

## بررسی آزمایشگاهی اثر پلیمر بر عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی متخلخل

### مقاله پژوهشی

مصطفی وامق<sup>\*</sup>، دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

آرمین جراحی، دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mostafa\_Vamegh@yahoo.com

دریافت: ۹۸/۰۳/۱۸ - پذیرش: ۹۸/۰۹/۲۰

صفحه ۱۷۶-۱۶۵

### چکیده

خصوصیات سطحی روسازی تاثیر مستقیم بر راحتی و ایمنی کاربران جاده‌ها بخصوص در شرایط جوی نامتعرف دارد. وجود آب در هنگام بارندگی در سطح روسازی موجب کاهش مقاومت لغزندگی بین تایر و سطح جاده، پاشش آب و انعکاس نور و در نتیجه کاهش ایمنی می‌گردد. آسفالت متخلخل به‌عنوان قشر رویه نفوذپذیر برای بهبود ایمنی و کاهش آلودگی‌های صوتی مورد استفاده قرار می‌گردد. در این پژوهش عملکرد آسفالت متخلخل اصلاح‌شده با دو نوع پلیمر از دسته الاستومرها و پلاستومرها مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا از قیر ۸۵/۱۰۰، مصالح سنگی آهکی، فیلر پودر سنگ و پلیمرهای EVA و SBR با درصد‌های ۴ و ۵ وزنی قیر مورد استفاده قرار گرفته است. جهت ارزیابی عملکرد قیرهای اصلاح‌شده در مقایسه با قیر پایه آزمایش‌های درجه نفوذ، ویسکوزیته دورانی و بازیابی الاستیک و همچنین برای ارزیابی خصوصیات مخلوط آسفالتی متخلخل آزمایش‌های مدول برچهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و آزمایش شیارهای چرخ انجام گرفته است. نتایج آزمایش‌های قیر نشان می‌دهد سختی و ویسکوزیته و انعطاف‌پذیری قیر با افزودن پلیمرها به قیر افزایش می‌یابد که منجر به بهبود عملکرد قیر می‌گردد. همچنین نتایج آزمایش‌های مخلوط آسفالتی نیز نشانگر افزایش انسجام، پیوستگی و چسبندگی در مخلوط‌های آسفالتی متخلخل نسبت به نمونه شاهد است که منجر به افزایش مقاومت در برابر رطوبت و کاهش شیار شدگی می‌گردد. در حالت کلی عملکرد نمونه‌های اصلاح‌شده با پلیمر SBR بهتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آسفالتی متخلخل، قیر اصلاح‌شده پلیمری، ویسکوزیته دورانی، بازیابی الاستیک، مقاومت کششی غیرمستقیم، شیار شدگی

### ۱- مقدمه

آسفالت متخلخل<sup>۱</sup>، آسفالتی سازگار با محیط‌زیست با درصد فضای خالی بالا (۱۸-۲۵ درصد) و با ضخامت حدود ۴ تا ۵ سانتی‌متر است که به‌طور مؤثر در مناطق دارای بارندگی زیاد استفاده می‌گردد. این آسفالت‌ها به دلیل ظرفیت بالای زهکشی منجر به افزایش کیفیت رانندگی و افزایش ایمنی به علت کاهش لغزندگی در هوای بارانی می‌شود و تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از این رویه‌ها باعث کاهش ۸۰ درصدی تصادفات در شرایط مرطوب می‌گردد. علاوه بر این، آسفالت متخلخل از پدیده هیدروپلنینگ و پاشش آب در سطح جاده

خصوصیات سطح روسازی تاثیر مستقیم بر راحتی و ایمنی راننده دارد. روسازی‌های آسفالتی متداول در شرایط مرطوب دارای مقاومت لغزشی پایینی به دلیل تشکیل فیلم آب بر روی سطح روسازی هستند، که وجود آب می‌تواند منجر به پدیده هیدروپلنینگ، تولید صدا و پخش آب شود. مطابق آمار به‌دست‌آمده از بیش از ۳۰۰۰۰ تصادف در هفت بزرگراه، نرخ تصادفات در هوای مرطوب ۳/۵ برابر بیشتر از هوای خشک است که این آمار در مناطق کوهستانی می‌تواند وخیم‌تر باشد (Liu & Cao, 2009; Luo et. al., 2015).

می‌دهند. در طرف دیگر پلاستومرها و پلیمرهای واکنش‌پذیر قیر را سخت‌تر و در نتیجه تغییر شکل در اثر بارگذاری کاهش می‌دهد (Gama et. al., 2016; Mostafa & Mahmoud, 2018). در حالت کلی خصوصیات قیرهای اصلاح‌شده علاوه بر نوع پلیمر مصرفی به درصد استفاده آن در قیر نیز وابسته است. در این راستا در تحقیق انجام‌گرفته توسط بهبهانی و همکاران اثر پلیمر SBR بر قیر و آسفالت متخلخل بررسی ارزیابی کردند. در این تحقیق SBR به میزان ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی قیر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های قیر حاکی از کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی است که منجر به افزایش الاستیسیته و سیالیت قیر در دمای بالا می‌گردد. همچنین نتایج ارزیابی مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد استحکام، روانی و مقاومت شیار شدگی مخلوط آسفالتی با افزودن SBR و افزایش درصد آن، نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا می‌کند (بهبهانی و همکاران، ۱۳۸۷). در تحقیق سال ۲۰۱۶ شیرینی و ایمانی نسب عملکرد مخلوط‌های آسفالتی متخلخل حاوی SBS (۵ درصد) و پودر لاستیک (CR) (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق بیانگر کاهش ریزش قیر و نفوذپذیری مخلوط‌های آسفالتی حاوی SBS و CR و افزایش قابل توجه مقاومت شیار شدگی در این نمونه‌ها می‌باشد. همچنین استفاده از CR موجب بهبود مدول برجهنگی، مقاومت لغزشی و حساسیت رطوبتی می‌گردد اما افزایش درصد CR موجب تاثیر منفی بر این پارامترها می‌گردد. در حالت کلی، آسفالت متخلخل حاوی ۱۰ درصد CR عملکرد خوب و تقریباً مشابه نمونه‌های حاوی SBS از خود نشان می‌دهد (Shirini & Imaninasab, 2016). منصوریان و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بررسی میدانی عملکرد آسفالت متخلخل حاوی الیاف سلولوزی و پلیمری در محور ساری - قائم‌شهر به طول ۱۰۰۰ و به عرض ۱۱ متر پرداختند. در این تحقیق بررسی‌ها شامل آزمون‌های آزمایشگاهی کانتابرو، ریزش قیر و مقاومت کششی غیرمستقیم و آزمون‌های میدانی نفوذسنجی، صوت و مقاومت لغزشی بر روی آسفالت متخلخل بودند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد آسفالت متخلخل اجراشده ضمن داشتن مقاومت و دوام مناسب می‌تواند منجر به افزایش نفوذپذیری، افزایش مقاومت لغزشی و کاهش میزان صوت ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه شود (منصوریان و همکاران، ۱۳۹۵). فونسو و همکاران در سال ۲۰۱۷ اثر الیاف

جلوگیری و با حذف نور منعکس‌شده در سطح جاده کیفیت دید را بهبود می‌بخشد، همچنین صدای تولیدشده بین تایر و سطح روسازی را ۳ تا ۵ دسی‌بل کاهش می‌دهد (Liu & Cao, 2009; Sangiorgi et. al., 2017). به‌طور کلی مزایای اصلی استفاده از این مخلوط افزایش مقاومت اصطکاکی، کاهش آلودگی صوتی، تخلیه سریع آب از رویه جاده، کاهش آب لغزی و افزایش ایمنی وسایل نقلیه است. عوامل یادشده محققین را به سمت استفاده از آسفالت متخلخل سوق داد. با زهکشی آب از میان منافذ مخلوط آسفالتی به جای عرض رویه، ضریب اصطکاک بین تایر وسیله نقلیه و رویه در حد مطلوب حفظ می‌شود (امیر فرهنگی، ۱۳۸۶ (Mallick et. al., 2000). علیرغم تمام مزایای آسفالت متخلخل، در برخی مشاهدات میدانی و تحقیقات انجام‌شده نقاط ضعف مکانیکی و عملکردی در این مخلوط‌ها گزارش شده است. از محدودیت‌های قابل توجه آسفالت متخلخل دوام پایین به دلیل خصوصیات ساختاری این مخلوط‌ها در مقایسه با سایر مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. همچنین این مخلوط‌ها دارای هزینه تولید و تعمیر بالاتری نیز می‌باشند. از سوی دیگر اکسیداسیون و پیری به‌عنوان نقص مخلوط‌های آسفالتی متخلخل گزارش شده است. به دلیل عبور آسان هوا و آب از درون حفره‌های متصل به یکدیگر نرخ پیری افزایش می‌یابد که منجر به کاهش چسبندگی قیر و سنگ‌دانه می‌شود (Sangiorgi et. al., 2017). با توجه به مشکلات آسفالت متخلخل، تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد استفاده از قیرهای اصلاح‌شده بجای قیرهای متداول می‌تواند عملکرد بلندمدت و تغییر شکل‌های دائم را در این مخلوط‌ها بهبود بخشد (Sangiorgi et. al., 2017). هدف از استفاده از افزودنی‌ها بهبود خواص و یا عملکرد قیر حاوی افزودنی‌ها یا مخلوط آسفالتی تولیدشده می‌باشد. از میان افزودنی‌های مورد استفاده در قیر، پلیمرها به‌عنوان مهم‌ترین خانواده اصلاح‌کننده مخلوط آسفالتی شناخته می‌شوند که با به‌کارگیری این مواد عملکرد و کارایی قیر و مخلوط آسفالتی بهبود می‌یابد (Lewandowski, 1994). سه دسته کلی پلیمر شامل ترموپلاستیک الاستومرها، پلاستومرها و پلیمرهای واکنش‌پذیر برای اصلاح خصوصیات قیر وجود دارد که هر کدام از آن‌ها اثر ویژه‌ای بر روی خصوصیات قیر دارند. ترموپلاستیک الاستومرها خاصیت بازایی تغییر شکل‌ها بعد از بارگذاری را افزایش و دامنه دمایی عملکرد قیر را گسترش

آزمایش شیار جای چرخ برای ارزیابی مقاومت شیار شدگی بر مخلوط‌های آسفالتی متخلخل انجام گرفته است.

## ۲- مصالح مصرفی

قیر مصرفی در این پژوهش، قیر با درجه نفوذ ۸۵-۱۰۰ از شرکت نفت جی می‌باشد که به‌عنوان قیر پایه و تهیه قیرهای اصلاح شده مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۱ آورده شده است. مصالح سنگی مورد استفاده از نوع آهکی می‌باشد که دانه‌بندی (منطبق با دانه‌بندی شماره ۲ جدول (۹-۱) نشریه ۲۳۴ روسازی) آن در جدول ۲ و مشخصات آن نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

سلولوزی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی متخلخل بررسی کردند. نتایج نشان که الیاف سلولوزی ریزش قیر که از مشکلات آسفالت متخلخل می‌باشد را کاهش و همچنین مقاومت تغییر شکل مخلوط‌های آسفالتی متخلخل حاوی الیاف را نسبت به مخلوط متداول افزایش می‌دهد (Afonso et. al., 2017). با توجه به مزایای ایمنی و زیست‌محیطی آسفالت متخلخل و ضرورت استفاده از افزودنی‌ها بخصوص پلیمرها در عملکرد بهینه این مخلوط‌ها آسفالتی، در این پژوهش جهت ارزیابی اثر اصلاح‌کننده‌های پلیمری، آزمایش‌های درجه نفوذ، آزمایش ویسکوزیته دورانی و آزمایش بازیابی الاستیک بروی قیرهای اصلاح شده با EVA<sup>۱</sup> و SBR<sup>۲</sup> و آزمایش مدول برجهندگی، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی و

جدول ۱. خصوصیات قیر مصرفی

روش آزمایش	مقدار	خصوصیات / واحد
ASTM D70	۱ - ۱/۰۵	وزن مخصوص (۲۵ درجه سانتی‌گراد) ( $\text{gr/cm}^3$ )
ASTM D5	۸۸	درجه نفوذ (۲۵ درجه سانتی‌گراد) (mm/10)
ASTM D36	۴۶	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
ASTM D113	حداقل ۱۰۰	انگمی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (cm)

جدول ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی

اندازه الک	درصد وزنی عبوری
۱۹ میلی‌متر	۱۰۰
۱۲/۵ میلی‌متر	۹۵
۹/۵ میلی‌متر	۸۰
۴/۷۵ میلی‌متر	۲۷/۵
۲/۳۶ میلی‌متر	۸
۰/۰۷۵ میلی‌متر	۳/۵

جدول ۳. مشخصات مصالح سنگی

استاندارد	مقدار	اندازه الک
AASHTO T96	۲۲/۳	حداکثر سایش به روش لوس‌آنجلس (درصد)
812 BS	۱۵	حداکثر ضریب تورق (درصد)
D5821 ASTM	۹۵	حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴ (درصد)
AASHTO T85	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
AASHTO T84	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
C127 ASTM	۲/۶	وزن مخصوص واقعی ( $\text{gr/cm}^3$ ) مصالح سنگی درشت‌دانه
C128 ASTM	۲/۳	وزن مخصوص واقعی ( $\text{gr/cm}^3$ ) مصالح سنگی ریزدانه

مدت ۳۰ دقیقه انجام شده است. برای تعیین درصد قیر بهینه در مخلوط آسفالتی متخلخل از روش کانتابرو استفاده شد. معیارها در این روش عبارتند از (Mallick et. al., 2000):

حداقل درصد فضای خالی نمونه‌ها ۱۸ درصد افت وزنی نمونه‌ها در آزمایش کانتابرو<sup>۴</sup> حداکثر ۲۰ درصد حداکثر میزان جاری شدن (ریزش قیر<sup>۵</sup>) قیر ۰/۳ درصد به‌منظور تعیین درصد قیر بهینه، سه درصد قیر ۵، ۵/۵ و ۶ برای ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شد و ساخت نمونه‌ها به‌وسیله دستگاه متراکم کننده دورانی<sup>۶</sup> انجام گرفته است. با توجه به سه معیار طرح اختلاط، مقدار قیر بهینه برای نمونه حاوی قیر خالص ۵/۴ درصد و برای نمونه‌های پلیمری ۵/۶ درصد می‌باشد. برای ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی و انجام هر آزمایش سه نمونه ساخته شده است و میانگین آنها به عنوان نتیجه نهایی برای هر مخلوط ارائه شده است.

### ۳-۲- آزمایش ویسکوزیته دورانی (RV)

ویسکوزیته دورانی<sup>۷</sup>، ویسکوزیته قیر در دماهای بالا و در محدوده دمایی تولید و ساخت را اندازه می‌کند. آزمایش ویسکوزیته دورانی طبق استاندارد AASHTO T316 با اندازه‌گیری ویسکوزیته قیرهای خالص و اصلاح شده، قابلیت سیالیت قیر برای پمپاژ و اختلاط ارزیابی می‌کند. برای آنکه چسبنده‌های قیری به‌ویژه قیر اصلاح شده بتواند به‌راحتی پمپاژ و جابجا شوند، ویسکوزیته قیر در حالت پیر نشده نباید از حداکثر ۳ Pa.s در دمای ۱۳۵ سانتی‌گراد بیشتر باشد (AASHTO T316, 2013).

### ۳-۳- آزمایش بازیابی الاستیک (ER)

بازیابی الاستیک<sup>۸</sup> درجه‌ای است که ماده بعد از اعمال تنش و رهاسازی آن، خود را بازیابی می‌کند. درجه بازیابی الاستیک برای جلوگیری از تغییر شکل‌های دائم در روسازی‌ها مطلوب است (Yildirim, 2007). همچنین مقدار بازیابی الاستیک بالاتر، نشانگر مقاومت مطلوب‌تر در برابر خستگی است. آزمایش بازیابی الاستیک مطابق استاندارد AASHTO T301 به‌وسیله دستگاه کشش‌پذیری (ductility) انجام می‌پذیرد. در این آزمایش بعدازاینکه

در این پژوهش برای ساخت قیرهای اصلاح شده و بهبود عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی متخلخل از پلیمرهای EVA و SBR استفاده شده است. این پلیمرها با درصدهای ۴ و ۵ درصد وزنی قیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. درصدهای مورد استفاده پلیمرها حدود بهینه آنها در قیر بوده است. EVA از دسته پلاستومرها بوده و با ایجاد یک ساختار سخت و سه‌بعدی در قیر منجر به افزایش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل می‌گردد (Dekhli et. al., 2015). SBR از خانواده الاستومرها می‌باشد که مزایای آن شامل افزایش شکل‌پذیری، بهبود بازیابی الاستیک، افزایش ویسکوزیته و همچنین بهبود انسجام و چسبندگی در قیر است (Yildirim, 2007). خصوصیات پلیمرهای مصرفی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات پلیمرهای مورد استفاده

روش آزمایش	مقدار	خصوصیات / واحد
<b>EVA</b>		
ASTM D1505	۰/۹۳۹	وزن مخصوص / (g/cm <sup>3</sup> )
LG Method	۱۸	مقدار استایرن / (%)
ASTM D1238	۲/۵	شاخص ذوب / (gr/10min)
ASTM D2240	۸۵	سختی / (Shore A)
<b>SBR</b>		
ASTM D1646	۵۸ - ۴۶	Mooney viscosity @ 100 °C (MU)
ASTM D5668	< ۰/۷۵	مواد فرار / (wt%)
ASTM D5667	< ۱/۵	مقدار خاکستر / (wt%)
ASTM D5774	۷/۵ - ۴/۷۵	اسیدهای آلی / (wt%)
ASTM D5775	۲۴/۵ - ۲۲/۵	استایرن / (wt%)
ASTM D 412	> ۲۵۰	مقاومت کششی / (kg/cm <sup>2</sup> )

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- طرح اختلاط و تعیین قیر بهینه

برای اختلاط قیر و پلیمر و تولید قیرهای اصلاح شده از دستگاه Highshear mixer (Silverson) استفاده شده است. اختلاط قیر و پلیمرها در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد با تعداد دور ۳۵۰۰ دور در دقیقه و به

اشباع سپس به مدت ۱۶ ساعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند و پس از آن، به حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد منتقل شده و به مدت ۲۴ ساعت در آن نگهداری می‌شوند. در انتها به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. برای انجام آزمایش در شرایط خشک نیز، نیمی دیگر از نمونه‌ها را در درجه حرارت ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. بارگذاری آزمایش کشش غیرمستقیم، به وسیله ۲ تیغه موازی با سرعت ثابت ۵۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌شود و مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه اندازه‌گیری می‌شود. بعد از به دست آوردن مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها، مقاومت کششی غیرمستقیم از رابطه شماره ۳ محاسبه می‌شود (عامری و همکاران، ۱۳۹۴; AASHTO T283, 2014).

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

ITS: مقاومت کششی برحسب کیلو پاسکال، P: بیشینه بار برحسب نیوتن، D: قطر نمونه برحسب میلی‌متر، t: ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر. مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت (TSR<sup>۱</sup>)، نسبت مقاومت کششی نمونه‌های تر به خشک می‌باشد که هرچه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی مقاومت رطوبتی بهتر است.

### ۳-۶- آزمایش شیار جای چرخ

شیارشدگی یکی از خرابی‌های اصلی روسازی‌های آسفالتی است که به واسطه تغییر شکل‌های تجمعی و دائمی و برگشت‌ناپذیر در لایه‌های روسازی در اثر تکرار بار در دوره خدمت‌دهی روسازی وجود می‌آید (Ameri et al., 2018). شیار شدگی عمر خدمت‌دهی مفید روسازی را کاهش و با تحت تاثیر قراردادن خصوصیات کنترلی وسیله نقلیه خطرات جدی را برای استفاده‌کنندگان از راه ایجاد می‌کند (عامری و همکاران، ۱۳۹۴a). یکی از روش‌های اندازه‌گیری ویژگی تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش شیار جای چرخ<sup>۱۱</sup> می‌باشد. این آزمایش نسبت به آزمایش خزش دینامیکی، شیار شدگی را به دلیل وجود مهارجانبی در نمونه‌های آسفالتی، بهتر و شبیه‌تر به واقعیت ارزیابی می‌نماید. نمونه‌های آسفالتی توسط چرخ‌هایی با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (۱۴۰psi) مورد بارگذاری قرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

نمونه به مقدار مشخصی کشیده شد، نمونه از وسط بریده می‌شود و مدت مشخصی به نمونه اجازه داده می‌شود نمونه خود را بازیابی نماید. درصد بازیابی از رابطه ۱ به دست می‌آید (AASHTO T301, 2017).

$$ER\% = \frac{\text{طول بعد از بازیابی} - \text{طول کشیده شده}}{\text{طول کشیده شده}} \quad (1)$$

### ۳-۴- آزمایش مدول برجهنگی

مدول برجهنگی یکی از اصلی‌ترین پارامترهای مخلوط‌های آسفالتی است که با اعمال بار تکراری و اندازه‌گیری کرنش و رسم نمودار تنش-کرنش خصوصیات الاستیک مصالح را نشان می‌دهد. در این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D4123، برای اندازه‌گیری مدول برجهنگی ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای به مدت ۲۴ ساعت (جهت هم‌دم شدن کل نمونه) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس نمونه‌ها درون دستگاه UTM 5 قرار گرفته و بار ۴۰۰ کیلو نیوتن و دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه (۰/۹ ثانیه استراحت) به صورت کششی غیرمستقیم بر نمونه اعمال می‌گردد. مدول برجهنگی بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌گردد. نتیجه برای هر نوع مخلوط به صورت میانگینی از سه نمونه تحت آزمایش گزارش می‌شود (ASTM D4123, 1995).

$$M_R = \frac{P(v+0.2734)}{\delta t} \quad (2)$$

در فرمول ۳، M<sub>R</sub>: مدول برجهنگی برحسب مگا پاسکال، P: بار اعمال شده برحسب نیوتن، v: نسبت پواسون، δ: تغییر شکل قابل برگشت برحسب میلی‌متر، t: ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر.

### ۳-۵- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (AASHTO T283)

مقاومت کششی مخلوط آسفالتی به دلیل پیوستگی مخلوط آسفالتی ناشی از پیوند بین قیر و سنگ‌دانه به وجود می‌آید. وجود آب می‌تواند پیوستگی و چسبندگی در مخلوط‌های آسفالتی را کاهش و منجر به خرابی‌های رطوبتی شود. حساسیت رطوبتی می‌تواند مقدم‌های برای ایجاد و تشدید خرابی‌هایی دیگر از قبیل ترک‌خوردگی، شن زدگی و به‌ویژه شیار شدگی باشد. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم<sup>۹</sup> (AASHTO T283) برای ارزیابی خرابی رطوبتی یا ارزیابی عریان‌شدگی قیر از سطح مصالح سنگی یا از بین رفتن مقاومت نمونه‌های متراکم شده توسعه داده شده است (Liang, 2008). در این آزمایش حداقل ۶ نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیمی از نمونه‌ها تا سطح ۵۵ تا ۸۰

#### ۴- نتایج و تحلیل آن‌ها

##### ۴-۱- آزمایش درجه نفوذ

نتایج ارایه شده در شکل ۱ نشان می‌دهد با افزودن شدن پلیمرهای EVA و SBR به قیر و افزایش درصد پلیمر در قیر، مقدار درجه نفوذ کاهش پیدا می‌کند. کاهش درجه نفوذ نشان‌دهنده سخت‌تر شدن قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر پایه می‌باشد که منجر به افزایش مقاومت در بارهای سنگین در دماهای بالاتر می‌شود و این سخت‌شدگی و افزایش مقاومت، افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی را در پی دارد.

##### ۴-۲- آزمایش ویسکوزیته دورانی (RV)

نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی در شکل ۲ ارایه شده است، این آزمایش کمک می‌کند از کارایی قیر برای جابجایی و پمپاژ و اختلاط اطمینان پیدا کنیم. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود استفاده از پلیمر جهت اصلاح قیر موجب افزایش قابل توجه ویسکوزیته (۱,۳۷ تا ۴,۸ برابر) می‌گردد که بیشترین ویسکوزیته در قیر حاوی ۵ درصد پلیمر SBR اتفاق می‌افتد. افزایش ویسکوزیته از حد مجاز تعیین شده (۳ Pa.s) بسیار کمتر است. افزایش ویسکوزیته در قیرهای اصلاح شده علاوه بر اینکه می‌تواند منجر به افزایش چسبندگی گردد، این ویسکوزیته بالاتر باعث شکل‌گیری لایه‌های ضخیم‌تر قیر در اطراف سنگ‌دانه می‌شود به همین بهبود در خصوصیات روسازی از جمله مقاومت در برابر آب می‌تواند مورد انتظار باشد.

##### ۴-۳- آزمایش بازیابی الاستیک (ER)

بازیابی الاستیک (ER) معمولاً در اندازه‌گیری مقاومت خستگی قیر یا توانایی آن برای جذب تنش‌های بزرگ بدون ترک‌خوردگی یا تغییر شکل استفاده می‌شود. همچنین خصوصیات الاستیک قیر نیز وابسته به اصلاح‌کننده و همچنین درجه اصلاح شدن آن است. آزمایش بازیابی الاستیک با استفاده از قالب‌های مخصوص بر روی قیرهای خالص و اصلاح شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با میزان کشیدگی نمونه به طول ۲۰ سانتی‌متر انجام گردید و نتایج آن در شکل ۳ ارایه شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد حضور پلیمرها باعث افزایش میزان بازیابی قیر و در نتیجه بهبود خصوصیات ویسکوالاستیک قیر می‌گردد. SBR به دلیل الاستومر بودن نسبت به EVA عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد و موجب انعطاف‌پذیری بیشتری قیر می‌گردد.

#### ۴-۴- آزمایش مدول برجهندگی

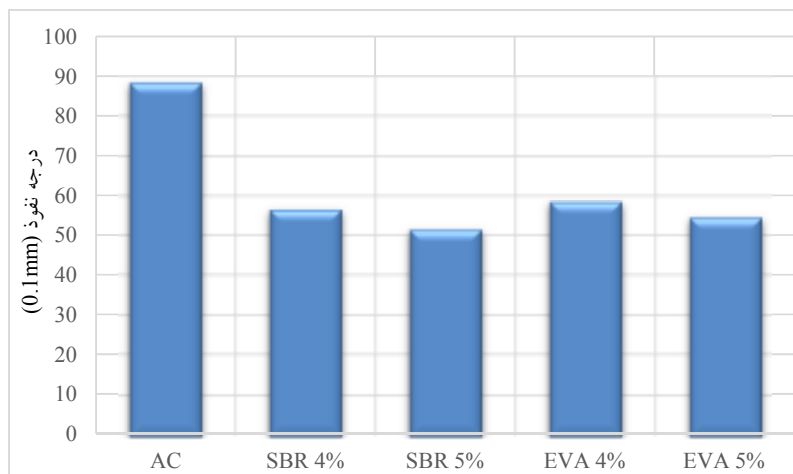
نتایج ارایه شده در شکل ۴ نتایج آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این نتایج بیانگر افزایش سختی و انسجام نمونه‌ها با افزودن پلیمر به قیر و افزایش درصد پلیمر مصرفی در مخلوط‌های آسفالتی است. بیشترین افزایش مدول برجهندگی در نمونه حاوی ۵ درصد SBR اتفاق می‌افتد. افزایش سختی و انسجام مخلوط‌های آسفالتی متخلخل به دلیل ایجاد شبکه به وسیله پلیمرها در قیر می‌باشد که منجر به افزایش چسبندگی و سختی در قیر می‌گردد.

##### ۴-۵- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (AASHTO T283)

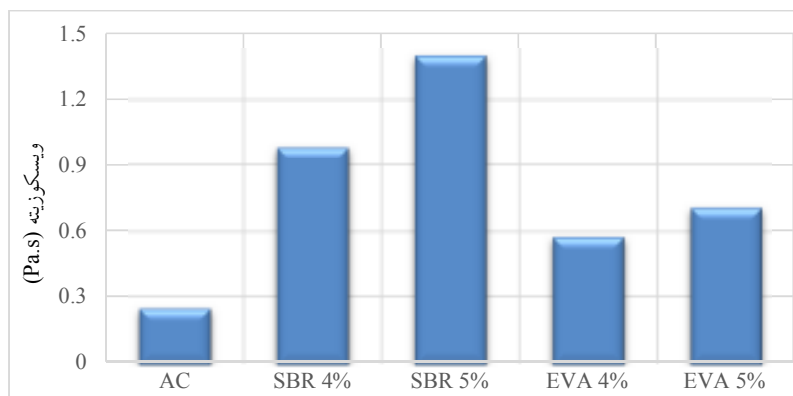
خصوصیات چسبندگی و انسجام نمونه‌ها در حالت خشک و تر با آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم مورد ارزیابی قرار گرفته است و همچنین نتایج آن در شکل ۵ ارایه گردیده است. بر اساس نتایج ارائه شده هر دو نوع پلیمر منجر به افزایش مقاومت کششی یا سختی نمونه‌ها در حالت خشک و تر می‌شوند که نشانگر افزایش چسبندگی قیر و افزایش چسبندگی و انسجام قیر و سنگ‌دانه در مخلوط آسفالتی متخلخل می‌باشد. عملکرد نمونه حاوی SBR بهتر از نمونه EVA می‌باشد که نشان می‌دهد به دلیل افزایش انسجام و انعطاف‌پذیری، نیروی بیشتری جهت از گسیختن این نمونه‌ها لازم است. نتایج TSR نشان می‌دهد حضور پلیمرها موجب تقویت پیوند سنگ‌دانه و قیر حتی در حضور آب می‌گردد به صورتی که مقدار TSR نسبت به نمونه شاهد ۳ تا ۱۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

##### ۴-۶- آزمایش شیار جای چرخ

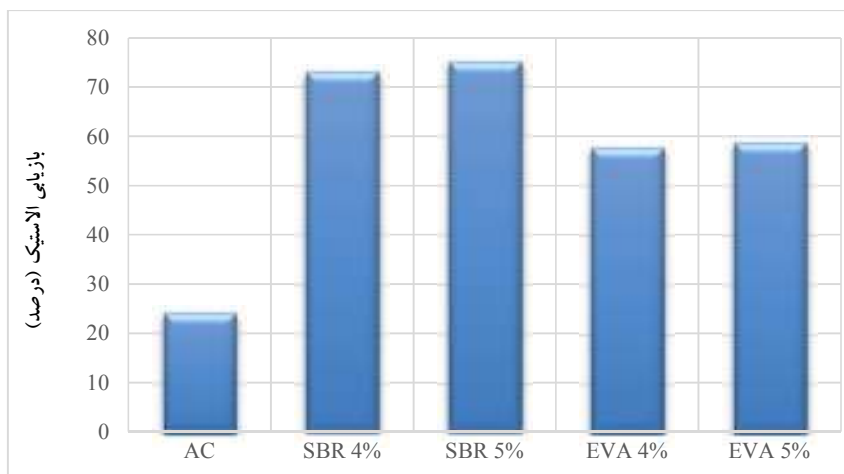
عمق شیار حاصله در آزمایش شیار جای چرخ را نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در نمونه‌های آسفالتی متخلخل اصلاح شده عمق شیار کمتری نسبت به نمونه اصلاح نشده ایجاد گردیده است که نشان‌دهنده اثر افزودنی‌ها پلیمری در افزایش سختی و تغییر شکل‌های الاستیک و کاهش پتانسیل شیار شدگی است. در این آزمایش نمونه حاوی ۵ درصد پلیمر EVA عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. EVA به دلیل ایجاد یک ساختار سخت‌تر در قیر و مخلوط آسفالتی متخلخل باعث افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی بیش از دو برابر نسبت به نمونه شاهد می‌شود.



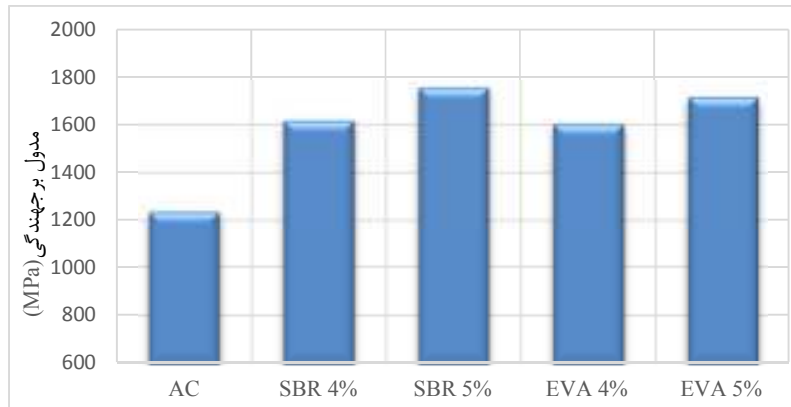
شکل ۱. نتایج آزمایش درجه نفوذ



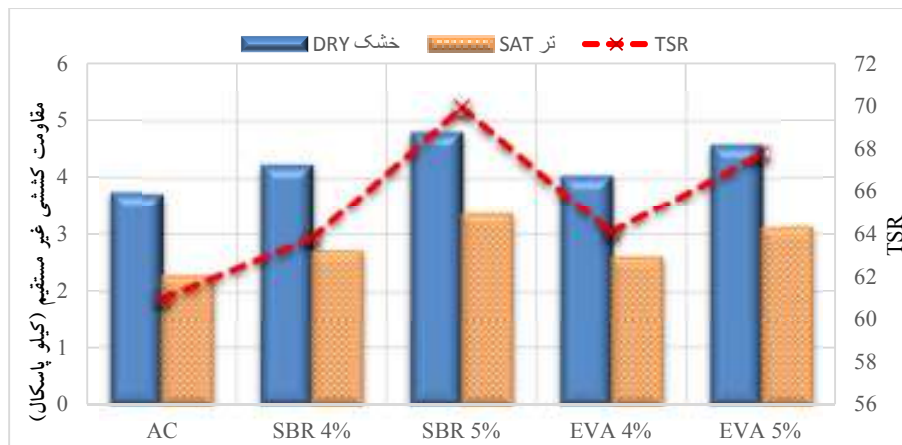
شکل ۲. نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی



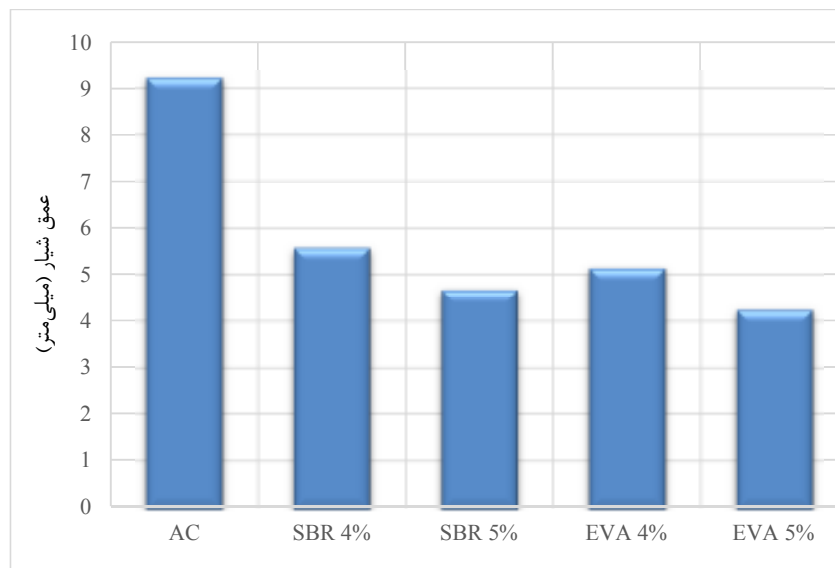
شکل ۳. نتایج آزمایش بازیابی الاستیک



شکل ۴. نتایج آزمایش مدول برجهندگی



شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و TSR



شکل ۶. نتایج آزمایش شیار جای چرخ



## تحلیل آماری یک طرفه ANOVA

به جهت بررسی بهتر نتایج، تحلیل آماری بر روی نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم و شیار شدگی انجام گرفته است. نتایج تحلیل یک طرفه انجام شده در جدول ۵ ارائه شده است، نتایج حاکی از بیشتر بودن انحراف معیار برون گروهی نسبت به انحراف معیار درون گروهی می باشد لذا می توان از تحلیل دوبه دو به روش توکی<sup>۱۲</sup> استفاده نمود.

نتایج این تحلیل بیانگر تأثیرگذاری به سزای پلیمرها در بهبود مقاومت شیار شدگی و کشش غیر مستقیم قیر اصلاحی نسبت به نمونه شاهد است. نکته قیل توجه عدم اختلاف معنادار بین اثر پلیمرها در بازه ی اطمینان ۹۵ درصد است. بنابراین اثرگذاری پلیمرهای مصرفی بر روی عملکرد شیار شدگی و کشش غیر مستقیم مخلوط تقریباً یکسان می باشد.

جدول ۵. نتایج تحلیل ANOVA و توکی بر روی نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم و شیارشدگی

ANOVA						شیارشدگی				
مقاومت کششی غیرمستقیم										
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.291	4	.573	3.671	0.43	49.561	4	12.390	15.165	.00
Within Groups	1.560	10	.156			8.170	10	.817		
Total	3.852	14				57.731	14			

Pairwise Tukey Statistical Analysis										
	AC	SBR 4%	SBR 5%	EVA 4%	EVA 5%	AC	SBR 4%	SBR 5%	EVA 4%	EVA 5%
AC	-	*	*	*	*	-	*	*	*	*
SBR 4%	*	-				*	-		*	
SBR 5%	*		-	*		*		-		*
EVA 4%	*	*		-		*	*		-	*
EVA 5%	*				-	*				-

## ۵- نتیجه گیری

هدف این پژوهش بررسی اثر پلیمرهای EVA و SBR بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی متخلخل است. نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- پلیمرهای مصرفی EVA و SBR با بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه مقاومت کششی مخلوط آسفالتی متخلخل را حتی در حضور آب افزایش می دهند که منجر به افزایش مقاومت در برابر رطوبت در مخلوطها آسفالتی اصلاح شده می گردد.
- با توجه به نتایج حاصل از شیار جای چرخ مقاومت مخلوطهای اصلاح شده با پلیمرها در برابر شیار شدگی به طور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا می کند. به صورتی که در نمونه حاوی ۵ درصد EVA عمق شیار ایجاد شده کمتر از نصف نمونه شاهد است.
- بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام گرفته بر روی قیرها و مخلوطهای آسفالتی، عملکرد نمونه های حاوی ۵ درصد پلیمر SBR بجز آزمایش شیار شدگی نسبت به پلیمر EVA بهتر است.
- بر اساس نتایج به دست آمده می توان عنوان کرد که پلیمرها با تغییراتی که در ساختار قیر به وجود می آورند موجب بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی از جمله چسبندگی، سختی و انعطاف پذیری قیر می گردند و نهایتاً این بهبود خصوصیات منجر به بهبود خصوصیات و مقاومت مخلوطهای آسفالتی متخلخل می گردد.

- اصلاح قیر به وسیله این پلیمرها موجب کاهش درجه نفوذ و افزایش سختی می گردد که این تغییرات منجر به بهبود دوام و عملکرد بهتر نسبت به قیر خالص می گردد.
- افزودن پلیمرها به قیر و افزایش درصد آنها باعث افزایش ویسکوزیته قیر می گردد که این افزایش ویسکوزیته موجب افزایش چسبندگی قیر می گردد. حداکثر مقدار ویسکوزیته ۱/۳۹ پاسکال ثانیه می باشد که در قیر حاوی ۵ درصد پلیمر SBR اتفاق می افتد، که مقدار آن از مقدار مجاز (۳ پاسکال ثانیه) بسیار کمتر می باشد.
- نتایج بازیابی الاستیک حاکی از افزایش انعطاف پذیری قیرهای اصلاح شده است که می تواند منجر به کاهش تغییر شکل های پلاستیک، افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی و خستگی شود.
- با توجه به نتایج مدول برجهندگی می توان گفت استفاده از قیرهای پلیمری انسجام و سختی را در مخلوطهای آسفالتی متخلخل افزایش داده است.

Highway and Transportation Officials.

-AASHTO T316., (2013), "Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer", American Association of State Highway and Transportation Officials.

-Afonso, M. L., Dinis-Almeida, M., & Fael, C. S., (2017), "Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibres", *Construction and Building Materials*, 135, pp.104-111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.222>.

-Ameri, M., Vamegh, M., Rooholamini, H., & Haddadi, F. (2018). Investigating Effects of Nano/SBR Polymer on Rutting Performance of Binder and Asphalt Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*, pp.1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/5891963>.

-ASTM D4123, (1995), "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous", *Annual Book of American Society for Testing Materials ASTM Standards*, 82(Reapproved), pp.2-5. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102299>.

-Dekhli, S., Mokhtar, K. A., Hammoum, F., & Bachir, D. S., (2015), "Rheological Behaviour of Ethylene-Vinyl-Acetate (EVA) Modified Road Bitumen". *Journal of Applied Sciences*, 15(3), pp.444-455. <https://doi.org/10.3923/jas.2015.444.455>.

-Gama, D. A., Rosa, J. M., De Melo, T. J. A., & Rodrigues, J. K. G. (2016). Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. *Construction and Building Materials*, 106, pp.290-295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.142>.

-Lewandowski, L. H. (1994). Polymer Modification of Paving Asphalt Binders. *Rubber Chemistry and Technology*, 67(3), pp.447-480. <https://doi.org/10.5254/1.3538685>.

-Liang, R., (2008), Refine AASHTO T283 resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage for superpave. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/860088>.

-Liu, Q., & Cao, D., (2009), "Research on material composition and performance of porous asphalt pavement", *Journal of Materials in Civil Engineering*. 21(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:4\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:4(135)).

-Luo, S., Lu, Q., & Qian, Z., (2015), "Performance evaluation of epoxy modified open-graded porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 76, pp.97-102.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Porous Asphalt
- 2- Ethylene-Vinyl Acetate
- 3- Styrene-Butadiene Rubber
- 4- Cantabro Test
- 5- Draindown Test
- 6- Superpave Gyrotory Compactors
- 7- Rotational Viscosity
- 8- Elastic Recovery
- 9- Indirect Tensile Strength (ITS) test
- 10- Tensile Strength Ratio
- 11- Wheel Track Test
- 12- Pairwise Tukey Statistical Analysis

۷- مراجع

-امیر فرهنگ، ف. (۱۳۸۶)، "آسفالت متخلخل"، وزارت راه و ترابری، دبیرخانه مجمع جهانی راه (پیارک)، انتشارات پژوهشکده حمل و نقل.

-بهبهانی، ح. رحمانی، ج. و صادقی، ا. (۱۳۸۷)، "ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر پلیمر SBS بر پارامترهای مقاومتی آسفالت متخلخل"، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور. سمنان.

-عامری، م. و امق، م. روح الامینی، ح. و بمانا، ک. (۱۳۹۴)، "ارزیابی اثر نانو رس بر رفتار تغییر شکل دائم مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA)"، مهندسی عمران مدرس، ۱۵(۳)، ص. ۱۴۹-۱۵۸.

-عامری، م. و امق، م. روح الامینی، ح. و بمانا، ک. (۱۳۹۴)، "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانو رس"، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی حمل و نقل، ۶(۴)، ص. ۶۱۳-۶۲۶.

-منصوریان، ا. جایروند، ک. و فخری، م. (۱۳۹۵). "بررسی عملکرد میدانی آسفالت متخلخل حاوی الیاف سلولزی و قیر پلیمری"، جاده، ۲۴(۸۶)، ص. ۶۹-۸۰.

-AASHTO T283, (2014), "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage", American Association of State Highway and Transportation Officials.

-AASHTO T301, (2017), "Standard method of test for elastic recovery of asphalt materials by means of a ductilometer", American Association of State

(2017), "A complete laboratory assessment of crumb rubber porous asphalt", *Construction and Building Materials*, 132, pp.500–507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.016>.

-Shirini, B., & Imaninasab, R., (2016), "Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 107, pp.165–171.

Yildirim, Y., (2007), "Polymer modified asphalt binders", *Construction and Building Materials*, pp.21- 66.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.057>.

-Mallick, R. B., Kandhal, P. S., Cooley Jr., L. A., & Watson, D. E., (2000), "Design, Construction, and Performance of New-Generation Open-Graded Friction Courses". NCAT Report 00-01, (April), 26.

-Mostafa, V., & Mahmoud, A., (2018), "Rutting performance of road pavement asphalt binders modified by polymers. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, pp.1–19. <https://doi.org/10.1680/jcoma.17.00073>

-Sangiorgi, C., Eskandarsefat, S., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., & Dondi, G.

## **Investigation of the Effect of Polymers on the Binder and Porous Asphalt Mixtures**

*M. Vamegh, Ph.D., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*M. Ameri, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*A. Jarrahi, Ph.D., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Email: mostafa\_vamegh@yahoo.com*

Received: September 2019-Accepted: December 2019

### **ABSTRACT**

The safety and convenience of road users have been affected straightly by the pavement surface condition, which would be more serious in special weather conditions. The reduction in skid resistance between tire and pavement surface, splashing, spray, unpleasant light reflection and reduce in driving safety can be count as consequence of water existence on the road surface. Porous Asphalt are using as permeable surface layer which can increase the safety and reduce the noise pollution. This study is focusing on modified porous asphalt with two different types of polymers, one elastomer and one plastomer. The samples has been prepared with 85-100 penetration grade bitumen, lime aggregates, stone powder filler and SBR and EVA polymer in two different content (4 and 5 percentage of bitumen weight). The penetration test, rotational viscosity and elastic recovery test has been performed on the modified bitumen. Moreover, the porous asphalt samples have been tested by resilient modulus test, indirect tensile stress test and wheel track test. Results of bitumen tests shows enhancement in stiffness, viscosity and flexibility of bitumen which improves the bitumen's performance. In addition, asphalt mixture test results show higher cohesion and adhesion in porous asphalt compared to the control sample, which is the reason of improvement in moisture sensitivity and rutting. Among the all tested samples, the SBR modified samples shows a better performance.

**Keywords:** Porous Asphalt, Polymer Modified Binder (PMB), Rotational Viscosity, Elastic Recovery, Rutting