توان گفت که آمیخته پلیمری می‌تواند عملکردی به تبع بهتر از پلیمر



شکل ۴. عملکرد مقاومت مارشال



شکل ۵. عملکرد نسبت مقاومت مارشال

جدول ۵. خلاصه نتایج تحلیل Tukey بر مقادیر نسبت مقاومت مارشال

Type of binder	AC	PS5%	SBR5%	SBS5%	(25SBR+75PS)3%	(25SBR+75PS)5%	(50SBR+50PS)3%	(50SBR+50PS)5%	(75SBR+25PS)3%	(75SBR+25PS)5%
AC	-	N	S	S	S	S	S	S	S	S
PS5%		-	S	S	S	S	S	S	S	S
SBR5%			-	S	N	N	S	S	S	S
SBS5%				-	S	S	N	S	S	S
(25SBR+75PS)3%					-	N	S	S	S	S
(25SBR+75PS)5%						-	S	S	S	S
(50SBR+50PS)3%							-	S	S	S
(50SBR+50PS)5%								-	N	S
(75SBR+25PS)3%									-	N
(75SBR+25PS)5%										-

S = Significant, N = Not significant

۴-۵. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

مقادیر مقاومت کشش غیرمستقیم در شکل ۶ نشان داده شده است. مقاومت کششی غیرمستقیم در دو حالت خشک و اشباع برای نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر بیشتر از نمونه‌های فاقد افزودنی است. این امر می‌تواند به دلیل افزایش ویسکوزیته و چسبندگی قیر در اثر افزودن پلیمر به آن باشد. در مقایسه بین پلیمرهای خالص، افزایش مقاومت به ترتیب در نمونه‌های حاوی استایرن بوتادین استایرن، استایرن بوتادین رابر و پلی‌استایرن است. با این حال، زمانی که دو پلیمر به صورت آمیخته مورد استفاده قرار گرفتند، مقاومت کششی نسبت به به‌کارگیری پلیمر خالص افزایش یافته است. به طوری که در نمونه‌های حاوی ۷۵٪ استایرن بوتادین رابر، مقاومت کششی همانند نمونه حاوی استایرن بوتادین استایرن است.

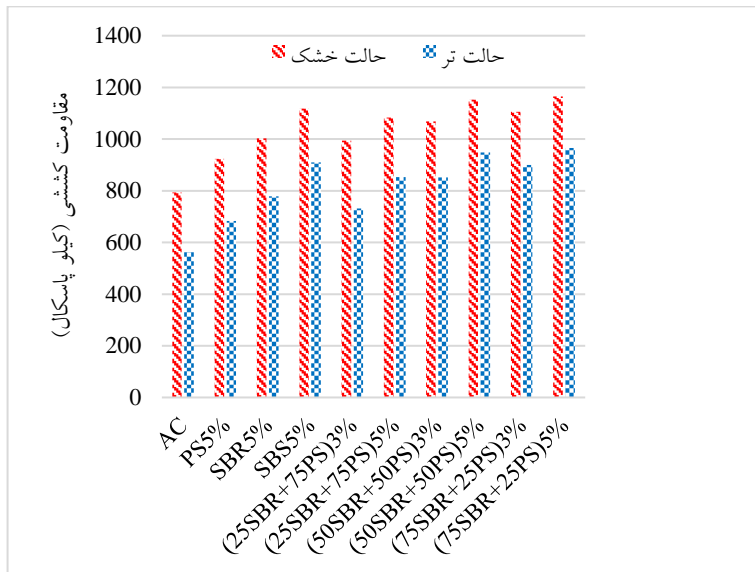
در شکل ۷ و جدول ۶، به ترتیب نتایج نسبت‌های مقاومت کششی و تحلیل آماری Tukey انجام شده روی این مقادیر قابل مشاهده است. سیلیسی بودن مصالح سنگی موجب شده تا نسبت‌های مقاومتی، مقادیر کمی داشته باشند. عملکرد نمونه فاقد افزودنی نسبت به عملکرد سایر نمونه‌های دارای افزودنی، به جز دو نمونه

دارای پلی‌استایرن و نمونه دارای ۳٪ از آمیخته حاوی ۷۵٪ پلی‌استایرن، تفاوت معنی‌داری دارد. این امر نشان می‌دهد که اغلب افزودنی‌ها موجب افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی نمونه‌ها گشته‌اند. زمانی که پلیمر پلی‌استایرن و پلیمر استایرن بوتادین رابر به صورت مستقل در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده‌اند، مقاومت رطوبتی ضعیف‌تری نسبت به زمان استفاده از ترکیب این دو پلیمر مشاهده شده است. بر طبق جدول ۳، اکثر آمیخته‌های پلیمری در مقایسه با دو پلیمر سازنده آن (استایرن بوتادین رابر و پلی‌استایرن)، تفاوت معنی‌داری در نتایج نسبت مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی ایجاد نموده‌اند. لیکن مقدار افزایش این نسبت در مقایسه با عملکرد پلیمر استایرن بوتادین استایرن قابل توجه نبوده است. در نمودار شکل ۷، عملکرد مشابهی در میان نمونه دارای استایرن بوتادین استایرن و نمونه‌های دارای ۵۰ و ۷۰ درصد استایرن بوتادین رابر قابل مشاهده است. با توجه به عدم وجود تفاوت معنی‌دار در بین نتایج این آزمایش روی نمونه‌های SBS5%، (50SBR+50PS)5%، (75SBR+25PS)3% و (75SBR+25PS)5% می‌توان نتیجه گرفت که سه آمیخته مذکور می‌توانند جایگزین مناسبی برای پلیمر استایرن بوتادین استایرن باشند و در

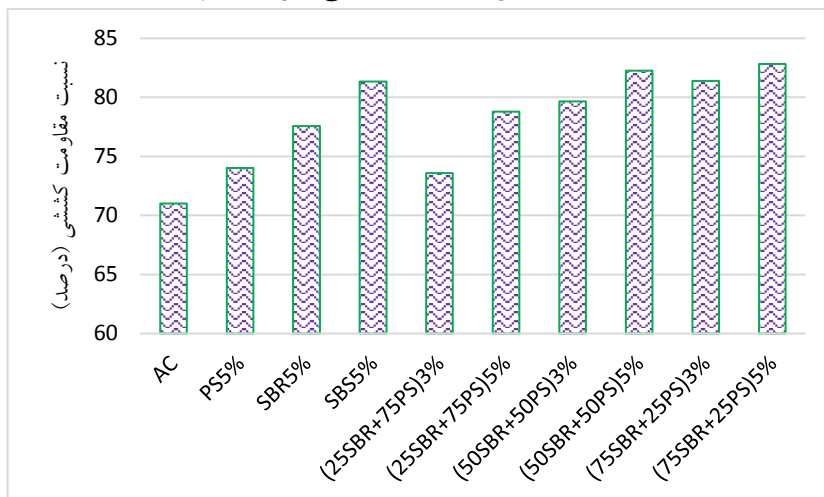
ترکیبات پلیمری (به خصوص در مقادیر به کارگیری بیشتر پلیمر استایرن بوتادین رابر) توانسته‌اند نتایج مطلوبی را برای حساسیت رطوبتی آسفالت پدید آورند. در مورد پلیمر استایرن بوتادین استایرن نیز می‌توان گفت که این پلیمر یک کوپلیمر سه بلوکه است که در آن بلوک‌های استایرن به وسیله یک بلوک بوتادین از یکدیگر جدا شده‌اند و در قیر توانایی ایجاد یک شبکه الاستیک سه‌بعدی از فاز پلی‌استایرن را تشکیل می‌دهند که به وسیله فاز پلی بوتادین به یکدیگر متصل شده‌اند. این شبکه سه‌بعدی باعث حفظ انسجام قیر و بهبود شرایط پیوستگی درون مخلوط آسفالتی می‌گردد و حساسیت رطوبتی را کاهش می‌دهد.

میان آن‌ها استفاده ۳ درصدی از آمیخته حاوی ۷۵٪ استایرن بوتادین رابر به سبب استفاده کمتر از پلیمرها، توصیه می‌گردد.

در مورد علت این عملکردها می‌توان گفت که در پلیمر استایرن بوتادین رابر، مونومر نرم بوتادین در قیر حل شده و آن را منعطف‌تر می‌سازد و سازگاری این پلیمر با قیر را افزایش می‌دهد. مونومر رابر نیز در الاستیسیته قیر شرکت می‌کند و خاصیت الاستیک مخلوط را بهبود می‌بخشد. مونومر سخت استایرن، سختی و نقطه نرمی قیر را افزایش می‌دهد (راسمن، ۲۰۰۷). وجود مونومر استایرن در استایرن بوتادین رابر باعث بهبود سازگاری این پلیمر با پلی‌استایرن و افزایش برهمکنش بین دو فاز و قابلیت اختلاط آن‌ها، علی‌رغم اختلاف موجود در پارامتر حلالیت آن‌ها می‌شود (یوسفی، ۲۰۱۳). از این‌رو،



شکل ۶. عملکرد مقاومت کششی غیرمستقیم



شکل ۷. عملکرد نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم

جدول ۶. خلاصه نتایج تحلیل Tukey بر مقادیر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم

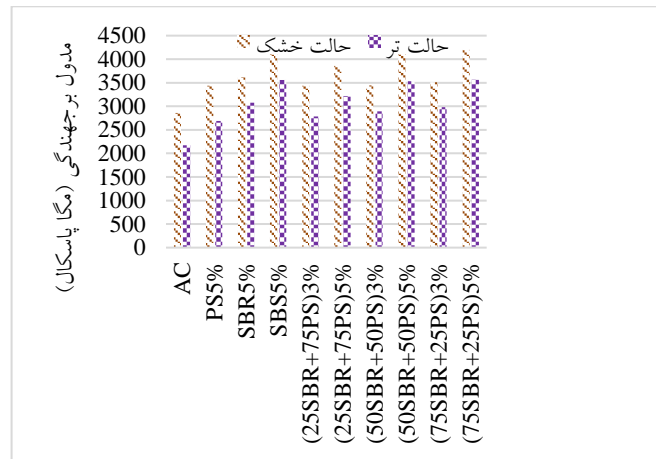
Type of binder	AC	PS5%	SBR5%	SBS5%	(25SBR+75PS)3%	(25SBR+75PS)5%	(50SBR+50PS)3%	(50SBR+50PS)5%	(75SBR+25PS)3%	(75SBR+25PS)5%
AC	-	N	S	S	N	S	S	S	S	S
PS5%		-	S	S	N	S	S	S	S	S
SBR5%			-	S	S	N	N	S	S	S
SBS5%				-	S	S	N	N	N	N
(25SBR+75PS)3%					-	S	S	S	S	S
(25SBR+75PS)5%						-	N	S	N	S
(50SBR+50PS)3%							-	N	N	S
(50SBR+50PS)5%								-	N	N
(75SBR+25PS)3%									-	N
(75SBR+25PS)5%										-

S = Significant, N = Not significant

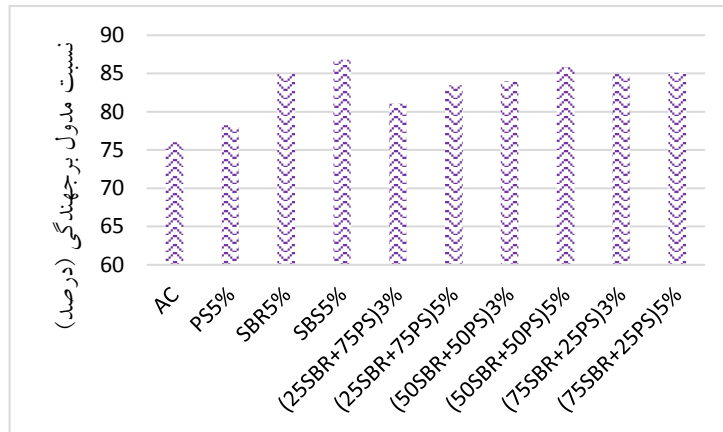
تمامی نمونه‌ها به استثنای نمونه حاوی پلی‌استایرن، افزایش قابل توجهی در مقدار مقاومت رطوبتی نسبت به نمونه فاقد افزودنی داشته‌اند. به جز نمونه دارای ۳٪ آمیخته حاوی ۷۵٪ پلی‌استایرن، سایر آمیخته‌ها همچون استایرن بوتادین استایرن، با اختلاف تقریباً کمی موجب بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط گشته‌اند (جدول ۴). ایجاد خاصیت الاستیک در مخلوط آسفالتی حاوی استایرن بوتادین رابر توانسته موجب بهبود خاصیت انعطاف‌پذیری آسفالت گردد. در مخلوط دارای پلیمر استایرن بوتادین استایرن نیز تشکیل شبکه پلیمری باعث حفظ انسجام در برابر جدایی ذرات آسفالت و افزایش مقاومت شده است.

۵-۵. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای دو حالت خشک و تر و مقادیر نسبت مدول برجهندگی به ترتیب در شکل-های ۸ و ۹ نشان داده شده است. استفاده از افزودنی‌های پلیمری به سبب داشتن مونومر سخت استایرن باعث افزایش سختی مخلوط و افزایش مدول برجهندگی شده است. همانند نتایج آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم، آمیخته‌ها توانسته‌اند مقاومت رطوبتی نظیر پلیمر استایرن بوتادین استایرن را برای مخلوط آسفالتی فراهم آورند. نتایج تحلیل Tukey برای نسبت مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی در جدول ۷ آورده شده است. همچون نتایج آزمایش‌های مقاومت مارشال و کشش غیرمستقیم،



شکل ۸. عملکرد مدول برجهنگی



شکل ۹. عملکرد نسبت مدول برجهنگی

جدول ۷. خلاصه نتایج تحلیل Tukey بر مقادیر نسبت مدول برجهنگی

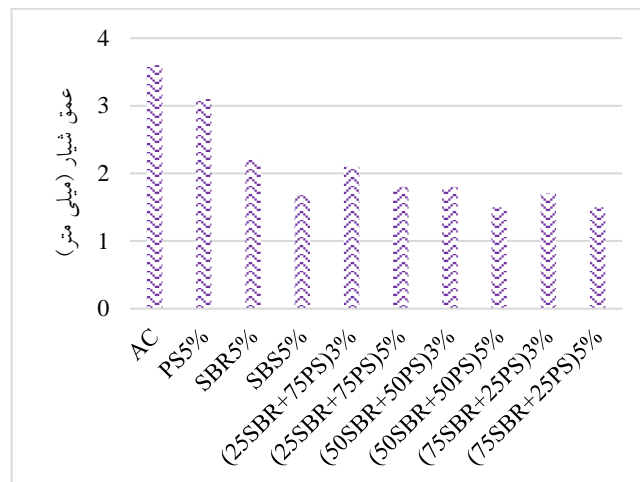
Type of binder	AC	PS5%	SBR5%	SBS5%	(25SBR+75PS)3%	(25SBR+75PS)5%	(50SBR+50PS)3%	(50SBR+50PS)5%	(75SBR+25PS)3%	(75SBR+25PS)5%
AC	-	N	S	S	S	S	S	S	S	S
PS5%		-	S	S	S	S	S	S	S	S
SBR5%			-	N	S	N	N	N	N	N
SBS5%				-	S	N	N	N	N	N
(25SBR+75PS)3%					-	N	N	S	S	S
(25SBR+75PS)5%						-	N	N	N	N
(50SBR+50PS)3%							-	N	N	N
(50SBR+50PS)5%								-	N	N
(75SBR+25PS)3%									-	N
(75SBR+25PS)5%										-

S = Significant, N = Not significant

۵-۶. نتایج آزمایش شیار چرخ

استایرن بوتادین رابر نیز پس از آن که مونومر نرم بوتادین در قیر حل شود، مونومر سخت استایرن با افزایش سختی قیر و مونومر رابر با بهبود خاصیت برگشت پذیری در مخلوط موجب افزایش مقاومت شیارشدگی شده است. همان طور که در جدول ۸ قابل مشاهده است، نتایج تحلیل آماری نشان می دهد که تمامی نمونه های دارای افزودنی نسبت به نمونه شاهد دارای افزایش قابل توجهی در مقدار مقاومت شیارشدگی گشته اند. عملکرد ضعیف تر پلی استایرن در مقایسه با سایر افزودنی ها، موجب اختلاف معنی داری در نتایج عمق شیارشدگی شده است. تمامی نمونه های دارای آمیخته، به جز نمونه دارای ۳٪ آمیخته حاوی ۷۵٪ پلی استایرن، توانسته اند مقاومت شیارشدگی نظیر پلیمر استایرن بوتادین استایرن در مخلوط آسفالتی ایجاد نمایند.

آزمایش شیار چرخ در زمره آزمایش های شبیه سازی با بارگذاری متناوب قرار دارد و همچنین در این آزمایش می توان روند تغییر شکل را در اثر تکرار بار تحت شرایط اعمال شده مشاهده کرد. نتایج این آزمایش برای نمونه های تحت مطالعه در شکل ۱۰ ارائه شده است. نمونه های دارای افزودنی دارای مقاومت شیارشدگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد هستند. پلی استایرن به سبب داشتن مونومر سخت استایرن موجب افزایش سختی مخلوط در برابر بارهای شیارشدگی شده است. برای پلیمر استایرن بوتادین استایرن نیز تشکیل شبکه سه بعدی در قیر و افزایش انسجام مخلوط موجب بهبود مقاومت در برابر پدیده شیارشدگی شده است. در پلیمر



شکل ۱۰. عملکرد شیارشدگی

جدول ۸. خلاصه نتایج تحلیل Tukey بر مقادیر شیار چرخ

Type of binder	AC	PS5%	SBR5%	SBS5%	(25SBR+75PS)3%	(25SBR+75PS)5%	(50SBR+50PS)3%	(50SBR+50PS)5%	(75SBR+25PS)3%	(75SBR+25PS)5%
AC	-	S	S	S	S	S	S	S	S	S
PS5%		-	S	S	S	S	S	S	S	S
SBR5%			-	S	N	N	N	S	S	S
SBS5%				-	S	N	N	N	N	N
(25SBR+75PS)3%					-	N	N	S	N	S
(25SBR+75PS)5%						-	N	N	N	N

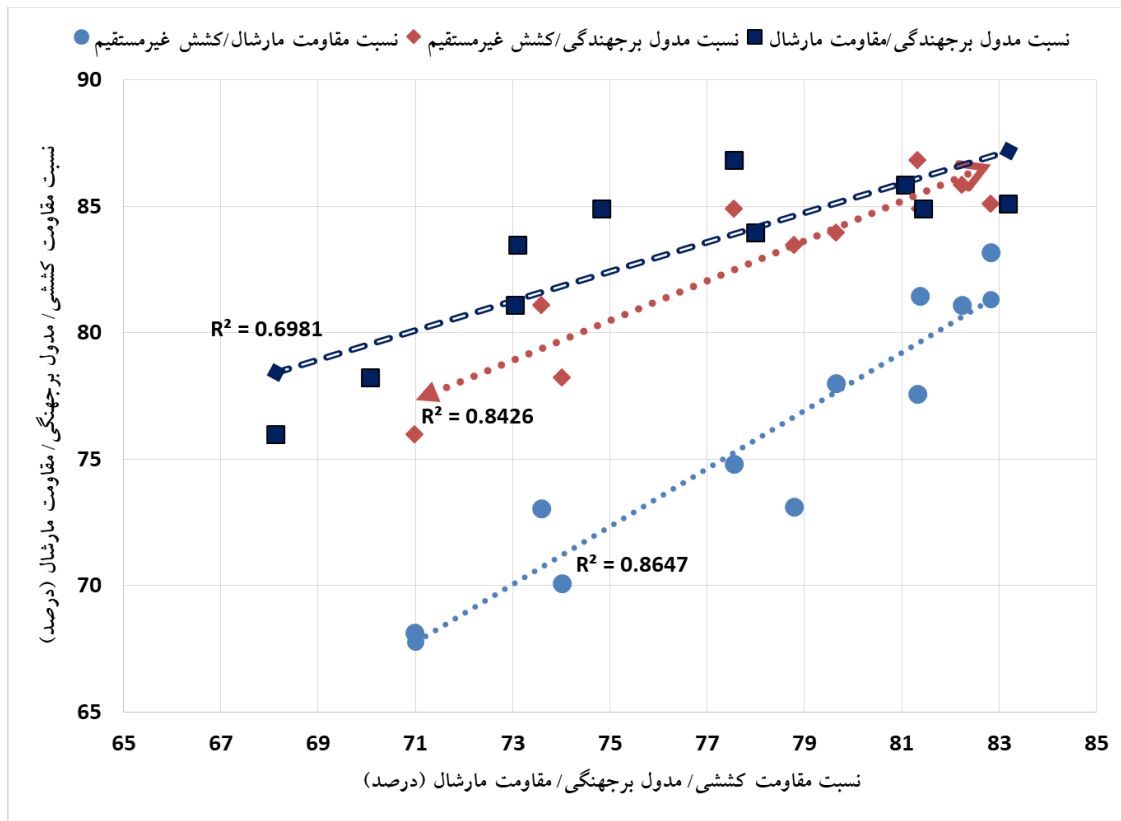
(50SBR+50PS)3 %	-	N	N	N
(50SBR+50PS)5 %	-	N	N	
(75SBR+25PS)3 %			-	N
(75SBR+25PS)5 %				-

S = Significant, N = Not significant

که برای تعیین میزان حساسیت رطوبتی، انجام آزمایش مدول برجهندگی در دو حالت خشک و تر جایگزین مناسبی برای انجام آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم است. این بحث در مقایسه نتایج دو آزمایش مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم که ضریب همبستگی مطلوبی دارند نیز صادق است. لیکن، در انتخاب دو آزمایش مقاومت مارشال و مدول برجهندگی به‌عنوان جایگزینی برای آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم، آزمایش مدول برجهندگی به دلیل غیرمخرب بودن و فراهم شدن امکان استفاده مجدد از نمونه‌های آسفالتی در سایر آزمایش‌ها ارجح‌تر است.

۵-۷. بررسی همبستگی بین نتایج پژوهش

در شکل ۱۱، همبستگی میان شاخص‌های حساسیت رطوبتی آزمایش‌های مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی قابل مشاهده است. با بررسی نمودار می‌توان دریافت که بیشترین همبستگی به ترتیب در میان نسبت مقاومت مارشال/کشش غیرمستقیم، نسبت مدول برجهندگی/کشش غیرمستقیم و نسبت مدول برجهندگی/مقاومت مارشال وجود دارد. بر طبق نمودار، ضریب همبستگی مناسبی میان مقادیر نسبت مدول برجهندگی و نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم وجود دارد. با این حال، به‌صورت قطعی نمی‌توان نتیجه گرفت



شکل ۱۱. همبستگی میان شاخص‌های حساسیت رطوبتی آزمایش‌های مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی بر آن بود تا با هم‌پوشانی خواص پلیمرها، ترکیبی کارآمد از پلیمرهای تولید داخل کشور ارائه گردد که توانایی ایجاد خواص عملکردی نظیر به‌کارگیری پلیمر وارداتی استاین بوتادین استاین در آسفالت را داشته باشد. در این راستا، دو پلیمر استاین بوتادین رابر و پلی‌استاین به‌صورت مستقل و ترکیبی و پلیمر استاین بوتادین استاین به‌صورت مستقل در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد و عملکرد حساسیت رطوبتی و شیارشدگی آن‌ها مورد مقایسه و تحلیل آماری قرار گرفت.

در تمامی آزمایش‌ها، نمونه‌های حاوی افزودنی عملکرد بهتری نسبت به نمونه فاقد افزودنی داشته‌اند. در سنجش حساسیت رطوبتی مشخص شد که ترکیبات پلیمری می‌توانند عملکرد مطلوبی نظیر پلیمر معروف استاین بوتادین استاین را در مخلوط‌های آسفالتی پدید آورند. در میان دو پلیمر به‌کار گرفته شده در آمیخته‌ها، تأثیر استاین بوتادین رابر بر بهبود مقاومت آسفالت، بیشتر از پلیمر پلی‌استاین است. در مقایسه تمام نمونه‌ها با یکدیگر، آمیخته دارای ۷۵٪ استاین بوتادین رابر و ۲۵٪ پلی‌استاین، مقاومت رطوبتی بیشتری را در مخلوط آسفالتی فراهم آورده است و مطابق با نتایج تحلیل آماری،

به‌کارگیری مقادیر ۳ و ۵ درصد از آمیخته در مخلوط آسفالتی، اختلاف معنی‌داری در نتایج حساسیت رطوبتی ایجاد نمی‌کند. از این‌رو، مصرف ۳٪ از این آمیخته به‌صرفه‌تر خواهد بود.

مقایسه خروجی سه آزمایش حساسیت رطوبتی نشان داد که مقادیر نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم به‌طور جداگانه با مقادیر نسبت مدول برجهندگی و نسبت مقاومت مارشال از همبستگی بالایی برخوردارند و مقاومت رطوبتی را می‌توان بر اساس نتایج مدول برجهندگی و مقاومت مارشال نیز استدلال نمود.

در ارزیابی مقاومت در برابر تغییرشکل دائم نیز ترکیب دو پلیمر بهتر از به‌کارگیری مستقل پلیمرها در مخلوط عمل نموده است. به‌عبارت دیگر، استفاده از آمیخته پلیمری (به‌خصوص آمیخته دارای مقدار بیشتری از پلیمر استاین بوتادین رابر) می‌تواند همچون پلیمر استاین بوتادین استاین موجب بهبود مقاومت شیارشدگی گردد.

این بررسی نشان داد که ترکیب دو پلیمر تولید داخل کشور با نام‌های استاین بوتادین رابر و پلی‌استاین به ترتیب به میزان ۷۵ و ۲۵ درصد، خواص عملکردی رطوبتی و شیارشدگی مشابه با پلیمر وارداتی استاین بوتادین استاین در آسفالت ایجاد نماید.

۷. مراجع

- ابطحی، س. م.، گلی، ا. و احمد دیباجی، س. ح. ۱۳۹۲. "اصلاح و نگهداری قیر". انتشارات مؤسسه علمی دانش پژوهان برین. Abdel-Goad, M. A. 2006. "Waste polyvinyl chloride-modified bitumen". J. Appl. Polym. Sci., 101(3): 1501-1505.
- Abdul-Mawjoud, A. A. and Thanoon, L. S. 2015. "Evaluation of SBR and PS-modified asphalt binders and HMA mixtures containing such binders". Appl. Res. J., 1: 460-469.
- Aksoy, A., Şamlioglu, K., Tayfur, S. and Özen, H. 2005. "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 19(1): 11-18.
- Ameri, M., Vamegh, M., Naeini, S. F. C. and Molayem, M. 2018. "Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik, Zycotherm and hydrated lime". Constr. Build. Mater., 165: 958-965.
- Barzegari, M. R., Yousefi, A. A. and Zeinali, M. 2002. "Bitumen modification via PS/PB blend". Iran. J. Polym. Sci. Technol., 16(67): 303-311.
- Dehnad, M. H., Khodaii, A. and Moghadas Nejad, F. 2013. "Moisture sensitivity of asphalt mixtures under different load frequencies and temperatures". Constr. Build. Mater., 48: 700-707.
- Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E. and Moeini, A. 2010. "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/ montmorillonite composites". Constr. Build. Mater., 24(3): 300-307.
- Garba, R. 2002. "Permanent deformation properties of asphalt concrete mixtures". PhD Thesis, NTNU, Norway.
- Gibreil, H. A. and Feng, C. P. 2017. "Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt". Constr. Build. Mater., 142: 101-108.

- Grenfell, J., Ahmad, N., Liu, Y., Apeageyi, A., Large, D. and Airey, G. 2014. "Assessing asphalt mixture moisture susceptibility through intrinsic adhesion, bitumen stripping and mechanical damage". *Road Mater. Pavement Design*, 15(1): 131-152.
- Hamed, G. 2018. "The effect of asphalt binder modification with SBR polymer on moisture sensitivity of hot mix asphalt". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 50(5): 51-60. (In Persian)
- Heinicke, J. J. and Vinson, T. S. 1988. "Effect of test condition parameters on IRMr". *J. Transport. Eng.*, 114(2): 153-172.
- Karahrodi, M. H., Jazani, O. M., Paran, S. M. R., Formela, K. and Saeb, M. R. 2017. "Modification of thermal and rheological characteristics of bitumen by waste PET/GTR blends". *Constr. Build. Mater.*, 134: 157-166.
- Kiggundu, B. M. and Roberts, F. L. 1988. "Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods". National Center for Asphalt Technology, Report No. 88-2.
- Kok, B. V. and Kuloglu, N. 2007. "The effects of different binders on mechanical properties of hot mix asphalt". *Int. J. Sci. Technol.*, 2(1): 41-48.
- Li, J., Ni, F., Jin, J. and Zhou, Z. 2017. "A comparison of rejuvenator and styrene-butadiene rubber latex used in hot in-place recycling". *Road Mater. Pavement Design*, 18(1): 101-115.
- Liang, P., Liang, M., Fan, W., Zhang, Y., Qian, C. and Ren, S. 2017. "Improving thermo-rheological behavior and compatibility of SBR modified asphalt by addition of polyphosphoric acid (PPA)". *Constr. Build. Mater.*, 139: 183-192.
- Lu, X. and Isacson, U. 2000. "Modification of road bitumens with thermoplastic polymers". *Polym. Test.*, 20(1): 77-86.
- Nciri, N., Kim, N. and Cho, N. 2017. "New insights into the effects of styrene-butadiene-styrene polymer modifier on the structure, properties, and performance of asphalt binder: The case of AP-5 asphalt and solvent deasphalting pitch". *Mater. Chem. Phys.*, 193: 477-495.
- Rossmann, S. 2007. "Technical guideline: The use of modified binders in road construction". Pretoria, Asphalt Academy, CSIR Built Environment.
- Salehfard, R., Abdi, A. and Amini, B. 2016. "Effect of SBR/NC on the rheological properties of bitumen and fatigue resistance of hot mix asphalt". *J. Mater. Civ. Eng.* 29(5): 04016282.
- Taherkhani, H. and Shafiee Matak, M. 2016. "Comparison of the properties of asphalt cements modified by nanoclay and SBS". *J. Transport. Res.*, 13(2): 141-152. (In Persian)
- Vamegh, M., Ameri, M. and Naeini, S. F. C. 2019. "Performance evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures modified by SBR/PP polymer blends and SBS". *Constr. Build. Mater.*, 209: 202-214.
- Xiao, F., Amirkhanian, S. N. and Luo, Z. 2016. "Performance properties of alternative polymerized asphalt mixtures containing various antistripping additives". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(8): 04016050.
- Yousefi, A. A. 2004. "Rubber-polyethylene modified bitumens". *Iran. Polym. J.*, 13(2): 101-112.
- Yousefi, A. A. 2013. "Segmental mobility in the vicinity of Tg in PS/SBR blends: Nanodomain size prediction of the dispersed phase". *J. Appl. Polym. Sci.*, 127(1): 659-665.

