

## ارزیابی تاثیر خصوصیات رئولوژیکی قیر و دانه بندی مصالح سنگی

### بر خصوصیات شیاردگی مخلوط آسفالتی

مقاله علمی-پژوهشی

آذین چیت سازان\*، گروه ارزیابی و آمایش سرزمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Chitsazan.az@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

صفحه ۲۰۲-۱۸۷

#### چکیده

شیاردگی یکی از منابع اصلی خرابی در روسازی‌های آسفالتی است و به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است زیرا بر هزینه‌های ایمنی و نگهداری تأثیر می‌گذارد. برای کاهش این خرابی، انتخاب قیر کافی و سنگدانه‌ها و تعادل مناسب بین آنها عناصر کلیدی است. این پژوهش هفت قیر (۲ قیر پایه، ۳ قیر اصلاح شده با پلیمر و ۲ قیر لاستیکی) و مخلوط‌های آسفالتی با درجه بندی‌های مختلف (مخلوط‌های آسفالتی با درجه بندی متراکم ۱۹ میلی‌متر و مخلوط آسفالت با درجه بندی باز ۱۲.۵ میلی‌متری) را تجزیه و تحلیل کرد. قیر از نظر رئولوژی با استفاده از یک رئومتر برشی دینامیکی ( $DSR^1$ ) و یک رئومتر تیر خمشی ( $BBR^2$ ) برای به دست آوردن درجه حرارت با عملکرد بالا و پایین  $PG^3$  مورد ارزیابی قرار گرفتند. علاوه بر این، آزمایش‌های خزش و بازیابی تنش چندگانه ( $MSCR^4$ ) برای تجزیه و تحلیل پتانسیل شیاردگی مواد در دماهای مختلف انجام شد. برای ارزیابی اثر اسکلک معدنی بر روی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش شیاردگی چرخ انجام شد. قیرهای اصلاح شده با پلیمر ( $PMBs^5$ ) و مخلوط‌های آسفالتی تولید شده با آنها، مقاوم‌ترین در برابر تغییر شکل دائمی با مقادیر کم عمق شیاردگی (۲.۵٪) بودند. به طور کلی، مخلوط‌های درجه بندی شده با دانه‌بندی باز مقاومت بهتری نسبت به مخلوط‌های دانه بندی متراکم داشتند. با این حال، این مقایسه به نوع قیر بستگی دارد. روابط بین پارامترهای قیر و مخلوط نیز پیشنهاد شد و آنها رابطه خوبی را بین انطباق خزش غیرقابل بازیافت قیرها ( $Jnr$ ) و عمق شیاردگی متراکم ( $R2 = 0.81$ ) نشان دادند. با این حال، هیچ رابطه معنی داری برای مخلوط‌های درجه بندی شده با فاصله ( $R2 = 0.52$ ) یافت نشد.

**واژه‌های کلیدی:** قیر، مخلوط‌های آسفالتی، حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها، قیر اصلاح شده، مقاومت در برابر شیاردگی، تست شیاردگی چرخ، تست خزش چند تنش و بازیابی

#### ۱-مقدمه

در پروژه بزرگراه انتخاب کنند تا از خرابی زودهنگام جلوگیری کنند، عملکرد روسازی را در طول عمر مفید آن بهینه کنند و هزینه‌های ساخت و نگهداری را کاهش دهند. این انتخاب‌ها بیشتر مربوط به یک مخلوط آسفالتی مناسب برای لایه سطحی همراه با سایر پارامترهای ساختاری مورد نظر است. نوع و درصد قیر و ترکیب سنگدانه‌ها عواملی هستند که باید در

شیاردگی و ترک خوردگی ناشی از خستگی، خرابی‌های اصلی مشاهده شده در سازه‌های روسازی آسفالتی هستند که تخریب بزرگراه‌ها را تسریع می‌کنند، و همچنین ایمنی جاده‌ها را کاهش می‌دهند، زیرا ترک‌ها و شیارها می‌توانند به وسایل نقلیه آسیب رسانده و باعث هیدروپلنلینگ شوند (Huang, 1993). مهندسان روسازی باید بهترین طرح مخلوط آسفالت را

مواد اصلاح شده با پلیمر و ایجاد یک حد واقعی از رابطه اصلی ارائه شده در استاندارد AASHTO M332-19 به گفته سلیم و همکاران (Salim et al, 2015)، مقادیر بالای منحنی نشان دهنده وجود پلیمرها در قیر است و مقادیر زیر نتایج منحنی به قیرهای اصلاح نشده نسبت داده می شود. سنگدانه ها همچنین نقش مهمی در رفتار مخلوط آسفالت دارند و مسئول استحکام و سختی آن هستند. چندین محقق اثر دانه بندی سنگدانه ها را بر رفتار تغییر شکل دائمی مخلوط های آسفالتی ارزیابی کرده اند. اسماعیل (Ismael, 2011) این اثر را با استفاده از یک تحلیل برنامه کامپیوتری مورد مطالعه قرار داد، که در آن مخلوط های آسفالتی طراحی شده با استفاده از حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلی متری (NMAS) مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل دائمی در مقایسه با مخلوط های آسفالتی با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۲٫۵ میلی متر. این رفتار برای سه دانه بندی مختلف (حد بالا، حد وسط و حد پایین محدود Superpave) مشاهده شد. در نتیجه، مقادیر بالاتر NMAS تمایل به کاهش سطح شیاردار دارند. نتیجه مشابهی توسط Mascarenhas و همکاران هنگام مقایسه مخلوط های آسفالتی متراکم ۱۹، ۳۲ و ۳۲ میلی متری NMAS بدست آمد. (Mascarenhas et al, 2020). سیلوا و همکاران (Silva et al, 2015) انتخاب اندازه سنگدانه ها و تأثیر آن بر مقاومت تغییر شکل دائمی مخلوط های آسفالتی را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که مخلوط های درشت درجه بندی شده نسبت به مخلوط های دانه بندی ریز عملکرد تغییر شکل دائمی بهتری دارند. علاوه بر این، فریرا و همکاران (Ferreira et al, 2020) ابزاری را برای ارزیابی کیفیت توزیع اندازه ذرات با توجه به رفتار تغییر شکل دائمی توسعه داد. این نویسندگان پارامتری را پیشنهاد کردند که شامل درصد قیر و ویسکوزیته قیر همراه با خواص به دست آمده از روش محدوده اندازه سنگدانه غالب (DASR) بود. این پارامتر توانست یک تناسب نمایی خوبی برای مقادیر عدد جریان چند مخلوط آسفالتی فراهم کند.

هدف پژوهش حاضر ارزیابی اثر نوع قیر و دانه بندی سنگدانه ها بر رفتار تغییر شکل دائمی مخلوط های آسفالتی، مقایسه انواع مختلف قیرها و ترکیبات مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمایش MSCR و آزمایش شیار جای چرخ می باشد.

طراحی مخلوط آسفالت به دقت مورد توجه قرار گیرند زیرا با استحکام و انعطاف پذیری سازه روسازی مرتبط هستند. با هدف بهبود عملکرد روسازی به دلیل افزایش تقاضای ترافیک، استفاده از پلیمرها و لاستیک به عنوان عوامل اصلاح کننده در طول سال ها افزایش یافته است (DuBois et al, 2014). مشخصات قیر Superpave قبلی (AASHTO M320-10) پارامتر  $|G^*|/\sin d$  را برای پیش بینی مقاومت قیر در برابر تغییر شکل دائمی در نظر گرفت. با این حال، چندین محقق ناکافی بودن این پارامتر را، به ویژه برای مواد اصلاح شده (Camargo et al, 2019; Anderson et al, 1993)، به دلیل ارتباط کم با عملکرد میدانی (Zhang et al, 2015) و همبستگی کم با ویژگی های الاستیک (wang et al, 2014) نشان داده اند. به گفته دلگادیلو و همکاران (Delgadillo et al, 2016) این نارسایی را می توان به این واقعیت نیز نسبت داد که پارامترهای  $|G^*|$  و  $d$  در ناحیه ویسکوالاستیک خطی (LVE) قیر اندازه گیری می شوند و ممکن است ماده به دلیل سطوح تنش بالا تحت رفتار غیرخطی در میدان باشد. برای رفع این محدودیت، اداره بزرگراه فدرال مشخصات AASHTO M332-19 را توسعه داد که ورودی ترافیک را در طبقه بندی قیر گنجانده است. تست خزش و بازیابی تنش چندگانه (MSCR) برای در نظر گرفتن اثرات الاستیک و سفتی پلیمرها بر روی ویژگی های قیر اصلاح شده، که توسط پارامتر  $|G^*|/\sin d$  در نظر گرفته نشد، توسعه داده شد. نتیجه اصلی آزمایش MSCR پارامتر سازگاری خزشی غیر قابل بازیافت  $J_{nr}$  است که به کرنش غیر قابل بازیافت نمونه پس از تخلیه تنش ها مربوط می شود. هر چه یک ماده با بارگذاری اعمال شده به طور دائم تغییر شکل دهد، مقدار  $J_{nr}$  بیشتر می شود. پارامتر مهم دیگری که از آزمایش MSCR به دست می آید، درصد بازیابی،  $R$  است که نشان دهنده اندازه گیری توانایی مواد برای بازگشت به شکل اولیه اش پس از بارگیری و تخلیه مکرر است. هرچه مواد الاستیک تر باشد، پارامتر  $R$  بالاتر است. هر دو  $J_{nr}$  و  $R$  می توانند برای تأیید وجود افزودنی های پلیمری در قیر با استفاده از تابعی استفاده شوند که مقدار  $R$  را پس از اعمال سطح تنش ۳٫۲ کیلو پاسکال،  $R_{3.2}$ ، به  $J_{nr}$  پس از سطح تنش  $J_{nr3.2}$  کیلو پاسکال مرتبط می کند. سلیم و همکاران (Salim et al, 2015) رابطه بین  $R_{3.2}$  و  $J_{nr3.2}$  را ارزیابی کرد و مدلی را بر اساس نتایج تجربی آنها ایجاد کرد. برای تنظیم بهتر

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- قیر

در مطالعه حاضر، هفت قیر مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت: یک قیر پایه با درجه نفوذ AC 50/70، یک قیر پایه با درجه نفوذ AC 30/45، یک قیر اصلاح شده با پلیمر با افزودن استایرن. - بوتادین - استایرن<sup>۸</sup> (SBS)، یک قیر اصلاح شده با پلیمر (HPMB) با SBS، یک قیر اصلاح شده توسط تریپلیمر الاستومری واکنشی (RET)<sup>۹</sup> که در این تحقیق به عنوان قیر اصلاح شده با الاستومری<sup>۱۰</sup> (EMB) شناسایی شده است.

آسفالت‌های لاستیکی (RA)<sup>۱۱</sup> و (RB) تولید شده در محل با خرده لاستیک که از مش ۳۰ عبور می‌کند. خصوصیات فیزیکی قیر در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر ویسکوزیته بروکفیلد در سه دمای مختلف برای قیرهای پایه و اصلاح شده با پلیمر مطابق با ASTM D 4402-15 به دست آمد، در حالی که برای مواد لاستیکی-آسفالت، فقط یک دما مورد نیاز بود (ASTM D 6114-97).

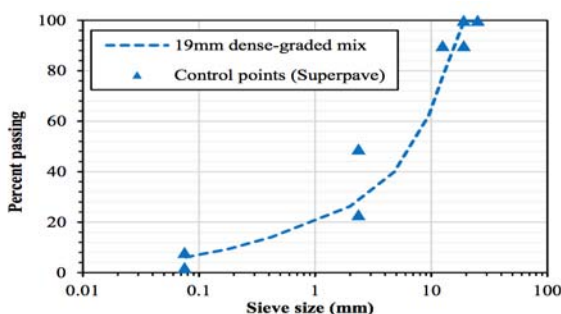
جدول ۱. خصوصیات فیزیکی قیر

خصوصیات	استاندارد	۵۰/۴۰	۶۰/۷۰
نقطه نرمی	ASTM D36	۵۵٫۲	۴۹٫۲
شکل پذیری در ۱۰ درجه	ASTM D113	-	-
درجه نفوذ	ASTM D5	۴۳	۶۳
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵	ASTM D4124	۴۷۹	۳۴۷
ویسکوزیته در دمای ۱۵۰		۲۳۳	۱۴۷

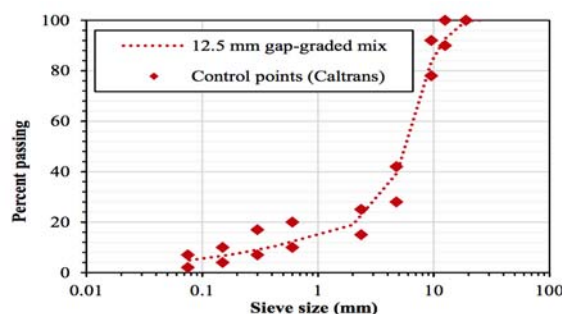
### ۲-۲- مخلوط آسفالتی

مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی شده در این مطالعه با رعایت محدودیت‌های دانه بندی Superpave تهیه شدند. اختلاط سنگدانه‌ها از سه اندازه مختلف مواد گرانیتی همراه با افزودن آهک هیدراته تشکیل شده است. دو ترکیب مخلوط آسفالتی برای هر قیر تهیه شد: یک مخلوط با دانه بندی متراکم با NMAS 19 میلی‌متر و یک مخلوط با دانه بندی فاصله با NMAS 12.5 میلی‌متر. مخلوط آسفالت در آزمایشگاه با

استفاده از میکسر پاگمیل که شرایط محل پروژه را از نظر اختلاط کارخانه آسفالت شبیه سازی می‌کند، تولید شد. پس از اختلاط، مخلوط‌ها به مدت دو ساعت در کوره در دمای تراکم نگهداری شدند که برای هر قیر متفاوت بود تا پیری کوتاه مدت شبیه سازی شود. دانه بندی مصالح طراحی مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۱ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی، الف) مصالح با دانه بندی پیوسته با ۱۹ میلی‌متر NMAS=

ب) مصالح با دانه بندی باز با ۱۲/۵ میلی‌متر NMAS=

دو NMAS هستند، که احتمالاً می‌تواند مربوط به ویسکوزیته بالایی باشد که معمولاً برای این قیرها یافت می‌شود، در حالی که کمترین درصد برای قیرهای تمیز مشاهده می‌شود. علاوه بر این، از آنجایی که دانه بندی مخلوط‌های NMAS 19 میلی متری متراکم است (همانطور که در شکل ۱ الف نشان داده شده است)، میزان فضای خالی هوا در این طرح مخلوط کمتر از مخلوط های NMAS 12.5 میلی متری با فاصله است. با توجه به مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) برای هر مخلوط آسفالتی، مقادیر بالاتری برای مخلوط‌های آسفالتی که توسط قیر پایه AC 30/45 و توسط HPMB برای هر دو دانه بندی مصالح پیشنهادی تشکیل شده‌اند، پیدا شد. قیر پایه AC 50/70 منجر به کاهش ارزش ITS<sup>۱۲</sup> در بین تمام مخلوط‌های آسفالتی آزمایش شده شد.

پارامترهای طراحی مخلوط در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است، از جمله مقادیر تخلخل، که می‌تواند به عنوان نسبت بین حجم حفره‌ها و حجم کل یک ماده تعریف شود. برای این تحقیق، این پارامتر با استفاده از روش DASR توسعه یافته توسط کیم (Kim, 2006) به دست آمد. به گفته این نویسنده و فریرا و همکاران. (Ferreira et al, 2016)، مقدار تخلخل باید کمتر از ۴۸٪ باشد تا مقاومت خوبی در برابر تغییر شکل دائمی نشان دهد. مخلوط‌های آسفالتی آزمایش شده در تحقیق حاضر نتایج مشابهی از نظر تخلخل داشتند که همگی زیر ۴۸ درصد بودند، با مخلوط‌های دانه‌بندی شده باز در مقایسه با مخلوط‌های با دانه بندی متراکم، مقادیر کمی پایین تر داشتند. درصد قیر مخلوط‌های ۱۹ میلی‌متری نسبت به مخلوط‌های ۱۲٫۵ میلی‌متری و همچنین محتوای خالی هوا کمتر است. مخلوط‌های لاستیک-آسفالت دارای بالاترین درصد قیر برای

جدول ۲. نتایج طرح اختلاط مصالح با ۱۹ میلی‌متر NMAS=

نمونه قیر	درصد قیر بهینه	چگالی ظاهری	چگالی واقعی	درصد فضای خالی مصالح سنگی			مقاومت کششی غیرمستقیم
				درصد هوا	درصد تخلخل	درصد تخلخل	
AC 40/50	4	2.532	2.431	4	13	35.2	1.6
AC 60/70	4.1	2.527	2.426	4	13.2	35.4	2.3
RA	4.7	2.505	2.405	4	14.6	36.6	1.8
RB	4.7	2.505	2.405	4	14.5	36.6	1.8
EMB	4.3	2.1519	2.418	4	13.7	35.9	1.8
SBS	4.3	2.1519	2.418	4	13.7	35.9	1.8
HPMB	4.4	2.1513	2.412	4	14	36.1	2.4

جدول ۳. نتایج طرح اختلاط مصالح با ۱۲/۵ میلی‌متر NMAS=

نمونه قیر	درصد قیر بهینه	چگالی ظاهری	چگالی واقعی	درصد فضای خالی مصالح سنگی			مقاومت کششی غیرمستقیم
				درصد هوا	درصد تخلخل	درصد تخلخل	
AC 40/50	5.2	2.476	2.353	5	16.2	33.4	1.3
AC 60/70	5.3	2.473	2.349	5	16.5	33.6	1.9
RA	5.9	2.461	2.337	5	17.4	34.4	1.4
RB	5.6	2.469	2.345	5	16.9	34	1.7
EMB	5.5	2.468	2.345	5	16.8	33.9	1.8
SBS	5.5	2.467	2.344	5	16.9	33.9	2.1
HPMB	5.6	2.469	2.345	5	16.9	34	2.1

### ۳- روش آزمایشگاهی

تفاوت بارهای تک محوری معادل انباشته شده که در نشان داده شده است، در نظر می‌گیرد. جدول ۴. هنگامی که سطح ترافیک بسیار سنگین در نظر گرفته می‌شود (۳۰ میلیون ESAL)، که در ایران معمول است، قیرهای اصلاح شده معمولاً در سناریوهای بحرانی (ترافیک سنگین و پر حجم) استفاده می‌شوند که در نتیجه معیار  $Jnr3.2 B 1$  ایجاد می‌شود.  $kPa-1$ .

پس از پیری طولانی مدت در مخزن پیری تحت فشار، PAV (ASTM D6521-19a)، خواص رئولوژیکی قیرهای بر اساس معیار خستگی که بر اساس دمای میانی است، ارزیابی شد. آزمایش‌ها با استفاده از DSR در دماهای تعیین شده توسط AASHTO M332-19 در ۱۰ راد بر ثانیه انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده در این مرحله، دمای آزمایش رئومتر پرتو خمشی (BBR) بر اساس معیار  $|G^*|9 \sin \delta$  6000 kPa، همراه با ورودی ترافیک بسیار سنگین انجام شد. برای انجام BBR، نمونه‌های با پیرشدگی  $PAV^{10}$  به مدت یک ساعت در یک حمام حرارتی در دمای آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌ها بر اساس ASTM D6648-16 انجام شد و نتایج در تعیین دمای پایین PG در نظر گرفته شد. تست‌های جارو دمایی قیر اصلاح شده با SBS با محتوای ۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ خاکستر پسته برنج انجام شد. قیر اصلاح شده با بدون پیری و RTFO پیر شده بود. برای قیر پیر نشده، کرنش کنترل شده ۱۲ درصد بود در حالی که برای قیر پیر شده با RTFO 10 درصد بود. قطر فیکسچر نمونه برای قیر پیر نشده و RTFO پیر شده ۲۵ میلی متر بود و فاصله بین فیکسچر نمونه بالایی و فیکسچر پایینی ۱ میلی متر بود. برای جاروی دما در این مطالعه، دماهای آزمایش ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰، ۷۶ و ۸۲ درجه سانتیگراد بودند. فرکانس آزمایش ۱۰ راد بر ثانیه (یعنی ۱،۵۹ هرتز) بود. مدول پیچیده  $G^*$ ، زاویه فاز  $\delta$ ، و فاکتورهای شیارش  $G^*/\sin \delta$  از قیر اصلاح شده SBS/RHA به دست آمد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

تحقیق حاضر را می‌توان به دو مطالعه آزمایشگاهی اصلی تقسیم کرد: (۱) توصیف انواع مختلف قیر از نظر خواص رئولوژیکی و پتانسیل شیارشدن آنها و (۲) پیش بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با درجه بندی‌های مختلف توسط ابزارهای شبیه‌سازی ترافیک آزمایشگاهی شکل ۲ چارچوب تحقیق شامل مواد و آزمون‌ها را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- آزمایشات رئولوژیکی قیر

تعیین درجه عملکرد (PG) قیرها بر اساس AASHTO R29-15 انجام شد. آزمایش‌ها بر اساس معیارهای توصیف شده در AASHTO M332-19 در رابطه با ارزیابی خواص رئولوژیکی قیرهای با استفاده از رئومتر برشی دینامیکی (DSR) انجام شد. خصوصیات رئولوژیکی بر روی قیرهای پایه (بدون پیری) برای تعیین خواص LVE<sup>۱۳</sup> مدول برشی دینامیکی،  $|G^*|$ ، و زاویه فاز،  $\delta$  مطابق با مشخصات ASTM D7175-15 انجام شد. آزمایش‌ها در دماهای بین ۴۶ تا ۸۲ درجه سانتیگراد (۶ درجه سانتیگراد افزایشی) با فرکانس ۱۰ راد بر ثانیه انجام شد. طبقه بندی PG مستلزم آن است که قیر پایه حداقل مقدار ۱ کیلو پاسکال را برای پارامتر Superpave  $|G^*|/\sin \delta$  ارائه کند. قیرها برای مدت کوتاهی در یک کوره فیلم نازک نورد<sup>۱۴</sup> (ASTM D2872-19) RTFO پیر شدند و سپس آزمایشات (ASTM D7405-15) MSCR برای به دست آوردن انطباق خزش غیرقابل پوشش (Jnr) و درصد بازیابی انجام شد. (ر). آزمایش MSCR در دماهای آزمایش مطابق با ASTM D7405-15 انجام شد و شامل اعمال چرخه‌های بارگذاری ۱ ثانیه و به دنبال آن ۹ ثانیه استراحت بود. بیست چرخه خزش و بازیابی در تنش خزشی ۰،۱ کیلو پاسکال و سپس ده چرخه در ۳،۲ کیلو پاسکال اجرا شد. درصد بازیابی، R، و انطباق خزش غیر قابل بازیابی، Jnr، برای ارزیابی اصلاح قیرها استفاده شد. طبقه‌بندی فعلی PG سطح ترافیک سازه روسازی را در نظر می‌گیرد که در آن قیر با گنجاندن حداکثر مقادیر حدی برای  $Jnr3.2$  بر اساس تعداد

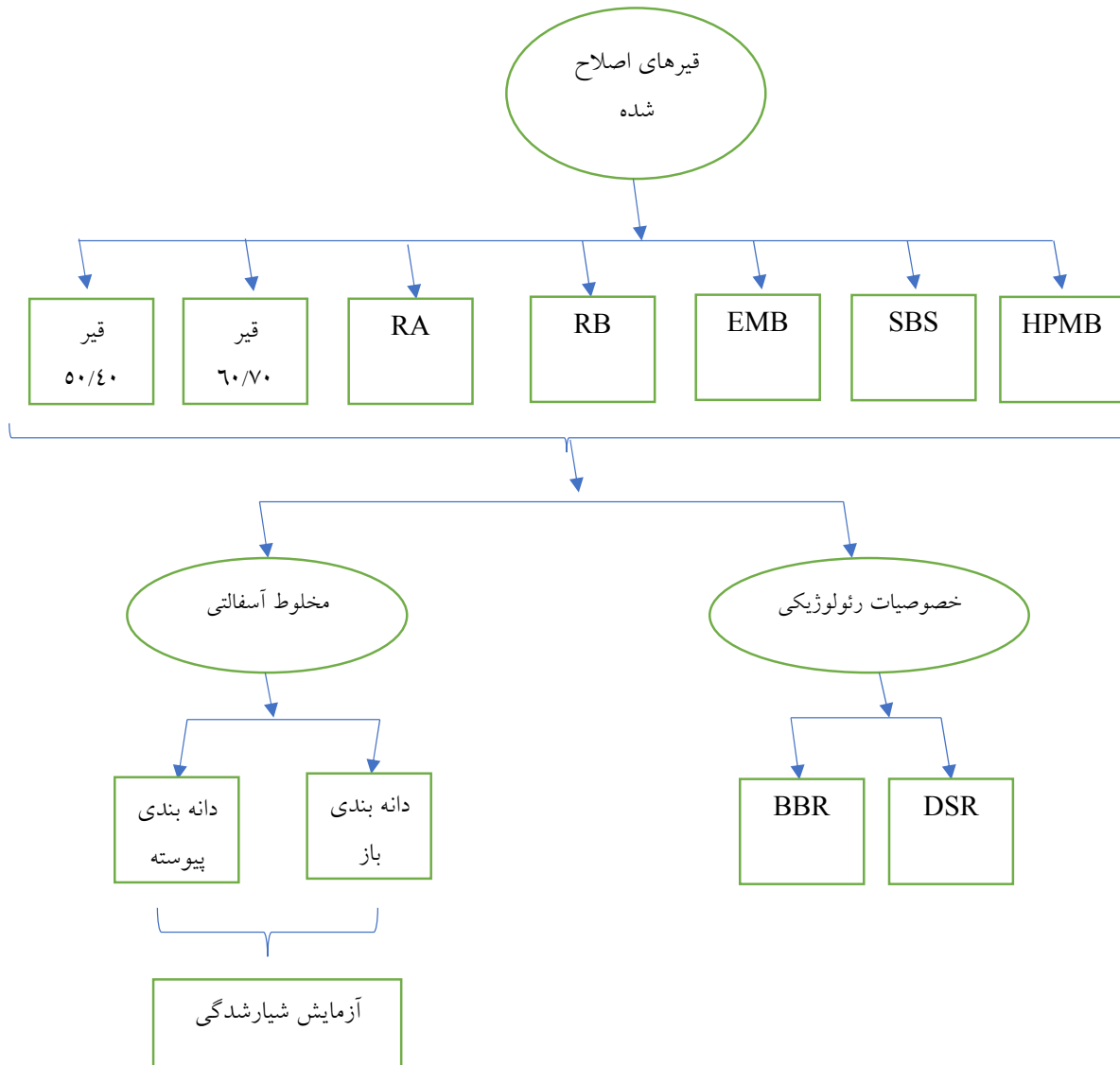
جدول ۴. معیارهای طبقه بندی قیر

حداکثر مقدار Jnr تفاوت	حداکثر مقدار Jnr	تعداد محورها و سرعت ترافیک	سطح ترافیک
۷۵	۴،۵		استاندارد ( )
۷۵	۲		سنگین
۷۵	۱		خیلی سنگین
۷۵	۰،۵		به شدت سنگین

### ۲-۳- آزمایش شیارشدگی مخلوط

آن عمق شیار در ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۱۰،۰۰۰ اندازه گیری شد. و ۳۰۰۰۰ چرخه از نظر محدودیت‌های پیشنهادی برای عمق شیارها، حداکثر توصیه شده برای ترافیک بسیار سنگین در بزرگراه‌های برزیل ۵٪ پس از ۳۰۰۰۰ چرخه زمانی است که مخلوط آسفالت برای استفاده در لایه سطحی طراحی شده است.

نمونه‌هایی از دال‌های مخلوط آسفالت بر روی یک متراکم‌کننده تهیه شد. تست شیار در یک شبیه ساز انجام شد. برای هر مخلوط، دو نمونه با ابعاد ۵۰ میلی متر ضخامت، ۱۸۰ میلی متر عرض و ۵۰۰ میلی متر طول آزمایش شد. آزمایش بر اساس استاندارد EN 12697-22 در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و شامل اعمال بار تیر ۵ کیلونیوتن بر روی هر نمونه مخلوط آسفالتی در فرکانس ۱ هرتز بود که در



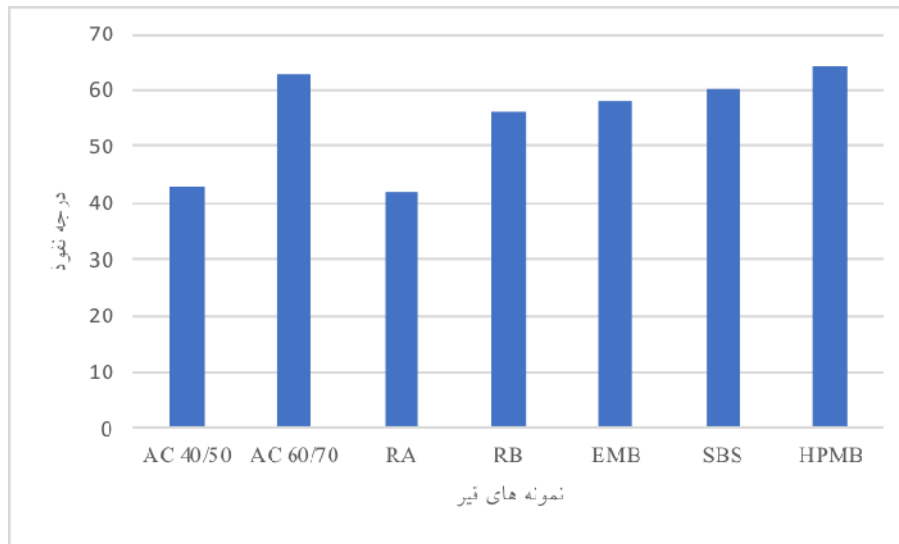
شکل ۲. فلوجارت روش تحقیق

#### ۴- بحث

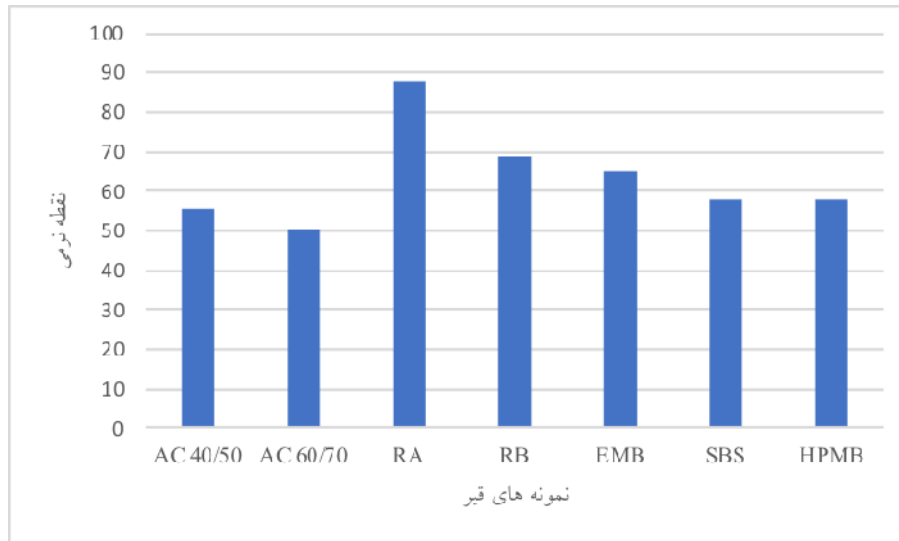
##### ۴-۱- نتایج آزمایشات قیر

سایر قیرهای اصلاح شده با پلیمر (SBS) و (EMB نشان داد. قیرهای اصلاح شده با پلیمر در این مطالعه پتانسیل بیشتری برای بازیابی الاستیک نسبت به قیرهای اصلاح شده با لاستیک دارند. همانطور که انتظار می‌رود، قیرهای پایه نسبت به مواد اصلاح شده ویسکوزیته کمتری دارند.

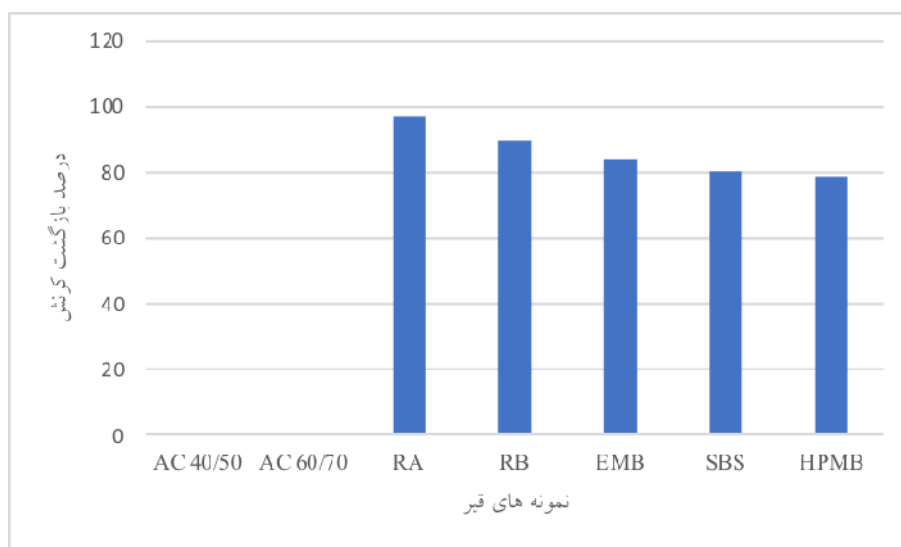
قیرهای اصلاح شده دارای درجه نفوذ بالاتری نسبت به قیر پایه بودند، با چسبندگی RA بیشتر از RB، که نشان می‌دهد قیرهای با مواد مشابه ممکن است بسته به مقدار و نوع لاستیک اضافه شده همراه با ویژگی‌های قیر پایه، رفتار متفاوتی از خود نشان دهند. با توجه به قیرهای اصلاح شده با پلیمر، HPMB مقادیر بیشتری از بازیابی الاستیک و ویسکوزیته را نسبت به



شکل ۳. نتایج درجه نفوذ



شکل ۴. نتایج نقطه نرمی



شکل ۵. نتایج درصد بازگشت کرنش



شکل ۶. نتایج ویسکوزیته قیر

که نشان می‌دهد که ویسکوزیته ممکن است بر نتایج آزمایش MSCR و در نتیجه بر محدوده دما درجه (PG) تأثیر بگذارد. قیر AC 30/45 را نمی‌توان برای بزرگراه‌های ترافیک بسیار سنگین (V) طبقه‌بندی کرد زیرا معیار دمای متوسط ( $|G^*|9 \text{ sind}$ ) را برای هیچ دمای آزمایشی برآورده نمی‌کرد. بنابراین، طبقه‌بندی ترافیک سنگین (H) در نظر گرفته شد. برای مقاصد مقایسه، آزمایش‌های MSCR در همان دما، ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، برای همه مواد آزمایش‌شده، مستقل از درجه PG در دمای بالا انجام شد. مقادیر R و Jnr برای هر دو سطح تنش و همچنین تفاوت بین نتایج Jnr (Jnrdiff) برای هر دما به دست آمد (جدول ۶).

درجه بندی PG قیر (جدول ۵) بر اساس میانگین نتایج دو نمونه آزمایش شده در هر مرحله مورد نیاز با روش Superpave به دست آمد. معیارهای مورد استفاده برای پذیرش نتایج به دست آمده برای هر ماده بر اساس استاندارد ASTM D7405-15 برای دقت تک اپراتور بود. HPMB محدوده دمای PG وسیع‌تری را ارائه کرد (PG 82 V-22)، زیرا این قیر به دلیل درصد پلیمری بالای آن، کاربرد وسیع‌تری از نظر دما در بزرگراه‌ها دارد. با این حال، AC 50/70 کمترین محدوده دمایی (PG 52 V-10) را نشان داد، که می‌تواند به ویسکوزیته کم و رفتار ارتجاعی کم آن مربوط شود. قیر RA، که چسبناک‌تر از RB است، دارای دمای بالای PG بالاتری بود،

دو دمای آزمایش شده، قیرهای HPMB و EMB نیز مقادیر درصد بازیابی بالایی را ارائه کردند که ۲۰ درصد بیشتر از مقادیر یافت شده برای قیر اصلاح شده با SBS معمولی بود، احتمالاً به دلیل ویسکوزیته بالاتر و الاستیسیته بالاتر این دو قیر اصلاح شده با پلیمر. در مقایسه با اصلاح استاندارد SBS از آنجایی که آزمون MSCR پتانسیل مقاومت شیارشدگی قیر را ارزیابی می کند، نتایج نشان می دهد که HPMB و EMB دارای خواص کنشسانی بالا و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی بهتری هستند.

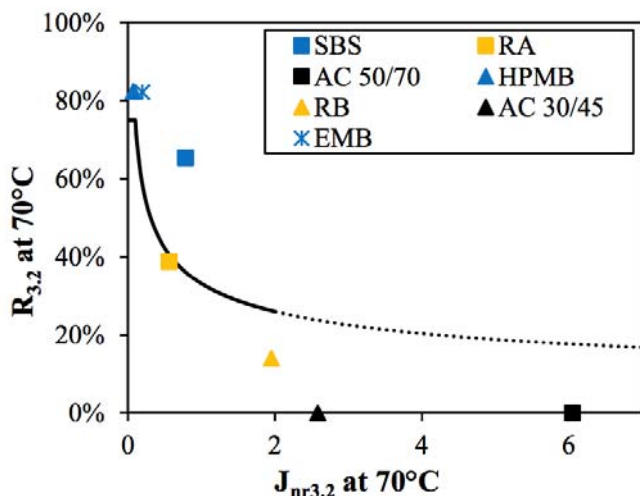
علاوه بر این، رابطه بین R3.2 و Jnr3.2 در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج از دو نمونه از هر ماده به دست آمد و مقادیر متوسط ارائه شده است. ناحیه اصلاح پلیمر را از طریق این رابطه محدود می کند و همچنین در شکل ۷ ارائه شده است برای قیرهای پایه، مقادیر Jnr3,2 در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد بالا بود، به خصوص برای (AC 50/70 (6.0 kPa-1). که نشان می دهد مقاومت شیارشدگی آنها در این دما، برای قیرهای اصلاح شده با پلیمر یا لاستیک، مقادیر Jnr3,2 کمتر از ۱,۰ کیلو پاسکال در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به جز (RA) بود که نشان دهنده رفتار شیارشدگی قابل توجهی است. در هر

جدول ۵. نتایج درجه بندی عملکردی قیرها

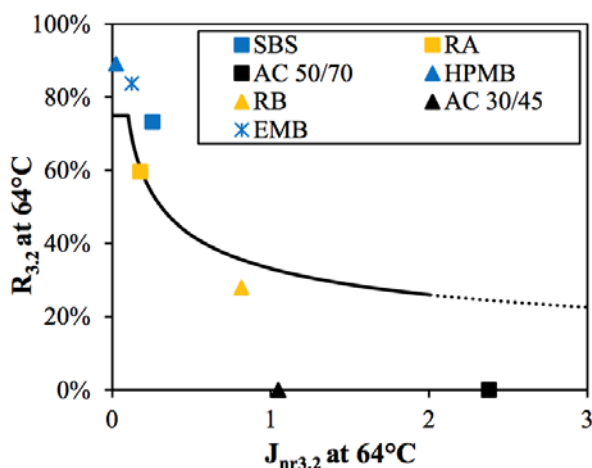
نمونه قیر	دما				PG grade
	g*/Sin>1kPa	Jnr<1	g*.Sin< 6000kPa	S<300 , m>0.3	
AC 40/50	64	52	25	0	PG52V-10
AC 60/70	70	64	31	0	PG 64H-10
RA	76	64	16	-12	PG 64V-22
RB	82	70	19	-12	PG 70V-22
EMB	70	70	19	-12	PG 70V-22
SBS	70	70	25	-6	PG70V-16
HPMB	82	82	28	-12	PG 82V-22

جدول ۶. نتایج آزمایش MSCR

نمونه قیر	Jnr0.1		%R0.1		Jnr3.2		%R3.2		Jnr diff	
	64	70	64	70	64	70	64	70	64	70
AC 40/50	2.29	5.69	0	0	2.4	5.9	0	0	4.29	0.09
AC 60/70	1	2.49	2.09	0	1	2.6	0	0	4.39	0.09
RA	0.39	0.79	0.59	55.1	0.79	1.89	0.29	13.8	1.09	137.7
RB	0.09	0.19	79.8	75.8	0.19	0.49	59.5	39	116.58	202.1
EMB	0.09	0.19	87	84.1	0.1	0.19	83.6	82	17.48	1.09
SBS	0.19	0.39	81.6	80.8	0.29	0.79	73.1	65.3	47.8	82
HPMB	0	0	93.9	89.2	0	0.1	89.1	82.2	86.9	73.6



(الف)



(ب)

شکل ۷. نتایج آزمایش MSCR در دمای. الف ( ۷۰ درجه سانتی‌گراد ب) ۶۴ درجه سانتی‌گراد

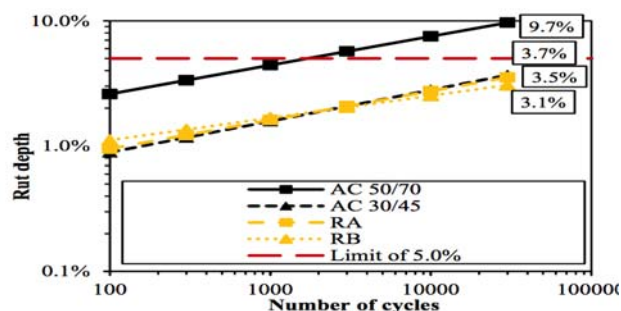
#### ۴-۲- نتایج مخلوط آسفالتی

متراکم ۱۹ میلی‌متری نشان می‌دهد که مخلوط با AC ۵۰/۷۰ کمترین مقاومت را در برابر تغییر شکل دائمی (۹,۷٪ عمق شیار) دارد که از حد توصیه شده ۵٪ پس از ۳۰۰۰۰ چرخه فراتر می‌رود، که نشان می‌دهد لازم است در طراحی مخلوط تجدید نظر شود. مطالعات قبلی گزارش کردند که مقدار بیش از حد قیر مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی را کاهش می‌دهد. با این حال، این مخلوط آسفالتی کمترین میزان قیر را

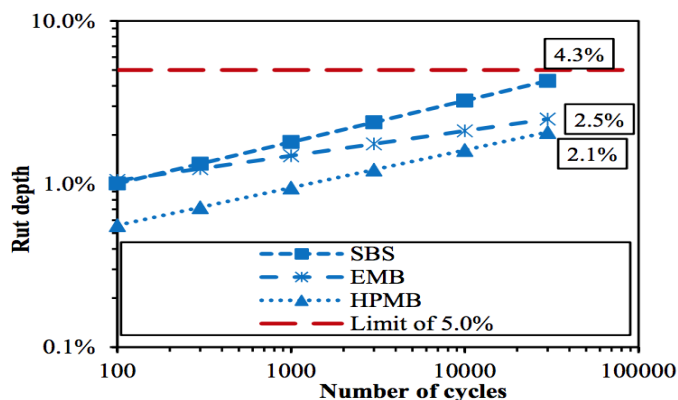
در مورد تست شیار جای چرخ، شکل ۸ و ۹ میانگین نتایج به دست آمده را برای هر دو مخلوط ۱۹ میلی‌متر و ۱۲,۵ میلی‌متر به ترتیب از نظر عمق شیار نشان می‌دهد. برای هر مخلوط آسفالتی، یک جفت دال مخلوط آسفالتی مورد آزمایش قرار گرفت. به طور کلی، هنگامی که از قیرهای اصلاح شده استفاده می‌شود، مزایایی در عملکرد شیارشدگی مخلوط‌ها مشاهده می‌شود. نتایج برای مخلوط‌های آسفالتی با دانه بندی

تهیه شده با AC ۵۰/۷۰ نشان دادند. با این حال، اگر شکل سنگدانه و مقاومت، همراه با دانه‌بندی آن، به طور دقیق انتخاب شده باشد، استفاده از قیر پایه هنوز هم می‌تواند امکان پذیر باشد. همین نتیجه در این مطالعه هنگام مقایسه نتایج مخلوط‌های آسفالتی با AC ۵۰/۷۰ برای هر دو دانه بندی (۱۹) میلی‌متر متراکم و ۱۲٫۵ میلی‌متر باز) مشاهده شد. در رابطه با مخلوط‌ها با سایر قیرها، مقادیر تغییر شکل دائمی پس از ۳۰۰۰۰ چرخه همگی کمتر از حد ۰٫۵٪ بود. مخلوط با HPMB در بین تمام مواد مورد آزمایش (۲٫۱٪ عمق شیار) مقاوم‌ترین به تغییر شکل دائمی بود. هنگامی که این قیر به جای قیر معمولی اصلاح شده با SBS استفاده شد، بیش از ۵۰٪ کاهش در ارزش عمق شیار وجود داشت.

در بین تمام مواد طراحی و آزمایش شده داشت. این مقاومت ضعیف ممکن است مربوط به کیفیت قیر مورد استفاده باشد، به ویژه به این دلیل که تمام مخلوط‌های آسفالتی با درجه متراکم ۱۹ میلی‌متری از توزیع اندازه سنگدانه‌های یکسانی تشکیل شده‌اند. علاوه بر این، AC ۵۰/۷۰ نقطه نرمی پایین‌تری داشت و به عنوان PG ۵۲ V-1۰ طبقه بندی شد که برای دماهای بالا و/یا ترافیک سنگین مناسب نبود. با توجه به اینکه آزمایش در بالای نقطه نرم شدن در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد انجام شد، ممکن است این مقدار برای این مخلوط خاص بسیار زیاد باشد و به تغییر شکل دائمی آن کمک کند. لئاندر و همکاران گزارش داد که مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده با قیر اصلاح شده با SBS تغییر شکل دائمی کمتری نسبت به مخلوط‌های

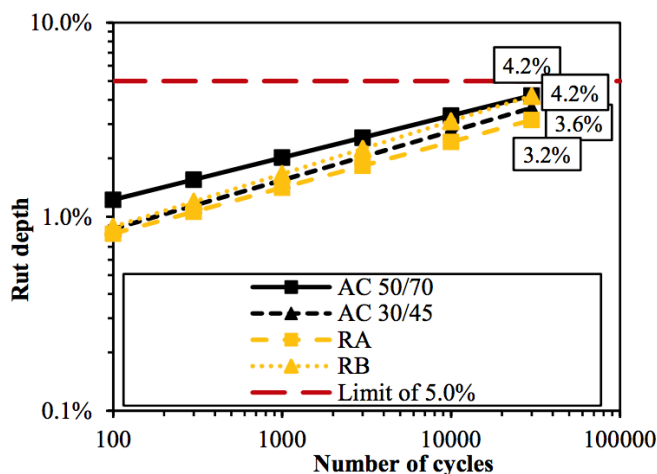


(الف)

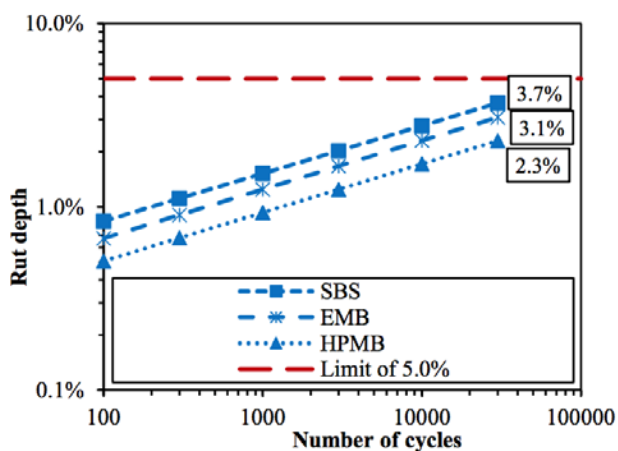


(ب)

شکل ۸. نتایج شیارشدگی ویل تراک برای مخلوط‌های با ۱۹ میلی‌متر (NMAS=الف) برای مخلوط کنترلی و اصلاح شده پلاستیکی (ب)مخلوط اصلاح شده پلیمری



(الف)



(ب)

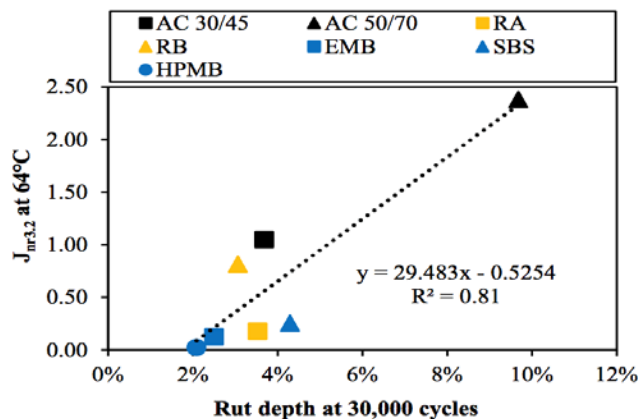
شکل ۹. نتایج شیارشدگی ویل تراک برای مخلوط های با ۱۲/۵ میلی متر  $NMAS$  (الف) برای مخلوط کنترلی و اصلاح شده پلاستیکی (ب) مخلوط اصلاح شده پلیمری

شیار) نشان می دهند، به ویژه برای مخلوط دانه بندی شده با فاصله با این حال، شایان ذکر است که، به طور کلی، درصد قیر برای مخلوط های آسفالتی اصلاح نشده کمتر از مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با لاستیک و پلیمر بود، که تمایل به افزایش مقاومت تغییر شکل دائمی دارد. در نهایت، استفاده از AC ۳۰/۴۵ ممکن است به عملکرد این ماده در رفتار خستگی محدود شود زیرا PG این قیر به دلیل محدودیت ۹ |G| نمی تواند برای ترافیک بسیار سنگین تعیین شود. به طور کلی، مخلوط های ۱۲.۵  $NMAS$  میلی متری با دانه بندی باز، مقادیر مشابهی از عمق شیار را در مقایسه با مخلوط های متراکم با دانه بندی درشت تر (۱۹  $NMAS$  میلی متری) ارائه می کنند، که ممکن است به تعادل بین درصد خالی هوای بالاتر مربوط باشد. مخلوط های دانه بندی شده با فاصله با درصد قیر بالاتر

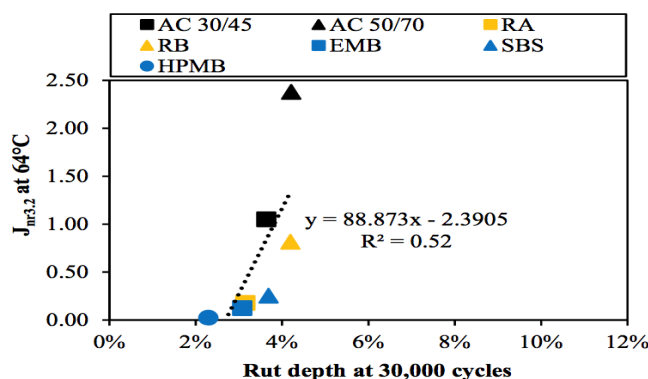
کمترین تغییر شکل دائمی برای مخلوط های آسفالتی با دانه بندی باز ۱۲.۵ میلی متر  $NMAS$  دوباره برای مخلوط با ۲.۳٪  $HPMB$  عمق شیار) مشاهده شد. نتایج با نتایج ارائه شده توسط Błaz\_ejowski و همکاران مطابقت دارد. به این نتیجه رسیدند که این نوع قیر عملکرد عالی برای تغییر شکل دائمی ارائه می دهد و می تواند در مکان هایی با سطوح کرنش بالا، دوره های سایش نازک و طیف وسیعی از دماهای روسازی استفاده شود. همانطور که قبلاً ارائه شد، دانه بندی PG (82 V-22)  $HPMB$  وسیع ترین محدوده دما را در بین هفت قیر مورد مطالعه دارد. نتایج آزمایش شیار جای چرخ نشان داد که مخلوط های آسفالتی با قیر ۳۰/۴۵ AC مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی مشابه آنچه برای مخلوط های آسفالتی با قیرهای اصلاح شده (در ۳،۰ و ۴،۰ درصد از عمق

عملکرد شیاردار همبستگی داشت، مخلوط های ۱۹ میلی متری NMAS با دانه بندی متراکم تنها مواردی بودند که همبستگی خوبی را نشان دادند که منجر به مقدار  $R^2 = 0.81$  شد (شکل ۱۰ الف). برای مخلوط های ۱۲٫۵ میلی متری NMAS با شکاف، این رابطه معنی دار نبود و دارای مقدار  $R^2 = 0.52$  بود (شکل ۱۰ ب). این ممکن است با تأثیر عمده اسکلت سنگدانه در این نوع مخلوط آسفالتی توضیح داده شود که نقش مهمی در مقاومت تغییر شکل دائمی دارد. با این وجود، نتایج آزمایش MSCR برای پیش بینی پتانسیل قیر در برابر مقاومت تغییر شکل دائمی مناسب است، زیرا  $AC 50/70$  بالاترین مقدار  $J_{nr}$  و بدترین عملکرد را در تست شیاردار چرخ LCPC و HPMB و EMB ارائه کرد. کمترین مقادیر  $J_{nr}$  و بالاترین درصد بازیابی را ارائه کرد، منجر به دو بهترین رفتار مخلوط شد.

ترکیب شده‌اند. با توجه به ساختار معدنی، مقادیر تخلخل به دست آمده با روش DASR ارائه شده در جداول ۲ و ۳) نیز نشان داد که مخلوط های آسفالتی می‌توانند رفتار مشابهی داشته باشند. نتایج همچنین این واقعیت را تأیید می‌کند که سطوح پایین‌تر شیاردگی با سطوح بالاتر NMAS به دست می‌آید. با این حال، ذکر این نکته حائز اهمیت است که NMAS تنها متغیر در این مطالعه از نظر دانه‌بندی سنگدانه‌ها نبود، زیرا دو نوع مخلوط آسفالتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (گرید متراکم و دانه بندی باز). برای تأیید رابطه بین مقاومت تغییر شکل دائمی قیرها و مخلوط های آسفالتی، نتایج آزمایش MSCR و نتایج آزمایش شیاردگی چرخ LCPC در  $30000$  سیکل از نظر  $J_{nr}$  در  $3.2$  کیلو پاسکال و  $64$  درجه سانتی‌گراد و مقادیر عمق شیاردگی داشتند. (شکل ۱۰ ب). پارامتر  $J_{nr}$  در دمای  $64$  درجه سانتی‌گراد به خوبی با



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. ارتباط بین عمق شیاردگی و پارامتر  $J_{nr}$  نمونه با ۱۹ میلی متر NMAS= (ب) ۱۲٫۵ میلی متر NMAS=

## ۵- نتیجه گیری

متراکم که منجر به مقادیر عمق شیار به ترتیب ۲,۵ و ۴,۳٪ شد. علاوه بر این، افزایش مقدار افزودن پلیمر با استفاده از HPMB تأثیر قابل توجهی بر درجه بندی PG قیر دارد و باعث افزایش دمای بالای PG از ۷۰ به ۸۲ درجه سانتیگراد؛

-درجه بندی (PG 64H-10) PG یک قیر سخت با رفتار غیر الاستیک (AC ۳۰/۴۵) نشان می‌دهد که برخی اقدامات احتیاطی برای استفاده از این ماده در بزرگراه‌های ترافیکی بسیار سنگین به دلیل مقاومت در برابر خستگی کم آن که در دماهای متوسط مشاهده می‌شود، ضروری است. این نوع قیر می‌تواند برای بزرگراه‌های سطح ترافیک پایین‌تر کار کند. مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌نشده طراحی شده با قیرهای نرم‌تر و چسبناک‌تر ممکن است مقاومت شیارشدگی پایین‌تری داشته باشند و در نتیجه مقادیر بالایی از عمق شیارها را به همراه داشته باشند (مخلوط آسفالتی با AC ۵۰/۷۰ منجر به ۹,۷٪ عمق شیار شد). بنابراین، می‌توان رفتار آنها را با تغییر دانه بندی سنگدانه‌ها افزایش داد، که می‌تواند به دلیل ناپیوستگی در توزیع دانه، قفل ذرات را افزایش دهد.

-به طور کلی، انتظار می‌رود که استفاده از مخلوط‌های آسفالتی با دانه بندی باز، حتی با مقادیر NMAS کوچک‌تر، در مقایسه با مخلوط‌های متراکم، مقاومت شیاردار بهتری را در زمانی که از یک قیر نرم و تمیز استفاده می‌شود.

پژوهش حاضر اثر نوع قیر و دانه بندی سنگدانه‌ها را بر تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از تست‌های خزش و بازیابی تنش چندگانه (MSCR) و تست‌های شیار جای چرخ ارزیابی کرد. نتیجه گیری در زیر خلاصه می‌شود.

-قیرهای لاستیکی آسفالتی که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفتند، علیرغم اینکه از یک پلیمر الاستومری تشکیل شده بودند، به عنوان دارای ویژگی‌های مشابه با قیرهای اصلاح شده با پلیمر طبقه بندی نشدند. این نشان می‌دهد که مدل ارائه شده توسط سلیم و همکاران (Salim et al, 2019) ممکن است برای شناسایی وجود خرده لاستیک در قیر مناسب نباشد.

-در رابطه با رفتار تغییر شکل دائمی قیرها، مواد اصلاح شده با پلیمر و آسفالت لاستیکی مقاومت بهتری نسبت به قیرهای پایه دارند. مخلوط‌های آسفالتی که توسط مواد اصلاح شده تشکیل شده‌اند نیز تمایل به رفتار بهتر دارند. با این حال، مخلوط‌های آسفالتی با شکاف، مقادیر مشابهی از عمق شیارشدگی دارند، مستقل از نوع قیر که در ترکیب آنها استفاده می‌شود، که نشان می‌دهد دانه بندی شکاف تأثیر بیشتری بر نتایج نسبت به رئولوژی قیر دارد.

-اصلاح قیرهای با ترپلیمر الاستومری راکتیو (RET) منجر به مقاومت شیارشدگی بهتری نسبت به اصلاح با پلیمر الاستومری معمولی (SBS) شد، به ویژه برای مخلوط‌های آسفالتی با درجه

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Dynamic Shear Rheometer
- 2- Bending Beam Rheometer
- 3- Performance Grade
- 4- Multiple Stress Creep Recovery
- 5- Polymer Modified Bitumen
- 6- Nominal Maximum Aggregate Size
- 7- Dominant Aggregate Size Range
- 8- Styrene Butadiene Styrene
- 9- Reactive Elastomeric Terpolymer
- 10- Elastomer-Modified Binder
- 11- Rubber Asphalt
- 12- Indirect Tensile Strength
- 13- Linear Viscoelastic
- 14- Rolling Thin Film Oven
- 15- Pressure Aging Vessel

## ۷-مراجع

- Ismael MQ (2011). Effect of aggregate gradations on the rutting potential of asphalt pavements. *Presented at the Iraq roads maintenance Conference*, Baghdad, Iraq
- Kim S (2006). Identification and assessment of the dominant aggregate size range of asphalt mixture. *Dissertation*, University of Florida.
- Mascarenhas ZMG, Gaspar MS, Vasconcelos KL, Bernucci LLB, Bhasin A (2020). Case study of a composite layer with large-stone asphalt mixture for heavy-traffic highways. *J Transp Eng B-Pave*. **doi.org/10.1061/JPEODX.0000143**
- Salim R, Gundla A, Underwood BS, Kaloush KE (2019). Effect of MSCR percent recovery on performance of polymer modified asphalt mixtures. *Transp Res Rec* 2673(5): 308–319. **doi.org/10.1177/0361198119841283**
- Silva SC, Bastos JBS, Soares JS (2015). O efeito da seleção granulométrica na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. *XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes*, Ouro Preto.
- Wang C, Zhang J (2014). Evaluation of rutting parameters of asphalt binder based on rheological test. *Int J Eng Technol* 6(1):30–33. **doi.org/10.7763/IJET.2014.V6.660**
- Zhang J, Walubita LF, Faruk AN, Karki P, Simate GS (2015). Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance—a laboratory study. *Constr Build Mater* 94:218–227. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.044**
- Anderson DA, Kennedy TW (1993). Development of SHRP binder specification. *J Assoc Asphalt Paving Technol*, 62: 482–507
- Camargo FF, Vasconcelos K, Bernucci LL (2019). Laboratory comparison of permanent deformation and fatigue behavior of neat, polymer, and rubber-asphalt binders. *Transp Res Rec*, 2673(4):524–532. **doi.org/10.1177/0361198119836769**
- DuBois E, Mehta Y, Nolan A (2014). Correlation between multiple stress creep recovery (MSCR) results and polymer modification of binder. *Constr Build Mater*, 65:184–190. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.111**
- Delgadillo R, Woo Cho D, Bahia HU (2006). Nonlinearity of repeated creep and recovery binder test and relationship with mixture permanent deformation. *Transp Res Rec*, 1962:3–11. **doi.org/10.1177/0361198106196200101**
- Ferreira JL, Soares JB, Bastos JB (2016). Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. *Transportes* 24(2):46–52. **doi.org/10.14295/transportes.v24i2.1129**
- Ferreira JL, Babadopulos LF, Bastos JB, Soares JB (2020). A tool to design rutting resistant asphalt mixes through aggregate gradation selection. *Constr Build Mater*. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117531**
- Huang YH (1993). Pavement analysis and design. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs*.

# Evaluation of the Effect of Rheological Properties of Bitumen and Gradation of Aggregates on the Rutting Characteristics of Asphalt Mixture

*Azin Chitsazan, Department of Land Use Planning and Assessment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Email: Chitsazan.az@gmail.com*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## **ABSTRACT**

Rutting is one of the main sources of failure in asphalt pavements and has been widely studied because it affects safety and maintenance costs. To reduce this failure, the selection of adequate bitumen and aggregates and the proper balance between them are key elements. In this research, seven bitumen (2 base bitumen, 3 polymer-modified bitumen and 2 rubber bitumen) and asphalt mixtures with different grades (asphalt mixtures with dense grading of 19 mm and asphalt mixture with open grading of 12.5 mm) analyzed. The bitumens were rheologically evaluated using a dynamic shear rheometer (1DSR) and a bending beam rheometer (BBR2) to obtain high and low performance temperature 3 (PG). In addition, multiple stress creep and recovery (4MSCR) tests were performed to analyze the rutting potential of the material at different temperatures. In order to evaluate the effect of mineral skeleton on asphalt mixtures, a wheel rut test was performed. Polymer modified bitumens (5PMBs) and asphalt mixtures produced with them were the most resistant to permanent deformation with low values of rut depth (2.5%). In general, open-graded mixes had better strength than dense-graded mixes. However, this comparison depends on the type of bitumen. Relationships between bitumen and mixture parameters were also proposed and they showed a good relationship between the non-recyclable creep compliance of bitumens ( $J_{nr}$ ) and the rut depth of dense mixtures ( $R^2 = 0.81$ ). However, no significant relationship was found for distance-graded mixtures ( $R^2 = 0.52$ ).

**Keywords:** Bitumen, Asphalt Mixtures, Maximum Nominal Size of Aggregates, Modified Bitumen, Rutting Resistance, Wheel Rut Test, Multi-Stress Creep Test and Recovery