

# ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات شیارشدگی قیرهای اصلاح شده با پلیمر و بررسی رابطه آن با مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی

## مقاله پژوهشی

امین چوبدار، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

امین فرج اللهی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۹۹/۰۶/۰۵

صفحه ۹۱-۱۰۲

## چکیده

در این تحقیق خصوصیات شیارشدگی قیر و مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، قیرها دارای درجه عملکردی بالای یکسان (PG 76-XX) و مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی پیوسته می باشد. سه نوع پلیمر Elvaloy SBS و SBR و PPA جهت اصلاح قیر انتخاب شدند. آزمایشات نقطه نرمی، رئومتر برش دینامیکی، خزش چندگانه و بازیابی و آزمایش جاروب فرکانس بر روی قیرهای اصلاح شده و آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوط آسفالتی انجام شد. نتایج نشان داد رتبه بندی پارامترهای قیر و مخلوط برای پارامترهای  $Jm$  عدد روانی مخلوط یکسان بود. همچنین کاربرد پارامتر  $G^*/\sin\delta$  نیز قابل تامل می باشد.

واژه‌های کلیدی: قیر، درجه عملکردی، شیارشدگی، عدد روانی، پلیمرها، پلی فسفوریک اسید

## ۱-مقدمه

Dreessen et al, 2009, Fontes et al, 2010, Golalipour, 2011, Martins et al, 2011, Onofre et al, 2013, Saboo et al, 2013) در مطالعاتی دیگر به دست آمده است. با ظهور خصوصیات سوپرپیو در دهه ۱۹۹۰، رئومتر برشی دینامیک (DSR) به عنوان یک دستگاه جدید برای اندازه گیری سختی کل قیر (مدول برشی پیچیده G) و قابلیت ارتجاعی نسبی آن (زاویه فاز d) معرفی شد. پارامتر  $G/\sin\delta$  سند نیز به عنوان شاخص پتانسیل شیارشدگی ماده در دمای بالای روسازی پیشنهاد شد، و برای قیرها بدون افزودنی در مخلوط به خوبی عمل کرده است (et al, 1998) (Sherwood). با توجه به نگرانی‌های مربوط به قابلیت کاربرد آن در مواد اصلاح شده، محققان به دنبال جایگزین بوده‌اند و تکنیک‌ها یا پارامترهای دیگر را برای جایگزین

شیار شدگی یک مکانیزم خرابی بسیار رایج مشاهده شده در روسازی‌های آسفالتی انعطاف پذیر است. به طور معمول، شیار شدگی با فرورفتگی در مسیر چرخ مشخص می شود و برش مخلوط می تواند در امتداد کف روسازی رخ دهد. این فرورفتگی ها ممکن است بسته به سرعت وسیله نقلیه، شرایط تراکم و دمای آب و هوا، گسترش از برخی متر تا چندین کیلومتر را پوشش دهند. برای جلوگیری یا حداقل به حداقل رساندن تشکیل شیارافتادگی، اصلاح کننده هایی مانند پلیمرها، لاستیک خرد شده و اسید فسفریک (PPA) به قیر اضافه شده اند. افزایش مقاومت قیر به تنهایی (et al, 2014, ) (D'Angelo, 2010, D'Angelo, 2012, Domingos et al, 2016, Bulatovic al, 2016, Tarefder et al, 2016) و یا مخلوط (Bahia et al, 2001, D'Angelo et al, 2007,

مخلوط بر عهده ذرات سنگ دانه است. سیفیدمزیگی و همکاران (Sefidmazgi et al, 2013) شاخص ساختار داخلی (ISI) را برای گروه‌بندی نماینده‌ترین متغیرهای اسکلت - تعداد نقاط تماس، طول این تماس‌ها و جهت گیری آن‌ها - تنها به یک پارامتر توسعه دادند، و همبستگی قوی بین ISI و FN مشاهده شد. اگر چه پارامترهای شیار شدگی قبلی در مشخصه شیارشدگی فعلی در نظر گرفته نشده‌اند، برخی از آن‌ها هنوز در چند سند اخیر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

می‌توان مشاهده کرد که چنین تحلیل‌هایی با اعتبار سنجی بیشتر یکی یا تعداد بیشتری از این پارامترها، شناسایی مشابهت یا اختلاف آنها، پیشنهادات یا اصلاحات در پروتکل تست‌ها یا دلایل دیگر. در هر دو مورد، ممکن است استنباط شود که ویژگی‌های ذاتی قیر اصلاح‌شده، محققان را برای مدتی طولانی مورد توجه قرار داده، و تلاش آن‌ها برای یافتن بهترین پروتکل/ پارامتر تست هنوز یک فرآیند جاری است.

## ۲- پیشینه تحقیق

براساس بحث‌های ذکر شده در مورد پارامترهای شیارافتادگی مختلف و نوآوری‌های اخیر در توصیف حساسیت این مواد به شیارافتادگی، مطالعه حاضر عمدتاً با هدف ارزیابی عملکرد شیارافتادگی قیرهای اصلاح‌شده که با مشخصات دمای بالای قیر یکسان (PG ۷۶<sup>۸</sup> XX -) درجه‌بندی شده‌اند و مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج ارائه‌شده توسط مخلوط‌های آسفالت گرم با استفاده از پارامتر عدد روانی می‌باشد. اهداف ثانویه را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

- شناسایی شباهت‌ها و تفاوت‌های بین نتایج آزمایشات قیر و (در صورت امکان) مشاهده الگوهای رفتاری؛
- بررسی تاثیر مقدار کم‌تر پلیمر و افزودن مقادیر کم PPA بر مقاومت قیرها و مخلوط‌ها در برابر شیارافتادگی؛
- برای گزارش پروتکل آزمایش که بهترین نتایج را به دست می‌دهد و رتبه‌بندی مشابهی از کم‌ترین تا بالاترین پتانسیل شیار شدگی را ارائه می‌دهد.

کردن روش‌های اصلی پیشنهاد داده‌اند، که بسیاری از آن‌ها در مقاله مرور متون دومینگو و فاکسینا مورد بحث و بررسی قرار گرفته و خلاصه شده‌اند (Domingos et al, 2016). این پارامترها عبارتند از:  $|G|/[1 - (1/\tan\delta)]$ ، ویسکوزیته ذخیره،  $(ZSV)^3$ . در نتیجه این مطالعات بعدی، پروتکل‌های خزش مکرر مانند خزش و بازیابی تنش چندگانه - MSCR (D'Angelo, 2010, et al, 2007) و به دنبال آن - تست خزش و بازیابی مکرر، یا  $RCRT^5$  - به عنوان جایگزین برای تست برش نوسانی  $G/\sin\delta$  طراحی و پیشنهاد شدند. پارامتر  $Jnr$  را در نسخه‌های بازبینی‌شده سوپریو جایگزین کرد. مشخصات اصلی جدول ۱ در استاندارد Aashto M ۳۲۰ (-, 2009) (AASHTO M320) نیز می‌تواند توسط شرکت‌ها و آژانس‌های بزرگراه مورد استفاده قرار گیرد، و به عنوان سیستم طبقه‌بندی پیش‌فرض در نظر گرفته می‌شود. اولین اصلاحیه در مورد ویژگی اشته در سال ۲۰۰۹ (2009, AASHTO M320) به عنوان یک جدول جدید ساخته شد (جدول ۳) تا  $Jnr$  را در ۲ / ۳ کیلو پاسکال به عنوان یک پارامتر جدید شیارشدگی قیر قرار دهد. هر دو پروتکل  $RCRT$  و  $MSCR$  براساس آزمون‌های خزش مکرر برای مخلوط‌های آسفالت بودند - به طور خاص، تست برش تکرار شده در ضخامت ثابت. متفاوت از تست‌های دیگر مانند مدول دینامیکی، تست خزش دینامیکی و خروجی اصلی آن - عدد روانی (FN) - به نظر می‌رسد به عنوان گزینه‌های مناسب برای مطالعه تکامل پدیده شیار شدگی در مخلوط و تخمین مقاومت مربوطه آن پذیرفته شده‌است (Apeagevi, 2014, Zhang et al, 2013). علاوه بر این، مقالات اشاره می‌کنند که  $Jnr$  می‌تواند اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری از عملکرد شیار شدگی قیرها ارائه دهد و به وضوح بین موادی با مقادیر مشابه  $G^*/\sin\delta$  و نقطه نرمی تمایز قابل شود. لازم به ذکر است که دانه‌بندی و اسکلت مصالح سنگی در مخلوط نیز برای مقاومت شیارافتادگی مخلوط مهم هستند، چون بخش عمده تحمل شیارشدگی

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- مواد و مصالح

به وزن قیر است، تهیه گردید. کوپلیمر استیرن - بوتادی استیرین (<sup>9</sup>SBS) سه بلوکی که حاوی مقدار استیرن ۳۱٪ می‌باشد، تهیه گردید. پلیمر (<sup>10</sup>SBR) حاوی مقدار کل استیرن ۲۵٪ و افزودنی (PPA) نیز مورد استفاده قرار گرفت.

مواد زیر در تهیه نمونه‌های قیر مورد استفاده قرار گرفتند: در این تحقیق، قیر اصلی ۶۰ / ۷۰ از پالایشگاه پاسارگاد و با درجه عملکردی پیوسته ۶۶،۳ درجه سانتیگراد تهیه گردید. همچنین پلیمر Elvaloy که حاوی ۸٪ مونومر اپوکسی نسبت

جدول ۱. اطلاعات در مورد قیرها و مخلوط‌ها و نتایج آزمایش نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر

AC+SBR+PPA	AC+SBR	AC+SBS+PPA	AC+SBS	AC+Elvaloy+PPA	قیر پایه	توضیحات	متغیر
94.8	92.5	96	95.3	97.8	100	درصد قیر (درصد وزنی (%))	درصد‌های مواد افزودنی و دمای عملکردی برای ترکیبات
4.5	7.5	3.4	4.7	1.6	-	درصد مواد افزودنی	
0.7	-	0.6	-	0.5	-	درصد PPA	
76-xx/76.6	76-xx/77.4	76-xx/76.9	76-xx/78	76-XX/76.6	64-XX/66.3	درج عملکردی/درجه دقیق	
low	low	high	high	low	-	سطح تنش	متغیرهای پردازش ترکیبات
180	180	180	180	190	-	دمای اختلاط	
120	120	120	120	120	-	زمان اختلاط	
300	400	4000	4000	300	-	سرعت چرخش	
4.9	5	5	5	4.8	4.4	درصد قیر	مشخصات مخلوط
7-7.1	6.9-7.1	6.9-7.1	6.9-7.1	6.8-6.9	6.9-7.1	درصد هوا	
177	177	177	177	177	154	دمای اختلاط	
177	174	169	170	170	142	دمای تراکم	
59.8	59.6	59.3	60.4	61	50.3	نقطه نرمی	نتایج
1.27	1.58	1.17	1.41	1.42	0.39	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵	
0.85	1.05	0.74	0.81	0.91	0.27	ویسکوزیته در دمای ۱۴۳	
0.62	0.77	0.55	0.57	0.64	0.19	ویسکوزیته در دمای ۱۵۰	
0.37	0.47	0.34	0.36	0.36	0.12	ویسکوزیته در دمای ۱۶۳	
0.22	0.3	0.2	0.22	0.21	0.07	ویسکوزیته در دمای ۱۷۷	

#### ۳-۲- تهیه نمونه‌ها

مشخصه سوپریپو طبقه‌بندی شده‌اند که توسط استاندارد Aashto M320-09، (AASHTO M320, 2009) ارزیابی شده‌است.

یک میکسر با برش بالا برای ترکیب قیر با مواد افزودنی مذکور در درصد‌های نشان داده شده در جدول ۱ استفاده شدند. تمام فرمولاسیون‌ها به صورت PG76-xx در

#### ۳-۳- آزمایشات قیر

##### رئومتر برش دینامیکی

رفتار الاستیک و ویسکوز قیر را در دماهای متوسط تا دماهای بالا توصیف کند. مدول مرکب ( $G^*$ ) و زاویه فاز

به منظور مشخص کردن ویژگی‌های اساسی ریولوژیکی قیر، تست DSR انجام شد. این تست می‌تواند به درستی

### آزمایش تنش خزشی دوگانه و باربرداری (MSCR)

جهت ارزیابی حساسیت قیرها در برابر تغییرشکل دائمی یا شیارشدگی، روش MSCR معرفی شده است. روند آزمایش بر این اساس است که یک نمونه قیر به قطر ۲۵ میلیمتر و ضخامت ۱ میلی متر در معرض ۱۰ سیکل بارگذاری با ۱ ثانیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دمای عملکردی زیاد (دمای ۶۴ درجه سلسیوس) با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیک قرار می‌گیرد. قبل از انجام آزمایش نمونه قیر، پیرشده کوتاه مدت می‌شود. درصد بازگشت کرنش و مدول غیر قابل بازگشت بعد از ۱۰ سیکل بارگذاری محاسبه خواهد شد. شماتیک دستگاه در شکل ۱ آورده شده است:

(d) پارامترهای اصلی ویسکو الاستیک هستند که در این تست اندازه‌گیری می‌شوند. پارامتر  $G$  اطلاعاتی را در مورد مقاومت قیر به تغییر شکل هنگامی که در معرض بار برشی قرار می‌گیرد، فراهم می‌کند. پارامتر  $d$  تاخیر زمانی بین تنش‌های برشی اعمال شده و پاسخ‌های کرنش برشی را نشان می‌دهد. تحلیل این دو پارامتر می‌تواند رفتار قیر مانند پتانسیل شیارشدگی را پیش‌بینی کند. پارامتر  $G^* / \text{Sind}$  که پارامتر شیارشدگی نامیده می‌شود مقاومت شیارشدگی قیر را نشان می‌دهد. نمونه‌های قیر با ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۲۵ میلی‌متر با فرکانس ۱۰ rad/s و در دمای ۶۴، ۵۸، ۵۲، ۴۶، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد با توجه به روش آزمون استاندارد ASTM - D ۱۷۱۷۵، تست شدند. مقدار  $G / \text{Sind}$  برای قیرهای پیرنشده توصیه می‌شود که با توجه به استاندارد، ASTM - DV175 بیش از ۱ کیلو پاسکال باشد.



شکل ۱. دستگاه رئومتر برش دینامیکی

انتهای هر سیکل باربرداری محاسبه می‌شود. معادله (۲) نیز میزان درصد بازگشت کرنش را نشان می‌دهد.

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0$$

مقدار مدول غیرقابل بازگشت ( $J_n r$ ) همان طور که در معادله (۳) آمده است، نسبت مقدار کرنش باقیمانده در نمونه بعد از بارگذاری و باربرداری به تنش اعمالی است که مقدار مقاومت نمونه را در برابر تغییرشکل دائمی نشان می‌دهد. پارامتر  $J_n r$  مقدار کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای ۹ ثانیه باربرداری می‌باشد. پارامتر  $\tau$  تنش برشی اعمالی می‌باشد. مقدار مدول غیرقابل بازگشت توانایی پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفاتی را دارد. حساسیت

مقدار کرنش اعمالی، درصد بازگشت کرنش، و مقدار مدول غیر قابل بازگشت برای هر ۱۰ سیکل در هر سطح تنش براساس فرمول‌های ارائه شده در زیر محاسبه می‌شود:

$$PR = \frac{\varepsilon_{10} - \varepsilon_0}{\varepsilon_1} \times 100 \quad (1)$$

$$J_{nr} = ave. \frac{\gamma_u}{\tau} \quad (2)$$

$$(3)$$

مقدار کرنش اولیه ( $\varepsilon_0$ ) در شروع بارگذاری خزشی در هر سیکل و مقادیر کرنش در انتهای هر سیکل ( $\varepsilon_c$ ) تعیین می‌گردد. اختلاف دو کرنش به عنوان کرنش اعمالی است ( $\varepsilon_1$ ). به طور مشابه، مقدار کرنش ( $\varepsilon_r$ ) در انتهای باربرداری در هر سیکل و کرنش اعمالی بعد از باربرداری ( $\varepsilon_{10}$ ) در

#### ۴- تحلیل نتایج

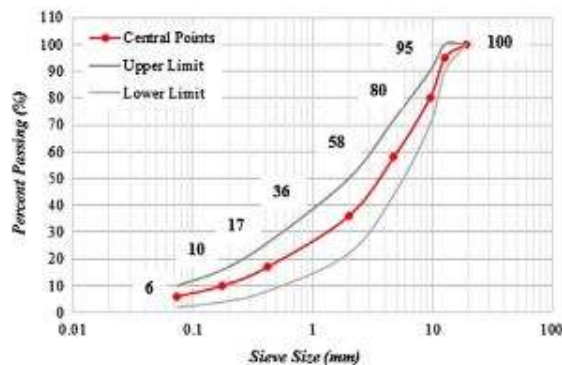
##### ۴-۱- آزمایشات فیزیکی و ویسکوزیته چرخشی

جدول ۱ نتایج آزمون‌های نقطه نرمی و ویسکوزیته چرخشی برای قیر پیر نشده و پیرشده کوتاه‌مدت را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، اصلاح قیر با یک یا چند افزودنی به‌طور قابل‌توجهی نقطه نرمی و ویسکوزیته را در دماهای ۱۳۵ تا ۱۷۷ درجه سانتی‌گراد افزایش داد و این دو اثر بعد از پیرشدگی کوتاه مدت افزایش یافت. جالب توجه است که برای مواد اصلاح‌شده با SBS, SBR و شرایط غیر پیرشدگی، حضور PPA و کاهش درصد پلیمر معمولاً نقطه نرم شدن و مقادیر ویسکوزیته را در تمام فاصله‌های دمایی کاهش می‌دهد. این نشان می‌دهد که کارایی ترکیب بندی بهبود یافت و براساس مشاهدات تجربی، سختی آن کاهش می‌یابد. با این حال، این امکان وجود ندارد که بگوییم چنین تغییراتی تنها توسط مقدار کم‌تر پلیمر و یا اضافه شدن PPA ایجاد شده‌اند. زیرا هر دو درصد از یک ماده به ماده دیگر تغییر می‌کنند. آنچه که می‌توان گفت این است که PPA تا حدی به تفاوت‌های بالاتر بین نتایج نمونه‌های قدیمی و نمونه‌های قدیمی آسفالت مربوط می‌شود. مشخص است که PPA می‌تواند به بهبود کارایی ترکیب بندی‌ها، برآورده کردن الزامات استاندارد سوپریو، بهبود درجه PG بالا و کاهش دمای اختلاط و تراکم کمک کند. در برخی موارد، خواص دمای پایین قیر نیز بهبود می‌یابد. یکی از نگرانی‌های عمده در مورد PPA این است که قیر ممکن است به‌طور منفی تحت‌تأثیر حضور این اسید قرار گیرد، زیرا به‌طور معمول مقدار آسفالتین‌ها را افزایش می‌دهد و ممکن است منجر به پیری زودرس آسفالت شود. با این حال، مطالعات میدانی انجام‌شده توسط کلاید و همکاران [۳۲] با چهار بخش روسازی - یک بخش اصلاح‌شده با PPA به تنهایی، یک مورد اصلاح یافته با SBS و دو مورد اصلاح یافته دیگر تهیه‌شده با SBS + PPA و Elvaloy + PPA - نشان داد که تنها پس از پنج سال از عمر خدمت، می‌توان حداقل شیار و خرابی ترک را مشاهده کرد که با استفاده از PPA به عنوان یک اصلاح‌کننده قیر بهبود می‌یابد.

نسبت به تنش خزشی نمونه‌های قیری به صورت درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت می‌باشد. این پارامتر، مقدار افزایش در مقدار پارامتر Jnr را وقتی تنش از ۱۰۰ پاسکال به ۳۲۰۰ پاسکال افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. در عمل، این پارامتر مقدار حساسیت قیر به شیارشدگی زمانی که بارهای ترافیکی مختلف به ساختار مخلوط یا دمای غیرمنتظره در سطح روسازی اعمال شود، نشان می‌دهد.

##### ۳-۴- نمونه‌های مخلوط آسفالتی و آزمایش مخلوط

نمونه‌های مخلوط آسفالتی با توجه به ترکیب بندی ذکر شده در جدول ۱ و مصالح سنگی بازالتی تهیه شدند. منحنی دانه بندی مصالح سنگی که منطبق با حد وسط دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ که در شکل ۲ نشان داده شده است (Leite 1994)، انتخاب شد. یک متراکم کننده چرخشی ژیراتوری سوپریو در تراکم نمونه‌ها (سه تکرار برای هر مخلوط آسفالت) تا فضای خالی هدف  $7 \pm 0.5\%$  مورد استفاده قرار گرفت. دمای آزمایش ۶۰ درجه سانتی‌گراد بود که انتظار می‌رود بدترین شرایط آب و هوایی را در طول بازسازی روسازی نشان دهد. که همچنین بالاترین دمای تست توصیه‌شده توسط ویزاک و همکاران است (et al, Witzczak 2002). درصد قیر براساس مطالعات قبلی توسط Onofre و همکارانش به دست آمد (Onofre et al, 2013). قبل از شروع آزمایش، سطح بالایی هر نمونه با یک لایه گچی پوشانده شد تا از توزیع یکنواخت بار در سراسر ماده اطمینان حاصل شود. پس از یک زمان خیساندن ۱۰ دقیقه‌ای در اتاق یک دستگاه، باهای دینامیکی در مخلوط با ظرفیت ۵،۲ کیلو پاسکال اعمال شدند. به محض اینکه ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری - باربرداری اعمال شد یا منطقه خزش مرحله سوم به دست آمد، آزمایش متوقف شد، هر کدام که زودتر اتفاق افتاد. پالس‌ها شامل زمان خزش ۰،۱ ثانیه و زمان بازیابی ۰،۹ ثانیه بودند (et al, 2002 Witzczak).



شکل ۲. منحنی دانه بندی نمونه‌های مخلوط آسفالتی

در نقطه نرمی آن‌ها است. چون  $G^*/Sind$  عدد در محدوده خطی ویسکوالاستیک قیر محاسبه می‌شود و وزن الاستیسیته در این پارامتر کافی نیست، می‌توان اشاره کرد که همبستگی‌ها با داده شیارشدگی مخلوط خیلی خوب نخواهند بود. با این حال، این مورد همه مطالعات نیست زیرا برخی نویسندگان نشان داده‌اند که  $G^*/Sind$  به عنوان یک پارامتر شیار شدگی ارزش دارد و می‌تواند مواد اصلاح نشده و اصلاح شده را به طور مشابه مانند  $Jnr$  و پارامترهای دیگر رتبه‌بندی کند. این بدان معنی است که اگر چه تست  $MSCR$  و  $Jnr$  به وضوح می‌تواند بین رفتار شیارافتادگی و پاسخ‌های الاستیک قیرهای آسفالت اصلاح شده نسبت به  $G^*/sind$ ، آسفالت اصلی تمایز قایل شوند، این پارامتر را نمی‌توان در مطالعات علمی و میدانی نادیده گرفت. همچنین، هر دو پارامتر در این مقاله محاسبه شدند زیرا مقایسه بین نتایج آن‌ها هنوز هم به نظر می‌رسد که موضوع مورد توجه در مقالات باشد. شکل‌های ۳ و ۴ مقادیر بازگشت کرنش قیرها را به ترتیب در ۰٫۱ و ۳٫۲ کیلو پاسکال نشان می‌دهند. این پارامتر به عنوان یک جایگزین برای بازیابی الاستیک به دست آمده در تست شکل‌پذیری پیشنهاد شده است و می‌تواند حضور یک اصلاح‌کننده پلیمری در قیر و نیز میزان و استحکام شبکه پلیمر در ترکیب را نشان دهد. مقادیر بالاتر  $R$  برای کاربردهای آسفالت سازی مطلوب هستند زیرا مقدار کرنش دائمی در هر چرخه کاهش می‌یابد. با این حال، الاستیسیته به تنهایی لزوماً به مخلوط‌های مقاوم‌تر مربوط نمی‌شود زیرا همبستگی‌های بین  $R$  و متغیرهای مخلوط قابل توجه نبودند و به متغیرهای بیشتری مانند آن‌هایی که مرتبط با سنگدانه هستند، وابسته هستند.

نتایج در جدول ۱ نیز نشان می‌دهد که به طور کلی، نقطه نرم شدگی و ویسکوزیته چرخشی از حالت بدون پی‌رگی تا شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت از ۱۰٪ تا ۲۲۰٪ افزایش می‌یابد. اعتقاد بر این است که مقادیر پایین‌تر  $SBS$  و  $SBR$  در  $AC + SBS + PPA$  و  $AC + SBR + PPA$  ممکن است به وجود مقادیر بیشتری از بخش‌های سبک در قیر کمک کرده باشند که پس از تأثیر گرما و هوا در گرمخانه پیرشدگی تبخیر شده‌اند. از سوی دیگر، حضور درصد بیشتری از آسفالتین‌ها در ترکیب قیر به علت  $PPA$ ، سفتی (نقطه نرم شدن) و قوام (ویسکوزیته) را در نرخ‌های بالاتر در مقایسه با شرایط غیر پیرشدگی مربوطه افزایش می‌دهد. یک تحلیل کلی نشان می‌دهد که  $AC + SBR$  ماده با حساسیت کمتری نسبت به پیری است و پس از آن  $AC + SBS$  و قیر پایه ۵۰ / ۷۰ قرار دارند.

#### ۴-۲- خزش و بازیابی تنش چند گانه ( $MSCR$ )

جدول ۲ مقادیر برش  $G^*/Sind$  قیرها در دماهای بین ۵۲ تا ۷۶ درجه سانتی‌گراد، و همچنین مقادیر پارامتر  $Jnr$  از تست  $MSCR$  را نشان می‌دهد. براساس داده‌های  $G\ sind$  گزارش شده، می‌توان گفت که  $AC +$  و  $AC + SBS + PPA$  و  $SBR + PPA$  کم‌تر مستعد کرنش دائمی تجمعی نسبت به نمونه‌های متناظر بدون  $PPA$  هستند. همچنین  $AC + Elvaloy + PPA$  مقاومت شیارافتادگی بسیار پایین تری را نشان می‌دهد و با مقاومت  $AC + SBS$  و  $AC + SBR$  قابل مقایسه است. به عبارت دیگر، حضور  $PPA$  در ترکیب های مختلف و استفاده از محتوای پایین‌تر پلیمر برای بهبود مقاومت شیارشدگی قیر مطلوب بود. این در توافق با درجه سختی بالاتر قیر اصلاح شده با  $PPA$  است که در این ادبیات موضوع یافت شده است و تا حدودی سطوح بالاتر افزایش

جدول ۲. چند نتیجه از پارامترهای قیر و مخلوط آسفالتی

AC+SBR+PP A	AC+SB R	AC+SBS+PP A	AC+SB S	AC+Elvaloy+PP A	قیر پایه	توضیحات
43.35	28	48.87	31.14	25.55	17.69	نتیجه در دمای ۵۲ درجه (کیلو پاسکال)
19.81	13.25	22.38	14.36	12.5	7.07	نتیجه در دمای ۵۸ درجه (کیلو پاسکال)
9.29	6.42	10.31	6.77	6.47	2.98	نتیجه در دمای ۶۴ درجه (کیلو پاسکال)
4.55	3.24	4.82	3.26	Jan-00	1.33	نتیجه در دمای ۷۰ درجه (کیلو پاسکال)
2.34	1.71	2.36	1.63	2.01	0.62	نتیجه در دمای ۷۷ درجه (کیلو پاسکال)
0.081	0.138	0.069	0.133	0.053	0.487	نتیجه در دمای ۵۲ درجه
0.206	0.325	0.166	0.275	0.125	1.295	نتیجه در دمای ۵۸ درجه
0.5	0.715	0.401	0.579	0.304	3.214	نتیجه در دمای ۶۴ درجه
1.157	1.485	0.971	1.24	0.741	7.488	نتیجه در دمای ۷۰ درجه
2.571	3.189	2.533	3.142	1.741	15.851	نتیجه در دمای ۷۷ درجه
0.089	0.159	0.082	0.156	0.065	0.49	نتیجه در دمای ۵۲ درجه
0.244	0.418	0.234	0.41	0.151	1.325	نتیجه در دمای ۵۸ درجه
0.662	1.055	0.634	0.997	0.367	3.352	نتیجه در دمای ۶۴ درجه
1.666	2.5	1.604	2.347	0.898	7.825	نتیجه در دمای ۷۰ درجه
3.84	5.735	3.92	5.703	2.089	16.648	نتیجه در دمای ۷۷ درجه
5875	3312	6110	4991	7050	2167	عدد روانی
12.9	11.27	21.11	8.21	24.82	4.49	cov(%)
2	4	5	1	3	6	نقطه نرمی
2	5	1	3	4	6	G*/Sind
3	5	2	4	1	6	Jnr @3200 pa
3	5	2	4	1	6	FN

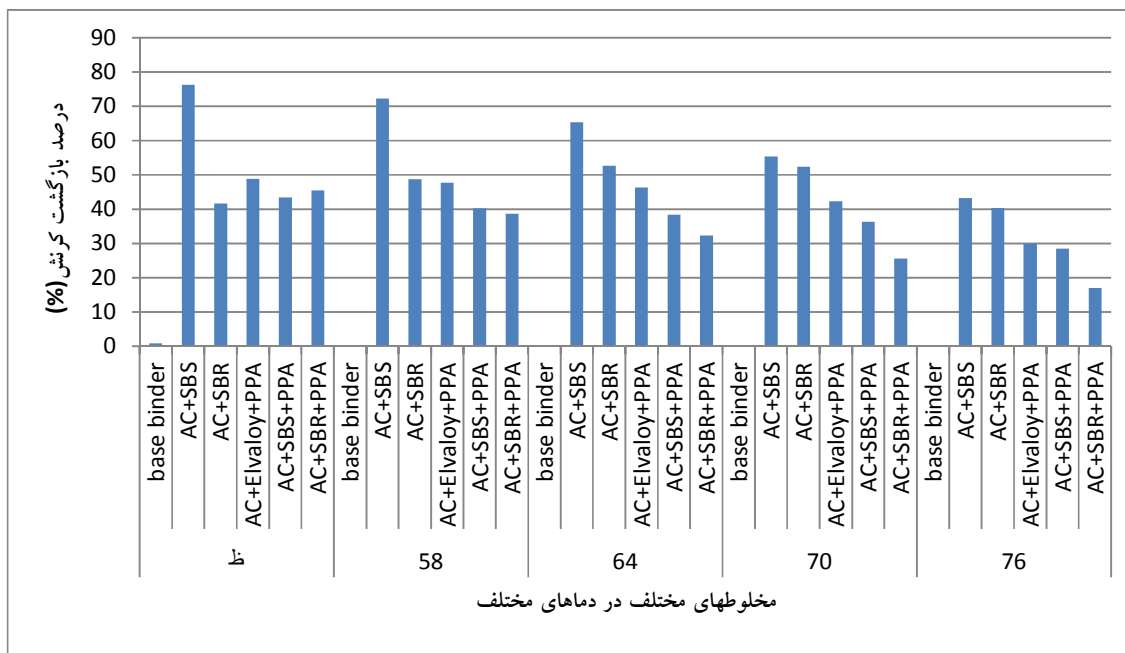
G\*/Sind

Jnr @100 pa

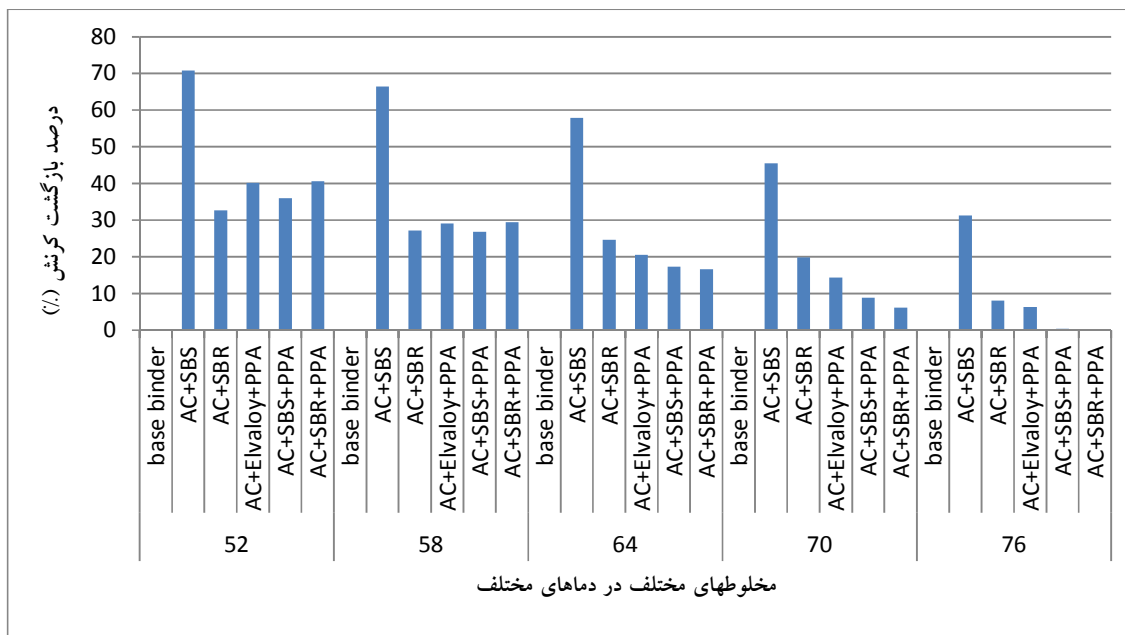
Jnr @3200 pa

مشخصات مخلوط

رتبه بندی قیر و مخلوط



شکل ۳. درصد بازگشت کرنش در تنش ۱۰۰ پاسکال



شکل ۴. درصد بازگشت کرنش در تنش ۳۲۰۰ پاسکال

که معمولاً منجر به توزیع همگن اصلاح کننده در فاز قیر و شبکه‌های پلمر می‌شود. ماهیت قطبی ترپلیمر یکی از عوامل کلیدی است که بهبود خواص ریولوژیکی ماده اصلاح شده را منجر می‌شود و محتوای آسفالتن می‌تواند در تشکیل شبکه

می‌توان مشاهده کرد که  $PPA + AC + Elval$  بالاترین پاسخهای الاستیک (مقادیر R) را در کل دامنه دمایی چه در ۰٫۱ و چه در ۳٫۲ کیلو پاسکال نشان می‌دهد. این امر ممکن است به واکنش بین Elvalvoy و قیر پایه نسبت داده شود

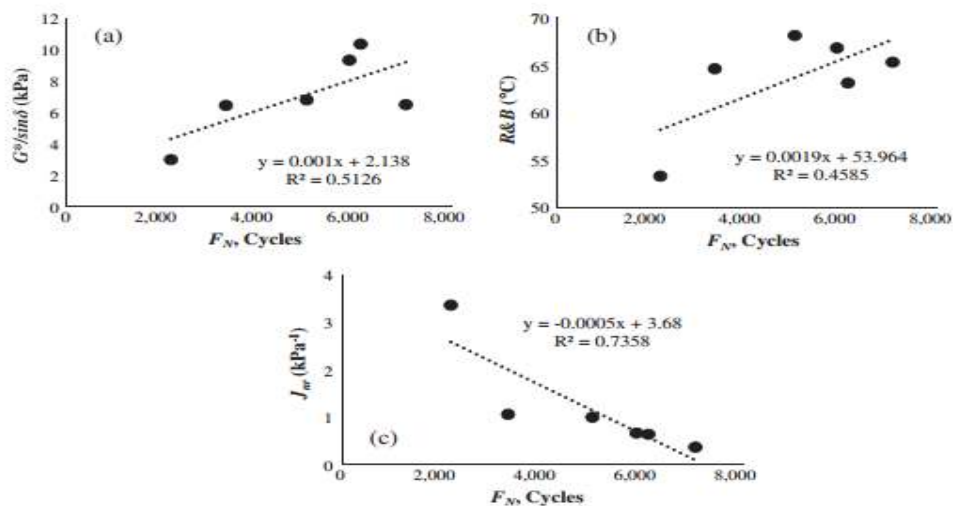


انتخاب شدند. مقادیر  $\dot{R}$  نشان‌دهنده وجود حداقل یک همبستگی منطقی بین  $G^*/Sind$  و  $FN$  ( $R=0,52$ ) و همبستگی خوب بین  $Jnr$  و  $FN$  ( $R$  برابر با  $0,74$ ) است. از سوی دیگر، مقادیر نقطه نرمی، همبستگی ضعیفی با  $FN$  ( $R^2=0/46$ ) نشان داد. این مورد با مطالعات قبلی نویسندگان (Sybilski, 1996) همخوانی دارد. به طور خلاصه، هر دو پارامتر  $G\ sind$  و  $Jnr$  همبستگی‌های خوبی را بین داده‌های آزمایشگاهی قیر و مخلوط نشان دادند، اگرچه  $Jnr$  انطباق به مقاومت واقعی مخلوط (مقادیر  $2R$  بالاتر) نزدیک‌تر از  $G$  بود. همانطور که انتظار می‌رفت، داده‌های نقطه نرم شدگی تنها یک روند در رفتار مخلوط نشان داد و نمی‌تواند به عنوان یک پارامتر امیدوار کننده برای مطالعه شیار شدگی در نظرتبندی سه مخلوط بسیار مقاوم در برابر رایت ( $AC +$  الوالی و  $PPA$ ، به دنبال آن  $AC + SBS + PPA$  و  $AC + SBS + PPA$  و  $SBR + PPA$ ) و سه مخلوط کم‌تر مقاوم در برابر رایت (کلاسور پایه، به دنبال آن  $AC + SBR$  و  $AC + SBS$ ) دقیقاً در رتبه‌بندی‌های مبتنی بر  $FN$  در دمای  $60$  درجه سانتی‌گراد و  $Jnr$  در دمای  $64$  درجه سانتی‌گراد و  $3/2$  درجه سانتی‌گراد است که در جدول شماره ۲ است. براساس این تجزیه و تحلیل، تست  $MSCR$  به عنوان بهترین روش مرتبط با عملکرد در نظر گرفته شد زیرا نه تنها می‌تواند به مسایل مربوط به حساسیت شیارشدگی اتصال‌ها در محدوده ویسکوالاستیک غیرخطی بپردازد، بلکه بارگذاری ترافیک واقعی را در پیاده‌رو به دقت شبیه‌سازی می‌کند.

نقش داشته باشد. برخلاف مقادیر  $R$ ، پارامتر  $Jnr$  نشان می‌دهد که ترکیبات با  $PPA$  ( $AC + SBS + PPA$  و  $AC + SBR + PPA$ ) نسبت به ترکیبات بدون  $PPA$  ( $AC + SBS$ ) و  $AC + SBR$  کم‌تر مستعد شیارشدگی هستند: این کاهش‌ها از  $19$  تا  $49\%$  با اضافه کردن  $PPA$  در ترکیب و کاهش مقدار پلیمر متفاوت است. براساس یافته‌های منتشر شده توسط گل‌علیپور (Golalipour, 2011) و آرشادی (Arshadi, 2013)، اعتقاد بر این است که افزایش سفتی قیر ( $Jnr$ ) تاثیر بیشتری بر مقاومت شیارافتادگی مخلوط نسبت به افزایش در سطح الاستیسیت (R) دارد. بنابراین انتظار می‌رود سه ماده با  $PPA$  ( $AC + SBS + PPA$ ،  $AC + SBS + PPA$  و  $AC + SBR + PPA$ ) تاثیر بیشتری بر پاسخ شیارافتادگی مخلوط نسبت به قیر پایه  $50/70$ ،  $AC + SBS$  و  $AC + SBR$  داشته باشند.

#### ۴-۳- آزمایشات شیارشدگی مخلوط و همبستگی داده‌های قیر

شکل ۵ همبستگی‌های بین مقادیر  $FN$  (جدول ۲) و پارامترهای شیار شدگی قیر، پارامتر  $G^*/Sind$ ، پارامتر  $Jnr$  از آزمون  $MSCR$  و نقطه نرمی. تغییرات در  $FN$  در توافق نزدیکی با تغییرات یافت‌شده در تحقیقات دیگر است (Li et al, 2014)، معمولاً روابط بین داده‌های مخلوط و قیر برقرار می‌شود و معادلات می‌توانند از خطی به لگاریتمی، توانی و نمایی تغییر کنند. از آنجا که همبستگی‌های خطی بر دیگر خطوط روند رگرسیون در بسیاری از نشریات در مورد  $MSCR$  و  $RCRT$  غالب است، این موارد در مقاله حاضر



شکل ۵. همبستگی‌های بین مقادیر  $FN$  (جدول ۲) و پارامترهای شیار شدگی قیر

## ۵- نتیجه گیری

-A. Golalipour, (2011), "Modification of multiple stress creep and recovery test procedure and usage in specification MSc", Thesis, University of Wisconsin Madison.

-A.T. Martins, L.F.M. Leite, M.C.C. Cravo, M. Chacur, P.A. Pinto, D.F. (2011), "Assumpção, Fluência e relaxação sob múltiplas tensões (MSCR): avaliação do desempenho de ligantes asfálticos [Multiple stress creep and recovery (MSCR): analysis of binder performance], Anais do 16o, Congresso Ibero Latinoamericano do Asfalto, IBP, Rio de Janeiro 1, In Portuguese., pp.711-721.

-American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2009), AASHTO M320 – Standard specification for performance-graded asphalt binder, Washington (DC).

-A.K. Apeageyi, (2014), "Flow number predictive models from volumetric and binder properties", Constr. Build. Mater, 64, pp.240-245, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.069>.

-D. Sybilski, (1996), "Evaluation of validity of conventional test methods in case of polymer-bitumens, Prepr", Pap. Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem. 41, pp.1302-1306.

-F.C. Onofre, V.T.F. Castelo Branco, J.B. Soares, A.L., (2013), "Faxina, Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas [Analysis of the effect of modified asphalt binders on the rutting resistance of dense-graded asphalt mixtures], Transportes 21, pp. 14-21. <http://dx.doi.org/10.4237/transportes.v21i3.685>, In Portuguese.

-H.U. Bahia, H. Zhai, M. Zeng, Y. Hu, P. Turner, (2001), "Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior, J. Assoc. Asph. Paving Technol. 70, pp.442-470.

-J. D'Angelo, (2010), "New high-temperature binder specification using multistress creep and recovery", Transp. Res. Circ. E-C147, pp.1-13.

-J.A. D'Angelo, (2012), "Effect of polyphosphoric acid on asphalt binder properties", Transp. Res. Circ. E-C160, pp.27-39.

براساس نتایج این مطالعه، نتایج زیر را می‌توان به دست آورد:

-اصلاح آسفالت فقط با یک افزودنی (SBR و SBS) یا دو افزودنی (PPA + Elvaloy, SBS + PPA و SBR + PPA) به طور قابل توجهی مقاومت شیارشدگی قیر و مخلوط در دماهای بالای آسفالت را بهبود بخشید، و این می‌تواند به کاهش قابل توجه در  $Jnr$  و افزایش قابل توجه در نقطه نرم شدن تبدیل شود.

-وجود جزئیات نور بیشتر در قیرهای اصلاح شده با PPA به دلیل کاهش درصد پلیمر ممکن است با حساسیت بالاتر آن‌ها به پیری در مقایسه با موارد بدون PPA همراه باشد.

-رتبه‌بندی قیرها و مخلوط‌ها از کم‌تر تا بیش‌ترین حساسیت نسبت به تجمع کرنش دائمی دقیقاً برای پارامترهای FN و  $Jnr$  یک‌سان است، که در مورد پارامتر  $G^*/Sind$  و پارامتر نقطه نرمی قیر صحیح نیست؛ در واقع، همبستگی بین FN و نقطه نرمی تنها یک روند است و همبستگی‌های بین FN و  $G^*/Sind$  موضوع بحث گسترده در ادبیات بوده و قطعی نیست.

-تست MSCR به عنوان بهترین پروتکل برای ارزیابی شیار شدگی قیرها نه تنها به دلیل شبیه‌سازی نزدیک بارگذاری ترافیک واقعی در جاده‌ها و بزرگراه‌ها، بلکه توانایی آن برای تحلیل شیار شدگی در محدوده ویسکوالاستیک غیر خطی مواد و برآورد وسعت شبکه پلیمر در فرمولاسیون (درصد بازیابی - R) انتخاب شد.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Polyphosphoric Acid
- 2- Dynamic Shear Rheometer
- 3- Zero Shear Viscosity
- 4- Multiple Stress Creep Recovery Test
- 5- Repeated Creep Recovery Test
- 6- Flow Number
- 7- Internal Structure Index
- 8- Performance Grade
- 9- Styrene-Butadiene-Styrene
- 10- Styrene-Butadiene Rubber

## ۷-مراجع

-A. Arshadi, (2013), "Importance of asphalt binder properties on rut resistance of asphalt mixture MSc", Thesis, University of Wisconsin-Madison.

- N. Saboo, P. Kumar, (2016), "Analysis of different test methods for quantifying rutting susceptibility of asphalt binders", *J. Mater. Civ. Eng.* 28,04016024, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001553](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001553).
- N.R. Sefidmazgi, L. Tashman, H. Bahia, (2012), "Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis", *Road Mater. Pavement Des.* 13, pp.21-37. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.657045>. Guidance-on-Using-MSCR-with-AASHTO-M320\_Final.pdf.
- Q. Li, F. Ni, L. Gao, Q. Yuan, Y. Xiao, (2014), "Evaluating the rutting resistance of asphalt mixtures using an advanced repeated load permanent deformation test under field conditions", *Constr. Build. Mater.* 61, pp. 241-251, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.052>.
- R.A. Tarefder, S.S. Yousefi, (2016), "Rheological examination of aging in polymermodified asphalt", *J. Mater. Civ. Eng.* 28, 04015112, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001370](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001370).
- S. Dreessen, J.P. Planche, V. Gardel, (2009), "A new performance related test method for rutting prediction: MSCRT, in: A. Loizos, M.N. Partl, T. Scarpas, I.L. Al-Qadi (Eds.), *Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials*", CRC Press/Balkema, Leiden, pp. 971-980, <http://dx.doi.org/10.1201/9780203092989.ch93>.
- V.O. Bulatovic, V. Rek, J. Marcovic, (2014), "Rheological properties of bitumen modified with ethylene butylacrylate glycidylmethacrylate", *Polym. Eng. Sci.* 54, pp.1056-1065, <http://dx.doi.org/10.1002/pen.23649>.
- J. D'Angelo, R. Kluttz, R. Dongré, K. Stephens, L. Zanzotto, (2007), "Revision of the superpave high temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test", *J. Assoc. Asph. Paving Technol* 76, pp.123-162.
- J.A. Sherwood, N.L. Thomas, X. Qi, (1998), "Correlation of superpave G/Sind with rutting test results from accelerated loading facility", *Transp. Res. Rec.* 1630, pp. 53-61, <http://dx.doi.org/10.3141/1630-07>.
- J. Zhang, A.E. Alvarez, S.I. Lee, A. Torres, L.F. Walubita, (2013), "Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation", *Constr. Build. Mater.* 44, pp.391-398, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.013>.
- L.P.T.L. Fontes, G. Trichês, J.C. Pais, P.A.A. Pereira, (2014), "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures", *Constr. Build. Mater.* 24, pp.1193-1200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat>.
- L.F.M. Leite, I.A. Tonial, (1994), "Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros Segundo as especificações SHRP Grading of the Brazilian asphalt cements according to the SHRP specifications". *Anais do 12o. Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro, In Portuguese*, pp. 94-119, 1994.
- M.W. Witzak, K. Kaloush, T. Pellinen, M. El-Basyouny, H. Von Quintus, (2002), "Simple performance test for super pave mix design, NCHRP Report 465, Transportation Research Board, Washington.
- M.D.I. Domingos, A.L. Faxina, (2016), "Susceptibility of asphalt binders to rutting: literature review", *J. Mater. Civ. Eng.* 28 04015134, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001364](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001364).

# Experimental Evaluation of Rutting Performance of Polymer Modified Binders and Its Relation to Rutting Resistance of Mixture

*Amin Choubdar, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

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

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

*E-mail: AminFarajollahi@gmail.com*

Received: March 2020-Accepted: September 2020

## **ABSTRACT**

This study was intended to evaluate the susceptibility of asphalt binders and mixtures to rutting. The binders have the same high PG grade (PG 76-xx) and a dense-graded gradation curve was used to produce the mixtures. Three types of polymers – Elvaloy, SBS and SBR – and polyphosphoric acid (PPA) were selected. The tests included softening point, oscillatory shear (parameter  $G/sind$ ), multiple stress creep and recovery (Jnr) and flow number (FN). The rankings of binder and mixture parameters (Jnr,  $G/sind$ , softening point and FN) are the same only for Jnr and FN, and the applicability of  $G/sind$  to modified materials is questionable.

**Keywords:** Asphalt Binders, Performance Grade, Rutting, Flow Number, Nonrecoverable Compliance, Polymers, Polyphosphoric Acid