

## ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی آمیخته پلیمری

محمود عامری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

سید فرهاد چاوشیان نائینی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه

علم و صنعت ایران، تهران

مصطفی وامق\*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: Mostafa\_Vamegh@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۰۳ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۹

### چکیده

یکی از اهداف مهم پژوهشگران صنعت راه‌سازی در راستای تأمین ایمنی و راحتی استفاده‌کنندگان از مسیر، حفظ روسازی‌های آسفالتی در برابر خرابی‌ها و عوامل محیطی، از جمله رطوبت و خرابی رطوبتی، می‌باشد. اصلاح خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی به منظور کاهش شدت خرابی‌ها و هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی، امری اجتناب‌ناپذیر است. پلیمر استایرن بوتادین استایرن به‌عنوان یکی از پرکاربردترین پلیمرهای مصرفی، برای بهبود خواص عملکردی آسفالت می‌باشد، لیکن، از آن جهت که این پلیمر وارداتی بوده و قیمت نسبتاً زیادی دارد، ارزیابی‌های اقتصادی مهندسی را به استفاده از مواد جایگزین سوق می‌دهد. در این پژوهش، به منظور بهبود خواص قیر، آمیخته‌ای از ترکیب دو نوع پلیمر تولید داخلی ارزان‌تر با هدف دستیابی به ترکیبی شبیه به پلیمرهای الاستوپلاستومر استفاده شده است. در این راستا، ترکیب SBR و PP هر کدام به میزان ۵۰٪ آمیخته، در نسبت‌های ۳، ۴ و ۵ درصد وزن قیر و برای مقایسه عملکرد آن‌ها پلیمر SBS نیز در نسبت‌های ۴ و ۵ درصد وزن قیر در مخلوط آسفالتی به‌کار گرفته شد. به منظور ایجاد پایداری مناسب پلیمر در قیرهای اصلاح شده، از نانورس به میزان ۱/۵ درصد وزنی قیر استفاده گردید. نتایج آزمایش‌های مارشال، کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی، جوشان تگراس و شیار چرخ نشان داد که میزان اثرگذاری ۵٪ از آمیخته پلیمری مشابه و کمی بهتر از SBS و ۲۰٪ افزایش بیشتر از نمونه شاهد (فاقد افزودنی) است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، حساسیت رطوبتی، آمیخته پلیمری، نانورس، کشش غیرمستقیم، جوشان تگراس

### ۱. مقدمه

شروع سایر خرابی‌ها از جمله شیارشدگی، چاله و ترک خستگی می‌باشد و در حالت کلی، با افزایش رطوبت، میزان و شدت این خرابی‌ها نیز افزایش می‌یابد (گرنفل و همکاران، ۲۰۱۴). با وجود آنکه این پدیده در اثر پیوند آب و سنگ‌دانه و جدایی قیر اتفاق می‌افتد، لیکن عوامل متعددی بر خرابی رطوبتی روسازی‌ها مؤثرند. برخی از عوامل، با مصالح مورد استفاده نظیر سنگ‌دانه

بررسی عملکرد اجزای مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت به‌عنوان یک عامل مخرب و تأثیرگذار بر رفتار دینامیک مخلوط‌های آسفالتی، از موارد مهم و قابل‌توجه محققین است. حساسیت رطوبتی از آن جهت یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی آسفالتی است که خود عاملی برای

راه‌ها می‌باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۳). علاوه بر آن، قیمت زیاد این پلیمر عامل دیگری است که نهایتاً منجر به انجام زمینه تحقیقاتی روی سایر گزینه‌های جایگزین مانند آمیخته‌ها شده است (یوسفی و همکاران، ۱۹۹۸).

از این‌رو، تحقیق روی پلیمرهای حاوی اجزای سازنده کوپلیمر SBS و آمیختن آن‌ها بر این اساس، امری منطقی به نظر می‌رسد. در این پژوهش، از آمیزه دو نوع پلیمر تولید داخل در راستای بهبود خواص قیر و دستیابی به خواصی مشابه پلیمر استایرن بوتادین استایرن استفاده گردیده است. پلی پروپیلن (پلاستومر) و استایرن بوتادین رابر (الاستومر) در نسبت وزنی ۵۰٪ آمیخته و در مقادیر ۳، ۴ و ۵ درصد وزن قیر به مخلوط اضافه شده و به‌منظور ارزیابی مقاومت آسفالت اصلاح‌شده در برابر خرابی رطوبتی، آزمایش‌های کشش غیرمستقیم (لاتمن اصلاح شده)، مارشال و مدول برجهدگی در دو حالت خشک و اشباع روی نمونه‌های آسفالتی و آزمایش شیارچرخ برای ارزیابی مقاومت در برابر شیارشدگی روی نمونه‌ها انجام گرفت. همچنین، نمونه‌های آسفالتی حاوی صفر، ۴ و ۵ درصد پلیمر استایرن بوتادین استایرن (الاستوپلاستومر) برای کنترل عملکرد مخلوط‌های حاوی آمیخته پلیمری نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند.

## ۲. مروری بر مطالعات پیشین

کوک و ییلماز (۲۰۰۹) از پلیمر SBS در کنار آهک برای افزایش مقاومت رطوبتی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار این پلیمر از ۲ به ۶ درصد نسبت به وزن قیر، مقدار مقاومت رطوبتی افزایش یافته و این روند در نمونه‌های حاوی ۲٪ آهک، بیشتر خود را نشان می‌دهد. لاستیک استایرن بوتادین رابر از رسته الاستومرها نیز قابلیت افزایش خواص الاستیک و انعطاف‌پذیری آسفالت را دارند. این لاستیک، ویسکوزیته قیر را افزایش می‌دهد و موجب افزایش مقاومت شیارشدگی می‌گردد و با خاصیت الاستیک و چسبندگی که در قیر ایجاد می‌کند مقاومت در برابر ترک‌های خستگی، حرارتی و خرابی رطوبتی را افزایش می‌دهد (لی و همکاران، ۲۰۱۷؛ عبدالموجود و تانون، ۲۰۱۵).

(مشخصات فیزیکی، ترکیبات و گرد و غبار سطحی) و قیر (ترکیب شیمیایی، سختی، منبع و روند پالایش) مرتبط‌اند. از دیگر عوامل خرابی رطوبتی می‌توان به عوامل طراحی و ساختمان مخلوط (میزان فضای خالی، ضخامت قیر، نفوذپذیری و زهکشی)، عوامل محیطی (دما، سن روسازی، سیکل ذوب و یخبندان، حضور یون-ها در آب)، شرایط ترافیک و نوع و خواص افزودنی‌های مورد استفاده اشاره نمود (دهناد و همکاران، ۲۰۱۳؛ میر و همکاران، ۲۰۱۶؛ استوارت، ۱۹۹۰).

با وجود اینکه قیر به مقدار کمی در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود، اما اثر مهمی بر عملکرد بهینه، دوام و پایداری مخلوط می‌گذارد. لذا، می‌توان با تغییر در خصوصیات قیر، آسفالت‌های بادوام‌تری تولید نمود (عامری و همکاران، ۲۰۱۱). استفاده از پلیمرها به‌عنوان اصلاح‌کننده خصوصیات قیر و نهایتاً مخلوط آسفالتی با بازخورد مثبتی همراه بوده است. عملکرد اساسی آن‌ها در مخلوط‌های آسفالتی تأثیر بر خواص فیزیکی، شیمیایی و رئولوژیک قیر است (نصیری و همکاران، ۲۰۱۷). استایرن بوتادین استایرن (SBS)، استایرن بوتادین رابر (SBR)، اتیلن ونیل استات (EVA)، پلی پروپیلن (PP) و رزین‌ها با وزن مولکولی زیاد از جمله رایج‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در تولید آسفالت پلیمری هستند. پلیمرها قابلیت افزایش مقاومت در برابر خستگی، شیارشدگی، ترک حرارتی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را فراهم می‌آورند (عبدالجواد، ۲۰۰۶). نحوه عملکرد افزودنی‌ها در قیر به پراکندگی خوب آن‌ها در قیر وابسته است. پلیمر SBS از دسته ترموپلاستیک الاستومرها بوده و قابلیت افزایش خواص الاستیک و ترموپلاستیک آسفالت را دارد، در این پلیمر، بلورهای پلی‌استایرن با پلی‌بوتادین به یکدیگر متصل شده‌اند (نصیری و همکاران، ۲۰۱۷؛ کوک و ییلماز، ۲۰۰۹). با این حال، سازگاری ضعیف بین این پلیمر با قیر و در نتیجه ناپایداری انبارداری قیر اصلاح شده با SBS، مانعی برای استفاده از آن در روسازی

<sup>1</sup> Styrene-butadiene-styrene

<sup>2</sup> Styrene butadiene rubber

<sup>3</sup> Ethylene-vinyl acetate

<sup>4</sup> Polypropylene

به کارگیری ۲٪ از Nanofil-15 نسبت به وزن قیر توانستند ترکیبات پلیمری پایداری در قیر ایجاد نمایند. عامری و همکاران (۱۳۹۴) برای بهبود پایداری آمیخته-های پلیمری در قیر از ۴٪ بنتونیت استفاده نمود که نتایج پایداری را مطلوب نشان داد.

### ۳. ضرورت و فرضیات پژوهش

افزایش روزافزون ترافیک محورهای مواصلاتی کشور و گستره متفاوت آب و هوای کشور، باعث شده تا قیرهای خالص تولیدی، بازدهی مناسب عملکردی را نداشته باشند. از این رو، اصلاح قیر و نهایتاً مخلوط‌های آسفالتی امری ضروری به نظر می‌رسد. اگرچه برخی از روش‌های اصلاحی نظیر به کارگیری پلیمر SBS در قیر با بازده عملی مناسبی همراه است، لیکن عدم صرفه اقتصادی آن در بسیاری از طرح‌های اجرایی منجر به استفاده محدود از آن شده است. از این رو، در این پژوهش، با فرض آنکه آمیخته دو پلیمر SBR و PP بتواند خواص بهتر یا حداقل مشابه در قیر و نهایتاً مخلوط آسفالتی را فراهم آورد، سعی شده است تا ترکیبی از این دو پلیمر مقرون به صرفه تولید داخل کشور در جهت جایگزینی با پلیمر گران‌قیمت و وارداتی SBS معرفی گردد.

### ۴. مصالح مصرفی

#### ۴-۱. مصالح سنگی

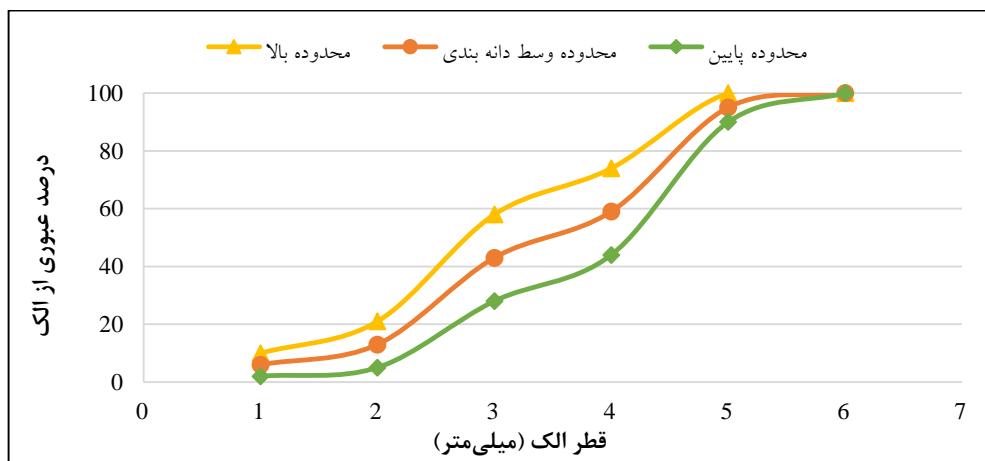
مصالح سنگی در آسفالت نقش سازه اصلی برای انتقال بار را ایفا کرده و سطحی را برای چسبیدن قیر ایجاد می‌کند (مجید زاده و براولد، ۱۹۶۸). از آنجا که مصالح سنگی آهکی نسبت به مصالح سنگی سیلیسی حساسیت کمتری نسبت به رطوبت دارند (عامری و همکاران، ۲۰۱۵)، در این پژوهش، از مصالح شکسته آهکی با مشخصاتی به شرح جدول ۱ و منطبق بر منحنی دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای آستر و رویه (شکل ۱) استفاده شد (نشریه شماره ۲۳۴). فیلر مصرفی نیز پودر سنگ‌آهک عبوری از الک ۲۰۰ می‌باشد.

برخی از پلیمرهای پلاستیکی همچون پلی‌پروپیلن، توانایی افزایش مقاومت رطوبتی را دارند. یول و همکاران (۲۰۱۷) با به کارگیری ۰/۱ درصد وزنی مخلوط پلی‌پروپیلن بازیافتی و غیربازیافتی در آسفالت نشان دادند که این ماده می‌تواند بین ۱۰ تا ۱۳ درصد حساسیت رطوبتی را نسبت به نمونه شاهد بهبود بخشد. آمیخته پلیمری، ترکیبی از حداقل دو پلیمر بوده و از مهم‌ترین دلایل آمیزه‌سازی پلیمری، دستیابی به ترکیب پلیمری با صرفه از طریق اختلاط با گونه‌های ارزان‌تر، نظیر پلیمرهای بازیافتی و تهیه مواد با خصوصیات بهتر می‌باشد (عامری و همکاران، ۱۳۹۴). ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) با افزودن آمیخته خرده لاستیک و استایرن بوتادین استایرن به قیر خالص دریافتند که ویسکوزیته قیر اصلاح شده و مقاومت شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی افزایش یافته است. شیائو و همکاران (۲۰۱۶) از آمیخته هموپلیمر اتیلن و استایرن بوتادین استایرن در آسفالت استفاده نمودند. آن‌ها پس از انجام آزمون کششی غیرمستقیم دریافتند که ترکیب ۱٪ از هموپلیمر اتیلن و ۲٪ استایرن بوتادین استایرن می‌تواند مقاومت رطوبتی را بیشتر از ۱۰٪، نسبت به نمونه ۳/۵ درصدی از استایرن بوتادین استایرن، افزایش دهد. نتایج آزمون شیارشدگی روی ترکیب آمیخته نیز افزایش ۵۰ درصدی این مقاومت را نشان می‌دهد. این ترکیب، علاوه بر افزایش مقاومت، موجب کاهش استفاده از پلیمر گران‌تر می‌گردد.

به کارگیری ترکیبات سازگار با اجزای سازنده قیر و یا استفاده از نانومواد، راه‌حلی برای غلبه بر معضل پایداری پلیمرها در قیر است. عامری و همکاران (۲۰۱۶) به وسیله نانورس Cloisite 15 A، علاوه بر بهبود سه برابری پایداری پلیمر SBS در قیر، سایر خواص عملکردی مخلوط آسفالتی را نیز بهبود بخشیدند. میزان به کارگیری این ماده در تحقیقات ایشان ۲٪ وزنی قیر بوده است. در تحقیق دیگری، نتایج مورفولوژی نشان داده است که پلی‌اتیلن در کنار نانورس، قیر یکنواخت‌تری ایجاد نموده است (فانگ و همکاران، ۲۰۱۳). چاوشیان نائینی و عامری (۱۳۹۶) با

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد آزمایش	واحد	حدود مجاز طبق		نتایج آزمایش	شرح آزمایش
		نشریه ۲۳۴ رویه	آستر		
AASHTO T96	درصد	۳۰	۴۰	۲۲/۳	حداکثر سایش به روش لس آنجلس
BS 812	درصد	۲۵	۳۰	۱۶	حداکثر ضریب تورق
ASTM D5821	درصد	۹۰	۸۰	۹۳	حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴
AASHTO T85	درصد	۲/۵	۲/۵	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
AASHTO T84	درصد	۲/۵	۲/۸	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
ASTM C127	گرم بر سانتی‌متر مکعب	-	-	۲/۵۹	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت‌دانه
ASTM C128	گرم بر سانتی‌متر مکعب	-	-	۲/۳۲	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریزدانه



شکل ۱. نمودار حدود بالا، پایین و وسط دانه‌بندی شماره ۴

#### ۴-۲. قیر

در تمامی نمونه‌های این تحقیق، از قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ (PG 64-16) استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

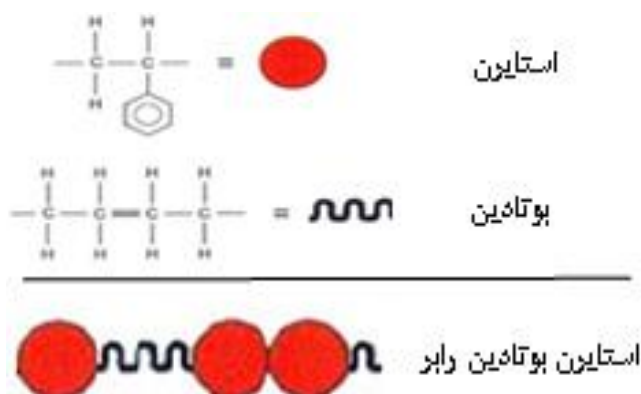
جدول ۲. خصوصیات فیزیکی قیر خالص مورد استفاده

روش آزمایش	مقدار	خصوصیات
ASTM D-70	۱/۰۳	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D-5	۶۴	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D-36	۵۴	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
ASTM D-113	۱۰۲	انگمی در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D-92	۳۰۵	نقطه اشتعال
ASTM D-70	۳۱۷	نقطه احتراق

### ۳-۴. افزودنی‌های پلیمری

هدف این پژوهش، یافتن ترکیبی از آمیزه پلیمری الاستومر (استایرن بوتادین رابر) و پلاستومر (پلی پروپیلن) با خصوصیات مشابه الاستوپلاستومر (استایرن بوتادین استایرن) می‌باشد. مونومر استایرن با قیر ناسازگار بوده و موجب اشکالاتی در پخش و ناپایداری انبارداری در دمای زیاد می‌گردد. لذا، مقدار این ماده در پلیمرها باید کنترل شده باشد. پلیمر SBR از کوپلیمریزاسیون استایرن و بوتادین تولید می‌شود. مونومر نرم بوتادین در الاستیسیته شرکت می‌کند و قیر را منعطف‌تر می‌کند. در حالی که مونومر سخت

استایرن، سختی و مقاومت برای قیر به همراه می‌آورد و نقطه نرمی را افزایش می‌دهد. وجود مونومر استایرن در SBR باعث بهبود سازگاری این پلیمر با پلاستومرها، افزایش برهمکنش بین دو فاز و قابلیت اختلاط آن‌ها می‌شود (رابینسون، ۲۰۰۵؛ رسمن، ۲۰۰۷). استایرن بوتادین رابر مصرفی از نوع SBR1502 تولیدی پتروشیمی تخت جمشید بوده که قابلیت پخش‌شدگی بالایی در کنار انحلال خوب در قیر دارد. در شکل ۲ ساختار کلی استایرن بوتادین رابر و در جدول ۳ مشخصات آن قابل مشاهده است.

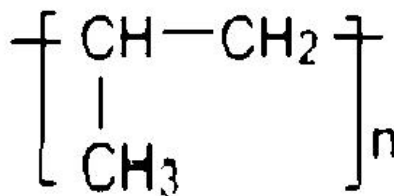


شکل ۲. تصویر ظاهری و ساختار مولکولی پلیمر SBR 1502

پلی پروپیلن نیز از جمله پلیمرهای پلاستومری است که با ایجاد خاصیت صلبیت آسفالت، مقاومت در برابر ایجاد تغییرشکل در اثر بار را افزایش می‌دهد. پلاستومر مصرفی، پلیمر پلی پروپیلن از نوع PP 552R شرکت پلی پروپیلن جم بوده که مشخصات کلی و ساختار مولکولی آن به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۳. مشخصات SBR مصرفی (SBR 1502)

مقدار	خصوصیات
۲۲/۲۴-۵/۵	مقدار استایرن (درصد وزنی)
۴/۷-۷۵/۵	ارگانیک اسید (درصد وزنی)
۲۴/۵	استحکام کششی (مگا پاسکال)
۳۵۰	ازدیاد طول تا پارگی (درصد)
-۳۰	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سلسیوس)
۰/۹۸	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)

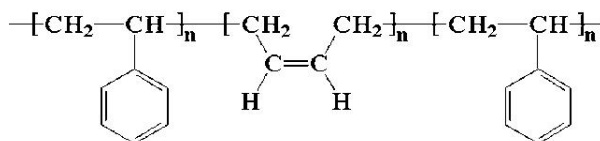


شکل ۳. تصویر ظاهری و ساختار مولکولی پلیمر PP 552R

کوپلیمر استایرن بوتادین استایرن ضمن بهبود خواص دمای پایین قیر تا دمای ۳۸ درجه سلسیوس و دمای زیاد تا حدود ۱۳۰ درجه سلسیوس، مشکلات فرایندی حین اختلاط کمتری نسب به لاستیک‌ها دارد. در این کوپلیمر سه‌بلوکه، بلوک‌های استایرن به‌وسیله یک بلوک بوتادین از یکدیگر جدا شده‌اند و در قیر توانایی ایجاد یک شبکه الاستیک سه‌بعدی از فاز پلی-استایرن را تشکیل می‌دهد که به‌وسیله فاز پلی‌بوتادین به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۴). مشخصات SBS 501 تولیدی کارخانه LG کره و مورد استفاده در این تحقیق، در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۴. مشخصات PP مصرفی (PP 552R)

مقدار	خصوصیات
۱۵۲	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
۳۲	استحکام کششی (مگاپاسکال)
۱۳	ازدیاد طول تا پارگی (درصد)
-۱۷	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سلسیوس)
۰/۹	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)



شکل ۴. تصویر ظاهری و ساختار مولکولی پلیمر SBS

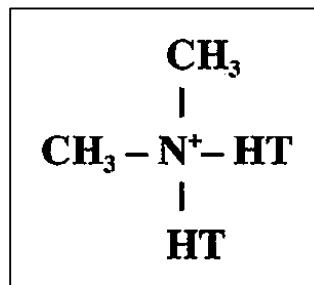
از آنجا که بحث پایداری پلیمر در قیر یکی از مهمترین مشکلات کاربرد آنها در آسفالت می‌باشد، در این تحقیق، به منظور افزایش قابلیت ذخیره‌سازی پلیمر در قیرهای اصلاح شده از ۱/۵ درصد وزن قیر، نانورس مونت موریلونیت Cloisite 15A استفاده شده است. ساختار مولکولی و مشخصات این نانوماده به ترتیب در شکل ۵ و جدول ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۵. مشخصات SBS مصرفی (SBS 501)

مقدار	خصوصیات
۳۱	مقدار استایرن (درصد وزنی)
خطی	ساختار مولکولی
۲۸۸	نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)
۷۹	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)
۱۳/۴	ویسکوزیته در ۲۰۰ درجه سلسیوس (سانتی پوز)
۰/۹۴	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)



شکل ۶. تصویر ظاهری آمیخته پلیمری SBR\PP



شکل ۵. ساختار مولکولی نانورس CA

جدول ۶. مشخصات CA مصرفی (Cloisite 15A)

مقدار	خصوصیات
2M2HT	اصلاح کننده آلی
۱۲۵	مقدار اصلاح کننده در ۱۰۰ گرم رس (میلی-گرم)
کمتر از ۲	میزان رطوبت (درصد)
۴۳	کاهش رطوبت در اثر حرارت (درصد)
۱/۶۶	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)

## ۵. روش تحقیق

### ۵-۱. ساخت قیر پلیمری

برای ساخت آمیخته پلیمری، ابتدا PP و SBR در نسبت‌های وزنی ۵۰٪ به صورت دستی مخلوط می‌گردند و سپس تحت فرایند اکستروژن به وسیله دستگاه Twin-Screw extruder مدل ZSK-25 قرار گرفته (۸۰ دور بر دقیقه و دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس) که خروجی آن گرانول‌های آمیخته پلیمری می‌باشد (شکل ۶). سپس قیرهای پلیمری حاوی ۳، ۴ و ۵ درصد گرانول و ۴ و ۵ درصد پلیمر SBS نسبت به وزن قیر تهیه گردیدند. فرایند اختلاط آمیخته پلیمری با قیر نیز در مدت ۶۰ دقیقه و در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس با سرعت برشی ۶۰۰۰ دور در دقیقه در دستگاه همزن دور بالا<sup>۱</sup> انجام شد. به منظور افزایش پایداری پلیمر در قیر، در ۳۰ دقیقه پایانی مدت زمان اختلاط، نانورس به میزان ۱/۵ درصد وزن قیر به ترکیب افزوده شد. در مجموع، با در نظرگیری قیر خالص، شش نوع قیر خواهیم داشت.

<sup>۱</sup> High shear mixer

### ۵-۲. طرح اختلاط

طرح اختلاط نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D1599 صورت پذیرفته است. به منظور تعیین قیر بهینه، سنگ‌دانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۷۰-۱۶۰ درجه سلسیوس در گرم‌خانه حرارت می‌بینند تا کاملاً خشک شوند. قیر نیز تا دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس گرم شده و سپس سنگ‌دانه‌ها با هر نوع از قیر در درصدهای ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ نسبت به وزن مخلوط، ترکیب شده و در داخل استوانه استاندارد مارشال با ۷۵ ضربه چکش مارشال (شبیه‌سازی ترافیک سنگین) در هر طرف کوبیده می‌شود. مقدار قیر بهینه برای نمونه‌های فاقد افزودنی، حاوی آمیخته پلیمری و نمونه حاوی SBS به ترتیب ۴/۸، ۵/۵ و ۵/۳ به دست آمده است.

به منظور ساخت نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام آزمایش‌ها، از دستگاه ژیراتوری روسازی ممتاز، که تراکم در آن بر مبنای ترافیک سنگین (۹۰ دوران با کنترل درصد فضای خالی) است، استفاده گردید. مقاومت در برابر رطوبت برای نمونه‌های متراکم نشده با آزمایش جوشان تگزاس و برای نمونه‌های متراکم شده با آزمایش‌های مارشال، کشش غیرمستقیم (لاتمن اصلاح شده) و مدول برجهندگی و مقاومت در برابر شیارشدگی با آزمایش شیار چرخ انجام پذیرفت.

### ۵-۳. آزمایش جوشان تگزاس

آزمایش جوشان تگزاس روی نمونه‌های متراکم نشده مخلوط آسفالتی صورت می‌پذیرد و یک ارزیابی اولیه از مقاومت مخلوط در برابر رطوبت را ارائه می‌دهد. روش

انجام این آزمایش به‌وسیله کندی و همکاران (۱۹۸۴) توسعه داده شد و در حال حاضر بر اساس استاندارد ASTM D3625، با استفاده از آب جوشان، اثر آب بر مصالح پوشانده شده با قیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این صورت که حدود ۲۵۰ گرم مخلوط آسفالتی متراکم نشده به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش قرار داده شده و سپس قیر جدا شده از سنگ‌دانه را از سطح آن برداشته و مخلوط در دمای محیط سرد می‌شود. معیار ارزیابی آسیب رطوبتی، میزان کاهش درصد مناطق پوشش داده شده توسط قیر روی سنگ‌دانه، به دلیل قرار گرفتن در شرایط آب جوشان است (ASTM D3625).

#### ۴-۵. آزمایش مقاومت مارشال

روانی و استحکام دو پارامتری هستند که می‌توان از آن‌ها به منظور قضاوت در مقاومت شیارشدگی و حساسیت رطوبتی استفاده نمود. نسبت مقاومت مارشال (مقاومت مارشال در حالت تر به حالت خشک)، شاخصی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی می‌باشد. از هر نوع قیر، سه نمونه در حالت تر و سه نمونه در حالت خشک مورد آزمایش قرار گرفتند. در حالت خشک و تر، نمونه‌ها 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 می‌گیرند. حاصل تقسیم مقاومت مارشال حالت تر به خشک برابر نسبت مقاومت مارشال می‌باشد. جهت حصول نتیجه مطلوب در شرایط عملی، مقدار این نسبت باید بیشتر از ۸۰٪ باشد (اکسوی، ۲۰۰۵).

#### ۵-۵. آزمایش حساسیت رطوبتی (آزمایش

کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده،

(AASHTO T283)

در این آزمایش، نمونه‌های استوانه‌ای متراکم شده با درصد هوای ۶ تا ۸ درصد تحت بار فشاری توسط دو تیغه موازی دستگاه کشش غیرمستقیم قرار گرفته و با بارگذاری ثابت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه نمونه‌ها تحت تنش کششی یکنواخت قرار می‌گیرند. برای هر یک از

انواع قیر، سه نمونه در حالت تر و سه نمونه در حالت خشک مورد آزمایش قرار می‌گیرند. نمونه‌های حالت تر برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد، توسط پمپ خلأ تحت فشار ۳۵ کیلوپاسکال قرار گرفته و سپس درون پلاستیک حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب، گذاشته شده و در فریزر با دمای ۱۸- درجه سلسیوس منجمد می‌شوند. پس از ۱۶ ساعت انجماد، به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب ۶۰ درجه سلسیوس نگهداری می‌شوند. در مرحله آخر، دمای حمام را به ۲۵ درجه کاهش داده و به مدت ۲ ساعت در این دما باقی می‌مانند و نهایتاً نمونه‌ها آماده بارگذاری در شرایط اشباع هستند. برای عمل‌آوری نمونه‌های حالت خشک نیز استوانه‌های آسفالتی در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس بارگذاری می‌شوند. مقاومت کششی غیرمستقیم از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (AASHTO T283، ۲۰۰۰؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۵).

$$ITS = \frac{2P}{\pi.D.t} \quad (1)$$

که ITS<sup>۱</sup> مقاومت کششی (کیلوپاسکال)، P بیشینه بار (کیلو نیوتن)، D قطر نمونه (متر) و t ضخامت نمونه (متر) است.

مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت از رابطه (۲) به دست می‌آید. مقدار ITS در این رابطه، مقدار میانگین آن برای نمونه‌های تحت شرایط اشباع و خشک است. حداقل مقدار<sup>۲</sup> TSR، ۸۰٪ جهت مقاومت نمونه در برابر رطوبت می‌باشد (AASHTO T283، ۲۰۰۰).

$$TSR = \frac{ITS_{sat}}{ITS_{dry}} \quad (2)$$

#### ۶-۵. آزمایش مدول برجهندگی

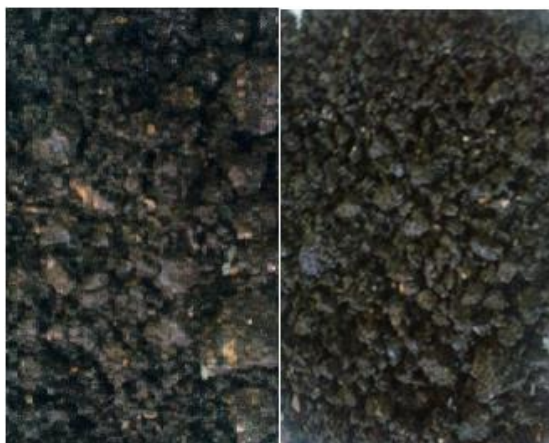
آزمایش مدول برجهندگی بارگذاری با مقدار کم و به‌صورت غیرمستقیم می‌باشد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D 4123-82 انجام شد. بدین ترتیب که نمونه‌های عمل‌آوری شده، همانند شرایط عمل‌آوری نمونه‌های کشش غیرمستقیم، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تحت بارگذاری نیمه سینوسی ۴۰۰

<sup>1</sup> Indirect tensile strength

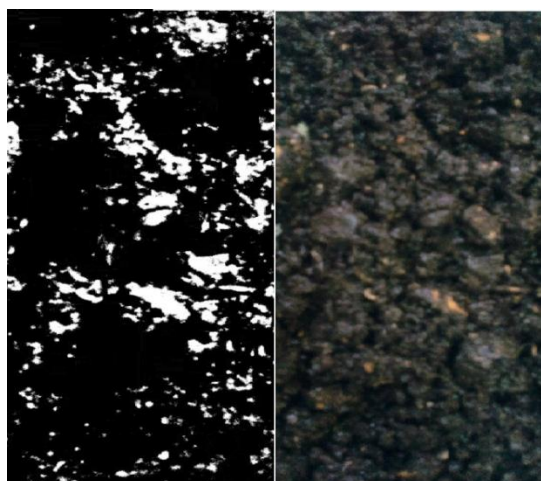
<sup>2</sup> Tensile strength ratio



و پیکسل‌های سفیدرنگ، نواحی عریان شدگی مصالح سنگی را نشان می‌دهند. با شمارش تعداد این پیکسل‌ها توسط نرم‌افزار، نسبت مساحت سطح عریان شده به مساحت کل شکل یافت خواهد شد که نتایج حاصل از این اقدام در شکل ۹ نشان داده شده است. سطح سنگ‌دانه‌های نمونه شاهد به شدت دچار عریان شدگی بوده و بیشترین میزان سطح عریان شده را به خود اختصاص داده است. با افزایش میزان آمیخته، مقدار سطوح قیری ازدست‌رفته روند کاهشی به خود می‌گیرد. به طوری که در میزان ۵٪ از آن، نمونه مشابه SBS5 عمل می‌کند.



شکل ۷. نمونه قبل (سمت راست) و بعد (سمت چپ) از آزمایش جوشان تگزاس



شکل ۸. تصویر نمونه پردازش شده

کیلونیوتن با دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه (۰/۹ ثانیه استراحت) قرار گرفتند (ASTM D 4123-82).

## ۷-۵. آزمایش شیار چرخ

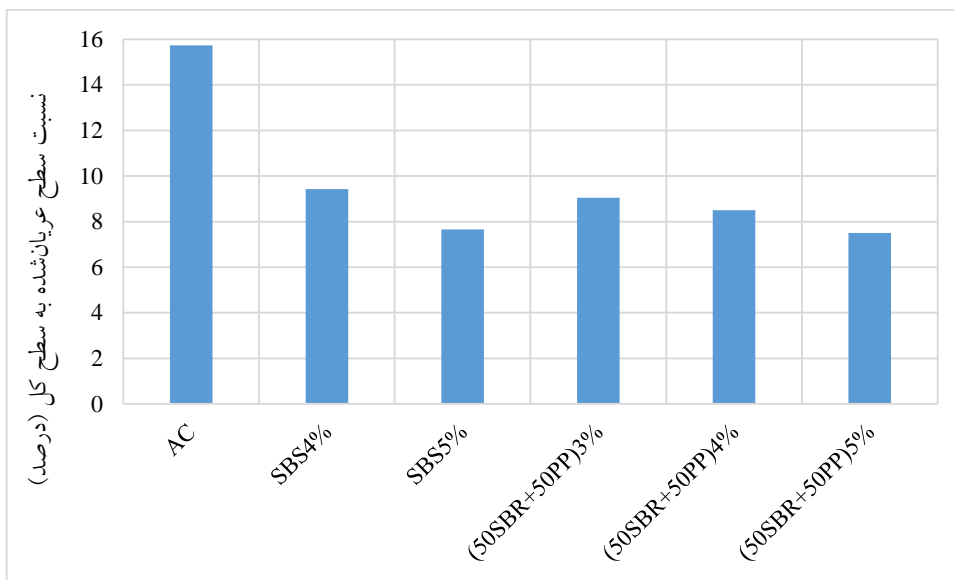
یکی از روش‌های اندازه‌گیری ویژگی تغییرشکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش شیار جای چرخ می‌باشد. از آنجا که از مقادیر تغییرمکان تجمعی در آزمایش خزش به دلیل قرار نداشتن نمونه مخلوط آسفالتی در شرایط طبیعی (نداشتن مهار جانبی) که در واقعیت از آن برخوردار است، نمی‌توان عمق شیار را نتیجه گرفت و تغییرمکان بیشتری در مقابل اعمال بار از خود نشان می‌دهد. بنابراین، برای اندازه‌گیری عمق شیار، از آزمایش شیار جای چرخ استفاده شده است (گاریا، ۲۰۰۲).

نمونه‌های استوانه‌ای در دستگاه قرار گرفته و توسط چرخ‌هایی با بار حدود ۷۰۵ نیوتن مورد بارگذاری قرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد. در مجموع، نمونه‌ها تحت ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از آن عمق شیار به وجود آمده در هر نمونه اندازه‌گیری شد. میانگین سه نمونه به‌عنوان عمق شیار هر نوع مخلوط به دست آمد.

## ۶. نتایج و تفسیر داده‌ها

### ۶-۱. آزمایش جوشان تگزاس

شکل ۷، تصویر یکی از نمونه‌های آسفالتی (نمونه حاوی ۳٪ آمیخته پلیمری)، قبل و بعد از قرارگیری در آب جوش را نشان می‌دهد. نواحی مشخص شده، قسمت‌های عریان شده مخلوط (مصالح سنگی بدون پوشش قیر) می‌باشند. معمولاً افزودن پلیمر به مخلوط موجب افزایش ویسکوزیته و بهبود قدرت چسبندگی قیر شده و نمونه‌های پلیمری توانسته‌اند مقاومت خوبی در برابر رطوبت ایجاد نمایند. به‌منظور بهره‌گیری مناسب از نتایج این آزمایش، عملیات پردازش تصویر با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام پذیرفت که نمونه‌ای از این پردازش تصویر در شکل ۸ قابل مشاهده است. پیکسل‌های مشکی‌رنگ، نواحی پوشش داده شده از قیر

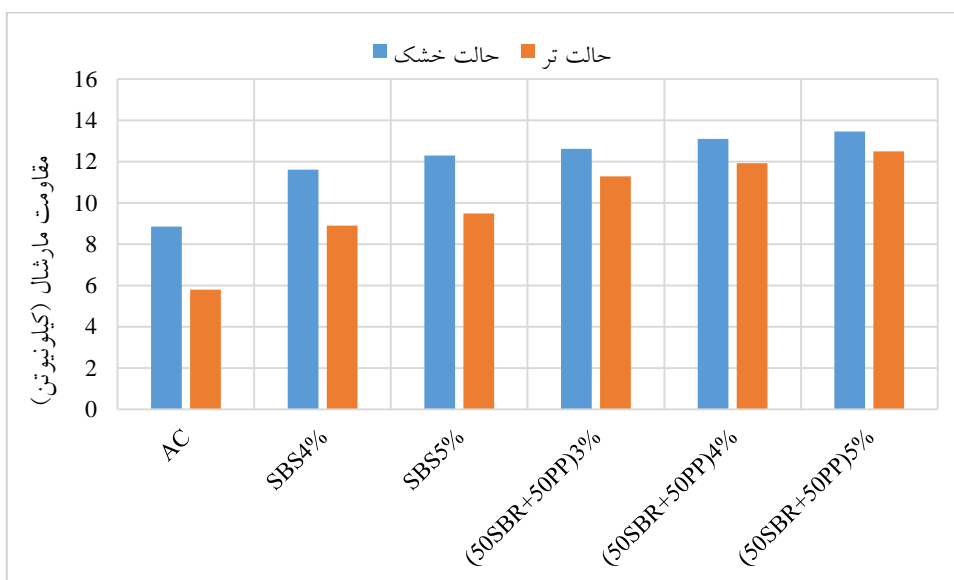


شکل ۹. نتایج حاصل از پردازش تصویر

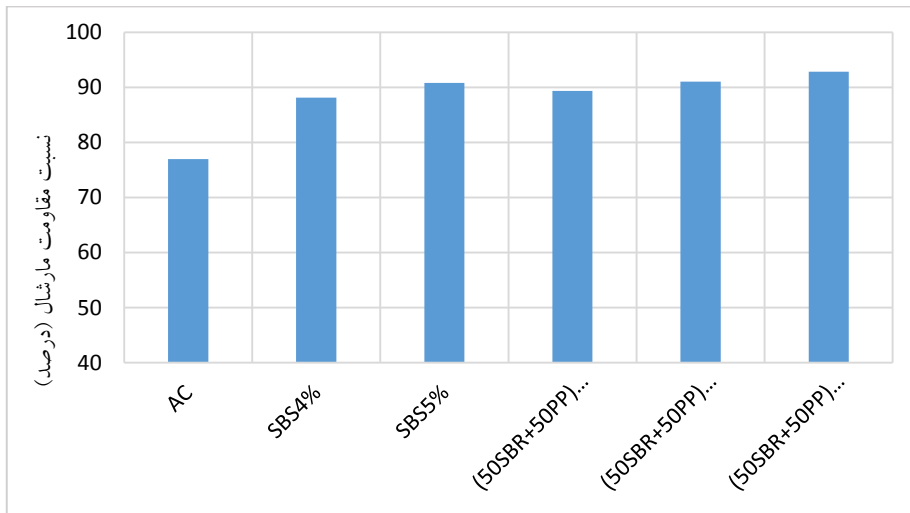
نمونه شاهد بیشتر از حد ۸۰٪ است و با افزایش میزان SBS از ۴ به ۵ درصد، مقاومت رطوبتی نیز افزایش یافته است و این روند افزایشی را در نمونه‌های حاوی آمیخته پلیمری نیز می‌توان یافت. به طوری که این نمونه‌ها دارای مقاومت بیشتر نسبت به سایر نمونه‌ها هستند و آمیخته پلیمری ۵٪ مقدار مقاومت رطوبتی بیشتری از سایر نمونه‌ها دارد.

#### ۲-۶. مقاومت مارشال

در شکل ۱۰، میانگین مقاومت مارشال نمونه‌ها در حالت خشک و تر قابل مشاهده است. پلیمرها با بهبود خواص چسبندگی قیر موجب افزایش مقاومت مارشال شده‌اند. نسبت این مقاومت در دو حالت مذکور، بیانگر میزان مقاومت رطوبتی است، که برای نتایج حاصل از این پژوهش در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. نسبت مقاومت مارشال در تمامی نمونه‌ها به‌استثنای



شکل ۱۰. استقامت مارشال

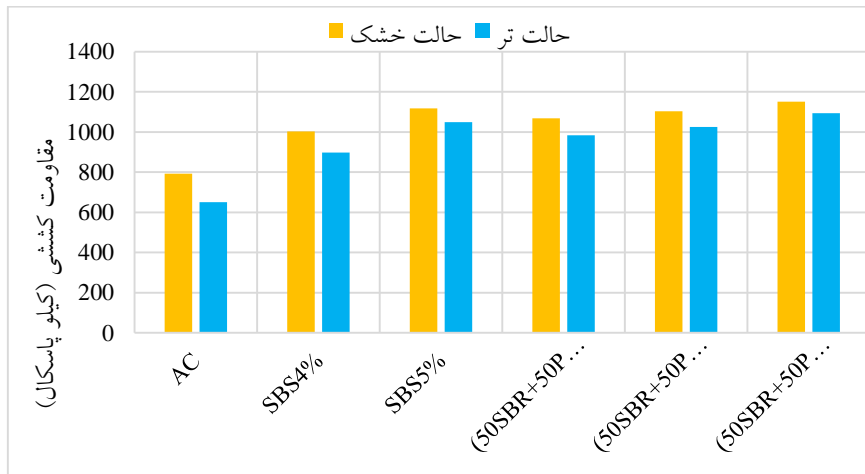


شکل ۱۱. نسبت مقاومت مارشال

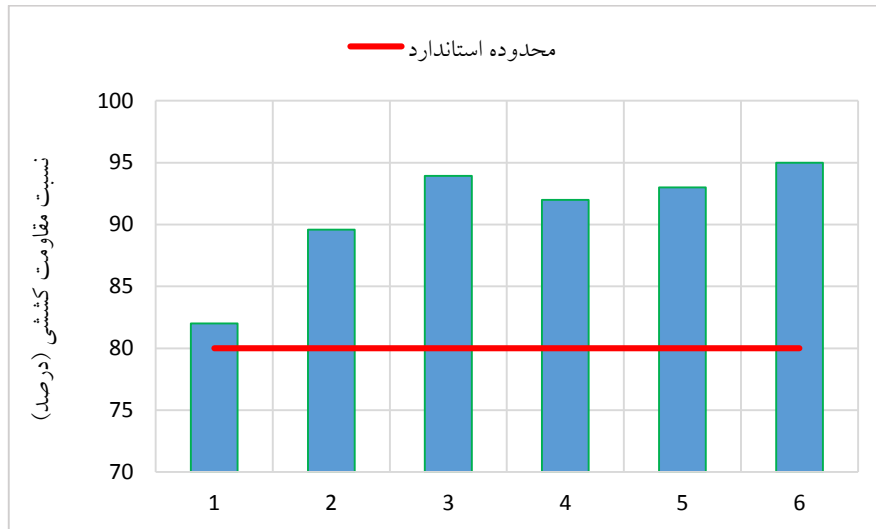
آسفالت می‌باشد. مقادیر این نسبت برای نمونه‌های مورد مطالعه در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. در تمامی نمونه‌ها، این نسبت از مقدار حداقلی ۸۰٪ بیشتر است. در بین نمونه‌ها، مخلوط آسفالتی حاوی ۵٪ آمیخته پلیمری و سپس نمونه حاوی ۵٪ SBS دارای بیشترین مقادیر این مقامت می‌باشند و در برابر رطوبت بهترین عملکرد را نشان می‌دهند. پلیمر الاستومری استایرن بوتادین رابر در کنار پلاستومر پلی‌پروپیلن توانسته‌اند به‌صورت مکمل عمل کرده و پلیمری با خواص بهتر از SBS الاستوپلاستومری ایجاد نماید و مقداری بیشتر، مقاومت رطوبتی را افزایش دهد. دو آمیخته ۳ و ۴ درصد نیز همانند SBS4 عمل کرده‌اند.

### ۳-۶. آزمایش کشش غیرمستقیم (لانمن اصلاح شده)

نتایج آزمون کشش غیرمستقیم در شکل ۱۲ 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 می‌باشد. این امر می‌تواند به دلیل افزایش لزجت قیر در اثر افزودن پلیمر به آن باشد. این افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی ۵٪ SBS بیشتر از سایر نمونه‌ها بوده و برای نمونه‌های حاوی آمیخته، مقادیر این مقاومت با میزان ۴٪ SBS تقریباً یکسان است. نسبت این مقاومت در دو حالت خشک و اشباع نشان دهنده میزان حساسیت نمونه‌ها به



شکل ۱۲. مقاومت کششی غیرمستقیم



شکل ۱۳. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم

با نمونه شاهد دارای یک تفاوت معنی‌دار است. این امر نشان از تأثیر قابل توجه پلیمر SBS و آمیخته‌های پلیمری در قیر خالص است. عدم تفاوت معنی‌دار مابین دو گروه افزودنی پلیمر SBS و آمیخته‌های پلیمری نشان‌دهنده عملکرد نزدیک دو گروه افزودنی در بهبود خواص رطوبتی مخلوط‌ها می‌باشد.

نتایج آزمون‌های آماری یک طرفه و دو به دو به ترتیب در جداول ۷ و ۸ نشان داده شده است. نتایج تحلیل یک طرفه نشان می‌دهد که نوع پلیمرها تأثیر بیشتری نسبت به پارامترهای آزمایشگاهی بر رفتار مخلوط داشته است و این امر بیانگر قابل استناد بودن داده‌های حاصل از آزمایش می‌باشد. تحلیل دو به دو نشان داد که تمامی نمونه‌های دارای افزودنی در مقایسه

جدول ۷. نتایج تحلیل یک طرفه ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	41.75	10	4.175	2.719	0.000
Within Groups	10.75	7	1.536		
Total	52.50	17			

جدول ۸. نتایج تحلیل دو به دو Tukey

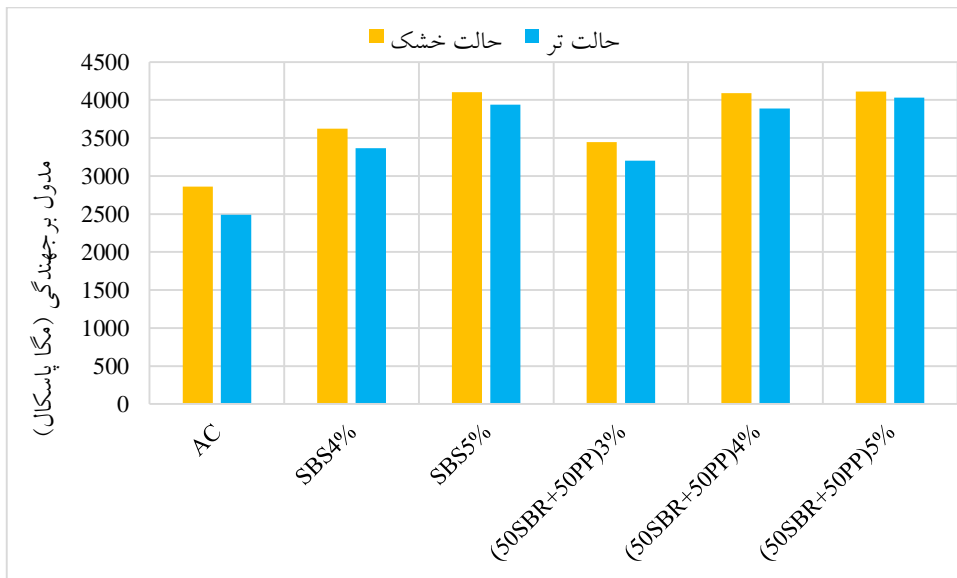
	AC	SBS4%	SBS5%	(50SBR+50PP)3%	(50SBR+50PP)4%	(50SBR+50PP)5%
AC	-	S	S	S	S	S
SBS4%		-	N	N	N	S
SBS5%			-	N	N	N
(50SBR+50PP)3%				-	N	N
(50SBR+50PP)4%					-	N
(50SBR+50PP)5%						-

#### ۶-۴. مدول برجهندگی

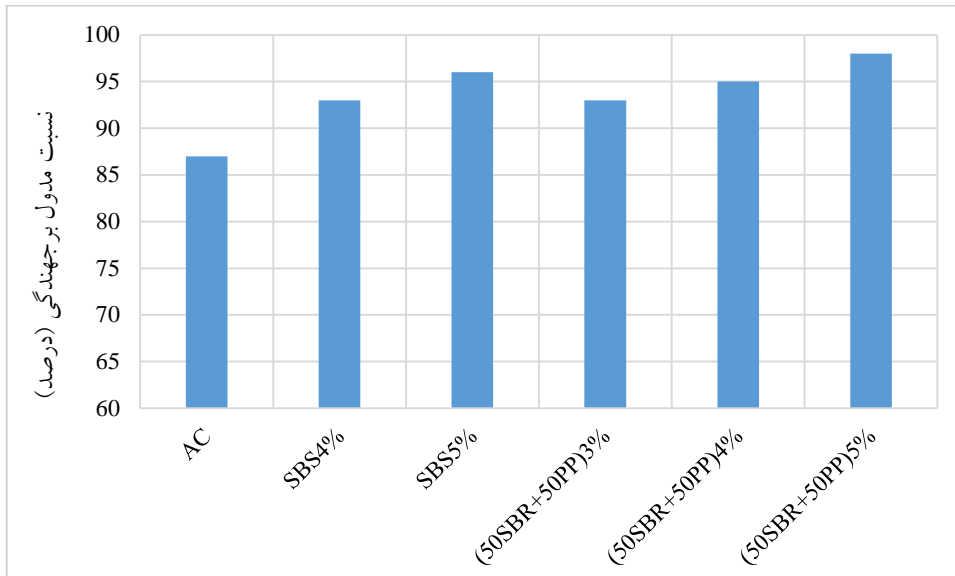
به منظور اطمینان خاطر بیشتر از عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوطها، آزمایش مدول برجهندگی نیز در دو حالت خشک و اشباع روی نمونه‌های آسفالتی انجام گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۱۴ نشان داده شده است. هرچند در طراحی ضخامت رویه آسفالتی از این پارامتر استفاده می‌شود، لیکن در این پژوهش نسبت مقادیر مدول مذکور در دو حالت خشک و اشباع به منظور ارزیابی مقاومت رطوبتی مخلوطها استفاده شده و این مقادیر در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با افزایش پلیمر یا آمیخته پلیمری، عملکرد نمونه‌ها در برابر حساسیت رطوبتی بهبود یافته است. نمونه حاوی ۵٪ آمیخته پلیمری با اختلاف کمی از نمونه حاوی ۵٪ SBS، بیشترین مقاومت رطوبتی را نشان می‌دهد.

#### ۶-۵. آزمایش شیار چرخ

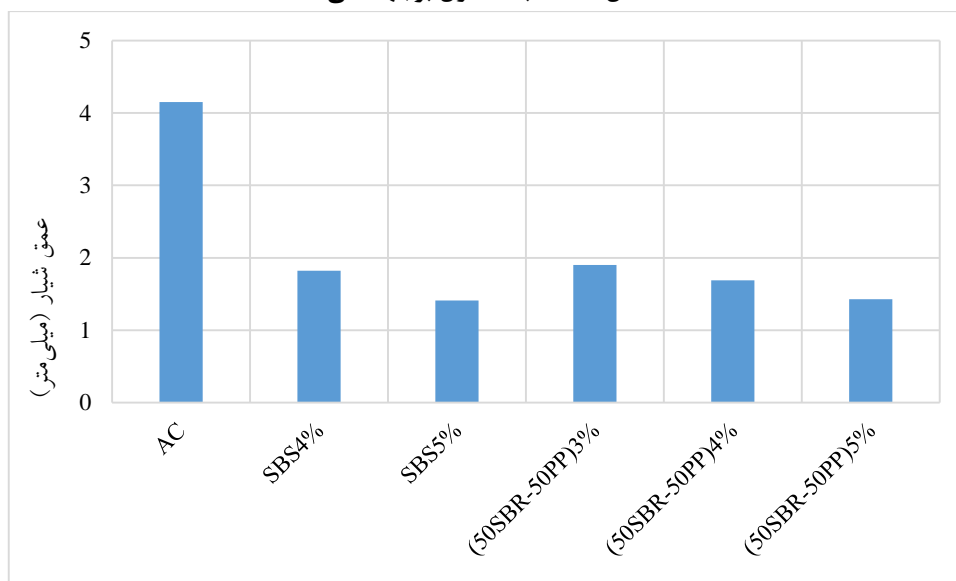
آزمایش شیار چرخ در زمره آزمایش‌های شبیه‌سازی با بارگذاری متناوب قرار دارد و همچنین در این آزمایش می‌توان روند تغییر شکل را در اثر تکرار بار تحت شرایط اعمال شده مشاهده کرد. برای انجام آزمایش و به منظور یکسان شدن دما در کل نمونه مخلوط آسفالتی، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس آزمایش روی آنها انجام گرفت و نتایج این آزمون در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانگونه که از نتایج مشاهده می‌شود، نمونه‌های اصلاح شده به مراتب سخت‌تر و تغییر شکل-های دائم در آنها بسیار کمتر از نمونه شاهد (اصلاح نشده) است. به‌صورتی که در بهترین حالت که در نمونه‌های حاوی ۵٪ آمیخته پلیمری و SBS اتفاق می‌افتد، عمق شیار نسبت به نمونه شاهد به میزان حدود ۶۰٪ کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۴. مدول برجهندگی



شکل ۱۵. نسبت مدول بر جهندگی



شکل ۱۶. عمق شیار

این مخلوط با نمونه شاهد و حاوی SBS و همچنین مقاومت در برابر تغییر شکل این نمونه‌ها مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج حاصل از این پژوهش به شرح بندهای زیر می‌باشد:

- ارزیابی اولیه حساسیت رطوبتی روی نمونه‌های متراکم نشده، حاکی از بهبود مقاومت رطوبتی نمونه‌های دارای افزودنی است. به طوری که مقاومت رطوبتی نمونه‌های حاوی آمیخته پلیمری و پلیمر استایرن بوتادین استایرن در میزان ۵٪ از سایر نمونه‌ها بهتر است و هر دو نمونه

## ۷. نتیجه‌گیری

آمیخته پلیمری راه‌حل مناسبی برای جایگزینی با پلیمرهای معروف و گران‌قیمتی همچون استایرن بوتادین استایرن می‌باشد. در این تحقیق، به منظور دستیابی به خواص مقاومت در برابر رطوبت آسفالت حاوی پلیمر وارداتی و گران‌قیمت SBS، از ترکیب دو پلیمر ارزان‌قیمت تولید داخل کشور ایران در آسفالت استفاده شده است. در این راستا، آمیخته پلیمر الاستومری استایرن بوتادین رابر با پلاستومر پلی‌پروپیلن در آسفالت به کار برده شده و میزان حساسیت رطوبتی

- در حالت کلی، مخلوط آسفالتی ۵٪ از آمیخته پلیمری و سپس نمونه حاوی ۵٪ SBS بهترین نتایج را به همراه داشته و این دو ماده به مقدار تقریباً ۲۰٪ نسبت به نمونه شاهد، مقاومت رطوبتی آسفالت را بهبود بخشیده‌اند.

- یا توجه به نتایج حاصل از شیار چرخ، مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل با حضور انواع پلیمرها افزایش می‌یابد و در نمونه حاوی ۵٪ آمیخته پلیمری و ۵٪ SBS کمترین تغییرشکل ایجاد می‌گردد.

- وجود مونومر استایرن در پلیمر استایرن بوتادین رابر باعث بهبود برهمکنش با پلیمرهای پلاستومر همچون پلی‌پروپیلن می‌شود. از طرفی، مونومر بوتادین نیز با جزء مالتن قیر سازگاری مناسبی را نشان می‌دهد.

- پلیمرهای پلاستومر پلی‌پروپیلن و الاستومر استایرن بوتادین رابر می‌توانند به صورت مکمل یکدیگر عمل کرده و همچون پلیمر الاستوپلاستومر استایرن بوتادین رابر به طور برابری حساسیت رطوبتی را بهبود بخشند. لذا، این آمیخته تولید شده از پلیمرهای ارزان قیمت می‌تواند جایگزین مناسبی برای پلیمر استایرن بوتادین استایرن معروف، وارداتی و گران قیمت باشد.

پلیمری توانسته‌اند مقدار عریان‌شدگی را به میزان حدوداً ۵۰٪ کاهش دهند.

- مقاومت مارشال در دو حالت خشک و تر برای نمونه‌های پلیمری، به خصوص در نمونه‌های حاوی آمیخته، افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. در نسبت مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی آمیخته پلیمری و پلیمر SBS نیز عملکرد تقریباً یکسانی در برابر رطوبت مشاهده می‌شود.

- تمام نمونه‌های حاوی آمیخته پلیمری مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتری نسبت به نمونه شاهد و ۴٪ SBS نشان می‌دهند و بیشترین میزان این مقاومت کششی در نمونه حاوی ۵٪ آمیخته پلیمری مشاهده می‌گردد. در نسبت مقاومت کششی (TSR)، آمیخته پلیمری ۵٪ به میزان ۲٪ از نمونه حاوی ۵٪ SBS و ۱۳٪ از نمونه شاهد دارای مقاومت رطوبتی بیشتری است.

- نسبت مدول برجهندگی نمونه حاوی ۵٪ آمیخته، بهترین مقاومت رطوبتی را نشان داد. این در حالی بود که مقدار مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی آمیخته پلیمری و پلیمر SBS تقریباً یکسان بود.

## ۸. مراجع

- چاوشیان نائینی، س. ف. و عامری، م. ۱۳۹۶. "بررسی و مقایسه اثر آمیخته SBR\PS و SBS بر خستگی مخلوط‌های آسفالتی. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۹ (ویژه‌نامه روسازی): ۱۱۹-۱۰۵.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۰. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، تهران.
- عامری، م.، وامق، م.، روح‌الامینی، ح. و بمانا، ک. ۱۳۹۴a. "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانورس". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۶(۴): ۶۲۶-۶۱۳.
- عامری، م.، یوسفی، ع. ا. و شکرگذار، م. ۱۳۹۴. "اثر آمیخته پلیمری بر رفتار قیر". هفتمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران.
- میر، ع.، امینیان، پ. و آقایان، ا. ۱۳۹۵. "تعیین پتانسیل مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی افزودنی پلیمری و معدنی در برابر خرابی رطوبتی". مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۱): ۱۰۶-۹۱.
- AASHTO T283-99. 2000. "Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA.
- 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., Mansourian, A., Ashani, S. S. and Yadollahi, G. 2011. "Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction". *Constr. Build. Mater.*, 25(3): 1379-1387.
- Ameri, M., Vamegh, M., Imaninasab, R. and Rooholamini, H. 2016. "Effect of nanoclay on performance of neat and SBS-modified bitumen and HMA". *Petrol. Sci. Technol.*, 34(11-12): 1091-1097.
- Asphalt Academy. 2007. "Technical guideline: The use of modified binders in road construction". Second edition, Pretoria, CSIR Built Environment.
- ASTM D3625. 2012. "Standard practice for effect of water on bituminous-coated aggregate using boiling water". ASTM International, PA, USA.
- ASTM D4123-82. 1995. "Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures". ASTM International, PA, USA.
- 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.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S. and Li, Y. 2013. "Nanomaterials applied in asphalt modification: A review". *J. Mater. Sci. Technol.*, 29(7): 589-594.
- Grenfell, J., Ahmad, N., Liu, Y., Apeagyei, 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.
- Garba, R. 2002. "Permanent deformation properties of asphalt concrete mixtures". Ph.D. Thesis, NTNU, Norway.
- Hesami, S., Ameri, M., Goli, H. and Akbari, A. 2015. "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Int. J. Pavement Eng.*, 16(8): 745-759.
- Kennedy, T.W., Roberts, F.L. and Anagnos, J.N., 1984. "Texas boiling test for evaluating moisture susceptibility of asphalt mixtures (No. FHWA-TX-85-63+ 253-5)". Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin.
- Kok, B. V. and Yilmaz, M. 2009. "The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 23(5): 1999-2006.
- 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.
- Majidzadeh, K. and Brovold, F. N. 1968. "Effect of water on bitumen-aggregate mixtures". Highway Research Board.
- 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.
- Robinson, H. 2005. "Polymers in asphalt". Vol. 15, No. 11, Smithers Rapra Publishing.
- Stuart, K. D. 1990. "Moisture damage in asphalt mixtures-a state-of-the-art report". Research Development and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Wang, S., Zhang, Y. and Zhang, Y. 2003. "SBS/carbon black compounds give asphalts with improved high-temperature storage stability". *Polym. Polym. Compos.*, 11(6): 477-485.
- 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.
- Yeole, C., Khanapure, V. U., Joshi, V. P. and Shelake, A. 2017. "Utilization of industrial polypropylene (PP) waste in asphalt binder for flexible pavements". *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 4(6): 2011-2016.
- Yousefi, A. A., Ait-Kadi, A. and Roy, C. 1998. "Effect of elastomeric and plastomeric tougheners on different properties of recycled polyethylene". *Adv. Polym. Technol.*, 17(2): 127-143.
- Zhang, Q., Wang, T., Fan, W., Ying, Y. and Wu, Y. 2014. "Evaluation of the properties of bitumen modified by SBS copolymers with different styrene-butadiene structure". *J. Appl. Polym. Sci.*, 131(12).