

بهینه‌سازی باندهای قیرسان در آسفالت‌های ماستیکی مسیرهای اتوبوس‌های پر سرعت

مقاله علمی - پژوهشی

*حسینعلی بگی (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

علی رحیمی، استاد، دانشگاه SDU آلماتی، قزاقستان

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hoseinbagi@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

صفحه ۲۴۲-۲۲۹

چکیده

افزایش خرابی‌های روسازی در ایستگاه‌های خطوط اتوبوس تندرو (BRT) تهران، از جمله ترک‌های پوست سوسماری، شیارشدگی و کناررفتگی، ضرورت استفاده از مخلوط‌های آسفالتی با عملکرد بالا را ایجاد می‌کند. در این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از آسفالت ماستیکی (SMA) حاوی ۳٪ درصد الیاف سلولزی به جای آسفالت گرم متداول (HMA) در این ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. پس از مطالعات میدانی در سه خط BRT تهران، طرح اختلاط هر دو نوع آسفالت با استفاده از مصالح سنگی یکسان و قیر ۷۰/۶۰ تهیه شد. نمونه‌ها با ۵ درصد قیر متفاوت (هر کدام ۳ تکرار) ساخته و تحت آزمایش‌های مارشال، مدول برجهندگی و شیارشدگی با دستگاه ویل‌تراک هامبورگ قرار گرفتند. تحلیل آماری نتایج نشان داد که آسفالت ماستیک با قیر بهینه ۶/۱٪، نسبت به آسفالت گرم با قیر بهینه ۴/۳۸٪، به طور معنی‌داری مدول برجهندگی بالاتر (۳۲۵۰ در مقابل ۲۱۰۰ مکاپاسکال، $P < 0.01$) و عمق شیار نهایی کمتر (۲/۳ در مقابل ۱/۸ میلی‌متر، $P < 0.001$) دارد که معادل ۶۰٪ کاهش شیارشدگی است. این بهبود به دانه‌بندی ناپیوسته، درصد فیلر بیشتر و تشکیل ملات قیر-الیاف نسبت داده می‌شود. بر این اساس، آسفالت ماستیک اصلاح‌شده با الیاف سلولزی گزینه‌ای مناسب برای افزایش دوام روسازی در ایستگاه‌های BRT تهران است.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه‌های اتوبوس، اتوبوس‌های پر سرعت، آسفالت ماستیکی، خرابی آسفالتی، شیار شدگی

۱-مقدمه

استفاده از انواع پلیمرهاست که باعث بهبود ویژگی‌هایی مانند قابلیت اجرا، ظرفیت تحمل بار و دوام آسفالت می‌شود. قیرهای اصلاح‌شده با افزودنی‌ها و پلیمرها، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را به‌طور قابل توجهی ارتقا می‌دهند. این اصلاحات نه تنها فرآیند اجرا را آسان‌تر می‌کنند، بلکه مقاومت در برابر بارهای سنگین و شرایط محیطی را نیز افزایش می‌دهند. همچنین، نوع قیر معمولی مورد استفاده در روسازی نقش مهمی در عملکرد نهایی دارد و اصلاح آن می‌تواند مزایای قابل توجهی به همراه داشته باشد (Nazari et al., 2021). برای نخستین بار، آسفالت ماستیکی در دهه ۱۹۶۰ در کشورهای غربی پیشرفته همانند آلمان غربی توسعه یافت. این تیپ آسفالت‌ها با هدف افزایش مقاومت

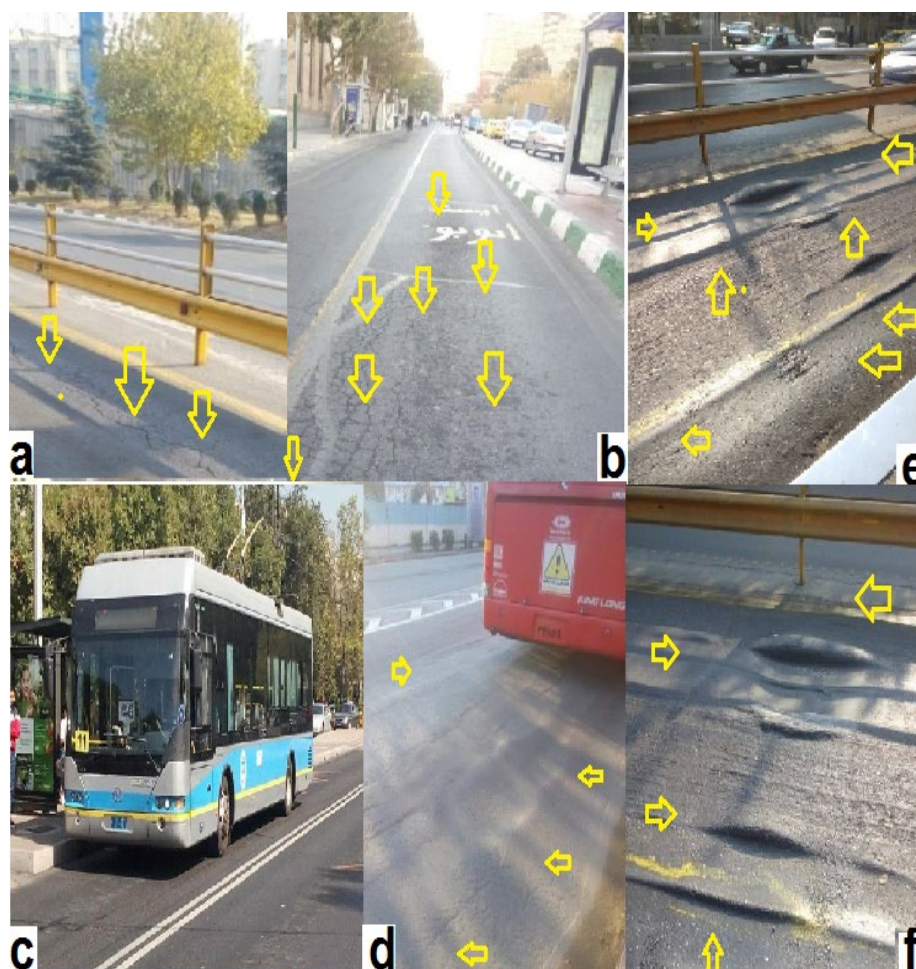
افزایش بار ترافیکی بر روی سازه‌های روسازی، به‌ویژه در مسیرهای پرتردد با تغییرات ناگهانی سرعت به خصوص در ایستگاه‌های اتوبوس‌های پرسرعت، موجب شده است تا استفاده از مصالح و فناوری‌های جدید در ساخت و نگهداری راه‌ها ضروری بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. مخلوط‌های آسفالتی سنتی دیگر پاسخگوی این شرایط نیستند و نیاز به بهبود عملکرد آن‌ها به‌وضوح احساس می‌شود. در شهرهای بزرگ ایران به خصوص تهران این موضوع مورد توجه قرار گرفته و تلاش‌هایی برای ارتقای کیفیت آسفالت‌ها صورت گرفته است. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از آسفالت‌های ماستیکی اصلاح شده است. این اصلاحات شامل افزودن مواد خاص یا

۲-روش تحقیق

در این پژوهش ابتدا مطالعات میدانی در شهر تهران در زمینه خرابی‌های ایجاد شده سامانه اتوبوس تندرو و در محل ایستگاه‌های آن (در محدوده پنجاه متر قبل و بعد از ایستگاه‌ها به دلیل تمرکز خرابی‌ها در این نواحی) بررسی گردید. همچنین بررسی‌های بسیار محدودی در تصویر برداری از ایستگاه‌های اتوبوس تندرو در آلمانی قزاقستان و تمرکز بر سلامت قابل توجه آسفالت در آن ایستگاه‌ها جهت مقایسه انجام گردید و سپس خرابیهای آسفالت‌های اجرا شده در ایستگاه‌های اتوبوس تندرو تهران به صورت میدانی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱). در نهایت به کمک مطالعات آزمایشگاهی و مقایسه آسفالت‌های معمولی و آسفالت ماستیکی اصلاح شده راهکارهای لازم برای کاهش و یا حذف خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی در محل ایستگاه‌های اتوبوس تندرو ارائه گردید. در این راستا نمونه‌ها برای آزمایش مارشال (با اعمال ۷۵ ضربه در هر طرف در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد) تهیه گردید. آزمایش مدول برجهندگی و شیار افتادگی (دستگاه HWT^۱) مطابق استانداردهای ASTM^۲ اجرا گردید. مصالح قابل استفاده از آسفالت ماستیکی باید از نظر شکستگی، افت ناشی از آزمایش لوس آنجلس، تطویل و تورق در محدوده استاندارد باشد (Bayat et al., 2019). این ویژگی‌های مشابه بتن‌های آسفالتی در مناطق مختلف نیز می‌باشد (Raj and Ramesh, 2024; Moharrer, 2024). در این راستا با بررسی‌های متعدد از واحدهای تولیدی سنگدانه، از واحد تولیدی بهینه با مشخصات زیر استفاده گردید (جدول ۱) در این مطالعه به منظور تحلیل کمی داده‌های آزمایشگاهی، از روش‌های آمار توصیفی و استنباطی استفاده گردید. ابتدا شاخص‌های توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و دامنه تغییرات برای هر یک از گروه‌های آزمایشی محاسبه شد. سپس با توجه به حجم نمونه محدود (۵ نمونه برای هر گروه) و عدم برقراری مفروضه‌های آزمون‌های پارامتریک (نظیر نرمال بودن توزیع داده‌ها)، از آزمون ناپارامتریک یو-من-ویتنی برای مقایسه میانگین رتبه‌های دو گروه مستقل استفاده گردید. سطح معنی‌داری برای آزمون فرضیات ۰,۰۵ در نظر گرفته شد. کلیه محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام پذیرفت.

لایه‌های آسفالتی بایندر و توپکا در برابر سایش ناشی از لاستیک‌های یخ‌شکن وسایل نقلیه سنگین توسط متخصصین طراحی شد تا جایگزینی برای مخلوط‌های آسفالتی قدیمی و سستی باشد و بتوانند در برابر بارهای سنگین و شرایط سخت آب‌وهوایی داشته باشند. ویژگی اصلی SMA، استفاده از دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ای درشت، فیلر معدنی زیاد، و قیر اصلاح‌شده با پلیمرها یا الیاف سلولزی است. این ترکیب منجر به ایجاد ساختاری متراکم و مقاوم در برابر تغییر شکل دائمی، ترک‌خوردگی و نفوذ رطوبت شد. در دهه‌های بعد، SMA به سرعت در کشورهای اروپایی، ایالات متحده، استرالیا و آسیا گسترش یافت و به عنوان یکی از گزینه‌های اصلی برای روسازی بزرگراه‌ها، فرودگاه‌ها و مسیرهای پرتردد شناخته شد (Bayat et al., 2021). در سال ۲۰۱۴، سازمان FHWA^۱ در گزارشی با ارزیابی اقتصادی روسازی آسفالت ماستیکی، افزایش هزینه در تولید آسفالت ماستیک را ۱۱ درصد و نفع بلندمدت این نوع مخلوط آسفالتی را با توجه به مناطق و ایالت مورد اجرا تا ۴۱ درصد گزارش نموده است.

پژوهش‌های متعددی هم در کشورهای آسیای میانه همانند کشور قزاقستان در راستای استفاده از آسفالت ماستیکی انجام گردیده است. این محققین بر روی چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب بر خواص مکانیکی قیرها و آسفالت ماستیک تأثیر تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی متعدد انجام داده‌اند. مطالعات آنها نشان داد که کاهش مدول پیچشی و افزایش شکنندگی در اثر تکرار چرخه‌ها منجر به تضعیف عملکرد سطح روسازی می‌شود، موضوعی که برای مناطق سردسیر قزاقستان با نوسانات دمایی شدید اهمیت ویژه‌ای دارد (Raj and Ramesh, 2024; Moharrer, 2024). در ایران هم مطالعات پراکنده‌ای بر روی آسفالت‌های ماستیکی انجام شده است. برای مثال ناظری و همکاران با استفاده از پلیمرهایی مانند استایرن-اتیلن-بوتیلن-استایرن (SEBS) در SMA، مشخص نموده‌اند که مقاومت این نوع آسفالت‌ها در برابر رطوبت و خستگی افزایش می‌یابد و عمر مفید روسازی را به‌طور قابل توجهی بالا می‌رود (Bayat et al., 2019). نوآوری اصلی این پژوهش در طراحی ترکیب بهینه آسفالت ماستیکی با استفاده از الیاف سلولزی جهت بهبود پایداری باندهای قیرسان در شرایط اقلیمی معتدل همانند تهران است، در حالی که مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی کلی آسفالت‌های ماستیکی متمرکز بوده است.



شکل ۱. - خرابی ترک‌های پوست سوسماری در خط شماره ۵ بی آر تی تهران ایستگاه رسالت - خرابی ترک‌های پوست سوسماری در روسازی خط شماره ۷ بی آر تی تهران، ایستگاه مختاری - وضعیت ایستگاه‌های اتوبوس در آلماتی قزاقستان، ایستگاه اریتا - ترک خوردگی لغزشی در روسازی خط شماره ۱ بی آر تی تهران، ایستگاه نیایش - خرابی کنار رفتگی در روسازی خط شماره ۵ بی آر تی تهران، ایستگاه اثنی عشر - خرابی کنار رفتگی در روسازی خط شماره ۵ بی آر تی تهران، ایستگاه اثنی عشر

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی مصالح مصرفی و مطابقت با آیین نامه‌های استاندارد (Hettiarachchi et al., 2024)

نتایج آزمایش			مشخصه	
فیلر مصالح	ماده ۵-۰ میلی متر	مشخصات درشت دانه	ارزش ماسه‌ای مصالح (AASHTO-T176)	
-	۸۹	-	نوع دانه بندی	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس (AASHTO-T96)
-	-	□	تعداد دور	
-	-	۵۰۰	درصد سایش	
-	-	۲۳	دامنه خمیری (PI)	

N.P	N.P	-	حدخمیری (PL)	حدود آتربرگ
غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	-	حد روانی (LL)	(AASHTO-T89,90)
-	-	۹۸	در یک جبهه	درصد شکستگی مصالح
-	-	۹۵	در دوجبهه	سنگی روی الک ۴
-	-	بیشتر از ۹۵	تأثیر آب جوش بر روی مخلوط‌های آسفالتی	(ASTM-D5821)
-	-	۶	تطویل	تأثیر آب جوش بر روی مخلوط‌های آسفالتی
-	-	۹	تورق	(ASTM-D3625)
-	۴۰/۵	-	درصد فضای خالی در حالت غیر تراکم	درصد تطویل و تورق
۹۳/	-	-	وزن حجمی فیلر gr/cm^3	(BS-812)
			EN-۱۰۹۷-۳	تعیین گوشه داری مصالح سنگ
				دانه ریز (ASTM-C1252)
				وزن حجمی فیلر gr/cm^3

نظر درجه نفوذ، نرمی مناسب و داشته باشد (Hettiarachchi et al., 2024; Cheng et al., 2016). در این پژوهش از قیر پالایشگاه نفت جی برای استفاده در مناطق معتدل با مشخصات زیر استفاده گردید (جدول ۲).

در آسفالت گرم و بتن آسفالتی غالباً از قیرهای خالص استفاده است که از تقطیر مستقیم مواد نفتی تهیه شده است. این قیرها باید همگن و فاقد آب بوده و زمانی که تا دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد گرم می‌شوند کف نکنند. مشخصات قیر مورد نیاز در مناطق معتدل کشور باید استانداردهای لازم همانند ۶۰/۷۰ از

جدول ۲. مشخصات قیر مصرفی

شماره	آزمایش	روش آزمون	محدوده استاندارد بیشترین کمترین	نتیجه
۱	درجه اشتعال قیر (سانتیگراد)	ASTM D4462	-	۳۳۲
۲	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد (Pa.s)	ASTM D92	۳	۳۲۵/
۳	پارامتر $G^*/Sino$ در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد (KPa) پیر نشده	AASHTO T315	-	۰۱/۰۸۸
۴	تغییرات وزن بعد از پیرشدگی کوتاه مدت (درصد)	ASTM D2872	۱/۰	۱۵۸/
۵	پارامتر $G^*/Sino$ در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد (KPa) پیر شده در RTFO	AASHTO T315	-	۳/۵۶
۶	پارامتر $G^*/Sino$ در دمای ۱۹ درجه سانتیگراد (KPa) RTFO+PAV	AASHTO T315	۵۰۰	۴۹۲۰
۷	سختی خزش در دمای ۲۲- درجه سانتیگراد (Mpa)	ASTM D6648	۳۰۰	۱۲۴/۶۵
۸	مقدار m (حداقل ۳۰۰/)	ASTM D6648	-	۳۰۱۹/
نتیجه				Pg 64-22

دمای تراکم و اختلاط مخلوط‌های آسفالتی با توجه به کندروانی قیر تعیین می‌گردد. بدین منظور کندروانی قیر خالص در سه دمای ۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۶۰ تعیین شد و با رسم منحنی کندروانی قیر، محدوده دمای تراکم و اختلاط دمای آسفالتی مشخص مورد ۱۷۰ + ۲۰ درجه سانتی استوکس تعیین گردید. حداقل الیاف

استفاده (شکل ۲) حدود ۳ درصد وزنی مخلوط آسفالتی تعیین گردید که در محدوده استانداردهای معمول (جدول ۲) می‌باشد (Hettiarachchi et al., 2024; Cheng et al., 2016)

جدول ۳. مشخصات الیاف مصرفی در آسفالت ماستیکی

مشخصات	آزمایش
روش A: دانه بندی به روش AL Pine	
طول الیاف	حداکثر ۶ میلی‌متر
درصد عبوری از الک ۱۰۰ (۱۵۰/میلی متر)	۶۰-۸۰
روش B: دانه بندی به روش Screen	
طول الیاف	حداکثر ۶ میلی‌متر
درصد عبوری از الک ۲۰۰ (۸۵۰/میلی متر)	۷۵-۹۰
درصد عبوری از الک ۴۰ (۴۲۵۰/میلی متر)	۵۵-۷۵
درصد عبوری از الک ۱۴۰ (۱۰۶۰/میلی متر)	۲۰-۴۰
درصد خاکستر	۱۳-۲۳
PH	۶/۸-۵/۵
جذب روغن	۴-۶ برابر وزن الیاف
درصد رطوبت	کمتر از ۵ درصد وزنی



شکل ۲. ظاهر فیزیکی الیاف استفاده شده

ارائه طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی درواقع نقطه شروعی برای دستیابی به روسازی مناسب و با کیفیت موردنظر و مطلوب است. تهیه طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مشخصات فنی و ضوابط طرح، از بخشهای مهم عملیات آسفالتی است که قبل از تولید مخلوط آسفالتی در کارخانه آسفالت و اجرای عملیات آسفالتی باید تهیه شود. در این پژوهش ارائه طرح اختلاط بر اساس روش مارشال انجام گرفته است (Cheng et al., 2016). با توجه به موضوع پژوهش جهت طراحی و ارزیابی مقاومتی آسفالت‌های ماستیکی در ایستگاه‌های اتوبوس بی آر تی علاوه بر تهیه طرح اختلاط آسفالت ماستیک (جدول ۴)

ارائه طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی درواقع نقطه شروعی برای دستیابی به روسازی مناسب و با کیفیت موردنظر و مطلوب است. تهیه طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مشخصات فنی و ضوابط طرح، از بخشهای مهم عملیات آسفالتی است که قبل از تولید مخلوط آسفالتی در کارخانه آسفالت و

ماستیک از یک کارخانه تولید آسفالت مصالح سنگی، قیر و شرایط یکسان دیگر گردید. جهت آماده سازی نمونه‌ها برای آزمایش مارشال اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف استفاده شده است.

و ارزیابی نتایج حاصله، جهت مقایسه رفتار آسفالت ماستیک با آسفالت سنتی گرم اقدام به ارائه طرح اختلاط آسفالت گرم سنتی گردید. لذا برای ایجاد شرایط یکسان برای هر دو نوع آسفالت، اقدام به ارائه هر دو طرح اختلاط آسفالت سنتی گرم و آسفالت

جدول ۴. دانه بندی مصالح و سنگدانه های استفاده شده در آسفالت ماستیکی

اندازه الک	حداکثر	حداقل	حد واسط
۳/۴ اینچ	-	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲ اینچ	۱۰۰	۱۰۰	۹۲
۳/۸ اینچ	۸۰	۱۰۰	۷۸
شماره ۴	۳۵	۲۰	۲۶
شماره ۸	۲۴	۱۶	۲۲
شماره ۲۰۰	۱۱	۸	۸/۶

ظرف جداگانه ریخته شده و پس از گرم شدن مصالح، نمونه‌ها با درصد‌های قیر معین و الیاف، مخلوط شدند (شکل ۳). مخلوط به نحوی ترکیب شد تا تمام سطوح دانه‌ها با قیر اندود شوند، سپس نمونه تا انجام تراکم مارشال در گرمخانه نگهداری گردید.

همچنین دمای متراکم کردن نمونه‌های آسفالت (۲۵ درجه سانتیگراد)، درجه حرارتی است که در آن دما ویسکوزیته کینماتیک قیر حدود ۲۸۰ سانتی استوکس است (Tan et al., 2013; Zakerzadeh, 2025). الیاف انتخاب شده از نوع Viatop در وزن های ۳ درصدی وزن مخلوط آسفالتی در



شکل ۳. نمونه‌های آسفالتی جهت آزمایش

استاندارد AASHTO-T245 با استفاده از قیر معرفی شده و همچنین الیاف VIATOP سه دهم درصد وزنی مخلوط آسفالتی تهیه گردید (جداول ۵ و ۶). مقدار درصد قیر بهینه مخلوط آسفالت ماستیک درشت دانه، بر اساس مشخصات استاندارد آشتو MP۸ برابر ۶/۱ تعیین گردید (Hettiarachchi et al., 2025).

ارائه طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی درواقع نقطه شروعی برای دستیابی به روسازی مناسب و با کیفیت موردنظر برای مخلوط‌های آسفالتی ماستیک است. فضای خالی بین مصالح سنگی برابر ۱۷ درصد و درصد فضای خالی مخلوط آسفالت ۲ تا ۴ درصد و حداقل میزان قیر ۶ درصد توصیه شده است (Khbbaz Mehrjardi et al., 2024). در این راستا نمونه‌های مخلوط آسفالتی با درصد‌های مختلف قیر به روش

جهت مقایسه و ارزیابی عملکرد آسفالت ماستیک، از مصالح همسان در طراحی آسفالت گرم استفاده شد (جدول ۶).

جدول ۵. دانسیته تئوری مخلوط آسفالتی

حد اکثر وزن مخصوص تئوری مخلوط آسفالتی	درصد قیر
۲/۴۷۸	۴/۵
۲/۴۶	۵
۲/۴۴۲	۵/۵
۲/۴۲۵	۶
۲/۴۰۷	۶/۵
۲/۳۹۱	۷

جدول ۶. مشخصات مصالح مصرفی در آسفالت گرم

اندازه الک	حدود مشخصات دانه بندی ۴ طبق نشریه ۲۳۴	درصد وزنی رد شده حاصل از اختلاط با نسبت های فوق
۳/۴ اینچ	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲ اینچ	۹۰-۱۰۰	۹۳
شماره ۴	۷۴-۴۴	۵۷
شماره ۸	۵۸-۲۵	۴۷
شماره ۵۰	۲۱-۵	۱۱
شماره ۲۰	۱۰-۲	۶/۴

نمونه های مخلوط آسفالتی با درصد های مختلف قیر، با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با استفاده از قیر پایه و به روش مارشال تهیه شد. سپس بر روی نمونه های تهیه شده در هر دو گروه آسفالت ماستیکی تغییر یافته و آسفالت معمولی، آزمایش های مدول برجهندگی و شیارافتادگی انجام گردید. مدول برجهندگی نمونه های مخلوط آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بر اساس استاندارد ASTM D۴۱۲۳ تعیین شد (Tsai et al., 2016). مطابق استاندارد، در این آزمایش از

شکل بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس یک هرتز، سیکل بارگذاری ثانیه ۱ استفاده گردید. مدت زمان استراحت ۹ / یک ثانیه، و ضربه پوآسون ۳۵ / در نظر گرفته شد. در این راستا آزمایش بر روی نمونه های آسفالتی معمولی و ماستیک درشت دانه توسط دستگاه شیارافتادگی ویل تراک هامبورگ و بر روی نمونه های استوانه ای (شکل ۴) مطابق استاندارد ASSHTO T324 انجام پذیرفت (Benesova et al., 2017)



شکل ۴. انجام آزمایش شیار افتادگی با دستگاه ویل تراک

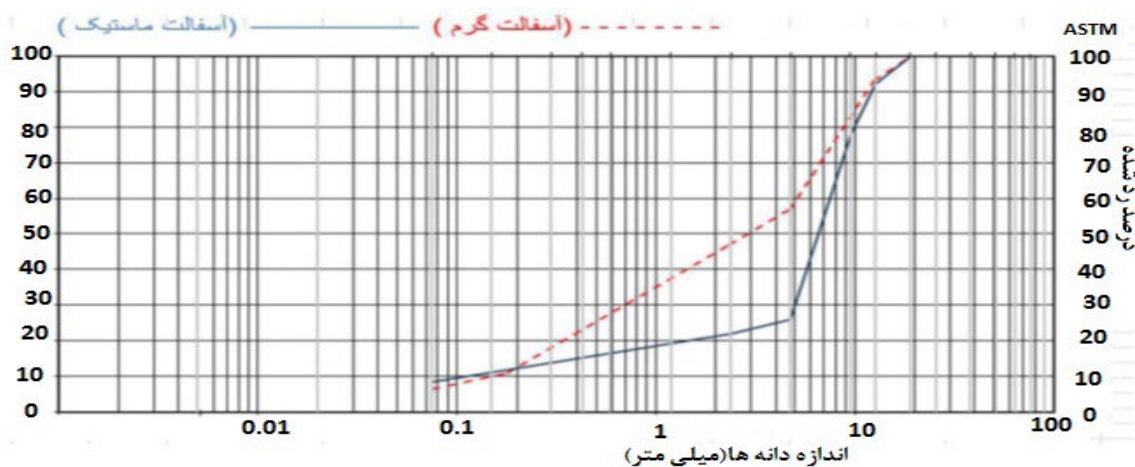
بحث

خواص شیمیایی، مکانیکی و فیزیکی آسفالت هنگام اصلاح با پلیمرها و سایر افزودنی‌ها تغییر می‌کند. «آسفالت اصلاح‌شده» اصطلاحی است که برای توصیف آسفالتی که ویژگی‌های آن تغییر کرده است، استفاده می‌شود.

این پژوهش بر استفاده از مخلوط الیافی جهت بهبود خواص رئولوژیکی آن با افزودنی‌های مختلف متمرکز گردیده است (Bi et al., 2021; Zhang et al., 2024; Bieliatynskiy et al., 2024). بررسی‌های آزمایش‌ها و نمودارها نشان می‌دهد که استحکام مخلوط آسفالتی در اثر افزایش میزان قیر تا نقطه بحرانی افزایش یافته و سپس تقلیل می‌یابد. میزان روانی آسفالت با افزایش قیر نسبت مستقیم دارد. درصد فضای خالی مخلوط با درصد قیر نسبت عکس دارد و نهایتاً به صفر متمایل می‌شود. درصد فضای خالی مصالح سنگی آسفالت در اثر افزایش قیر تا نقطه بحرانی کاهش یافته و پس از آن افزایش می‌یابد (Bieliatynskiy et al., 2024). در نمودار زیر (شکل ۵) مقایسه تغییرات کمیته‌های مخلوط آسفالت ماستیک و آسفالت گرم نمایش داده شده است. تفاوت دانه بندی‌ها در الک نمره ۴ کاملاً متمایز است بدین شکل که درصد عبوری دو نمونه آسفالت در این الک متفاوت است.

استخوان‌بندی اصلی آسفالت ماستیک را مصالح درشت‌تر از الک نمره ۴ تشکیل می‌دهند و به همین دلیل درصد عبوری از الک نمره ۴ در آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای بسیار کمتر و در حد نصف درصد عبوری دانه بندی آسفالت گرم است که همین عامل باعث ایجاد تماس سنگدانه به سنگدانه می‌شود که استحکام آسفالت ماستیک سنگدانه بر پایه همین اتصال سنگدانه به سنگدانه است.

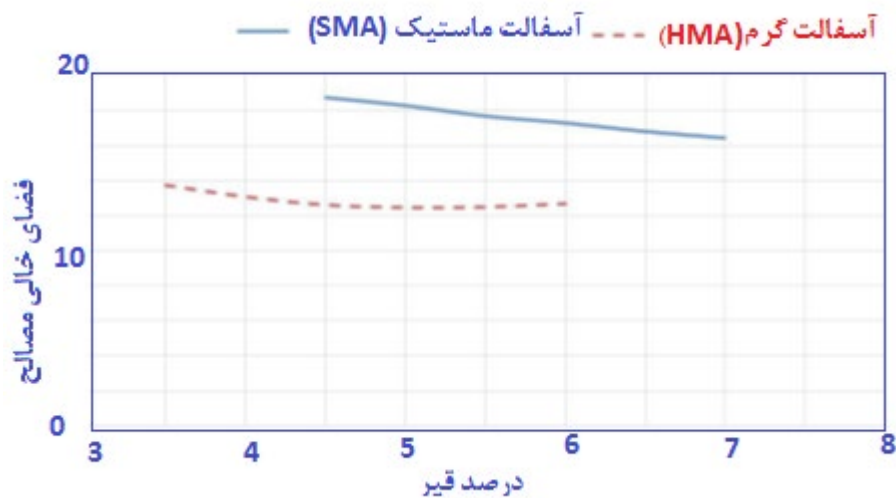
نحوه قرارگیری سنگدانه‌های درشت در مخلوط، تمایل به جابجایی ذرات را کم می‌کند و همین امر مقاومت آسفالت ماستیک در برابر شیار افتادگی جای چرخ را افزایش می‌دهد اگر چه وجود الیاف در ترکیب نیز اثر گذار می‌باشد (Cheng et al., 2024; Xiong et al., 2021). همچنین میزان فیلر در آسفالت گرم و ماستیکی به ترتیب ۶/۳۸ و ۸/۵۸ درصد است که منجر به مصرف قیر بیشتر است. آسفالت ماستیک با توجه به مقدار فیلر بیشتر، از سختی بیشتری برخوردار است و مقاومت در برابر شیار افتادگی جای چرخ در این آسفالت افزایش پیدا می‌کند (Cheng et al., 2024).



شکل ۵. نمودار و منحنی دانه‌بندی دو نوع مصالح مورد استفاده در آسفالت ماستیکی

می‌شود و شرایط اتصال سنگدانه به سنگدانه را فراهم می‌نماید. اتصال سنگدانه به سنگدانه عامل اصلی استحکام آسفالت ماستیک است. بافت درشت با ایجاد سطح زیر سبب افزایش سطح تماس لاستیک و روسازی می‌شود که باعث افزایش مقاومت آسفالت در برابر لغزندگی شده و احتمال وقوع صیقلی شدن دانه‌ها را کمتر می‌کند. همچنین بافت درشت‌دانه در هنگام بارندگی زهکشی بیشتری انجام می‌دهد که باعث کاهش پاشش آب خواهد شد.

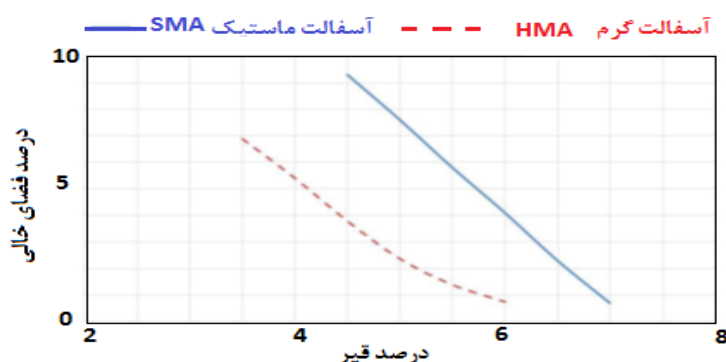
در این آزمایش‌ها میزان درصد فضای خالی مصالح سنگی در آسفالت ماستیک سنگدانه‌های ۱۷/۱۵ درصد به ازای ۶/۱ درصد قیر بهینه است که این میزان در آسفالت گرم به ازای ۴/۳۸ درصد قیر بهینه، ۱۳/۳۵ می‌باشد. اختلاف میزان فضای خالی در هر نوع آسفالت در شکل زیر نمایش داده شده است. میزان فضای خالی مخلوط مصالح سنگی در آسفالت ماستیک حداقل ۱۷ درصد توصیه شده است (شکل ۶). این میزان درصد فضای خالی در آسفالت ماستیک باعث ایجاد بافت درشت مخلوط آسفالتی



شکل ۶. منحنی تغییرات فضای خالی مصالح سنگی با درصد قیرهای مختلف در آسفالت معمولی و ماستیکی

عریان شدگی سنگدانه‌ها و تأمین مناسب درصد فضای خالی، با درصد قیر بهینه غشاء قیری اطراف سنگدانه‌ها باعث دوام مخلوط می‌شود. به طور کلی در آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای ترکیب فیلر و قیر به میزان زیاد و الیاف (در مقایسه با آسفالت گرم) که همان ملات ماستیک را تشکیل می‌دهند، ضمن پر کردن فضای خالی مخلوط مصالح سنگی به عنوان تثبیت کننده نیز عمل می‌کنند و باعث پایداری مخلوط و افزایش مقاومت در برابر شیار افتادگی می‌شوند.

با توجه به نمودار اشکال ۶ و ۷ افزایش مقدار قیر در مخلوط، درصد فضای خالی کاهش می‌یابد. در آسفالت ماستیک درصد فضای خالی به ازای ۶/۰۹ درصد قیر بهینه مقدار ۳/۹۵ درصد است و در مخلوط آسفالت گرم به ازای درصد قیر بهینه به مقدار ۴/۳۸ درصد، مقدار فضای خالی ۳/۷۹ درصد است. در هر دو نمونه مخلوط آسفالتی میزان درصد فضای خالی تأمین گردیده تا بتوانند عملکرد مناسبی در خصوص خرابی‌هایی از جمله قیر زدگی و اثرات مخرب رطوبت داشته باشند. آسفالت ماستیک ضمن تأمین ضوابط ۶/۰۹ درصد (قیر بهینه) و پایین بودن احتمال



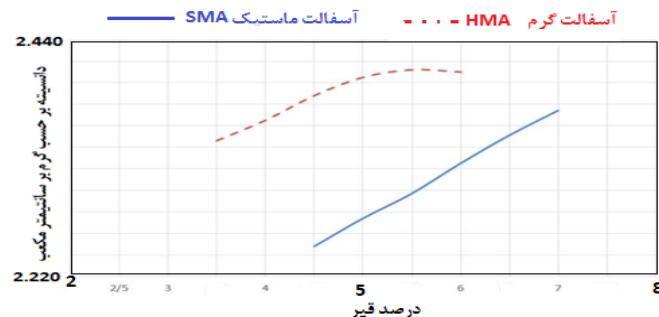
شکل ۷. تغییرات فضای خالی مخلوط آسفالتی با درصد قیرهای مختلف در آسفالت معمولی و ماستیکی

ماستیک در درصدهای قیر متفاوت به مراتب کمتر از آسفالت گرم است. این امر به دلیل نوع دانه‌بندی میان تهی آسفالت

با بررسی نمودارهای دانسیته حقیقی در این آسفالت‌ها به ازای درصد قیرهای متفاوت مشاهده می‌شود که دانسیته آسفالت

مخصوص (دانسیته) کمتر به جای سنگدانه، می‌تواند باعث افت دانسته مخلوط شود. این مطالعات آزمایشگاهی مطابقت کامل با سایر پژوهش‌های مرتبط با آسفالت ماستیکی دارد (Xu et al., 2024; Al-Shamsi et al., 2017)

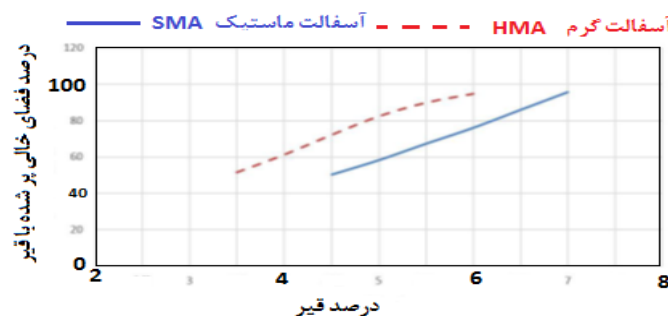
ماستیک می‌باشد. با افزایش درصد قیر در هر دو آسفالت، میزان دانسیته نیز افزایش می‌یابد تا جایی که افزایش قیر باعث افت دانسیته می‌شود (شکل ۸). دلیل افت وزن مخصوص را می‌توان روان شدن مخلوط دانست. همچنین جانشینی قیر با وزن



شکل ۸. تغییرات دانسیته حقیقی با درصد قیرهای مختلف

نداشته باشد و قیر از مخلوط آسفالتی بیرون بزند، از این رو انتخاب صحیح درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی در جلوگیری از قیر زدگی حائز اهمیت است. تغییرات نرمی با درصد قیرهای مختلف در آسفالت ماستیکی اصلاح شده با قیر بهینه ۱۲/۵۸ درصد است اما در آسفالت گرم با قیر بهینه ۹/۴۸ درصد است و شیب ملایم تر آسفالت ماستیکی به آسفالت گرم به دلیل فیلر بیشتر در آسفالت ماستیک مشخص است (شکل ۹).

فضای پر شده با قیر نسبت مستقیم با کاهش فضای مصالح یا VMA دارد. درصد فضای خالی پر شده با قیر در مخلوط آسفالت ماستیک و آسفالت گرم به ازای درصد قیر بهینه می‌تواند درک صحیحی از قیر زدگی در لایه‌های آسفالتی داشت باشد (Fung et al., 2024) با فضای خالی پر شده با قیر، متراکم شدن آسفالت تحت تأثیر بار ترافیکی از میزان فضای خالی مخلوط آسفالتی کم می‌شود تا جایی که هیچگونه فضای خالی وجود



شکل ۹. تغییرات فضای خالی پر شده با قیر با درصد قیرهای مختلف



شکل ۱۰. تغییرات نرمی با درصد قیرهای مختلف

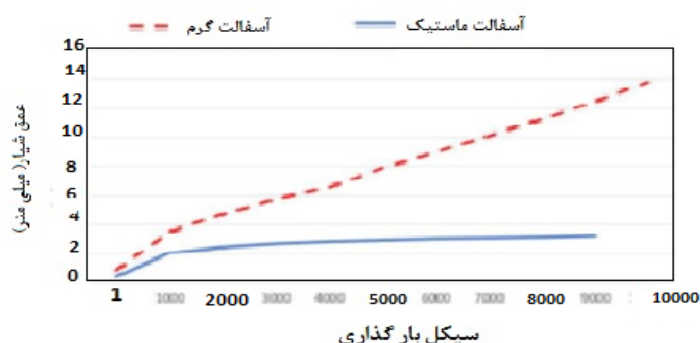
بنابراین با استفاده از آسفالت ماستیک می‌توان دوام روسازی آسفالتی در ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی را افزایش داد؛ چراکه مقاومت در برابر شیار شدگی رابطه مستقیمی با دوام مخلوط‌های آسفالتی دارد (شکل ۱۱). ضریب تغییرات (پراکندگی بسیار پایین ۰/۲۷ درصد) برای آسفالت ماستیکی نشان‌دهنده همگنی عالی نمونه‌ها و برای آسفالت معمولی که حدود ۲/۲۸ درصد نشان‌دهنده پراکندگی کم، و تکرار پذیری مناسب است و مطابق استاندارد ASTM C670، ضریب تغییرات زیر ۵٪ برای آزمایش‌های کنترل کیفی قابل قبول است.

در آسفالت ماستیک با توجه به مصرف قیر زیاد (جدول ۷)، خاصیت انعطاف پذیری بیشتری دارد که باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت مخلوط آسفالت ماستیک در مقابل خستگی‌های ناشی از تغییر شکل متناوب در مقایسه با مخلوط آسفالتی گرم شده است (شکل ۱۰).

نتایج آزمایش شیار شدگی جای چرخ برای مخلوط‌های آسفالتی گرم و ماستیک نشان می‌دهد عمق شیارافتادگی در آسفالت ماستیکی اصلاح شده به مراتب کمتر از آسفالت گرم است (به طور میانگین ۶۰ درصد کمتر از مخلوط آسفالتی گرم است).

جدول ۷. نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالت

گروه	تعداد نمونه (n)	میانگین (MPa)	انحراف معیار (SD)	ضریب تغییرات (CV %)	حداقل (MPa)	حداکثر (MPa)
آسفالت ماستیک درشت‌دانه (SMA)	۵	۶۱۸۵	۱۶،۷	۰،۲۷	۶۰۶۷	۶۳۰۳
آسفالت معمولی (HMA)	۵	۱۹۵۴	۴۴،۵	۲،۲۸	۱۹۲۲	۱۹۸۵



شکل ۱۱. تغییرات عمق شیارافتادگی در مقابل سیکل بارگذاری برای مخلوط آسفالتی گرم و ماستیک

تحلیل عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بر اساس نتایج آزمایشگاهی، نتایج حاصل از آزمایش‌های مدول برجهندگی و شیارشدگی، بیانگر تفاوت عملکردی چشمگیر میان دو نوع مخلوط آسفالتی گرم و آسفالت ماستیک درشت‌دانه می‌باشد. بر اساس داده‌های مستخرج از آزمایش‌ها، میانگین مدول برجهندگی برای نمونه‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه معادل ۶۱۸۵ مگاپاسکال و برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی گرم معادل ۱۹۵۳/۵ مگاپاسکال محاسبه شده است که نشان‌دهنده سختی و مقاومت

اگر چه مشخص شده است که عمر خستگی مخلوط آسفالت به طور قابل توجهی به توالی بارگذاری بستگی دارد. با این حال، معادلات خستگی خطی سستی که به طور گسترده استفاده می‌شوند، برای تعیین عمر خستگی مخلوط آسفالت تحت توالی‌های بارگذاری مختلف دشوار هستند (Lio et al., 2012) مقایسه نتایج این پژوهش با سایر تحقیقات انجام شده پیوستگی نسبتاً بالایی نشان می‌دهد (Lv et al., 2021; Maggiore, 2014; Underwood, 2016)

بالتر در این نوع مخلوط می‌باشد. با توجه به رابطه مستقیم مقاومت در برابر شیارشدگی با دوام روسازی، استفاده از آسفالت ماستیک در ایستگاه‌های اتوبوس‌های تندرو که تحت بارگذاری تناوبی سنگین قرار دارند، می‌تواند طول عمر روسازی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. این در حالی است که برای ارزیابی دقیق‌تر عمر خستگی، نمی‌توان صرفاً به معادلات خطی سستی اتکا کرد و لازم است توالی بارگذاری نیز در تحلیل‌ها لحاظ گردد.

می‌تواند در ایستگاه‌های خطوط اتوبوس تندرو مقاومت بهتری در مقابل شیار افتادگی و کنار رفتگی در مقایسه با آسفالت‌های سستی از خود نشان دهد. آسفالت ماستیک به واسطه استفاده از مصالح سنگی درشت‌دانه با کیفیت عالی و دانه بندی ناپیوسته و باز دارای بافت زبر و باز است، در نتیجه با افزایش سطح تماس بین لاستیک و روسازی، مقاومت در برابر لغزندگی افزایش یافته و درصد سایش کمتری نیز ایجاد می‌شود، که این امر می‌تواند مقاومت در برابر صیقلی شدن دانه‌ها را خصوصاً در محل ایستگاه‌های اتوبوس افزایش دهد. همچنین بافت زبر روسازی سبب کاهش پاشش آب و کاهش لغزندگی می‌شود. دوام آسفالت ماستیک به دلیل مصرف زیاد قیر افزایش می‌یابد و همچنین پدیده عریان‌شدگی نیز کنترل خواهد شد و به دلیل درصد فضای خالی کمتر مخلوط آسفالتی، پیرشدگی آسفالت نیز به تعویق می‌افتد. همچنین به واسطه مصرف فیلر زیاد در مخلوط آسفالت ماستیک، سنگدانه‌های این مخلوط دارای قدرت باربری زیاد و تغییر شکل نسبی کم است. در این راستا تکرار این پژوهش در تهران یا مناطق مشابه آب و هوایی در کلان‌شهرها با ترکیب الیاف سلولزی و پلیمرهای دیگر در آسفالت ماستیکی پیشنهاد می‌شود.

۶- سپاسگزاری

در پایان بر خود لازم می‌دانیم که از مسئولان دانشگاه SDU آلمانی و دانشگاه ملی مهارت و کارشناسان آزمایشگاه که در این راستا با ما همکاری نموده‌اند سپاسگزاری نماییم. از آقای دکتر امیر کسبایان (دانشگاه تهران) که در تحلیل‌های آماری این پژوهش ما را یاری نموده‌اند، قدردانی می‌نماییم.

بیشتر آسفالت ماستیکی در برابر تغییر شکل‌های لحظه‌ای است. با این حال، تحلیل نتایج آزمایش شیارشدگی تصویر یکسانی و تطابق کاملی با مدول برجهندگی دارد، به گونه‌ای که میانگین عمق شیار در مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه تنها $\frac{3}{4}$ میلی‌متر و در مخلوط مخلوط آسفالتی گرم معادل $\frac{8}{5}$ میلی‌متر بدست آمده است. این یافته حاکی از کاهش حدود ۶۰ درصدی عمق شیار افتادگی در آسفالت ماستیک نسبت به نوع معمولی است که ناشی از نقش اسکلتی دانه بندی و مصرف قیر

۵- نتیجه‌گیری

انواع طرح‌های مخلوط جدید آسفالت ماستیکی با قیر اصلاح‌شده، پتانسیل قابل توجهی را نشان دادند که در آن افزودن اصلاح‌کننده‌ها به طور مثبت بر پارامترهای مقاومتی آسفالت ماستیکی تأثیر می‌گذارد. اثر مثبت قیر اصلاح‌شده با الیاف سلولزی به وضوح نشان می‌دهد که مخلوط‌های اصلاح‌شده از این طریق، باعث افزایش مدول سختی بالا حتی در دماهای بالا، مقاومت بالا در برابر تنش چرخه‌ای و تغییر شکل دائمی را نشان دادند. با توجه به خرابی‌های رایج و مشاهده شده در آسفالت‌های سستی اجرا شده در خطوط اتوبوس تندرو در تهران و با در نظر گرفتن نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان با استفاده از آسفالت ماستیک در محل ایستگاه‌های خطوط اتوبوس تندرو به جای آسفالت‌های سستی و رایج مورد استفاده در کشور ایران (مناطق معتدل)، به نتایج مطلوبی در جهت حذف و یا کاهش خرابی‌های متداول روسازی‌های آسفالتی از جمله شیار افتادگی، دست یافت. آسفالت ماستیک به واسطه مصرف قیر زیاد، دیرتر دچار پیرشدگی می‌شود و همچنین انعطاف پذیری زیادی از خود نشان می‌دهد و در مقابل تغییر شکل‌های متناوب و همچنین ترک‌های پوست سوسماری مقاوم است. این امر، در خطوط اتوبوس تندرو با توجه به تناوب بارگذاری و نوع بار وارده از سوی اتوبوس‌ها حائز اهمیت است. همچنین با در نظر گرفتن این نکته که ترک‌های پوست سوسماری از نوع ترک‌های سازهای می‌باشند، اهمیت کنترل و یا حذف این نوع ترک‌ها توسط آسفالت ماستیک دوچندان می‌نماید. با توجه به نتایج حاصل از انجام آزمایش شیار افتادگی که نشان دهنده کاهش ۶۰ درصدی شیار افتادگی آسفالت ماستیک نسبت به مخلوط آسفالتی گرم است و با در نظر گرفتن پایداری زیاد و مقاومت در برابر تغییر شکل (به دلیل استخوان‌بندی سنگدانه‌ای)، آسفالت ماستیک

۷- مراجع

- pavement (FHWA Report No. FHWA-HIF-14-XXX). U.S. Department of Transportation. doi.org/10.1111/fhwa.hif.14.1111
- Hettiarachchi, C., & Mamppearachchi, W. (2025). Handbook of Asphalt Technology. Springer. doi.org/10.1007/978-981-96-4532-9
- Maggiore, C. (2014). A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- Moharrer, A. (2024). Investigating the effect of silica fume waste powder of sand blasting as cement replacement in the rheological and mechanical properties of concrete. *Karafan Journal*, *21*(3), 325–346 (in Persian). doi.org/10.48301/kssa.2023.409074.2640
- Nazari, M., Mirbaha, B., Abdi Kordani, A., & Mojabi, S. A. (2021). Laboratory investigation of the effect of stone mastic asphalt modified with SEBS polymer and cellulose fibers on the moisture susceptibility. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *15*, 1317–1326. doi.org/10.1007/s42947-021-00090-6
- Raj, N. K. K., & Ramesh, A. (2024, June). Development of sustainable pavement: an experimental study of stone mastic asphalt prepared with warm mix additives and reclaimed asphalt pavement. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1326, No. 1, 012082. IOP Publishing. doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012082
- Tan, Y., & Guo, M. (2013). Study on the phase behavior of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, *47*, 311–317. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.064
- Teltayev, B. B., Rossi, C. O., Izmailova, G. G., & Amirbayev, E. D. (2019). Effect of freeze-thaw cycles on mechanical characteristics of bitumens and stone mastic asphalts. *Applied Sciences*, *9*(3), 458. doi.org/10.3390/app9030458
- Tsai, B. W., Coleri, E., Harvey, J. T., & Monismith, C. L. (2016). Evaluation of AASHTO T 324 Hamburg-wheel track device test. *Construction and Building Materials*, *114*, 248–260. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.171
- Underwood, B. S. (2016). A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue. *International Journal of Fatigue*, *82*, 387–401. doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.08.012
- Xiong, X., Xiao, S., Tan, Y., Zhang, X., Zhang, D., Han, M., & Wang, W. (2021). Estimation of density and moisture content in asphalt mixture based on dielectric property. *Construction and Building Materials*, *298*, 123518. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123518
- Xu, S., Cai, S., Zhang, C., Fang, L., Bian, C., Zou, X., & Fu, D. (2024). A novel environmentally-friendly filler of the asphalt mastic: Organic modified waste shells. *Journal of Cleaner Production*, *470*, 143333. doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143333
- Zhang, K., Min, Z., Hao, X., Huang, W., & Shao, K. (2024). Experimental investigation of the properties of epoxy asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, *435*, 136866. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136866
- Al-Shamsi, K., Hassan, H. F., & Mohammed, L. N. (2017). Effect of low VMA in hot mix asphalt on load-related cracking resistance. *Construction and Building Materials*, *149*, 386–394.
- Benešová, L., Sedina, J., & Valentin, J. (2017). Influence of selected test parameters on measured values during the MSCR test. ResearchGate.
- Bi, Y., Guo, F., Zhang, J., Pei, J., & Li, R. (2021). Correlation analysis between asphalt binder/asphalt mastic properties and dynamic modulus of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, *276*, 122256. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122256
- Fang, C., Tang, D., Li, Z., Chen, Y., Guo, N., & Guo, T. (2024). A new fatigue equation for asphalt mixtures considering loading sequence effects. *Case Studies in Construction Materials*, *20*, e03286. doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03286
- Khabbaz Mehrjardi, M., & Khabiri, M. M. (2024). The effect of pistachio skin ash as an additive on the performance of bitumen and asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1–20. doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05400
- Liao, M. C., Chen, J. S., & Tsou, K. W. (2012). Fatigue characteristics of bitumen-filler mastics and asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *24*(7), 916–923. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000450](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000450)
- Lv, S., Wang, P., Fan, X., Cabrera, M. B., Hu, L., Peng, X., Liu, C., & Yuan, J. (2021). Normalized comparative study on fatigue characteristics of different pavement materials. *Construction and Building Materials*, *271*, 121907. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121907
- Zakerzadeh, M. (2025). Optimising mix design and performance of crumb rubber modified stone mastic asphalt (SMA): An experimental study for enhanced durability and sustainability (Doctoral dissertation, UNSW Sydney). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.186
- Bayat, R., Habibi, M., & Taherkhani, H. (2019). Comparison of the effect of novel additives on the technical characteristics of asphalt concrete with Topeka grading. *Karafan Journal*, *16*(1), 127–150. dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23829796.1398.16.45.7.0
- Bieliatynskiy, A., Yang, S., Pershakov, V., Shao, M., & Ta, M. (2024). Features of the structure and properties of stone mastic asphalt. *Materialwissenschaft und Werks tofftechnik*, *55*(7), 986–994. doi.org/10.1002/mawe.202300181
- Cheng, Y., Liang, J., Wang, W., Wang, H., Zhao, W., Li, A., & Xia, W. (2024). Characteristics and evolution mechanism of creep properties for asphalt binder/mastic under salt-erosion conditions. *Construction and Building Materials*, *443*, 137702. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137702
- Cheng, Y., Tao, J., Jiao, Y., Tan, G., Guo, Q., Wang, S., & Ni, P. (2016). Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, *118*, 268–275. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.041
- Federal Highway Administration. (2014). Economic evaluation of mastic asphalt

Optimization of Bitumen Bands in Mastic Asphalt for High-Speed Bus Routes

Hoseinali Bagi, Assistant Professor, Civil Department, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

Ali Rahimi, Professor, Engineering Department, SDU. Almaty, Kazakhstan.

E-mail: hoseinbagi@yahoo.com

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

The increasing frequency of pavement distresses at Bus Rapid Transit (BRT) stations in Tehran, including alligator cracking, rutting, and shoving, necessitates the application of high-performance asphalt mixtures. This study assesses the feasibility of utilizing Stone Matrix Asphalt (SMA) containing 0.3% cellulose fibers as a replacement for conventional Hot Mix Asphalt (HMA) at these stations. Following field investigations at three BRT lines in Tehran, mix designs for both asphalt types were prepared using identical aggregates and 60/70 penetration grade bitumen. Specimens were fabricated with five different bitumen percentages (three replicates each) and subjected to Marshall test, resilient modulus testing (ASTM D4123), and rutting evaluation using the Hamburg Wheel Tracker (AASHTO T324). Statistical analysis of the results indicated that the SMA mixture, with an optimum bitumen content of 6.1%, exhibited a significantly higher resilient modulus (3250 MPa vs. 2100 MPa, $P < 0.001$) and a substantially lower final rut depth (3.2 mm vs. 8.1 mm, $P < 0.0001$) compared to the HMA mixture with an optimum bitumen content of 4.38%. This represents a 60% reduction in rutting potential. This superior performance is attributed to the SMA's gap-graded aggregate structure, higher filler content, and the formation of a mastic reinforced with bitumen-fiber mortar. Consequently, cellulose fiber-reinforced Stone Matrix Asphalt is recommended as a suitable option for enhancing the durability of pavements at BRT stations in Tehran.

Keywords: Bus Stations, Bus Rapid Transit (BRT), Stone Matrix Asphalt (SMA), Pavement Distress, Rutting