

بررسی خرابی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی و راهکارهای بهبود آن

علمی - پژوهشی

ساجد برادران، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمود عامری*، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Ameri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۷۰-۵۳

چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به کاهش طول عمر خدمت‌دهی روسازی راه‌ها و افزایش چشمگیر هزینه‌های تعمیر و نگهداری، برای برآورده کردن نیازها از جمله حمل‌ونقل بدون تأخیر در حوزه محصولات تجاری و صنعتی، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و همچنین ایمنی و کیفیت مناسب سواری، راه‌ها و روسازی آن‌ها مستلزم عملکرد بهتر و مقاوم‌تر در برابر خرابی‌های گوناگون از قبیل شیارشدگی، ترک خوردگی، عریان شدگی و ... می‌باشند. هرکدام از این خرابی‌ها با مکانیزم‌های مختلفی در روسازی ایجاد گردیده و عواملی از قبیل خصوصیات مخلوط آسفالتی، قیر، شرایط آب و هوایی و بارگذاری ترافیک باعث تشدید و توسعه این خرابی‌ها می‌گردد. در طی سالیان اخیر محققان و پژوهشگران روش‌ها و راهکارهای مختلفی برای بهبود عملکرد روسازی‌ها در برابر خرابی شیارشدگی ارائه کرده‌اند. در این تحقیق به بررسی و مقایسه رویکردهای مختلف جهت بهبود عملکرد روسازی آسفالتی در برابر خرابی شیارشدگی از قبیل اصلاح دانه‌بندی و بهبود قفل و بست سنگدانه‌ای، استفاده از مواد افزودنی و اصلاح‌کننده‌ها، به‌کارگیری سیستم‌های روسازی نیمه انعطاف‌پذیر و استفاده از تراشه‌های آسفالت بازیافتی پرداخته شده و مزیت و معایب هر روش نیز به تفصیل بیان گردیده است. در مجموع نتایج این بررسی و مقایسه نشان داد که استفاده از افزودنی‌ها و اصلاح‌کننده‌های مختلف و تراشه‌های آسفالت بازیافتی تحت شرایط ویژه و کنترل‌شده می‌تواند باعث بهبود عملکرد روسازی در برابر خرابی شیارشدگی گردند.

واژه‌های کلیدی: روسازی آسفالتی، خرابی روسازی، شیارشدگی

۱- مقدمه

شکل، ترک‌های خستگی، ناپایداری و سایر اشکال خرابی می‌شود که در نهایت عملکرد و دوام ساختار روسازی را تضعیف می‌کند (Taherkhani, H., and Khebreh, A. 2017). شناسایی و پیش‌بینی حداکثر خرابی‌هایی که یک روسازی احتمالاً در طول عمر خدمت‌دهی تجربه می‌کند، مهم‌ترین عوامل برای طراحی مناسب روسازی هستند. به همین علت امروزه با بهره‌گیری از فناوری‌های جدید، به منظور ساخت، توسعه، نگهداری و یا افزایش کیفیت روسازی‌ها در برابر خرابی‌های گوناگون علاوه

امروزه با توجه به نقش چشمگیر روسازی راه‌ها در توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل و به تبع آن رشد و توسعه مناطق شهری و افزایش روزافزون وسایل نقلیه، حجم و شدت بارهای ترافیکی در جهان رو به افزایش است. چنین رشد بار و حجم ترافیک سنگین مستلزم عملکرد بهتر راه‌ها برای برآورده کردن نیازها از جمله حمل‌ونقل بدون تأخیر در حوزه محصولات تجاری و صنعتی می‌باشد. بارهای ترافیکی تکراری که جاده در طول عمر خود تجربه می‌کند به همراه عوامل محیطی باعث تغییر

به صورت فرو رفتگی سطحی در مسیرهای چرخ ظاهر می‌شود. به‌ویژه در تقاطع‌ها و ایستگاه‌های اتوبوس شهری، بارگذاری افقی ایجاد شده ناشی از اصطکاک سطح روسازی و لاستیک هنگام ترمزهای مکرر خودرو و همچنین شتاب‌گیری، اغلب باعث ایجاد تنش برشی و کرنش زیاد در ساختار روسازی می‌شود (Li, L., et al. 2013 & Wang, H., & Al-Qadi, I. L. 2010 & Hammoum, F., et al. 2010). در بخش‌های طولانی و شیب‌دار بزرگراه‌ها نیز، شیارشدگی به دلیل برهم‌نهی زمان - دما به راحتی اتفاق می‌افتد (Li, L., et al. 2015). این خرابی به آب و هوا و شرایط ترافیکی مانند تراکم ترافیک، بارهای سنگین، کندی ترافیک و دمای بالا بستگی دارد (Morea, F., et al. 2011). علاوه بر این، کیفیت ضعیف مواد و مصالح مخلوط آسفالتی (Zhang, W., et al. 2017) و ضعف در طرح اختلاط و همچنین در اجرا و استفاده از قیر با درجه عملکردی ناسازگار با درجه حرارت منطقه‌ای که راه از آن مناطق عبور می‌کند (Faruk, A. N., et al. 2015) نیز از عوامل مهم برای ایجاد این خرابی هستند. بسیاری از مشکلات روسازی در ارتباط با خرابی ناشی از شیارشدگی می‌باشد. به‌عنوان مثال، هنگامی که آب در شیارها جمع می‌شود، نفوذ آب به ساختار روسازی می‌تواند سطح روسازی را بیشتر خراب کند (Tian, Y., et al. 2017). علاوه بر این، آب جمع شده در شیارها خطری برای ایمنی در رانندگی و پدیده آب پیمایی ایجاد می‌کند (Wang, G., et al. 2012).

۳- مکانیزم‌های ایجاد شیارشدگی

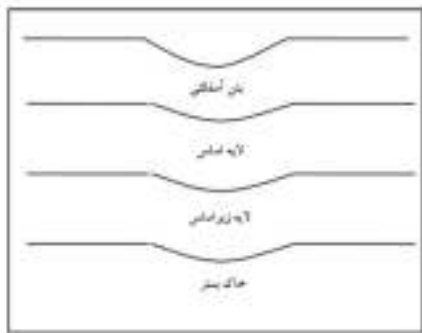
مکانیزم بروز شیارشدگی در زمان‌های متفاوت عمر روسازی را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم کرد:

۱) شیارشدگی اولیه؛ که در اوایل عمر روسازی اتفاق می‌افتد و عمدتاً به دلیل عدم تراکم کافی لایه‌های روسازی و یا بیشتر متراکم شدن آنها بر اثر تردد ترافیک وسایل نقلیه سنگین مرتبط می‌باشد. پارامترهایی چون؛ انتخاب ضخامت بسیار نازک برای مقطع روسازی و همچنین اجرای نادرست روسازی در ایجاد این نوع شیارشدگی مؤثر است. مهم‌ترین عامل بروز شیارشدگی تحت مکانیزم فوق، ضعف لایه‌های تحتانی، از جمله خاک بستر

بر افزایش کیفیت خدمت‌دهی، می‌توان باعث کاهش هزینه‌های چرخه عمر و همچنین ایمنی در رانندگی شد. شیارشدگی^۱ یکی از خرابی‌های اصلی و مهم روسازی‌های انعطاف‌پذیر است که سالیانه بخش زیادی از هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه را به خود اختصاص می‌دهد و اغلب به تغییر شکل‌های دائمی اطلاق می‌شود که به صورت شیار فرورفته در مسیر عبور چرخ‌های وسیله نقلیه به موازات محور طولی راه همراه با برآمدگی کوچکی در کنار مسیر عبور چرخ‌ها نمایان می‌شود. افزایش وسعت و شدت تغییر شکل‌های دائمی در سطح راه‌های کشور در سالیان اخیر، نگرانی‌هایی را در ارتباط با اثر این نوع خرابی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی شدت بخشیده است. این نوع خرابی قابلیت بهره‌برداری از روسازی را کاهش داده و همچنین خطر جمع شدن آب درون شیارها موجب بروز حوادث رانندگی و کاهش کیفیت سواری می‌شود (Iran Ministry of Road and Transportation, 2009). با علم بر اثرات منفی این نوع خرابی بر روی عملکرد روسازی و بخصوص اهمیت این موضوع در راه‌های کشور در این پژوهش به بررسی این خرابی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر پرداخته شده است.

۲- تعریف شیارشدگی

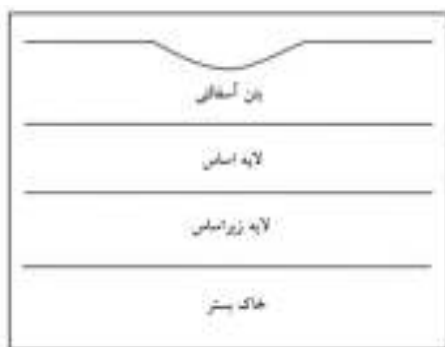
روسازی‌ها را می‌توان به عنوان ساختارهای چند لایه مشخص کرد که این لایه‌ها بر روی خاک بستر قرار گرفته‌اند. از آنجا که این سازه در طول عمر مفید خود تحت بارهای ترافیکی و تغییرات آب و هوایی قرار می‌گیرد، بسیاری از مکانیزم‌های خرابی را می‌توان در سطح روسازی یا زیر لایه سطحی مشاهده کرد. یکی از انواع رایج مکانیزم خرابی تجمع تغییر شکل دائمی^۲ است که معمولاً به آن شیارشدگی گفته می‌شود (Miller, J.S., & Bellinger, W. Y. 2003). این خرابی یکی از اصلی‌ترین حالت‌های خرابی روسازی‌های انعطاف‌پذیر است و بیشتر در مناطق با آب و هوای گرم اتفاق می‌افتد. شیارشدگی معمولاً در هر دو لایه آسفالتی و لایه‌های غیر چسبنده زیرین اتفاق می‌افتد. برای روسازی‌های آسفالتی که آب اجازه عبور از لایه‌های غیر چسبنده را ندارد، تقریباً ۸۵ - ۹۵٪ از شیارشدگی در لایه‌های آسفالتی اتفاق می‌افتد (Du, Y., et al. 2018). این خرابی معمولاً



شکل ۱. شیارشدگی ناشی از ضعف بستر و سیستم روسازی
(Management and Planning Organization, 2016)

۴-۲- شیارشدگی ناشی از سایش لایه آسفالتی

این نوع از شیارشدگی ناشی از فرسایش سطحی (شکل ۲) است، در اثر جداشدگی و از بین رفتن مصالح سنگی از سطح رویه آسفالتی به وجود می‌آید. عامل به وجود آمدن این نوع شیارشدگی در زمستان سایش ناشی از عبور لاستیک‌های پخشکن^۴ است و در تابستان نیز گرمای هوا و بارهای ترافیکی سنگین عامل این خرابی می‌باشد. این نوع خرابی به دلیل فرسایش سنگ‌ها در زمستان و به علت شرایط محیطی و بارهای ترافیکی در سطح رویه و جداشدگی سنگدانه‌ها از قیر شدت می‌گیرد. این شیارشدگی به شیارشدگی سایشی^۵ نیز معروف می‌باشد (Management and Planning Organization, 2016).



شکل (۲). شیارشدگی ناشی از سایش لایه آسفالتی
(Management and Planning Organization, 2016)

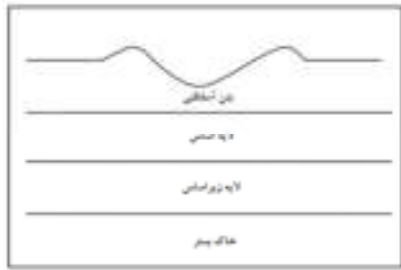
است. در این نوع از شیارشدگی، ضخامت لایه آسفالتی تقریباً ثابت مانده و لایه‌های زیرین تغییر شکل می‌یابند (Management and Planning Organization, 2016).

۲) شیارشدگی پس از مرحله اولیه، کاهش حجم مصالح روسازی در زیر تایرها تقریباً با افزایش حجم مناطق برآمده کناری برابر است. بدین معنا که تراکم اولیه کامل شده و از این پس شیارشدگی به علت جابجایی لایه با حجم ثابت، رخ می‌دهد. این نوع شیارشدگی اساساً، ناشی از ضعف در مقاومت و استحکام لایه آسفالتی است. ضعف در استحکام می‌تواند معلول توزیع نامناسب مصالح سنگی، صدمه‌های ناشی از رطوبت و یا ضعف در قفل و بست سنگ‌دانه‌های مخلوط باشد (Management and Planning Organization, 2016).

۴- انواع شیارشدگی

۴-۱- شیارشدگی ناشی از ضعف بستر و سیستم روسازی
اولین نوع شیارشدگی، شیارشدگی ناشی از ضعف بستر و سیستم روسازی می‌باشد (شکل ۱)؛ که حاصل تغییر شکل مجزا یک یا چند لایه از روسازی از جمله بستر روسازی می‌باشد. زمانی که میزان تنش‌های وارده به روسازی بیشتر از مقاومت مصالح و مواد بکار برده شده در لایه‌های روسازی باشد این نوع شیارشدگی اتفاق می‌افتد. این شیارشدگی به شیارشدگی سازه‌ای^۳ موسوم است و شیارهای ایجاد شده عریض بوده و اطراف آن‌ها برآمدگی مشاهده نمی‌شود (نیمرخ V شکل). شیارشدگی سازه‌ای معمولاً در روسازی‌هایی اتفاق می‌افتد که برای شرایط ترافیک واقعی به طور صحیح طراحی و یا اجرا نشده باشند.

از دیگر عوامل بوجود آمدن این نوع شیارشدگی می‌توان به استفاده از مصالح نامناسب در هنگام پخش و تراکم، زهکشی نامناسب، طراحی ضعیف در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد و سایر عواملی که به نوعی بر روی ظرفیت باربری بستر و لایه‌های روسازی در طول عمر بهره‌برداری پیش‌بینی شده اثر می‌گذارد (Management and Planning Organization, 2016).



شکل ۳. شیارشدگی ناشی از ضعف لایه آسفالتی (Management and Planning Organization, 2016)

۳-۴- شیارشدگی ناشی از ضعف لایه آسفالتی

این نوع شیارشدگی حاصل تغییر شکل مجزا لایه (لایه‌های) آسفالتی بوده و بیشتر به طرح اختلاط مخلوط آسفالتی مربوط می‌شود. عوامل مؤثر در ایجاد این نوع شیارشدگی (شکل ۳) شامل مشخصات اجزا تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی، نسبت این اجزا در مخلوط است. مواد و مصالح مخلوط آسفالتی زمانی که تنش‌های ناشی از بارگذاری از مقدار مقاومت مصالح بیشتر می‌شود بر روی سطوح روسازی برشی به صورت جانبی جابجا می‌گردند و در اثر فرورفتگی ناحیه بارگذاری شده در مسیر عبور چرخ‌ها و همچنین برآمدگی رویه در کنار مسیر عبور چرخ‌ها شیارشدگی ایجاد می‌شود.

همچنین این نوع شیارشدگی به شیارشدگی ناپایدار^۶ موسوم است و شیارهای ایجاد شده، دارای برآمدگی در اطراف می‌باشد و بیشتر در سربالایی‌ها، تقاطع‌ها و قوس‌ها و زمانی که ماشین‌های باری سنگین مجبور به کاهش سرعت باشند و تنش‌های مماسی در محل سطح تماس لاستیک و روسازی بیشتر باشد بوجود می‌آیند. همچنین زمانی که خصوصیات سازه‌ای آسفالت متراکم شده و مقاومت آن برای عبور بارهای تکراری که به سطح رویه وارد می‌شود ناکافی باشد این نوع شیارشدگی شکل می‌گیرد (Management and Planning Organization, 2016).

عوامل مؤثر بر شیارشدگی

عوامل زیادی، از جمله عوامل داخلی و خارجی، بر مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی تأثیر می‌گذارد. عوامل داخلی به خواص مواد مورد استفاده در مخلوط آسفالتی مربوط می‌شود، درحالی‌که عوامل خارجی که بر مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالتی تأثیر می‌گذارد عمدتاً شامل روش ساخت، شرایط آب و هوایی، شدت ترافیک و میزان مواد و مصالح اولیه‌ای که به مخلوط آسفالتی اضافه می‌شود و غیره، می‌باشد (Guo, R., & Nian, T, 2020). در جدول (۱) عوامل متعددی که بر روی مقاومت در برابر شیارشدگی روسازی آسفالتی تأثیر می‌گذارند به صورت خلاصه آورده شده است (Witzak, M. W. 2007).

جدول ۱. عوامل مؤثر بر مقاومت روسازی در برابر شیارشدگی (Witzak, M. W, 2007).

عامل تأثیرگذار	عامل	تغییر در عامل	تأثیر تغییر در عامل بر مقاومت شیارشدگی
سنگدانه‌ها	بافت سطحی	صاف به زبر	افزایش
	دانه‌بندی	باز به پیوسته	افزایش
	شکل	گرد گوشه به زاویه‌دار بودن	افزایش
	اندازه	افزایش در میزان بزرگ‌ترین اندازه	افزایش
قیر	سفتی	افزایش	افزایش
مخلوط آسفالتی	درصد قیر	افزایش	کاهش
	درصد فضای خالی	افزایش	کاهش
	VMA	افزایش	کاهش
	نحوه تراکم	تأثیرگذار بر مقاومت در برابر شیارشدگی	
شرایط محیطی یا آزمایشگاهی	دما	افزایش	کاهش
	حالت تنش _ کرنش	افزایش فشار تماس لاستیک	کاهش
	تکرار بارگذاری (ترافیک)	افزایش	کاهش
	میزان رطوبت	خشک به مرطوب	کاهش در مخلوط‌های حساس به رطوبت

رویکردهای گوناگون جهت بهبود شیارشدگی

بررسی روش‌های مؤثر برای کاهش خرابی شیارشدگی برای ایجاد یک جاده با دوام طولانی‌مدت و ایمنی بسیار بالا مهم است. راه‌حل‌های موجود جهت بهبود شیارشدگی ابتدا مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که تلاش‌های صنایع، جامعه دانشگاهی و مهندسی بر بهبود خواص رئولوژیکی قیر و بهبود خواص مخلوط آسفالتی با افزودن پودر، الیاف یا اصلاح‌کننده به قیر یا مخلوط آسفالتی و همچنین تقویت قفل و بست سنگدانه‌ها، اصلاح دانه‌بندی و اعمال ساختار جدید روسازی و استفاده از ژئوسنتتیک‌ها متمرکز شده است. به‌عنوان مثال با استفاده از انواع افزودنی‌ها، الیاف و اصلاح‌کننده‌ها مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی افزایش یافت. از طرفی روسازی آسفالتی نیمه انعطاف‌پذیر به‌عنوان یک روش امیدوارکننده برای افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی پیشنهاد شد، زیرا دارای خصوصیات مکانیکی بسیار خوبی است بدون این که انعطاف‌پذیری روسازی آسفالتی را کاهش دهد. در ادامه به بررسی هر یک از این رویکردها به تفصیل پرداخته می‌شود.

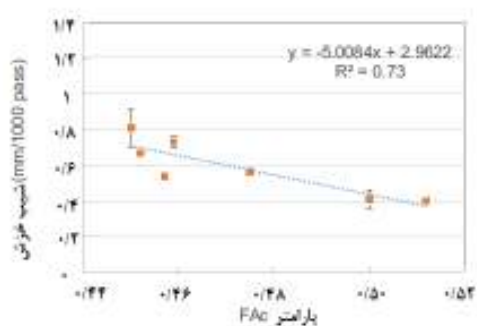
اصلاح دانه‌بندی

شیارشدگی (تغییر شکل دائمی) یکی از اصلی‌ترین مشکلات روسازی‌های آسفالتی در طول عمر مفید آن‌ها است. امروزه بسیاری از جاده‌ها به دلیل افزایش بار ترافیکی دچار مشکلات گسترده، شدید و زودهنگام از قبیل شیارشدگی می‌شوند. سنگدانه بخش عمده‌ای از مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد و بنابراین ویژگی‌های آن نقش اساسی در مقاومت در برابر شیارشدگی دارد. دانه‌بندی سنگدانه‌ها به‌طور کلی به‌عنوان مهم‌ترین مشخصه سنگدانه‌ها و به دلیل نقش مهمی که در شکل‌گیری اسکلت و ساختار مخلوط آسفالتی^۷ دارد، در نظر گرفته می‌شود (Otto, F., et al., 2018). یک دانه‌بندی مناسب باید بتواند بارهای ترافیکی را از طریق یک اسکلت دانه‌ای به هم پیوسته منتقل کند و در نتیجه از نظر مقاومت برشی به قیر یا ماستیک وابسته نیست (Button, J. W., et al., 1990). مخلوط آسفالتی متراکم متداول که بر اساس فرمول تیلور طراحی شده است، به دلیل عدم وجود اسکلت سنگدانه در هم پیچیده، معمولاً در برابر خرابی شیارشدگی آسیب‌پذیر می‌باشد (Cheng, Y., & Qin, Y., 2019). میزان زیاد ذرات ریزدانه در مخلوط متراکم بر تشکیل یک اسکلت

سنگدانه قوی تأثیر می‌گذارد و منجر به استقامت ضعیف در درجه حرارت زیاد مخلوط آسفالتی می‌شود. برای بهبود عملکرد در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی، مخلوط اسکلت مانند مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای^۸ (SMA)، مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی درشت^۹ و مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی باز^{۱۰} معرفی شد. معروف‌ترین مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی متراکم، SMA، توسط زیکنر^{۱۱} در آلمان در دهه ۱۹۶۰ طراحی شد (Brown, E., et al., 1997). با این حال، SMA تا دهه‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار نگرفت زیرا مزایای SMA را نمی‌توان به‌طور کامل در سطح ترافیک در آن زمان نشان داد. SMA مقاومت خود را از اسکلت محکم به‌هم‌پیوسته که از سنگدانه‌های درشت تشکیل شده است، می‌گیرد. ذرات ریز (کوچک‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر) فقط به‌عنوان پرکننده در SMA استفاده می‌شوند و بخشی از اسکلت SMA نیستند (Panda, M., et al., 2013). علی‌رغم عملکرد مناسب در برابر شیارشدگی SMA، مخلوط SMA نیازمند مصالح سنگی با خصوصیات و همچنین دانه‌بندی مناسب است (Brown, E. R., et al., 1997). از این رو، عموماً اعتقاد بر این است که دانه‌بندی مناسب مصالح سنگی باعث به وجود آمدن اسکلت سنگدانه‌ای قوی برای مخلوط می‌گردد (Ayar, P., et al., 2022).

تحقیقات فراوانی با تمرکز بر تأثیر دانه‌بندی سنگدانه بر عملکرد در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. کندال^{۱۲} از تحلیلگر روسازی آسفالت^{۱۳} برای مطالعه تأثیر دانه‌بندی مخلوط و خواص سنگدانه بر مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی استفاده کرد و تفاوت معنی‌داری بین عمق شیارشدگی^{۱۴} در مخلوط‌ها با استفاده از انواع سنگدانه‌ها و دانه‌بندی‌های مختلف را گزارش کرد (Kandhal, P. S., & Mallick, R. B., 2001). گلعلی پور و همکاران از آزمون مارشال و آزمون خزش دینامیکی برای ارزیابی تأثیر دانه‌بندی سنگدانه بر رفتار مخلوط‌ها در برابر شیارشدگی استفاده کردند. اشاره شد که ظرفیت باربری مخلوط آسفالتی بستگی به عوامل مختلفی از جمله دانه‌بندی سنگدانه‌ها و خواصی مانند اصطکاک، زاویه‌داری^{۱۵}، قفل و بست سنگدانه‌ها^{۱۶} و اتصال قیر و سنگدانه‌ها علاوه بر سختی سنگدانه دارد (Golalipour, A., et al., 2012). کوان و همکاران به بررسی تأثیر اصلاح

دانه‌بندی ریزتر در قسمت ریزدانه (کوچکتر از ۴/۷۵ میلی‌متر) مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط را بهبود بخشد زیرا شیب خزش ^{17}HWT با پارامتر FAc مخلوط ($R^2 = 0/73$) ارتباط منفی دارد (شکل ۵). در نهایت می‌توان از نتایج فهمید که یک دانه‌بندی درشت‌تر در قسمت درشت‌دانه (بیشتر از ۴/۷۵ میلی‌متر) و یک دانه‌بندی ریزتر در قسمت ریزدانه، هر دو عملکرد در برابر شیارشدگی مخلوط را بهبود می‌بخشد؛ اما تأثیر آن‌ها به اندازه کاهش نسبت عبور از الک ۴/۷۵ میلی‌متر نیست (Lv, Q., et al., 2020).

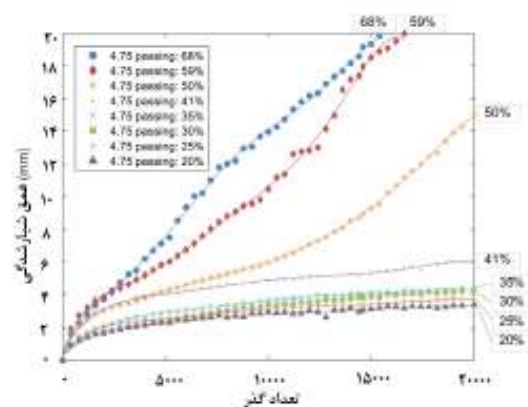


شکل ۵. همبستگی بین شیب خزش و پارامتر FAc از روش پبلی مخلوط‌های آسفالتی مختلف (Lv, Q., et al., 2020)

تقویت قفل و بست سنگدانه‌ای

سنگدانه‌ها بخش عمده‌ای از مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهند. زاویه اصطکاک داخلی مصالح سنگی بالغ بر ۸۰ درصد مقاومت برشی مخلوط مصالح سنگی را تامین می‌نماید؛ بنابراین تقویت قفل و بست سنگدانه‌ای برای بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی مفید است که با استفاده از سنگدانه‌هایی با اصطکاک زیاد (سنگدانه با زاویه‌داری و بافت سطحی مناسب)، یا بهینه‌سازی دانه‌بندی سنگدانه معمولاً دانه‌بندی درشت‌دانه و دانه‌بندی ناپیوسته^{۱۸} این امر محقق شد (Polaczyk, P., et al., 2021). کلری و همکاران اشاره کردند که با قفل و بست سنگدانه‌ای بیشتر، در نتیجه دانه‌بندی متراکم و اندازه سنگدانه بزرگ‌تر، منجر به مقاومت برشی بالاتر می‌شود (Coleri, E. et al., 2013). تاشمن و همکاران به این نتیجه رسیدند که تعداد نقاط تماس بین سنگدانه‌هایی که مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهند به روش‌های مورد استفاده جهت تراکم آن‌ها بستگی

دانه‌بندی بر مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. به این منظور در مجموع ۲۶ مخلوط آسفالتی با دستگاه ویل تراک مورد آزمایش قرار گرفتند و اثر چهار متغیر، یعنی میزان قیر، مصالح عبوری از الک کلیدی ۴/۷۵ میلی‌متر، تغییرات دانه‌بندی درشت‌دانه (بزرگتر از ۴/۷۵ میلی‌متر) و تغییرات دانه‌بندی ریزدانه (کوچکتر از ۴/۷۵ میلی‌متر) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد (شکل ۴) که افزایش نسبت عبوری از الک ۴/۷۵ میلی‌متر از ۲۰٪ به ۳۵٪ به آرامی عمق شیارشدگی را افزایش می‌دهد، با نسبت عبوری از الک بیش از ۴۱٪، مخلوط مقاومت در برابر شیارشدگی بسیار پایینی را نشان داد و رفتار عریان شدگی نیز مشاهده شد. برای مخلوط‌های مورد آزمایش در این مطالعه، نسبت عبور از الک ۴/۷۵ میلی‌متر در حدود ۴۱ درصد یک حد بحرانی است که در مقادیر بیشتر از آن استخوان‌بندی درشت‌دانه مخلوط آسیب می‌بیند و مقاومت در برابر شیارشدگی و رطوبت مخلوط به‌طور قابل توجهی تضعیف می‌شود (Qian, C, et al., 2020).



شکل ۴. منحنی‌های شیارشدگی مربوط به مخلوط‌های آسفالتی با نسبت عبوری از الک ۴/۷۵ میلی‌متری متفاوت (Qian, C, et al., 2020)

استخوان‌بندی تشکیل شده از سنگدانه‌های ۱۳/۲-۹/۵ میلی‌متری از استخوان‌بندی شکل گرفته با سنگدانه‌های ۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر بهتر عمل کرد. استخوان‌بندی با دانه‌بندی یکنواخت در هر اندازه بدترین مقاومت در برابر شیارشدگی را نشان داد زیرا ذرات کوچک‌تر می‌توانند با فشار دادن سنگدانه درشت به یکپارچگی اسکلت مخلوط آسیب برسانند. یک

دارای خصوصیات انعطاف‌پذیری روسازی‌های آسفالتی و صلیبیت روسازی‌های بتنی می‌باشند (شکل ۶).



شکل ۶. مراحل ساخت روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر

(الف) مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی باز. (ب) پرکردن مخلوط آسفالتی با دوغاب سیمان. (ج) روسازی نیمه انعطاف‌پذیر پس از عمل‌آوری با دوغاب سیمانی (Li, L., et al., 2015)

از طرفی، این نوع روسازی‌ها مستعد خرابی شیارشدگی یا فتیله شدن^{۲۰} نیستند. امروزه در کشورهای اروپایی مانند آلمان، انگلیس، ایتالیا یا هلند و در کشورهای آسیایی مانند چین، مالزی، سنگاپور و هند از روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر به‌عنوان روسازی بزرگراه‌ها، آزادراه‌ها، روسازی عرشه پل، تونل‌ها و ... مناطق صنعتی با تردد ماشین‌آلات سنگین، اپرون فرودگاه (با احتمال نشست زیاد ترکیبات شیمیایی و سوخت‌ها) و ایستگاه‌های BRT استفاده می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد، استقامت و دوام روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر در برابر وسایل نقلیه سنگین و بارهای استاتیکی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهتر از روسازی‌های آسفالتی است. روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر نوع جدیدی از روسازی‌ها هستند که شامل دو جزء اصلی می‌باشند که عبارت‌اند از: (الف) مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی باز و (ب) دوغاب سیمان. که دوغاب‌ها از سیمان پرتلند، ماسه، مواد افزودنی مانند پلی کربوکسیلیک، کربوکسیل لاتکس، فوق روان‌کننده‌ها و

دارد (Tashman, L. S., et al., 2000). سوسا و همکاران نمونه‌های HMA را با تراکم ژیراتوری^{۱۹} تولید کرده و نتیجه گرفتند که آن‌ها در مقایسه با نمونه‌های تهیه شده با استفاده از سایر روش‌های تراکم، مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل دائمی دارند (Sousa, J. B. et al., 1991). پس روش‌های مختلف تراکم می‌تواند بر تقویت قفل و بست سنگدانه‌ای اثر بگذارد و باعث افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی گردد.

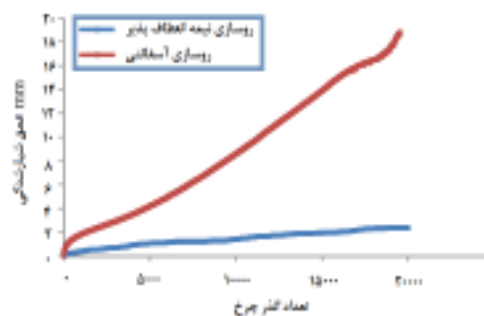
۳-۶- استفاده از سیستم روسازی نیمه انعطاف‌پذیر

روسازی‌های آسفالتی با توجه به عملکرد رضایت‌بخش آن‌ها در برابر بارهای ترافیکی و همچنین مقاومت بالا در برابر لغزش، سرویس‌دهی خوب و کیفیت سواری، به‌عنوان روسازی بزرگراه، آزادراه و فرودگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. طی دهه‌های گذشته، با توسعه سریع شهرنشینی و با توجه به افزایش چشمگیر بارهای ترافیکی، افزایش حجم و سرعت ترافیک، تغییر شکل دائمی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر به‌طور قابل‌توجهی گسترده شده است. از سوی دیگر، به دنبال پیرشدگی قیر در مخلوط‌های آسفالتی و حساسیت آن‌ها نسبت به درجه حرارت پایین و بالا، هزینه‌های نگهداری اداره راه افزایش یافته است. از نظر روسازی بتنی، مسائلی مانند اتصالات و نحوه طراحی و اجرا آن‌ها و همچنین محدودیت‌های مربوط به زمان ساخت آن را نمی‌توان به‌سادگی نادیده گرفت. علاوه بر این، زمان گیرش در مراحل ساخت و نگهداری روسازی بتنی می‌تواند بر کیفیت آن تأثیر منفی بگذارد. همچنین شایان ذکر است که برای ارتقاء کیفیت سواری ضعیف در روسازی بتنی و همچنین صدای ایجاد شده در درزهای انبساط و انقباض نیز باید راه‌حل‌هایی در نظر گرفته شود. در نتیجه، در مقایسه با روسازی بتنی، روسازی نیمه انعطاف‌پذیر یک تکنولوژی روسازی قابل‌اطمینان و پرکاربرد بدون اتصالات است و ساخت و تعمیر آن آسان است. علاوه بر این، کیفیت سواری و خدمات رضایت‌بخشی را ارائه می‌دهد (Hassani, A. et al. 2020). روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر مواد کامپوزیتی هستند که از مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز با ۲۰ تا ۳۵ درصد فضای خالی که با دوغاب سیمان مخصوص پر شده‌اند (Hasan, M., & Sugiarto, S., 2021). این نوع جدید از روسازی‌های بدون اتصال، هم‌زمان

تا حد تحمل لایه‌های زیرین روسازی کاهش داده و در حد قابل تحمل، به لایه‌ها و خاک‌های زیرین توزیع کنند. بطور معمول لایه‌های روسازی انعطاف‌پذیر شامل یک لایه رویه آسفالتی، یک لایه اساس سنگدانه‌ای و یک لایه زیر اساس سنگدانه‌ای می‌شود که بر روی خاک بستر طبیعی یا اصلاح و تقویت شده موسوم به بستر راه اجرا و ساخته می‌شود. همانطور که بیان شد یکی از انواع رایج خرابی‌های روسازی، شیارشدگی است. شیارشدگی زمانی رخ می‌دهد که روسازی بر روی خاک‌های ضعیف و مرطوب بستر که قدرت که کافی برای تحمل بارهای ترافیکی را ندارند اجرا و ساخته شود. طراحی و ساخت روسازی‌های انعطاف‌پذیر بر روی لایه‌های ضعیف و مرطوب بستر همیشه برای طراحان و مهندسان روسازی چالشی بوده است. شیوه متداول در برخی ایالت‌های آمریکا، تثبیت سطح بالایی مصالح بستر با سیمان یا آهک، بر اساس نوع خاک و طبقه‌بندی خاک بستر، برای ایجاد یک سکوی محکم‌تر می‌باشد. ژئوسنتتیک‌ها می‌توانند یک گزینه‌ای سازگار با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه برای تقویت و یا تسلیح بستر روسازی‌ها باشند. جاده به‌ویژه جاده‌هایی که بر روی خاک‌های ضعیف ساخته شده‌اند، ارایه دهند. در چنین کاربردی، ژئوسنتتیک‌ها که در بالای لایه بستر یا در میان لایه اساس غیر چسبنده قرار گرفته‌اند، با خاک و سنگدانه‌ها برهم اثر می‌گذارند تا با توجه به مکانیزم‌های تقویت آن، مقطعی تقویت‌شده ایجاد شود (Alimohammadi, H. et al., 2021).

مفهوم کاربرد ژئوسنتتیک^{۱۱} در تقویت راه‌سازی در دهه ۱۹۷۰ آغاز شد. از آن زمان، بسیاری از مطالعات مزایای استفاده از تقویت‌کننده‌های ژئوسنتتیک را بررسی و ارزیابی کرده‌اند. ژئوتکستایل و ژئوگریدها دو نوع محصولات ژئوسنتتیک هستند که معمولاً در مطالعات تجربی در ادبیات مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور کلی، نتایج مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که ژئوسنتتیک‌ها می‌توانند عمر مفید روسازی‌ها را افزایش دهند، ضخامت لایه اساس را کاهش دهند، گسترش خرابی شیارشدگی را به تعویق بیندازند و اجازه ساخت وساز بر روی خاک بستر نرم که قبلاً غیرممکن بود را می‌دهد (Alimohammadi, H. et al., 2021). نتایج مطالعات تجربی نشان داد که مزایای تقویت روسازی با ژئوسنتتیک‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد.

افزودنی‌های پلیمری در برخی موارد تشکیل شده است (Hassani, A. et al., 2020). ژانگ و همکاران به بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط کامپوزیت آسفالت و سیمان پرداختند. به این منظور آزمون‌های مارشال و شیارشدگی انجام گرفت. نتایج نشان داد که در مقایسه با مخلوط آسفالتی معمولی، مخلوط کامپوزیت سیمان - آسفالت دارای مقاومت بهتری در دمای بالا بود و درعین حال انعطاف‌پذیری خود را حفظ می‌کرد و عملکرد روسازی آسفالتی را در مقاومت در برابر تغییر شکل در دمای بالا بسیار بهبود می‌بخشید (Zhang, H. et al., 2019). در مطالعه‌ای دیگر بهارات و همکاران دریافتند که روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر در مقایسه با روسازی‌های معمولی خرابی شیارشدگی کمتری داشت (شکل ۷). همچنین دارای نسبت استحکام کششی TSR_{96} ٪ بود که مقاومت بهتری در برابر رطوبت نسبت به روسازی آسفالتی با ارزش TSR_{80} ٪ نشان داد. همچنین از نظر مقاومت فشاری و استقامت؛ این مخلوط کامپوزیت به ترتیب، تقریباً $6/5$ و $2/75$ برابر مقادیر بیشتری در مقایسه با مخلوط آسفالتی متداول نشان داد. همچنین مدول‌های دینامیکی نمونه‌های کامپوزیت در همه دماها و فرکانس‌ها به مراتب بیشتر از نمونه‌های آسفالتی بود (Bharath, G. et al., 2020).

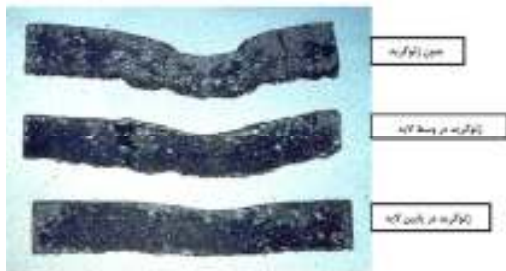


شکل ۷. مقایسه عملکرد در برابر شیارشدگی روسازی نیمه انعطاف‌پذیر با روسازی آسفالتی متداول (Bharath, G. et al., 2020)

۶-۴- استفاده از ژئوسنتتیک‌ها

لایه‌های روسازی طوری طراحی می‌شوند که بارهای ناشی از وسایل نقلیه را تحمل کرده و تنش‌های ناشی از بارگذاری را

کرنش کششی در مخلوط آسفالتی تا حدود زیادی جلوگیری میکند و باعث کاهش عمق شیارشدگی می‌شود (شکل ۹). نویسنده این نتایج را بر اساس نتایج آزمایش خستگی و آزمایش ویل تراک بر روی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده به دست آورده است. مطالعه این محقق نشان داد که استفاده از ژئوتکستایل، عمر روسازی ۲/۵ تا ۳ برابر در مقایسه با بخشی که از ژئوگرید در آن استفاده نشده است، افزایش می‌دهد (Brown, S. F., 2009).



شکل ۹. تاثیر ژئوگرید در کاهش شیارشدگی (Brown, S. F., 2009)

استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی

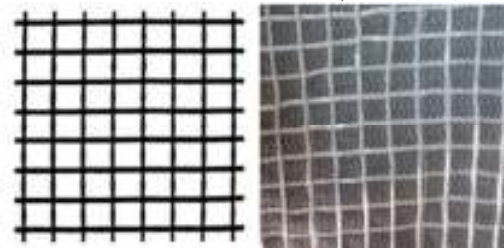
بازیافت مصالح مخلوط آسفالتی منجر به استفاده مجدد از مصالح سنگی و قیر می‌گردد که به‌عنوان روسازی آسفالتی بازیافتی^{۲۲} شناخته می‌شود. بازیافت روسازی آسفالتی یک رویکرد ارزشمند به دلایل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی است (Kennedy, T. W. et al., 1998). با توجه به افزایش هزینه‌های قیر، کمپایه مصالح سنگی با کیفیت و نیاز مبرم به حفظ محیط‌زیست، استفاده از RAP نسبت به مخلوط‌های آسفالتی ترجیح داده شده است. تحقیقات نشان داده است که استفاده از درصد‌های مختلف تراشه آسفالتی می‌تواند باعث صرفه‌جویی قابل توجه در هزینه‌های ساخت و تأمین مصالح جهت احداث روسازی گردد (Al-Qadi, et al., 2007).

محققان تحقیقات زیادی را بر روی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت انجام داده‌اند. نتایج نشان داده است که قیر استخراج‌شده از RAP دارای ویسکوزیته بالاتری نسبت به قیر اصلی است به همین علت مخلوط آسفالتی حاوی RAP به علت سفتی بیشتر مقاومت در برابر شیارشدگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های متداول دارد. با این وجود پیشنهاد شده است که میزان RAP مورد استفاده در مخلوط آسفالتی کنترل شود؛ زیرا افزایش کنترل نشده این مقدار ممکن است باعث

این عوامل شامل مقاومت و سختی لایه بستر، ضخامت لایه اساس، ضخامت لایه آسفالتی، محل قرارگیری لایه تقویتی در لایه اساس و خصوصیات هندسی و فنی و مهندسی ژئوسنتتیک است. به‌طور کلی، محل لایه تقویت‌کننده بستگی به ضخامت لایه اساس و میزان بار اعمال‌شده دارد (Alimohammadi, H. et al., 2021).

مطالعات زیاد انجام شده بر روی ژئوگرید نشان می‌دهد که انتقال بهینه تنش‌های برشی زمانی اتفاق می‌افتد که حداقل عرض روزنه‌های ژئوگرید کمتر از اندازه متوسط ذرات سنگدانه D₅₀ باشد.

به‌طور کلی، مطالعات نشان می‌دهد که ژئوسنتتیک با مدول سختی بالاتر باعث بهبودی بهتر در توزیع تنش منتقل‌شده به بستر می‌شود و تغییر شکل سطحی را در مقایسه با ژئوگرید با مدول کمتر کاهش می‌دهد (Alimohammadi, H. et al., 2021). همچنین، برخی از مطالعات تجربی بر روی مقاطع تقویت‌شده ژئوگرید تک لایه و چندلایه انجام شده است. به‌عنوان مثال، مونتالی و کانسلی نشان دادند که ژئوگریدهای چندلایه تغییر شکل کمتری نسبت به ژئوگرید تک لایه متداول نشان می‌دهند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که لایه‌های ژئوگرید قادر به جلوگیری از شکست برشی موضعی و تغییر شکل در مقاطع تقویت‌شده بودند (Cancelli, A., & Montanelli, F., 1999). ژئوگرید (شکل ۸) نوعی ماده ژئوسنتتیک است که با ترکیب دنده‌های طولی و عرضی (که به آن شبکه می‌گویند) مشخص می‌شود (Qadir, A., & Gazder, U., 2021).



شکل ۸. ژئوگرید (Qadir, A., & Gazder, U., 2021)

مطالعه‌ای که توسط براون برای ارزیابی تأثیر ژئوگرید در روسازی انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از ژئوگرید در کاهش کرنش‌های دائمی انباشته‌شده در بتن آسفالتی نقش زیادی دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ژئوگرید باعث افزایش سختی لایه آسفالتی می‌شود و در نتیجه از بوجود آمدن

جوانساز روغن بازیافتی منجر به کاهش قابل توجه پارامتر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت حاوی RAP شد. استفاده از RAP در مخلوط‌های آسفالتی منجر به مخلوط‌های سفت‌تر و متعاقب آن مقاوم‌تر در برابر شیارشدگی می‌شود (Ziari, H. et al., 2019). در مطالعه‌ای دیگر میرحسینی و همکاران به بررسی تأثیر RAP و روغن هسته خرما به‌عنوان جوانساز در مخلوط آسفالتی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزودن RAP به مخلوط، مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط افزایش می‌یابد و سپس، با اضافه کردن جوانساز به مخلوط، حساسیت بیشتری در برابر شیارشدگی ایجاد می‌شود جدول (۲) (Mirhosseini, A. F. et al., 2019).

جدول ۲. نتایج آزمایش ویل تراک
(Mirhosseini, A. F. et al., 2019)

نمونه مورد آزمایش	عمق شیارشدگی (میلی‌متر)	
	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰
RD	۷/۰۹	-
R20	۳/۷۱	۶/۱۲
R20D5	۵/۲۷	۸/۲۵
R20D10	۹/۵۴	-
R30	۲/۴۱	۵/۳۶
R30D5	۳/۶۴	۷/۷۴
R30D10	۵/۸۹	۹/۱۳
R40	۱/۳۲	۲/۶۹
R40D5	۲/۵۶	۴/۸۸
R40D10	۳/۷	۷/۱۳

استفاده از افزودنی‌ها و اصلاح‌کننده‌های قیر و مخلوط

آسفالتی

برای غلبه و یا کاهش خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی، تحقیقات متعددی برای بهبود خواص قیر و مخلوط آسفالتی با انواع مختلف اصلاح‌کننده انجام شده است. معمولاً از یک اصلاح‌کننده برای اصلاح برخی از ویژگی‌های قیر یا مخلوط آسفالتی در مورد برخی خرابی‌های روسازی استفاده می‌شود.

بروز مشکلات دیگر نظیر عملکرد ضعیف در دمای پایین، ترک‌خوردگی، عملکرد ضعیف خستگی و پیرشدگی ثانویه^{۲۳} به دلیل دمای بالای ساخت گردد (Park, B. et al., 2021). عاملی و همکاران به بررسی تأثیر خرده لاستیک به همراه تراشه آسفالتی در مخلوط آسفالتی پرداختند. به این منظور خرده لاستیک با نسبت وزنی صفر، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی قیر به همراه تراشه آسفالتی صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد اضافه گردید. نتایج نشان داد که مقاومت شیارشدگی با افزایش درصد لاستیک افزایش یافت. همچنین با افزایش درصد RAP در مخلوط‌ها، مقاومت شیارشدگی مخلوط‌ها به طور قابل توجهی با لاستیک خرده افزایش می‌یابد. همچنین تجزیه و تحلیل آماری نشان می‌دهد که افزودن RAP و لاستیک خرده تأثیر قابل توجهی در کاهش تغییر شکل دائمی مخلوط‌ها دارد. با توجه به نتایج، با افزودن درصد بالایی از RAP (بیش از ۴۰٪)، روند افزایش مقاومت در شیارشدگی مخلوط‌ها افزایش یافت. پیرشدگی قیر شامل پیرشدگی کوتاه‌مدت در حین اختلاط و ساخت و پیرشدگی طولانی‌مدت در طول عمر مفید است. پیرشدگی که عمدتاً به دلیل اکسیداسیون و از دست دادن مواد فرار اتفاق می‌افتد، ویسکوزیته قیر را افزایش داده و آن‌ها را نسبت به قیرهای تازه سفت‌تر می‌کند.

قیر کهنه و سفت می‌تواند به‌طور بالقوه مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر تغییر شکل دائمی افزایش دهند، با این حال، توسعه ترک را تسریع می‌کنند. استفاده از مقادیر زیاد RAP می‌تواند به دلیل وجود قیر به‌شدت پیر شده خرابی‌های همچون ترک‌خوردگی و عریان‌شدگی را ایجاد کند. از جوانسازها^{۲۴} جهت رفع و کاهش مشکلات ناشی از قیرهای پیر شده، استفاده شده است. آن‌ها می‌توانند خواص ویسکوالاستیک و رئولوژیکی مخلوط‌های آسفالت حاوی RAP را بهبود بخشند (Ameli, A. et al., 2016).

پس توجه به این موضوع که برخی از جوانسازها باعث افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی شده اما کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی همراه می‌باشند، باید در طرح اختلاط‌ها مدنظر قرار بگیرد. به‌عنوان مثال زیاری و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر نانو رس به همراه جوانساز RAP در مخلوط آسفالتی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از

آسفالت کمک می‌کنند (Zhang, P. et al., 2016). به طور کلی، مواد ضد شیارشدگی به میزان ۰/۳٪ تا ۰/۵٪ وزنی مخلوط آسفالتی بسته به شرایط ترافیکی اضافه می‌شود (Li, Y., et al., 2021).

استفاده از خرده لاستیک

با افزایش میزان لاستیک‌های فرسوده، لاستیک خرده ساخته شده از لاستیک‌های ضایعاتی به طور قابل توجهی به عنوان اصلاح‌کننده قیر مورد استفاده قرار گرفته است (Amin, M. N., et al., 2016). لاستیک خرده می‌تواند منجر به افزایش نقطه نرمی، ویسکوزیته و انعطاف‌پذیری گردد همچنین عملکرد قیر را در دماهای بالا به طور مؤثری بهبود بخشد (Xu, O., et al., 2016). سطح بهبود تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله نوع خرده لاستیک، اندازه ذرات، ویژگی‌های سطح، شرایط اختلاط و غیره است (Liu, S et al., 2009). به عنوان مثال خرده لاستیک با اندازه ذرات بزرگ‌تر، تأثیر بهتری بر خصوصیات دمای بالا قیر دارد، اما باعث ایجاد مشکل در پایداری می‌شود، به ویژه هنگامی که درصد خرده لاستیک زیاد باشد (Zhang, L., et al., 2016 & Qian, C. et al., 2020).

در مطالعه‌ای دیگر به بررسی تأثیر خرده لاستیک در مخلوط آسفالتی پرداخته شد. به این منظور ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیر خرده لاستیک به قیر اضافه گردید. آزمایش‌های رئومتر برشی دینامیکی، جاروب فرکانس^{۲۹} انجام گرفت. طبق آزمون‌های مختلف نتایج نشان داد که با افزایش درصد اصلاح‌کننده در قیر مقاومت در برابر شیارشدگی بیشتر می‌گردد (Hajikarimi, P. et al., 2015). در ادامه به بررسی افزودنی‌های مختلف مورد استفاده در تحقیقات اخیر در قیر و مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است و نتایج تاثیرگذاری این افزودنی‌ها نیز در جدول ۳ به صورت خلاصه گردآوری شده است. لازم به ذکر است که تمامی افزودنی‌ها و اصلاح‌کننده‌های نام برده شده در جدول زیر، همگی باعث افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی هستند.

اثرات اصلاح‌کننده‌های مختلف را می‌توان با آزمایش تعیین کرد و سپس بسته به هدف آن‌ها را انتخاب کرد (Bahia, H., 2006). برای مثال پلیمرها به طور گسترده‌ای برای اصلاح خواص قیر در دمای بالا، مانند کوپلیمرهای استایرن - بوتادین - استایرن^{۲۵}، اتیلن وینیل استات^{۲۶}، پلی‌اتیلن^{۲۷} و غیره استفاده شده‌اند. SBS، یک کوپلیمر بلوک ترموپلاستیک با مورفولوژی دو فازی، به طور گسترده‌ای برای اصلاح قیر در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است که تأثیر مثبتی بر قابلیت ارتجاعی و ضد شیارشدگی نشان می‌دهد (Klinsky, L. M. G et al., 2018). استفاده از نانو مواد به طور فزاینده‌ای برای اصلاح قیر به منظور بهبود عملکرد در دمای بالا استفاده می‌شوند مانند نانوسیلیس، نانولوله‌های کربنی^{۲۸} که باعث افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالتی می‌گردند. از طرفی دیگر برخی از الیاف‌ها به عنوان مثال بازالت، شیشه و سرامیک نیز تأثیر به سزایی در افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی از خود نشان داده‌اند. در همین حال، چگونگی دستیابی به پراکندگی همگن اصلاح‌کننده‌ها هنوز هم برای قیرهای اصلاح‌شده یک چالش محسوب می‌شود که به طور قابل توجهی بر روی اثر ناشی از اصلاح‌کننده تأثیر می‌گذارد. در ادامه به بررسی افزودنی‌ها و اصلاح‌کننده‌های مختلف در قیر و مخلوط آسفالتی پرداخته شده است و تأثیر هر یک از این مواد مورد بررسی و بحث قرار گرفته است.

استفاده از مواد ضد شیارشدگی

مواد افزودنی ضد شیارشدگی، مانند PR از فرانسه و ۸۰۰۰LF از آلمان، مواد دانه‌ای هستند که برای کاهش خرابی شیارشدگی روسازی آسفالتی استفاده می‌شود. این مواد از توانایی تغییر شکل الاستیک عالی برخوردار هستند و به بازیابی تغییر شکل روسازی آسفالتی کمک می‌کنند. وقتی این مواد به مخلوط آسفالتی اضافه شوند، جز سبک قیر را جذب می‌کنند.

در همین حال، ممکن است در طول فرآیند اختلاط به شکل الیافی درآیند و ساختار مخلوط آسفالتی را تقویت کنند (Li, Y., et al., 2021). علاوه بر این، آن‌ها همچنین می‌توانند فضاهای خالی موجود در بتن آسفالتی را پر کرده و در نتیجه مقاومت سازه‌ای را جهت ظرفیت باربری بیشتر افزایش دهند. همه این عوامل در کنار هم به افزایش عملکرد ضد شیارشدگی روسازی

جدول ۳. جمع‌بندی تحقیقات مختلف پژوهشگران

نوع افزودنی یا اصلاح کننده	نام افزودنی یا اصلاح کننده	سایر خصوصیات	مرجع
افزودنی پلیمری	استایرن - بوتادین - استایرن	افزایش استقامت مارشال، نسبت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم	(Sengul, C. E. et al., 2013)
	SBS + FRP +VIATOP	افزایش مقاومت در برابر خستگی مخلوط	(Saedi, S., & Oruc, S. .2020)
	پلی اتیلن ترفتالات ^{۳۰}	کاهش نسبت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم	(Moghaddam, T. B. et al .,2014)
	اتیلن وینیل استات	افزایش استقامت مارشال، افزایش FN اتصال بهتر بین قیر و سنگدانه، افزایش عمر خستگی	(Chegenizadeh, A. et al., 2021)
	پلی پروپیلن ^{۳۱}	کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی	(Kathari, P. M., 2016)
	پلی پروپیلن + آرامید	افزایش مقاومت کششی خشک و مرطوب	(Klinsky, L. M. G. et al., 2018)
	پلی وینیل کلراید ^{۳۲}	افزایش عمر خستگی در سطوح کم کرنش	(Ziari, H. et al., 2019)
	پلی اتیلن با وزن مولکولی فوق‌العاده بالا ^{۳۳}	کاهش حساسیت حرارتی، افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم	(Hamedi, G. H. et al., 2020)
نانوافزودنی	نانو سیلیس	بهبود عملکرد در برابر خستگی، افزایش مقاومت در برابر رطوبت	(Saltan, M. et al., 2017)
	نانو آلومینیوم اکسید	افزایش مقاومت در برابر رطوبت، کاهش دمای تراکم، افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم	(Karahancer, S., 2020).
	نانولوله‌های کربنی	افزایش استقامت مارشال	(Ismael, M. Q et al., 2021)
الیاف	بازالت	افزایش نقطه نرمی، کاهش درجه نفوذ، افزایش قابلیت کشسانی قیر	(Kathari, P. M. et al ., 2018)
	سرامیک	افزایش سفتی خزشی قیر، افزایش دمای اختلاط افزایش عمر خستگی	(Arabani, M., & Shabani, A., 2019).
	پشم سنگ ^{۳۴}	افزایش عمر خستگی	(Behbahani, H. et al., 2020)
جایگزین سنگدانه‌ها	سرباره فولادی	افزایش قفل و بست سنگدانه‌ای، افزایش مقاومت در برابر لغزش	(Chen, J. S., & Wei, S. H., 2016)
	سرباره فولادی با پایه اکسیژن	افزایش مقاومت در برابر سایش	(Xue, Y. et al., 2006)
	سرباره مس*	افزایش عمر خستگی، افزایش مدول برجهنگی	(Sharma, D. K. et al., 2021)

* نتایج تحقیقات اخیر نشان داد که استفاده از سرباره مس تا میزان حدود ۲۰ درصد وزن سنگدانه‌ها به جای بخش ریزدانه مخلوط باعث افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌گردد و اگر از این میزان فراتر رود، روند کاهشی داشته و باعث کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌گردد.

۵- نتیجه گیری

مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالتی می‌گردند. از دیگر راهکارهای بهبود عملکرد در برابر شیارشدگی استفاده از مواد افزودنی ضد شیارشدگی می‌باشد. این مواد از توانایی تغییر شکل الاستیک عالی برخوردار هستند و به بازیابی تغییر شکل روسازی آسفالتی کمک می‌کنند. به‌عنوان مثال محققین با به کار بردن مواد ضد شیارشدگی مانند PR از فرانس و LF8000 از آلمان در مخلوط آسفالتی پی به عملکرد مناسب آن‌ها در برابر شیارشدگی بردند.

روسازی‌های نیمه انعطاف‌پذیر مواد کامپوزیتی هستند که از مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز با ۲۰ تا ۳۵ درصد فضای خالی که با دوغاب سیمان مخصوص پر شده‌اند این نوع جدید از روسازی‌های بدون اتصال، هم‌زمان دارای خصوصیات انعطاف‌پذیری روسازی‌های آسفالتی و صلبیت روسازی‌های بتنی می‌باشند. این نوع روسازی‌ها مستعد خرابی شیارشدگی یا فتیله شدن نیستند. ژئوتکستایل و ژئوگریدها دو نوع محصولات ژئوستتیک هستند که معمولاً در مطالعات تجربی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی، نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که ژئوستتیک‌ها می‌توانند عمر مفید روسازی‌ها را افزایش دهند، ضخامت لایه اساس را کاهش دهند، گسترش خرابی شیارشدگی را به تعویق بی‌اندازند. در سالیان اخیر با افزایش هزینه‌های ساخت، تأمین مصالح و تعمیر و نگهداری و نگرانی‌های زیست‌محیطی استفاده از تراشه‌های آسفالت بازیافتی رو به افزایش است. تحقیقات نشان داده است که استفاده از درصد‌های مختلف تراشه آسفالتی می‌تواند باعث صرفه‌جویی قابل توجه در هزینه‌های ساخت و تأمین مصالح جهت احداث روسازی و همچنین افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی گردد.

اما باید به این نکته توجه داشت که میزان RAP مورد استفاده در مخلوط آسفالتی کنترل شود؛ زیرا افزایش کنترل نشده این مقدار ممکن است باعث بروز مشکلات دیگر نظیر عملکرد ضعیف در دمای پایین، ترک خوردگی، عملکرد ضعیف خستگی و پیرشدگی ثانویه به دلیل دمای بالای ساخت گردد.

شیارشدگی یکی از اصلی‌ترین حالت‌های خرابی روسازی‌های انعطاف‌پذیر است که انواع مختلفی از جمله شیارشدگی سازه‌ای، ناپایداری و سایشی دارد. عوامل مختلفی بر ایجاد شیارشدگی و تشدید این خرابی مؤثر هستند. این عوامل عبارت است از خصوصیات قیر مصرفی، درصد قیر مورد استفاده در مخلوط آسفالتی، خصوصیات مصالح سنگی، دانه‌بندی، بافت سطحی، شرایط آب و هوایی، میزان رطوبت، میزان فضای خالی مخلوط و میزان ترافیک و شدت بارگذاری. در این پژوهش به بررسی راهکارهای موجود جهت افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی روسازی‌ها پرداخته شد و به صورت خلاصه می‌توان گفت نتایج زیر حاصل گردید:

یکی از روش‌های بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی اصلاح دانه‌بندی مصالح سنگی می‌باشد. محققان دریافتند که قفل و بست سنگدانه‌ای بیشتر، در نتیجه دانه‌بندی متراکم و اندازه سنگدانه بزرگ‌تر، منجر به دستیابی به مقاومت برشی بالاتر می‌شود همچنین تعداد نقاط تماس بین سنگدانه‌هایی که مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهند به روش‌های مورد استفاده جهت تراکم آن‌ها بستگی دارد؛ و نمونه‌هایی که با تراکم ژیراتوری تولید می‌شود در مقایسه با سایر روش‌های تراکم، مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل دائمی دارند. در نتیجه روش‌های مختلف تراکم می‌تواند بر تقویت قفل و بست سنگدانه‌ای اثر بگذارد و باعث افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی گردد.

از دیگر روش‌های افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی استفاده از اصلاح‌کننده‌ها و افزودنی‌ها در قیر و مخلوط آسفالتی می‌باشد. امروزه توجه ویژه‌ای به افزودنی‌ها به علت بهبود خصوصیات رئولوژیکی قیر و همچنین مخلوط آسفالتی شده است. افزودنی‌های مختلفی از قبیل افزودنی‌های پلیمری، الیاف، نانو ذرات، افزودنی به‌عنوان جایگزین مصالح سنگی و برخی افزودنی‌های دیگر نظیر خرده لاستیک پرداخته شد.

نتایج نشان داد که افزودنی‌های پلیمری همچون SBS، PET، EVA، PVC، پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن با وزن مولکولی فوق‌العاده بالا، نانو ذرات مانند نانو سیلیس، نانو اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی، مواد الیافی از قبیل بازالت، سرامیک، پشم سنگ و سایر افزودنی‌ها همچون خرده لاستیک باعث بهبود خصوصیات رئولوژیکی قیر و در پی آن افزایش

pavement construction”, Sustainability, 8(10), pp. 949-950.

-Arabani, M., & Shabani, A., (2019), “Evaluation of the ceramic fiber modified asphalt binder”, Construction and Building Materials, 205, pp.377-386.

-Ayar, P., Baradaran, S., Abdipour Vosta, S. (2022), “A Review on the Effect of Various Additives on Mechanical Properties of Stone Mastic Asphalt (SMA)”, Road, 30(110), pp.57-86.

Doi: 10.22034/road.2021.295635.1969.

-Bahia, H., (2006), “Modified asphalt binders for paving applications”.

-Behbahani, H., Najafi Moghaddam Gilani, V., Salehfarid, R., & Safari, D., (2020), “Evaluation of fatigue and rutting behaviour of hot mix asphalt containing rock wool”, International Journal of Civil Engineering, 18, pp.1293-1300.

-Bharath, G., Shukla, M., Nagabushana, M. N., Chandra, S., & Shaw, A., (2020), “Laboratory and field evaluation of cement grouted bituminous mixes”, Road Materials and Pavement Design, 21(6), pp.1694-1712.

-Brown, E. R., Haddock, J. E., Mallick, R. B., & Lynn, T. A., (1997), “Development of a mixture designs procedure for stone matrix asphalt”.

-Brown, E., Mallick, R. B., Haddock, J. E., & Bukowski, J., (1997), “Performance of stone matrix asphalts (SMA) mixtures in the United States (No. Report No: NCAT Report No. 97-1)”, National Center for Asphalt Technology.

-Brown, S. F., (2009), “An assessment of geogrid use in railways and asphalt applications”, In Proceedings of Jubilee Symposium on Polymer Geogrid Reinforcement.

-Button, J. W., Perdomo, D., & Lytton, R. L., (1990), “Influence of aggregate on rutting in asphalt concrete pavements”, Transportation Research Record, (1259).

-Cancelli, A., & Montanelli, F., (1999), “In-ground test for geosynthetic reinforced flexible paved roads Vol. 2.

-Chegenizadeh, A., Tokoni, L., Nikraz, H., & Dadras, E., (2021), “Effect of ethylene-vinyl acetate (EVA) on stone mastic asphalt (SMA)

1. Rutting
2. Permanent Deformation
3. Structural Rutting
4. Studded Tires
5. Surface Wear Rutting
6. Instability Rutting
7. Asphalt Mixture Structure
8. Stone Mastic Asphalt (SMA)
9. Large Stone Asphalt Mixture (LSAM)
10. Open-Graded Friction Coarse (OGFC)
11. Zichner
12. Kandhal
13. Asphalt Pavement Analyzer
14. Rutting Depth
15. Angularity
16. Aggregate Interlock
17. Hamburg Wheel Tracking Test (HWT)
18. Gap-Graded
19. Gyrotory Compaction
20. Shoving
21. Geosynthetics
22. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
23. Secondary Aging
24. Asphalt Rejuvenators
25. Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)
26. Ethylene-Vinyl Acetate (EVA)
27. Polyethylene (PE)
28. Carbon Nanotube
29. Frequency Sweep Test
30. Polyethylene Terephthalate (PET)
31. Polypropylene (PP)
32. Polyvinyl Chloride (PVC)
33. High-Density Polyethylene (HDPE)
34. RockWool

-Alimohammadi, H., Schaefer, V. R., Zheng, J., & Li, H., (2021), “Performance evaluation of geosynthetic reinforced flexible pavement: a review of full-scale field studies”, International Journal of Pavement Research and Technology, 14(1), pp.30-42.

-Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007), “Reclaimed asphalt pavement—a literature review”, FHWA-ICT-07-001.

-Ameli, A., Babagoli, R., & Aghapour, M., (2016), “Laboratory evaluation of the effect of reclaimed asphalt pavement on rutting performance of rubberized asphalt mixtures”, Petroleum Science and Technology, 34(5), pp.449-453.

-Amin, M. N., Khan, M. I., & Saleem, M. U., (2016), “Performance evaluation of asphalt modified with municipal wastes for sustainable

- on bituminous pavement”, *Materials and Structures*, 43(9), pp.1257-1269.
- Hasan, M., & Sugiarto, S., (2021), “Determining the properties of semi-flexible pavement using waste tire rubber powder and natural zeolite, *Construction and Building Materials*, 266, 121199.
- Hassani, A., Taghipoor, M., & Karimi, M. M., (2020), “A state of the art of semi-flexible pavements: Introduction, design, and performance”, *Construction and Building Materials*, 253, 119196.
- Iran Ministry of Road and Transportation, (2009), “Effect of Gradation Type and Void in Asphalt Concrete on Rutting and Bleeding in Iran Roads”, 1st Ed., Transportation Research Institute (TRI).
- Ismael, M. Q., Fattah, M. Y., & Jasim, A. F., (2021), “Improving the rutting resistance of asphalt pavement modified with the carbon nanotubes additive”, *Ain Shams Engineering Journal*.
- Kandhal, P. S., & Mallick, R. B., (2001), “Effect of mix gradation on rutting potential of dense-graded asphalt mixtures”, *Transportation Research Record*, 1767(1), pp.146-151.
- Karahancer, S., (2020), “Effect of aluminum oxide nano particle on modified bitumen and hot mix asphalt”, *Petroleum Science and Technology*, 38(13), pp.773-784.
- Kathari, P. M., (2016), “Rheological properties of polypropylene reinforced asphalt binder”, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 3(3), pp.109-126.
- Kathari, P. M., Sandra, A. K., & Sravana, P., (2018), “Experimental investigation on the performance of asphalt binders reinforced with basalt fibers”, *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1), pp.1-9.
- Kennedy, T. W., Tam, W. O., & Solaimanian, M., (1998), “Optimizing use of reclaimed asphalt pavement with the Superpave system”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 67.
- Klinsky, L. M. G., Kaloush, K. E., Faria, V. C., & Bardini, V. S. S., (2018), “Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt”, *Construction and Building Materials*, 176, pp.747-752.
- Li, L., Huang, X., Han, D., Dong, M., & Zhu, D., (2015), “Investigation of rutting behavior of asphalt pavement in long and steep section of mountainous highway with overloading”, *Construction and Building Materials*, 93, pp.635-643.
- behavior”, *Construction and Building Materials*, 272, pp.121628.
- Chen, J. S., & Wei, S. H., (2016), “Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag”, *Construction and Building Materials*, 128, pp.148-153.
- Cheng, Y., & Qin, Y., (2019), “Aggregates breakage introduction to optimize gradation of multi-supporting skeleton asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials*, 200, pp.265-271.
- Coleri, E., Harvey, J. T., Yang, K., & Boone, J. M., (2013), “Investigation of asphalt concrete rutting mechanisms by X-ray computed tomography imaging and micromechanical finite element modeling”, *Materials and structures*, 46(6), pp.1027-1043.
- Du, Y., Chen, J., Han, Z., & Liu, W., (2018), “A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods”, *Construction and Building Materials*, 168, pp.893-905.
- Faruk, A. N., Lee, S. I., Zhang, J., Naik, B., & Walubita, L. F., (2015), “Measurement of HMA shear resistance potential in the lab: The Simple Punching Shear Test”, *Construction and Building Materials*, 99, pp.62-72.
- Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z., & Khadem, M., (2012), “Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, pp.440-449.
- Guo, R., & Nian, T., (2020), “Analysis of factors that influence anti-rutting performance of asphalt pavement”, *Construction and Building Materials*, 254, 119237.
- Hajikarimi, P., Rahi, M., & Moghadas Nejad, F., (2015), “Comparing different rutting specification parameters using high temperature characteristics of rubber-modified asphalt binders”, *Road Materials and Pavement Design*, 16(4), pp.751-766.
- Hamedi, G. H., Shamami, K. G., & Pakenari, M. M., (2020), “Effect of ultra-high-molecular-weight polyethylene on the performance characteristics of hot mix asphalt”, *Construction and Building Materials*, 258, 119729.
- Hammoum, F., Chabot, A., St-Laurent, D., Chollet, H., & Vulturescu, B., (2010), “Effects of accelerating and decelerating tramway loads

- Otto, F., Liu, P., Zhang, Z., Wang, D., & Oeser, M., (2018), "Influence of temperature on the cracking behavior of asphalt base courses with structural weaknesses", *International Journal of Transportation Science and Technology*, 7(3), pp.208-216.
- Panda, M., Suchismita, A., & Giri, J., (2013), "Utilization of ripe coconut fiber in stone matrix asphalt mixes", *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2(4), pp.289-302.
- Park, B., Zou, J., Yan, Y., Roque, R., Lopp, G., & Moseley, H., (2021), "Effect of reclaimed asphalt pavement on cracking performance of asphalt mixtures with regular and high polymer modified binders", *Road Materials and Pavement Design*, 1-13.
- Polaczyk, P., Ma, Y., Xiao, R., Hu, W., Jiang, X., & Huang, B., (2021), "Characterization of aggregate interlocking in hot mix asphalt by mechanistic performance tests", *Road Materials and Pavement Design*, 22 (sup1), S498-S513.
- Qadir, A., & Gazder, U., (2021), "Statistical analysis for comparing and predicting rutting resistance of asphalt pavements with rigid and flexible geogrid layers", *Construction and Building Materials*, 302, 124136.
- Qian, C., Fan, W., Yang, G., Han, L., Xing, B., & Lv, X., (2020), "Influence of crumb rubber particle size and SBS structure on properties of CR/SBS composite modified asphalt", *Construction and Building Materials*, 235, 117517.
- Saedi, S., & Oruc, S., (2020), "The influence of SBS", viatop premium and FRP on the improvement of stone mastic asphalt performance. *Fibers*, 8(4), 20.
- Saltan, M., Terzi, S., & Karahancer, S., (2017), "Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica", *Construction and Building Materials*, 156, pp.976-984.
- Sengul, C. E., Oruc, S., Iskender, E., & Aksoy, A., (2013), "Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance", *Construction and Building Materials*, 41, pp.777-783.
- Sharma, D. K., Swami, B. L., & Vyas, A. K., (2021), "Performance evaluation of hot mix asphalt containing copper slag" *Materials Today: Proceedings*, 38, pp.1241-1244.
- Li, L., Huang, X., Wang, L., & Li, C., (2013), "Integrated experimental and numerical study on permanent deformation of asphalt pavement at intersections", *Journal of materials in civil engineering*, 25(7), pp.907-912.
- Li, Y., Hao, P., Zhao, C., Ling, J., Wu, T., Li, D. & Sun, B., (2021), "Anti-rutting performance evaluation of modified asphalt binders: a review", *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*.
- Liu, S., Cao, W., Fang, J., & Shang, S., (2009), "Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt", *Construction and Building Materials*, 23(7), pp.2701-2708.
- Lv, Q., Huang, W., Zheng, M., Sadek, H., Zhang, Y., & Yan, C., (2020), Influence of gradation on asphalt mix rutting resistance measured by Hamburg Wheel Tracking test, *Construction and Building Materials*, 238, 117674.
- Management and Planning Organization, (2016), "Instruction for design and implementation of coarse grained asphalt mixtures", Criterion No. 706, Management and Planning Organization of the country, Transportation Research Institute. (in Persian)
- Miller, J.S., & Bellinger, W. Y., (2003), "Distress identification manual for the long-term pavement performance program (No. FHWA-RD-03-031)". United States, Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development.
- Mirhosseini, A. F., Tahami, S. A., Hoff, I., Dessouky, S., & Ho, C. H., (2019), "Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator", *Construction and Building Materials*, 227, 116465.
- Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R., (2014), "Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads", *Construction and Building Materials*, 65, pp.487-494.
- Morea, F., Agnusdei, J. O., & Zerbino, R., (2011), "The use of asphalt low shear viscosity to predict permanent deformation performance of asphalt concrete. *Materials and structures*", 44(7), pp.1241-1248.

- Xue, Y., Wu, S., Hou, H., & Zha, J., (2006), "Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture", *Journal of hazardous materials*, 138(2), pp.261-268.
- Zhang, H., Liang, S., Ma, Y., & Fu, X., (2019), "Study on the mechanical performance and application of the composite cement-asphalt mixture", *International Journal of Pavement Engineering*, 20(1), pp.44-52.
- Zhang, L., Xing, C., Gao., F., Li, T. S., & Tan, Y. Q., (2016), "Using DSR and MSCR tests to characterize high temperature performance of different rubber modified asphalt", *Construction and Building Materials*, 127, pp.466-474.
- Zhang, P., Li, H., Yin, N., & Ma, D., (2016), "Pavement performance evaluation and creep properties study on asphalt mixture modified by anti-rutting agent PCF", In *Functional Pavement Design*, CRC Press, pp. 645-654.
- Zhang, W., Shen, S., Wu, S., & Mohammad, L. N., (2017), "Prediction model for field rut depth of asphalt pavement based on Hamburg wheel tracking test properties", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9), 04017098.
- Ziari, H., Moniri, A., & Norouzi, N., (2019), "The effect of nanoclay as bitumen modifier on rutting performance of asphalt mixtures containing high content of rejuvenated reclaimed asphalt pavement", *Petroleum Science and Technology*, 37(17), pp.1946-1951.
- Ziari, H., Nasiri, E., Amini, A., & Ferdosian, O., (2019), "The effect of EAF dust and waste PVC on moisture sensitivity, rutting resistance, and fatigue performance of asphalt binders and mixtures", *Construction and Building Materials*, 203, pp.188-200.
- Sousa, J. B., Harvey, J., Painter, L., Deacon, J. A., & Monismith, C. L., (1991), "Evaluation of laboratory procedures for compaction of asphalt-aggregate mixtures, (No. SHRP-A/UWP-91-523).
- Taherkhani, H., and Khebreh, A., (2017), "Investigation of grooves and top-down cracks in composite pavements made with roller concrete using finite element method", *Transportation Engineering*, 9 (Special Issue), pp.69-88. (in Persian).
- Tashman, L. S., Masad, E., Peterson, B., & Saleh, H., (2000), "Internal structure analysis of asphalt mixes to improve the simulation of superpave gyratory compaction to field conditions (Master's thesis, Washington State University)".
- Tian, Y., Lee, J., Nantung, T., & Haddock, J. E., (2017), "Development of a mid-depth profile monitoring system for accelerated pavement testing", *Construction and Building Materials*, 140, pp.1-9.
- Wang, G., Roque, R., & Morian, D., (2012), "Effects of surface rutting on near-surface pavement responses based on a two-dimensional axle-tire-pavement interaction finite-element model", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(11), pp.1388-1395.
- Wang, H., & Al-Qadi, I. L., (2010), "Evaluation of surface-related pavement damage due to tire braking", *Road Materials and Pavement Design*, 11(1), pp.101-121.
- Witczak, M. W., (2007), "Specification criteria for simple performance tests for rutting, Vol. 580, Transportation Research Board.
- Xu, O., Xiao, F., Han, S., Amirhanian, S. N., & Wang, Z., (2016), "High temperature rheological properties of crumb rubber modified asphalt binders with various modifiers", *Construction and Building Materials*, 112, pp.49-58.

Investigation of Rutting Failure in Asphalt Mixtures and Its Improvement Strategies

*Sajed Baradaran, M.Sc., Student, Department of Highway and Transportation Engineering
School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Mahmoud Ameri, Professor, Department of Highway and Transportation Engineering
School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: Ameri@iust.ac.ir

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

In recent years, due to reduced service life of road pavement and a significant increase in maintenance costs, roads to meet the needs, including transportation without delay in commercial and industrial products, reduced maintenance costs, safety, and good ride quality. Their pavement requires better performance and is more resistant to various damages such as rutting, cracking, stripping, and so on. Each of these failures is caused by different mechanisms in the pavement, and factors such as the properties of asphalt mixtures, bitumen, weather conditions, and traffic loading intensify and develop these failures. In recent years, researchers have developed various methods and strategies to improve the performance of pavements against rutting failure. In this study, different approaches to enhance the performance of asphalt pavement against rutting failures such as correction of aggregate grading and improvement of aggregate interlocking, use of additives and modifiers, use of semi-flexible pavement systems, and use of reclaimed asphalt pavement were investigated, and compared. Furthermore, the advantages and disadvantages of each method were explained in detail. Overall, the results of this study and comparison showed that using various additives and modifiers and recycled asphalt pavement under special and controlled conditions can improve pavement performance against rutting failure.

Keywords: Asphalt Pavement, Pavement Distress, Rutting Resistance