

# بررسی اثر پلیمر SBR بر رفتار خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی

## ماستیک درشت دانه

حمید بهبهانی (مستول مکاتبات)، استاد گروه راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

علی منیری، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمد تخت فیروز، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: ali.moniri1@gmail.com

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۶

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۸

### چکیده

آسفالت ماستیک درشت دانه (SMA)<sup>۱</sup> از جمله آسفالت‌هایی است که با توجه به مزیت های بسیار زیاد آن مورد توجه راهسازان قرار گرفته است. از جمله مزایای این آسفالت می‌توان به افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار، کاهش روند رشد ترک، بهبود مقاومت لغزندگی، کاهش آلودگی صوتی ناشی از تردد وسایل اشاره کرد. در این پژوهش از پلیمر SBR<sup>۲</sup> خالص به صورت مخلوط در قیر و SBR مایع به صورت مستقیم در مخلوط جهت بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت دانه استفاده و نتایج با مخلوط بدون پلیمر به‌عنوان مخلوط شاهد مقایسه شده اند. در خلال این مطالعه آزمایشهای مارشال، حساسیت رطوبتی، خستگی قطری و ویل تراک بر روی نمونه‌های ساخته شده با SBR انجام شد. نتایج نشانگر آن بود که استفاده از پلیمر SBR مخلوط در قیر تأثیر مثبتی روی مقاومت کشی غیرمستقیم، مقاومت مارشال، مدول برجهنگی، مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی دارد. بااین‌حال، مقاومت در برابر رطوبت برای این مخلوط‌ها تفاوت چندانی با مخلوط شاهد ندارد. استفاده از پلیمر SBR مایع به صورت مستقیم در مخلوط باعث کاهش مقاومت خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی SMA شد. با این حال چنانچه این پلیمر بعد از قیر به مخلوط اضافه شود موجب بهبود در مقاومت مخلوط در برابر رطوبت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آسفالت ماستیک درشت دانه، آسفالت SMA، پلیمر SBR، خستگی، شیار شدگی

## ۱. مقدمه

اصلاح‌کننده‌ها مورد توجه فعالین امر روسازی راه قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۶ پاردس و همکارانش روی استفاده از پودر لاستیک در مخلوط‌های آسفالتی SMA به‌عنوان ترکیبی که هم باعث بهبود خصوصیات عملکردی می‌شود و هم از ریزش قیر جلوگیری می‌کند استفاده کردند [Manosalvas-Paredes, Gallego, Saiz and Bermejo, 2016] آن‌ها در خلال این تحقیق نشان دادند استفاده از پودر لاستیک موجب بهبود خصوصیات عملکردی کشش غیرمستقیم و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی SMA می‌شود. باین‌حال حذف الیاف سلولوزی باعث کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم شده اما مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش می‌دهد. در سال ۲۰۱۷ دکتر عامری و همکارانش روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانو رس و پلیمر SBS<sup>۲</sup> تحقیقاتی را انجام دادند [Ameri, Mohammadi, Vamegh, and Molayem, 2017]. آن‌ها در این تحقیق مخلوط‌های آسفالتی SMA حاوی ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد نانو رس و نیز همین مخلوط‌ها به همراه ۵ درصد پلیمر SBS ساختند و مورد آزمایش‌های مارشال، خزش و شیار چرخ قرار دادند. نتایج این تحقیق حاکی از بهبود چشم‌گیر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه در برابر شیار-شدگی زمان استفاده از نانو رس و پلیمر SBS به‌عنوان اصلاح‌کننده بود. در سال ۲۰۱۷ ایمانی نسب طی مقاله‌ای تأثیر پلیمر ECB<sup>۳</sup> به همراه پلیمر رئوفالت EVA<sup>۴</sup> و پلیمر SBS را در مخلوط‌های آسفالتی گرم و نیمه گرم آسفالت SMA مورد ارزیابی قرارداد. وی برای این کار آزمایش خزش دینامیکی را انجام داد و پارامتر عدد روانی را به‌عنوان پارامتر شاخص برای مقایسه این مخلوط‌ها در نظر گرفت [Imaninasab, 2017]. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که تأثیر مثبت استفاده از پلیمر SBS در مقاومت شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه بسیار بیشتر از پلیمرهای EVA و ECB بود. در سال ۲۰۱۷ باباگلی و محمدی طی مقاله‌ای تأثیر پلیمر SBS و افزودنی نانورس را در مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی SMA مورد ارزیابی

مخلوط‌های آسفالتی SMA از مصالح سنگی با دانه‌بندی میان‌تهی، قیر و مصالح تثبیت‌کننده تشکیل شده است. درصد زیاد مصالح درشت‌دانه در این مخلوط‌ها باعث بهبود ساختار دانه‌بندی آن می‌شود. فضای خالی موجود در این مخلوط آسفالتی تقریباً به‌طور کامل توسط ماستیک (مخلوط فیلر ریزدانه و قیر) پر می‌شود. در این مخلوط‌ها به‌منظور دستیابی به تراکم مناسب مخلوط‌های مقدار قیر بیشتری نسبت به مخلوط‌های متداول HMA لازم است. به‌منظور تثبیت این نوع مخلوط‌های آسفالتی می‌توان از الیاف آلی و معدنی، سیلیک اسید و پلیمرها استفاده کرد [Imaninasab, 2017; Khedmati, Khodaii, and Haghshenas, 2017; Woodside, Woodward, and Akbulut, 1998]. مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای به علت درصد فضای خالی کم و ضخامت زیاد قشر قیراندود کننده مصالح سنگی، دوام بسیار مناسبی از خود نشان می‌دهند. این مخلوط‌ها نسبت به ترک‌خوردگی زودهنگام، جدا شدن دانه‌ها و آسیب‌دیدگی و خرابی ناشی از رطوبت مقاوم هستند [Bernard, 2017; Rezvan and Hassan, 2017]. علاوه بر پایداری خوب و دوام که خدمت‌دهی درازمدت و عمر زیاد مخلوط را تضمین می‌نماید، مزایای دیگری برای این مخلوط‌ها، مطرح است. به‌عنوان مثال، این مخلوط‌های آسفالتی می‌توانند روی سطح شیار افتاده یا ناهموار اجرا گردند زیرا در حین عمل تراکم خیلی کم متراکم و فشرده می‌شوند. این ویژگی، صاف و هموار بودن طولی و عرضی سطح را به‌راحتی تأمین می‌نماید. از دیگر مزایای مخلوط‌های آسفالتی SMA می‌توان به این نکته اشاره کرد که این مخلوط‌ها در مقایسه با مخلوط‌های بتن آسفالتی صدای چرخ وسیله نقلیه را به میزان تقریباً دو و نیم دسی‌بل کاهش می‌دهند [NAPA, 2002]. با توجه به افزایش روزافزون استفاده از این آسفالت، بهبود مشخصات آن و بهینه‌سازی این مخلوط با استفاده از پلیمرها و

## بررسی اثر پلیمر SBR بر رفتار خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت دانه

میلی‌متر مطابق با جدول ۱۳-۳ نشریه آیین‌نامه راه‌های آسفالتی ایران انتخاب شده‌اند. ابتدا آزمایش‌های متداول و مرسوم مارشال و محاسبه درصد قیر بهینه انجام می‌پذیرد و سپس با داشتن درصد قیر بهینه هر ترکیب نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های حساسیت رطوبتی، خستگی قطری و آزمون شیار چرخ را در دمای اختلاط ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد آماده شد. در پایان نیز نتایج هر یک از آزمایش‌های ارائه شده تاثیر درصد اضافه شدن پلیمر SBR روی نتایج آزمایشها مورد بررسی قرار گرفت.

### ۱-۲ مصالح و ساخت نمونه

#### ۱-۱-۲ قیر و مصالح سنگی

سنگدانه‌های استفاده شده برای ساخت آسفالت از معدن اسب چران در شمال شرق تهران استفاده شده است. مرغوبیت مصالح، مورد آزمایش قرار گرفته شد. درصد افت لس آنجلس بر اساس آیین‌نامه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشوری ۲۲/۵ درصد و میزان جذب آب ۱/۴ درصد است که هر دو در حد مجاز آیین‌نامه قرار دارند سایر خصوصیات مصالح سنگی به شرح جدول ۱ است. قیر مورد استفاده از در این پژوهش از نوع ۶۰-۷۰ است. کند روانی این قیر ۳۵۴ سانتی استوکس و درجه اشتعال آن ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. دیگر خواص قیر مورد استفاده نیز در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی سنگدانه آهکی مورد استفاده در این

مطالعه		
سنگدانه آهکی	استاندارد	خصوصیات فیزیکی
۲/۶۳	ASTM C127	وزن مخصوص مصالح ریزدانه
۰/۹	ASTM C127	جذب آب (%)
۲/۶۲	ASTM C128	وزن مخصوص مصالح درشت دانه
۲۲/۵	ASTM C131	سایش لس آنجلس (%)

قراردادند [Babagoli and Mohammadi, 2017]. نتایج حاکی از تأثیر مثبت افزودنی نانورس و SBS بر خصوصیت مقاومت کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی و انرژی شکست بود. همچنین پلیمر SBS در قیاس با نانورس بسیار تأثیر گذارتر بود. استفاده از پلیمر SBR برای بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی نیز مورد توجه محققین این امر است. بهبود عملکرد دمای پایین آسفالت، افزایش الاستیسیته قیر، افزایش چسبندگی را می‌توان به‌عنوان عمده تأثیرات استفاده از این پلیمر در قیر و [Liang et al. 2017, Yildirim, 2007 Zhang and Hu, 2013] مخلوط‌های قیری اشاره کرد.

تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص مزایای آسفالت SMA و نیز تأثیر انواع افزودنی‌ها بر این آسفالت انجام شده است. اصلاح آسفالت SMA از سالیان گذشته با توجه به نیاز روزافزون راه‌سازان و راهداران به کاهش هزینه نگهداری و مرمت و ساخت روسازی‌های بادوام بیشتر در دستور کار قرار می‌گرفته است. اصلاح این آسفالت توسط پلیمر SBR با توجه به خصوصیات ارتجاعی بسیار عالی این پلیمر می‌تواند یکی از راهکارهای بسیار مناسب برای بهبود عملکرد آن باشد. با این حال اصلاح مخلوط‌های آسفالتی SMA توسط پلیمر SBR کم‌تر مورد توجه قرار گرفته و بسیاری از زوایای آن مانند درصد بهینه پلیمر و میزان تأثیر آن بر خصوصیات عملکردی این آسفالت پنهان است. در این تحقیق پلیمر SBR به‌عنوان افزودنی در قیر با درصدهای مختلف مورد استفاده قرار گرفت و خصوصیات عملکردی آسفالت SMA اصلاح شده با این افزودنی همانند خستگی و شیارشدگی مورد بررسی قرار گرفتند. از طرفی با هماهنگی شرکت تولیدکننده، افزودنی SBR مایع نیز به صورت مستقیم در مخلوط مورد استفاده قرار گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند.

### ۲. روش تحقیق

همچنین قیر ۶۰/۷۰ شرکت نفت پاسارگاد برای ساخت نمونه‌ها بکار گرفته شده است. نمونه‌های آسفالتی طبق دانه‌بندی ۰-۱۹

1727 از شرکت پتروشیمی بندر امام تهیه شده است. مشخصات این پلیمر به شرح جدول ۳ است. همچنین تصویر آن در شکل شماره ۱ قابل ملاحظه است. اختلاط قیر و پلیمر خالص با دستگاه مخلوطکن با نیروی برشی بالا انجام پذیرفت. برای این کار ابتدا پلیمر به دانه‌های ریز تقسیم شد. سپس دوسوم حجم محفظه اختلاط دستگاه برش بالا قیر ریخته شده و مقادیر ۳ و ۵ و ۷ درصد پلیمر SBR در دمای ۱۴۰ درجه و سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه پلیمر را به آرامی داخل قیر ریخته شد و سپس دما را به ۱۸۰ رسانده و با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، یک ساعت هم زده شد [Salehfar, Abdi, and Amini, 2016].

جدول ۳. مشخصات پلیمر SBR مورد استفاده در این تحقیق

واحد	مقدار	کمیت
%	< ۱,۵	Ash content
MU	۵۲ - ۴۵	Mooney viscosity
MPa	۱۰,۷ - ۷,۷	Tensile modulus-MD
%	> ۵۳۰	Elongation at break-MD
MPa	> ۱۹,۶	Tensile strength
%	۲۴,۵ - ۲۲,۵	styrene content
%	< ۷۵	Volatiles
%	۲۸,۵ - ۲۵,۵	Oil Content

### ۲-۱-۳ پلیمر SBR مایع

از این پلیمر عموماً در آسفالت سرد استفاده می‌شود. با این حال با مشورت تولیدکننده این پلیمر به آرامی در آسفالت داغ اضافه شد تا عملکرد آن ارزیابی شود. پلیمر SBR مایع به دو صورت و صرفاً برای مقایسه به مخلوط‌های آسفالتی اضافه شد. این پلیمرها به صورت مستقیم به مخلوط وارد شد. یکبار به سنگدانه‌ها و قبل از اضافه کردن قیر و یکبار بعد از اضافه کردن قیر این پلیمر به مخلوط اضافه شد. درصد استفاده از این پلیمر با توجه به توصیه تولیدکننده ۳ درصد وزنی کل مخلوط بود. این پلیمر با توجه به توصیه تولیدکننده قبل از استفاده تا ۸۰

درصد شکستگی در دوسمت (%)	ASTM D5821	۹۸
درصد شکستگی در یک سمت (%)	ASTM D5821	۱۰۰
ارزش ماسه ای (%)	ASTM D2419	۶۰

جدول ۲. مشخصات قیر به کار رفته در این تحقیق		
آزمایش قیر	استاندارد	نتایج
درجه نفوذ (دهم میلیمتر)	ASTM D5	۶۱
خاصیت انگمی	ASTM D113	بیشتر از یک متر
نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)	ASTM D36	۴۹
نقطه اشتعال	ASTM D92	۳۱۰
چگالی	ASTM D70	۱/۰۲
ویسکوزیته (سانتی استوکس)	ASTM D2170	۳۵۴

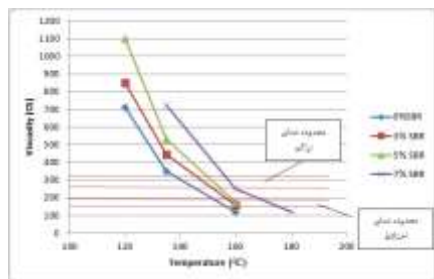
### ۲-۱-۲ پلیمر SBR خالص

SBR به مجموعه‌ای از لاستیک‌های مصنوعی اطلاق می‌شود که از استایرن و بوتادین مشتق شده است. این مواد زمانی که با مواد افزودنی مناسبی مخلوط شوند، مقاومت خوبی در مقابل سایش دارند. نسبت استایرن و بوتادین در لاستیک مصنوعی بر ویژگی‌های پلیمر اثرگذار است؛ به طوری که اگر مقدار استایرن آن زیاد باشد، لاستیک سخت‌تر بوده و خاصیت لاستیکی آن کمتر است. لاستیک مصنوعی پرکاربردترین الاستومر مصنوعی در جهان است. تقاضای این محصول معطوف به کالاهای بادوام خصوصاً در صنعت خودروسازی مانند تایر است. این امر حدود ۷۰ درصد از تقاضای جهانی محصولات را به خود اختصاص می‌دهد. بازارهای دیگر به غیر از تایر در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد تقاضای لاستیک مصنوعی را در برمی‌گیرند که قطعات مکانیکی و طیف گسترده‌ای از سایر محصولات نهایی را شامل می‌شود. مزیت عمده لاستیک مصنوعی در تولید تایر آن است که طول عمر بیشتری را برای تایر به ارمغان می‌آورد [Donatelli, Sperling, and Thomas, 1976]. در این تحقیق SBR

## بررسی اثر پلیمر SBR بر رفتار خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت دانه

### ۲-۱-۵ ساخت نمونه

در ساخت تمامی نمونه‌ها مصالح سنگی با نسبت‌های مشخص بر اساس دانه‌بندی انتخاب شده با یکدیگر مخلوط شده تا نمونه‌های ۱۲۰۰ گرمی آماده شود و سپس سنگدانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های حاوی ۰، ۳ و ۵ درصد پلیمر SBR و دمای ۱۷۰ درجه برای مخلوط‌های حاوی ۷ درصد پلیمر SBR قرار گرفتند و قیر نیز تا دمای ۱۳۸ درجه گرم شد دمای اختلاط و تراکم با توجه به آزمایشات ویسکوزیته قیر تعیین گردیده و در شکل ۲ نشان داده شده است [Ziari, Moniri, Ayazi and Nakhaei, 2015; Ziari, Nakhaei, Akbari Nasrekani, and Moniri, 2016]. در آزمایش مارشال به منظور یافتن درصد قیر بهینه درصد‌های قیر ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵، ۷ و ۷/۵ و از هر درصد ۳ نمونه ساخته شد. نمونه‌ها با استفاده از چکش مارشال و به صورت ۵۰ ضربه در هر طرف کوبیده شدند. پس از محاسبه درصد قیر بهینه ساخت نمونه‌ها در سایر آزمایشها بر اساس درصد قیر بهینه هر ترکیب و با دستگاه ژیراتوری انجام شد. در این تحقیق با توجه به استاندارد ASTM D6935 تعداد ۳۶ نمونه جهت انجام آزمایشات عملکردی با استفاده از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری و بر مبنای وزن مخصوص واقعی و وزن مخصوص ماکزیمی که از آزمایشهای مارشال بدست آمده بود ساخته شدند. دستگاه نمونه‌ها را تحت زاویه ۱/۲۵ درجه و با سرعت ۳۰ دور در دقیقه نمونه‌ها را تا رسیدن به فضای خالی ۴ درصد متراکم شدند.



شکل ۲. ویسکوزیته قیرهای پلیمری این تحقیق در دماهای

مختلف و تعیین دمای تراکم و اختلاط

درجه سانتی‌گراد گرم شد. خصوصیات SBR مایع به شرح جدول ۴ است.

جدول ۴. مشخصات پلیمر SBR مایع مورد استفاده در این تحقیق

مقدار	واحد	خصوصیات
۱,۰۲	g/cm <sup>3</sup>	وزن مخصوص
۴,۲	-	PH
۵۸	%	مواد جامد



شکل ۱. پلیمر SBR جامد مورد استفاده در این تحقیق

### ۲-۱-۴ الیاف جهت جلوگیری از ریزش قیر

در این پژوهش جهت جلوگیری از ریزش قیر از الیاف سلولوزی استفاده شد. این الیاف داخل قرص‌هایی هستند که بعد از برشی که حین اختلاط با مصالح به آن‌ها وارد می‌شوند، باز شده و موجب جذب قیر و کاهش میزان ریزش قیر می‌شوند. میزان استفاده از این الیاف ۰,۳ درصد وزنی کل مخلوط بود. مشخصات الیاف به شرح جدول ۵ است.

جدول ۵. مشخصات الیاف سلولوزی مورد استفاده در این تحقیق

مقدار	واحد	خصوصیات
۱,۱	mm	طول الیاف
۷۷	%	درصد عبوری از الک نمبر ۱۰۰
۰,۵۵	g/cm <sup>3</sup>	وزن مخصوص متراکم نشده
۰,۲	%	درصد رطوبت

### ۳. برنامه آزمایشگاهی

آزمایشهای انجام شده در این تحقیق به ۳ دسته کلی تقسیم بندی می شود. دسته اول آزمایشهای مارشال و ریزش قیر برای طرح اختلاط این مخلوط است. دسته دوم بررسی تأثیر پلیمر در خستگی بوده که برای این کار از روش تنش ثابت خستگی قطری استفاده شده، دسته سوم بررسی تأثیر پلیمر بر شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی با استفاده از آزمایش شیار چرخ و دسته چهارم بررسی حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی ماستیک درشت دانه حاوی پلیمر SBR است.

### ۳-۱ آزمایشهای مارشال و طرح اختلاط

در این تحقیق آزمایشات مارشال بر اساس استاندارد AASHTO T245 انجام شد. جهت انجام این کار نمونه‌ها توسط چکش مارشال ساخته شده و آزمایشات مقاومت و روانی مارشال، وزن مخصوص مارشال و وزن مخصوص ماکزیمم بر روی نمونه‌ها انجام شدند. همچنین جهت ارزیابی پارامتر ریزش قیر آزمایش ریزش قیر با استفاده از استاندارد AASHTO T305 انجام شد. این آزمایش بر اساس اندازه‌گیری میزان تجمع ریزش ملات قیری در طی یک ساعت توسط سبد مخصوص به ابعاد  $6/35 \times 6/35$  میلیمتر برحسب وزن کل مخلوط انجام می شود.

### ۳-۲ آزمایش خستگی قطری

خستگی یکی از عمده خرابی‌های روسازی است که عموماً به علت تکرار بارگذاری در دمای میانی اتفاق می افتد [Sabouri, Mirzaeian and Moniri, 2018]. این آزمایش با توجه به استاندارد En12697 انجام می شود، هدف اندازه‌گیری پاسخ خستگی مخلوط آسفالتی نمونه‌های استوانه‌ای از طریق کشش غیرمستقیم است. در این آزمایش روش بارگذاری از طریق کنترل تنش انجام گردید و شکل بارگذاری از نوع نیمه سینوسی با  $0/1$  ثانیه زمان بارگذاری و  $0/9$  ثانیه زمان استراحت با فرکانس  $1\text{HZ}$

است. بیشینه بار انتخاب شده برای این آزمایش  $3,15$  کیلونیوتن است. دمای آزمایش حدود  $20$  درجه سانتی گراد بود. دمای آزمایش توسط دماسنجی که داخل نمونه آسفالتی داخل دستگاه بود اندازه‌گیری شد. کوبه بارگذاری تحت نیروی فشار باد به فرورفتگی نوار فولادی چسبیده و سپس بارگذاری نیمه سینوسی در زمان  $0,1$  ثانیه اعمال می کرد. سنسورهای (LVDT)<sup>۶</sup> به کاررفته دارای دامنه‌ای برابر با  $\pm 5\text{mm}$  بودند که با تنظیم بر کناره‌های نوار فولادی طوری تنظیم شدند که جابجایی  $9$  میلی‌متر را تأمین کنند. در این آزمایش زمان روانی یعنی زمانی که شیب تغییرات کرنش مثبت می شود و تغییر شکل‌ها به صورت ناگهانی و قابل توجه افزایش پیدا می کنند، شاخصی برای عمر خستگی است.

### ۳-۳ آزمایش شیار چرخ

آزمون شیار شدگی توسط دستگاه شیار جای چرخ موجود در آزمایشگاه مرکز تحقیقات قیر و مخلوطهای آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شد. درجه حرارت آزمایش برای آزمایش شیار جای چرخ بر پایه بیشترین درجه حرارت محیطی که روسازی تجربه خواهد کرد، انتخاب می شود. از این رو برای انجام آزمایش، ابتدا از هر نوع مخلوط سه نمونه به مدت  $5$  ساعت در دمای  $50$  درجه سانتی گراد قرار می گیرند [Behbahani, Ayazi and Moniri, 2017; Ziari, Moniri, Imaninasab, and Nakhaei, 2017]. سنسور نمونه‌ای استوانه‌ای در دستگاه قرار گرفته و توسط دوچرخ که حول مرکزشان دوران می کنند با فشار حدود  $10$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مورد بارگذاری قرار می گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه  $1$  هرتز و دمای آزمایش  $50$  درجه سانتی گراد است. در مجموع نمونه‌ها تحت  $8000$  سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از آن بیشترین عمق شیار به وجود آمده در هر نمونه اندازه‌گیری می شود. میانگین سه نمونه به عنوان عمق شیار هر نوع مخلوط به دست آمد.

### ۳-۴- آزمایش حساسیت رطوبتی

حساسیت رطوبتی از جمله خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی است و به جدا شدگی قیر از مصالح سنگی در مجاورت رطوبت اطلاق می‌شود [Ayazi, Moniri and Barghabany, 2017]. آزمون حساسیت رطوبتی با توجه به استاندارد AASHTO T283 انجام شد. برای این کار ۳ نمونه خشک و ۳ نمونه اشباع مورد آزمایش قرار گرفتند. برای ساخت نمونه‌های اشباع ابتدا نمونه‌ها در یک ظرف شیشه‌ای دربسته به مدت ۵ دقیقه و با اعمال مکش نسبی ۷۶ کیلو پاسکال اشباع شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در نهایت این نمونه‌ها به مدت دو ساعت در دمای ۲۵ درجه قرار می‌گیرند. نمونه‌های خشک نیز داخل کیسه‌های نفوذناپذیر قرار گرفته و داخل آب ۲۵ درجه سانتی-گراد قرار می‌گیرند. سپس نمونه‌ها را به‌طور قائم بین دو فک دستگاه آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفته و بار قطری با سرعت ۵۰ mm/min بر نمونه اعمال می‌شود تا بار به بیشینه خود برسد و نمونه بشکند. سپس بعد از این که بار بیشینه ثبت شد با استفاده از رابطه ۱ نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک به‌عنوان پارامتری از حساسیت رطوبتی عنوان می‌شود.

### ۴. بحث و بررسی نتایج

#### ۴-۱- آزمایش مارشال و طرح اختلاط

نتایج آزمایش‌های مارشال در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در این اشکال مشهود است درصد فضای خالی مخلوط با افزایش قیر کاهش یافته و درصد فضای خالی متناظر با قیر ۴ درصد برابر با قیر حدود ۶٫۸ درصد است. سایر پارامترها هم برای این میزان قیر کاملاً در محدوده آیین‌نامه قرار دارد. مقاومت مارشال متناظر با قیر ۶٫۸ درصد برابر ۵۳۰ کیلوگرم و نیز وزن مخصوص متناظر حدود ۲٫۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. خلاصه طرح اختلاط انجام شده به شرح جدول شماره ۶ است.

پس از انجام طرح اختلاط و مشخص شدن درصد قیر بهینه، آزمایشات مقاومت مارشال، درصد فضای خالی و وزن مخصوص مارشال جهت کنترل مجدد و مقایسه برای مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف پلیمر جامد در قیر و نیز مخلوط‌های حاوی پلیمر مایع انجام شد. نتایج در جدول شماره ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقاومت مارشال با افزایش میزان پلیمر جامد مخلوط در قیر به‌صورت قابل‌توجهی افزایش پیدا می‌کند. با این حال استفاده از پلیمر مایع باعث کاهش مقاومت مارشال و نیز کاهش تراکم‌پذیری نمونه می‌شود.

نکته قابل‌ارائه در این بخش بحث ریزش قیر مخلوط‌های حاوی پلیمر است. همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است، استفاده از پلیمر SBR به‌صورت جامد در قیر به‌صورت قابل‌توجهی ریزش قیر را کاهش می‌دهد. این امر به دلیل سفتی و چسبندگی بالا قیر حاوی پلیمر است [Abtahi, Sheikhzadeh and Hejazi, 2010; Mokhtari and Nejad, 2012]. این موضوع می‌تواند جبران استفاده از الیاف باشد و با کاهش الیاف در هزینه صرفه‌جویی شود. همچنین ملاحظه می‌شود که استفاده از پلیمر مایع هم خصوصاً زمانی که بعد از قیر به مخلوط اضافه می‌شود، به‌صورت قابل‌توجهی ریزش قیر را کاهش می‌دهد. این موضوع می‌تواند به علت چسبندگی SBR مایع باشد. پلیمر SBR مایع به‌صورت یک‌لایه چسبنده اطراف سنگدانه‌های حاوی قیر را گرفته و مانع از ریزش قیر آن‌ها می‌شود.

است استفاده از پلیمر مایع به صورت مستقیم داخل مخلوط به طور قابل توجهی عمر خستگی مخلوط را کاهش می دهد. علت این امر را می توان عدم اختلاط یکنواخت پلیمر و نیز کاهش چسبندگی بین قیر و آسفالت با اضافه کردن پلیمر مایع به مخلوط آسفالتی نام برد. باین حال استفاده از پلیمر SBR داخل قیر موجب بهبود خستگی قطری قیر شده و عمر خستگی مخلوط را به افزایش می دهد. ۳ درصد پلی SBR داخل قیر باعث بهبود جزئی خستگی می شود اما با اضافه کردن ۵ و ۷ درصد پلیمر عمر خستگی به صورت قابل ملاحظه ای افزایش یافته و حتی بعضی از نمونه ها پس از به پایان رسیدن زمان آزمایش وارد ناحیه غیر خطی نمی شدند و مقاومت می کردند. این موضوع به علت افزایش الاستیسیته قیر اصلاح شده با پلیمر SBR که در مروری بر ادبیات گذشته نیز به آن اشاره شده بود است ( Yildirim, 2007).

جدول ۶. نتایج آزمایشهای طرح اختلاط مارشال

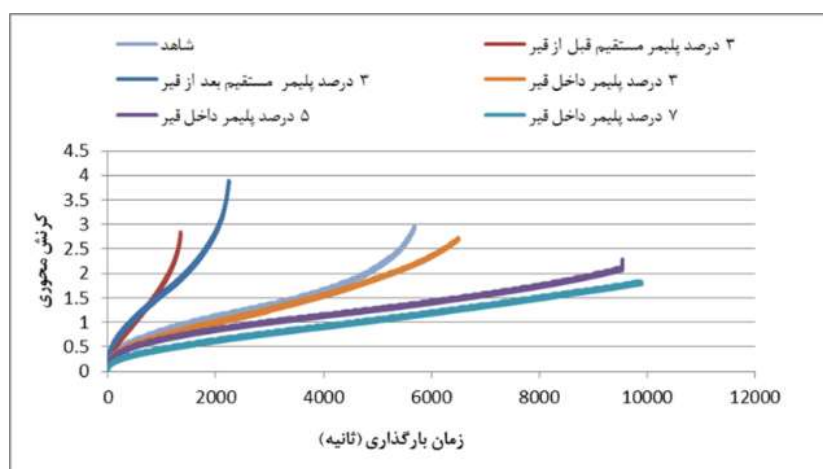
پارامتر	واحد	مقدار
قیر بهینه	%	۶٫۸
مقاومت مارشال در قیر بهینه	kg	۵۳۰
درصد فضای خالی در قیر بهینه	%	۴
وزن مخصوص در قیر بهینه	Gr/cm <sup>3</sup>	۲٫۳۸
درصد فضای خالی مصالح سنگی	%	۱۹
ریزش قیر در قیر بهینه	%	۰٫۰۵
VCA در قیر بهینه	-	۱٫۲۱

#### ۴-۲ آزمایش خستگی قطری

آزمایش خستگی به صورت تنش ثابت و با بار ماکزیمم ۳٫۱۵ کیلونیوتن انجام شده و زمان روانی به شرح شکل ۳ ارائه می گردد. همان طور که از نتایج آزمایش خستگی قطری قابل مشاهده

جدول ۷. نتایج آزمایشات مارشال برای مخلوطهای حاوی درصدها و انواع مختلف پلیمر SBR

پارامتر	واحد	۳٪ SBR مخلوط	۵٪ SBR مخلوط	۷٪ SBR مخلوط	۳٪ SBR مایع مستقیم قبل قیر	۳٪ SBR مایع مستقیم بعد قیر
مقاومت مارشال	Kg	۵۸۰	۶۵۰	۷۴۰	۵۲۰	۴۷۰
فضای خالی	%	۴	۴	۴	۴٫۴	۴٫۵
وزن مخصوص	g/cm <sup>3</sup>	۲٫۳۸	۲٫۳۸	۲٫۳۸	۲٫۳۷	۲٫۳۶
ریزش قیر	%	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱



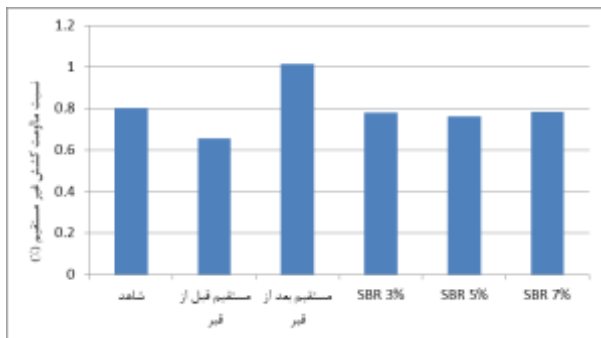
شکل ۳. نتایج آزمایش خستگی قطری مخلوطهای ماستیک درشت دانه حاوی پلیمر

#### ۴-۳ آزمایش شیار چرخ



## بررسی اثر پلیمر SBR بر رفتار خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت دانه

آسفالتی اضافه شده‌اند. به نظر می‌رسد اضافه کردن SBR مایع پس از قیر باعث چسبندگی بسیار زیاد قیر و سنگدانه می‌شود. اضافه کردن SBR مایع قبل از قیر به صورت مستقیم در مخلوط چسبندگی میان قیر و آسفالت را کاهش داده و موجب افزایش حساسیت رطوبتی می‌شود.



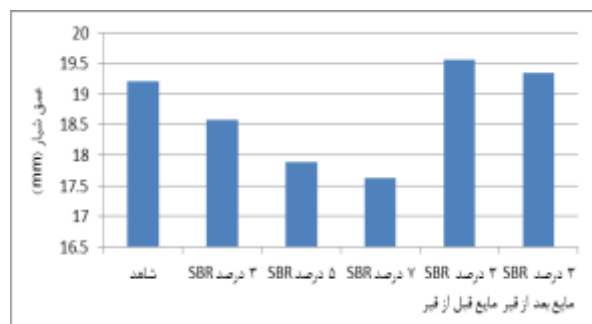
شکل ۵. نتایج آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم اشباع به خشک

### ۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق از پلیمر SBR، هم به صورت جامد و مخلوط در قیر در درصد‌های ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی قیر و هم به صورت مایع و مستقیم در مخلوط (یکبار قبل از اضافه شدن قیر به مخلوط و یکبار پس از اضافه شدن قیر به مخلوط) به میزان ۳ درصد وزنی قیر برای اصلاح مخلوط‌های SMA استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از اثر مثبت استفاده از پلیمر SBR جامد مخلوط در قیر بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی SMA در برابر خستگی و شیارشدگی بود. با این حال استفاده از پلیمر SBR مایع به صورت مستقیم در مخلوط مقاومت خستگی و شیارشدگی را در مخلوط‌های آسفالتی SMA کاهش می‌داد. سایر نتایج این تحقیق به شرح زیر است.

- افزایش درصد پلیمر SBR به صورت مخلوط در قیر باعث افزایش مقاومت مارشال می‌شود. با این حال چنانچه دمای اختلاط با استفاده از آزمایش ویسکوزیته تعیین شود، خصوصیات وزنی و حجمی مخلوط ساخته شده تغییر چندانی نمی‌کند.

نتایج آزمایش شیار چرخ به شرح شکل شماره ۴ ارائه شده است. نتایج آزمایش ویل تراک نشان می‌دهد که استفاده از لاتکس مایع تأثیر چندانی در مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی SMA نداشته و حتی به میزان اندکی این باعث کاهش مقاومت شیارشدگی می‌شود. اما با افزایش درصد پلیمر لاتکس در قیر مقاومت در برابر شیارشدگی کاهش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حدوداً ۲ میلی‌متر کاهش عمق شیار را در مخلوط‌های حاوی ۷ درصد پلیمر SBR که داخل قیر ترکیب شده است شاهد هستیم. این نتایج تصدیق‌کننده نتایج سایر محققین است و می‌توان گفت به طور کلی با استفاده از پلیمر SBR مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی بهبود می‌یابد. علت این امر سفتی بیشتر قیر زمانی که افزودنی SBR به آن اضافه می‌شود است (Liang et al. 2017; Salehfard et al. 2016).



شکل ۴ نتایج آزمایش شیار چرخ مخلوط‌های ماستیک درشت دانه حاوی پلیمر SBR

### ۴-۴ آزمایش حساسیت رطوبتی

نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک به عنوان پارامتری از حساسیت رطوبتی در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان می‌دهد که نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم اشباع به خشک برای مخلوط‌های SMA شاهد حدود ۰٫۸ است و اضافه کردن پلیمر SBR به آن تأثیر چندانی در حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها ندارد. نکته قابل توجه مقاومت بسیار زیاد مخلوط‌های ساخته شده با SBR مایع است که به صورت مستقیم پس از قیر به مخلوط‌های

در پایان از تمام افرادی که ما را در انجام این پروژه یاری کردند، بویژه مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران سپاسگزاریم.

### مراجع

- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M. and Hejazi, S. M. (2010) "Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 6, PP. 871-877.

-Ameri, M., Mohammadi, R., Vamegh, M. and Molayem, M. (2017) "Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 156 pp. 107-113.

-Ayazi, M. J., Moniri, A., and Barghabany, P. (2017). "Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 35, No. 9, pp. 890-895.

-Babagoli, R. and Mohammadi, R. (2017) "Laboratory evaluation of the effect of styrene-butadiene-styrene–montmorillonite nanocomposite on rheological behavior of bitumen and performance of stone matrix asphalt mixtures", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 44, No. 9, pp. 736-742.

-Behbahani, H., Ayazi, M. J., and Moniri, A. (2017). "Laboratory investigation of rutting performance of warm mix asphalt containing high content of reclaimed asphalt pavement", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 35, No. 15, pp. 1556-1561.

-Bernard, B. (2017) "A review on various issues related to stone matrix asphalt", *International Journal of Engineering, Technology, Science and Research*, Vol. 4, Issue 12, pp. 588-591.

• استفاده از پلیمر SBR به صورت مخلوط در قیر باعث کاهش میزان ریزش قیر می‌شود. می‌توان با بررسی اثر ترکیبی استفاده از پلیمر و کاهش میزان الیاف قیمت تمام‌شده برای تولید مخلوط را کاهش داد.

• استفاده از پلیمر SBR مایع باعث کاهش تراکم مخلوط‌های SMA شده و مقاومت مارشال را کاهش می‌دهد. با این حال ریزش قیر با استفاده از این افزودنی به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد.

• با افزایش درصد پلیمر SBR جامد در قیر مقاومت مخلوط در برابر خستگی به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد. با این حال پلیمر SBR مایع به صورت مستقیم در مخلوط در مقاومت خستگی مخلوط‌های تأثیر منفی می‌گذارد.

• مقاومت در برابر شیار شدگی با افزایش درصد پلیمر SBR مخلوط در قیر بهبود می‌یابد. استفاده از پلیمر SBR مایع مستقیم در مخلوط تأثیر چندانی روی این پارامتر ندارد.

• پارامتر حساسیت رطوبتی با اضافه کردن افزودنی SBR به قیر تغییر چندانی نمی‌کند. با این حال اضافه کردن SBR مایع پس از قیر به مخلوط موجب بهبود چشم‌گیر این پارامتر و اضافه کردن آن قبل از قیر موجب کاهش چشم‌گیر پارامتر حساسیت رطوبتی می‌شود.

### ۶. پی نوشت‌ها:

1. Stone Mastic Asphalt
2. Styrene Butadine Rubber
3. Styrene Butadine Styrene
4. Ethylyn Copolymer bitumen
5. Ethylene-vinyl acetate
6. Linear variable differential transformer

### ۷. سپاسگزاری

- Sabouri, M., Mirzaeian, D., and Moniri, A. (2018). "Effectiveness of Linear Amplitude Sweep (LAS) asphalt binder test in predicting asphalt mixtures fatigue performance", *Construction and Building Materials*, Vol. 171, PP. 281-290.
- Salehfarid, R., Abdi, A., and Amini, B. (2016). "Effect of SBR/NC on the rheological properties of bitumen and fatigue resistance of hot mix asphalt", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29, No. 5, PP. 04016282.
- Woodside, A., Woodward, D., and Akbulut, H. (1998). Stone mastic asphalt: assessing the effect of cellulose fibre additives. Paper presented at the Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer.
- Yildirim, Y. (2007). "Polymer modified asphalt binders", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 1, PP. 66-72.
- Zhang, F., and Hu, C. (2013). "The research for SBS and SBR compound modified asphalts with polyphosphoric acid and sulfur", *Construction and Building Materials*, Vol. 43, PP. 461-468.
- Ziari, H., Moniri, A., Ayazi, M. J., and Nakhaei, M. (2015). "Investigation of rutting performance of wma mixtures containing copper slag", *International Journal of Transportation Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 227-235.
- Ziari, H., Moniri, A., Imaninasab, R., and Nakhaei, M. (2017). "Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 20, No. 7, pp. 775-781.
- Ziari, H., Nakhaei, M., Akbari Nasrekani, A., and Moniri, A. (2016). "Characterization of rutting resistance of EBS-modified asphalt mixtures", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 34, No. 13, pp. 1107-1112.
- Donatelli, A., Sperling, L. and Thomas, D. (1976) "Interpenetrating polymer networks based on SBR/PS. 1. Control of morphology by level of cross-linking", *Macromolecules*, Vol. 9, No. 4, PP. 671-675.
- Imaninasab, R. (2017) "Effect of granular polymers on rutting performance of SMA with respect to modification process", *Construction and Building Materials*, Vol. 130, PP. 64-72.
- Khedmati, M., Khodaii, A. and Haghshenas, H. (2017) "A study on moisture susceptibility of stone matrix warm mix asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol. 144, PP. 42-49.
- 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)", *Construction and Building Materials*, Vol. 139, pp. 183-192.
- Manosalvas-Paredes, M., Gallego, J., Saiz, L., and Bermejo, J. M. (2016) "Rubber modified binders as an alternative to cellulose fiber-SBS polymers in stone matrix asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol. 121, pp. 727-732.
- Mokhtari, A. and Nejad, F. M. (2012) "Mechanistic approach for fiber and polymer modified SMA mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 381-390.
- National Asphalt Pavement Association - NAPA- (2002) "Designing and constructing SMA mixtures: State of the Practice: National Asphalt Pavement Association.
- Rezvan, B. and Hassan, Z. (2017) "Evaluation of rutting performance of stone matrix asphalt mixtures containing warm mix additives", *Journal of Central South University*, Vol. 24 No. 2, pp. 360-373.

## حمید بهبهانی، علی منیری، محمد تخت فیروز

حمید بهبهانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را از دانشگاه فلوریدا امریکا و درجه دکتری رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را از همان دانشگاه اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طرح هندسی راه، برنامه ریزی حمل و نقل، مهندسی ترافیک، تکنولوژی قیر و آسفالت، طراحی روسازی راه بوده و در حال حاضر استاد دانشکده عمران در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



علی منیری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه زنجان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تکنولوژی قیر و آسفالت، طراحی روسازی راه بوده و در حال حاضر دانشجوی دکتری در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



محمد تخت فیروزه، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۳ از موسسه آموزش عالی صالحان قائمشهر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران\_راه و ترابری را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود

