

ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای حاوی افزودنی‌های خرده لاستیک و شیشه

احمد منصوریان*، استادیار، پژوهشکده حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مصعب مولایی، کارشناس ارشد راه و ترابری

E-mail: a_mansourian@iust.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۵/۲۹ - پذیرش: ۹۲/۱۱/۱۵

چکیده

انباشت روزافزون مواد زائد حاصل از تولیدات کارخانجات صنعتی و زندگی روزمره به یکی از معضلات اساسی در شهرهای بزرگ تبدیل شده است. از جمله راه‌حلهایی که برای این مشکل اندیشیده شده است، استفاده از این مواد در زیرساخت‌های راه می‌باشد. با توجه به اینکه تایرهای مستعمل و شیشه ضایعاتی از جمله موادی هستند که حجم قابل ملاحظه‌ای از مواد زائد را به خود اختصاص می‌دهند، در این تحقیق، اثر افزودنی‌های خرده لاستیک و خرده شیشه بر ویژگی‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای در دمای زیاد (مقاومت در برابر شیارافتادگی) مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور از مصالح سنگی با دانه بندی باز، قیر خالص ۷۰-۶۰ و دو نوع ماده افزودنی (خرده لاستیک و خرده شیشه) با درصد‌های مختلف استفاده شده است. نتایج حاصل از انجام آزمایش خزش دینامیک روی نمونه‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای نشان می‌دهد مواد افزودنی مذکور باعث افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای در برابر شیار افتادگی جای چرخ می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: آسفالت با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای، شیشه، لاستیک، شیار افتادگی جای چرخ، خزش دینامیک.

۱. مقدمه

کهنه و فرسوده وسایل نقلیه نیز از جمله مشکلات زیست محیطی بسیاری از کشورها محسوب می‌شود. به عنوان مثال، سرانه تایرهای مستعمل در ایالات متحده برابر یک حلقه است (NCHRP، ۲۰۱۳). از این تعداد تایر مستعمل، ۳۰ میلیون حلقه برای تولید مجدد تایرهای نو استفاده می‌شود و ۲۵۰ میلیون حلقه دیگر غیر قابل استفاده بوده و باید در مکانی دپو گردد (NCHRP، ۲۰۱۳). استفاده از لاستیک‌های مستعمل و شیشه ضایعاتی در فرایند تولید محصولاتمانند آسفالت که منجر به ارتقای کیفیت این محصولات شود، می‌تواند هم از نقطه نظر زیست محیطی و هم از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت باشد.

انباشت روزافزون مواد زائد حاصل از تولیدات کارخانجات صنعتی و زندگی روزمره به یکی از معضلات اساسی در شهرهای بزرگ تبدیل شده است. از جمله راه‌حل‌هایی که برای این مشکل اندیشیده شده است، استفاده از این مواد در زیرساخت‌های راه می‌باشد. شیشه ضایعاتی و لاستیک‌های فرسوده وسایل نقلیه از عمده مواد زایدی هستند که توسط انسان به چرخه محیط زیست وارد می‌شود. بر اساس بررسی‌های انجام شده حدود ۱۰ میلیون تن زباله در شهرهای بزرگ جهان تولید می‌شود که ۳ الی ۵ درصد آن را خرده شیشه تشکیل می‌دهد (وو و همکاران، ۲۰۰۴). ضایعات لاستیک حاصل از تایرهای

مدول سختی و کاهش تغییرشکل‌های دائمی آنها دارد (عربانی، ۲۰۱۱).

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد استفاده از آسفالت با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای^۲ (SMA) از جمله راه‌حل‌هایی است که برای مقابله با شیارافتادگی جای چرخ در روسازی‌های آسفالتی در نظر گرفته می‌شود (براون و منگلورکار، ۱۹۹۳). در این نوع آسفالت، که از دانه‌بندی گسترده^۳ استفاده می‌شود، مصالح سنگی درشت‌دانه مستقیماً با یکدیگر در تماس بوده و قفل و بست بهتری نسبت به آسفالت معمولی ایجاد می‌کنند. در نتیجه، مخلوط آسفالتی پایداری و مقاومت بیشتری در برابر بارهای ترافیکی از خود نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین میزان شیارافتادگی جای چرخ روی نمونه‌های ساخته شده مخلوط بتن آسفالتی معمولی و مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای در دو دمای ۳۵ و ۵۵ درجه سلسیوس نشان می‌دهد که با افزایش دما مقاومت در برابر شیار افتادگی جای چرخ کاهش می‌یابد. با این وجود، مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای نسبت به مخلوط بتن آسفالتی معمولی، به ویژه در دمای زیاد، مقاومت بهتری را در مقابل شیار افتادگی جای چرخ از خود نشان داده‌اند (AASHTO، ۲۰۰۰).

بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد که حجم عمده‌ای از این تحقیقات به بررسی اثر مواد افزودنی مختلف بر عملکرد آسفالت گرم رایج اختصاص داده شده است و بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای حاوی این مواد افزودنی کمتر مورد توجه واقع شده است. در این راستا، در این مقاله، به بررسی و مقایسه اثر خرده لاستیک و خرده شیشه بر رفتار آسفالت با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای در دمای زیاد (شیارافتادگی جای چرخ) پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق، مصالح سنگی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های آسفالتی SMA از معدن پ.بل واقع در استان

مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از پودر لاستیک منجر به بهبود عملکرد آسفالت در برابر شیار افتادگی می‌شود (بیلدیریم، ۲۰۰۵). محققین اداره حمل و نقل ایالت آریزونا به منظور ارزیابی عملکرد آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده لاستیک از آزمایش مدول دینامیک مرکب^۱ استفاده نمودند (کالوش و همکاران، ۲۰۰۳). این محققین پس از انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و مقایسه آنها با مخلوط‌های آسفالتی اجرا شده در محل، نتیجه‌گیری نمودند که استفاده از قیرهای اصلاح شده با خرده لاستیک موجب ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دماهای زیاد و کم می‌شود. تحقیقات آکستی و همکاران (۲۰۰۹) نیز نشان می‌دهد که مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیرهای اصلاح شده با لاستیک باعث کاهش سروصدای ناشی از ترافیک، کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود و به همین دلیل در بسیاری از نقاط جهان استفاده از این نوع مخلوط‌های آسفالتی روبه افزایش است. محققین ایالت یوتا نیز اشاره داشته‌اند که استفاده از خرده لاستیک در مخلوط‌های آسفالتی گرم باعث بهبود دوام لایه آسفالتی و کاهش سروصدای ناشی از عبور وسایل نقلیه از روی روسازی به میزان ۶ تا ۱۰ دسی‌بل می‌شود (NCHRP، ۲۰۱۳). البته این محققین در کنار مزایای مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده لاستیک اظهار داشته‌اند که محدودیت دوره زمانی اجرا (برای اجرای این نوع مخلوط‌های آسفالتی دمای هوا حداقل باید ۲۱ درجه سلسیوس باشد) و پایدار نبودن مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی خرده لاستیک با دانه‌بندی پیوسته از جمله معایب این نوع مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد.

همانطور که گفته شد، شیشه نیز از جمله موادی است که روزانه حجم قابل توجهی از مواد زائد شهری را به خود اختصاص می‌دهد. با وجود اینکه استفاده از خرده شیشه بیشتر در بتن سیمانی مطرح بوده است (NCHRP، ۲۰۱۳)، ولی بررسی‌ها نشان می‌دهد مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و حاوی خرده شیشه (به عنوان قسمتی از سنگ‌دانه مخلوط) نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش

2 - Stone mastic asphalt
3 - Gap graded

1 - Dynamic complex modulus

مخلوط را افزایش می‌دهد (نشریه شماره ۲۰۶ سازمان مدیریت، ۱۳۷۹).

برای ساخت تعدادی از نمونه‌های آسفالتی SMA از ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد پودر شیشه و ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد پودر لاستیک به عنوان مواد افزودنی در مخلوط آسفالتی استفاده شد. درصدهای مذکور نسبت به وزن قیر در مخلوط SMA می‌باشند.

برای تهیه پودر شیشه، مقداری شیشه ضایعاتی توسط آسیاب‌های سایشی و سیاره‌ای دانشگاه تحصیلات تکمیلی تکنولوژی‌های پیشرفته ماهان کرمان به صورت پودر درآمده و از الک نمره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلی‌متر) عبور داده شد.

خرده لاستیک مورد نیاز نیز از کارخانه لاستیک بارز کرمان تهیه شد و قبل از استفاده در مخلوط‌های آسفالتی SMA، از الک نمره ۳۰ (۰/۶ میلی‌متر) عبور داده شد. در این تحقیق، برای اختلاط خرده لاستیک با مخلوط آسفالتی SMA از روش خشک استفاده گردید. مشخصات خرده لاستیک استفاده شده در جدول ۳ ارائه شده است.

کرمان تهیه شدند. مشخصات مصالح سنگی در جدول ۱ آمده است. قیر مورد استفاده نیز از نوع خالص ۷۰-۶۰ و از پالایشگاه اصفهان تهیه شد. جدول ۲ مشخصات قیر مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. دانه‌بندی مصالح سنگی نیز مطابق شکل ۱ می‌باشد. لازم به ذکر است که دانه‌بندی مذکور بر اساس ضوابط طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (۱۳۷۹) و مفاد آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (۱۳۹۰) انتخاب شده است.

بالا بودن فضای خالی بین مصالح درشت دانه و مصرف نسبتاً زیاد قیر در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای عاملی جهت ریزش و بیرون زدن قیر از مخلوط آسفالتی است. به منظور جلوگیری از این پدیده، در این تحقیق از الیاف سلولزی به میزان ۰/۳ درصد وزن مخلوط آسفالتی استفاده شد. لازم به ذکر است که وجود الیاف مناسب در مخلوط‌های آسفالتی SMA علاوه بر جلوگیری از قیرزدگی و جاری شدن قیر، مقاومت فشاری، ضریب سختی، مقاومت در برابر خستگی و دوام

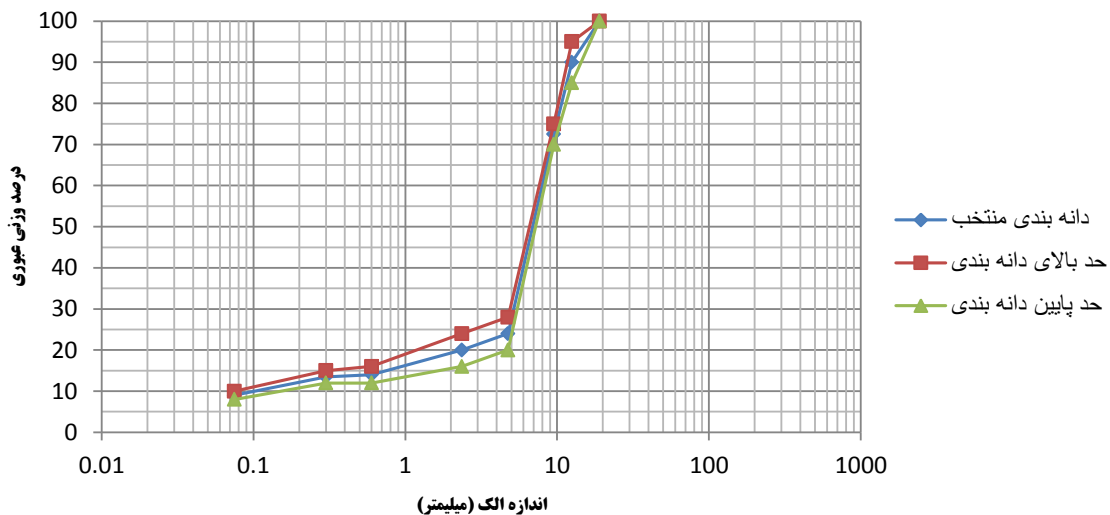
جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی استفاده شده در تحقیق

شرح	روش آزمایش	مقدار مورد استفاده در این تحقیق
مصالح درشت دانه		
سایش به روش لس آنجلس، درصد	ASTM C131	۲۵
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم، درصد	ASTM C88	۳/۵٪
درصد شکستگی	ASTM D 5821	۹۱
درصد سنگ‌دانه‌های پهن و دراز	ASTM D4791	۱۴
وزن مخصوص حقیقی مصالح مانده روی الک نمره ۸ (gr/cm^3)	ASTM C127	۲/۶۴۲
درصد جذب آب مصالح مانده روی الک نمره ۸	ASTM C127	۱/۱
درصد جذب قیر مصالح		۰/۳۵
مصالح ریزدانه		
دامنه خمیری PI، درصد	ASTM D4318	NP
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم، درصد	ASTM C88	۵/۲٪
ارزش ماسه ای، درصد	ASTM D 2419	۷۷
وزن مخصوص حقیقی مصالح بین الک ۸ و ۲۰۰ (gr/cm^3)	ASTM C128	۲/۵۸۸
درصد جذب آب مصالح بین الک ۸ و ۲۰۰	ASTM C128	۱/۹
فیبر		
وزن مخصوص حقیقی مصالح رد شده از الک ۲۰۰ (gr/cm^3)	ASTM C188	۲/۷۵۶

ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای حاوی افزودنی‌های خرده لاستیک و شیشه

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده در تحقیق

نوع آزمایش	روش آزمایش	قیر خالص
وزن مخصوص	ASTM D3289	۱/۰۱۷
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	ASTM D36	۵۰/۵
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس (دهم میلی‌متر)	ASTM D5	۶۴
نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)	ASTM D92	۲۹۶
کشش قیر در ۲۵ درجه سلسیوس	ASTM D113	+۱۰۰
مواد نامحلول قیر		۹۹/۸
ویسکوزیته در ۱۲۰ درجه سلسیوس	ASTM D2170	۵۹۲
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه سلسیوس	ASTM D2170	۳۳۱
ویسکوزیته در ۱۶۰ درجه سلسیوس	ASTM D2170	۱۲۴
شاخص PI (برحسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس)		-۰/۴۷۸
شاخص PVN (بر حسب درجه نفوذ و ویسکوزیته کینماتیک)		-۰/۹۷۶



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی SMA

جدول ۳. مشخصات خرده لاستیک مورد استفاده در تحقیق

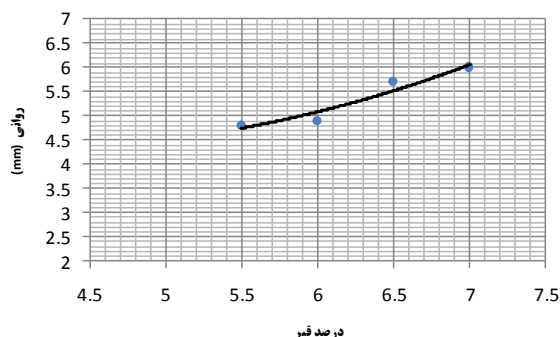
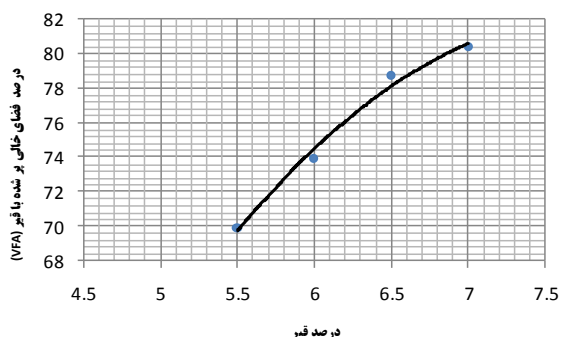
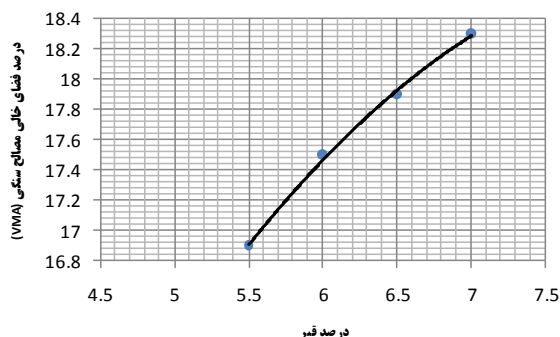
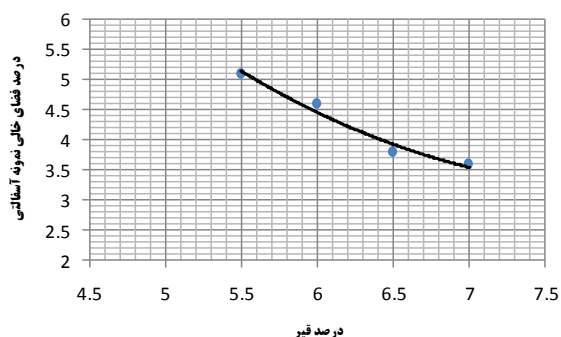
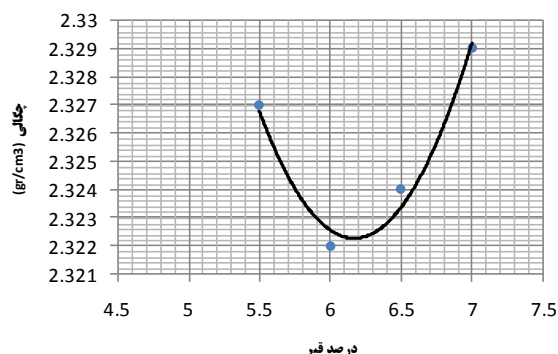
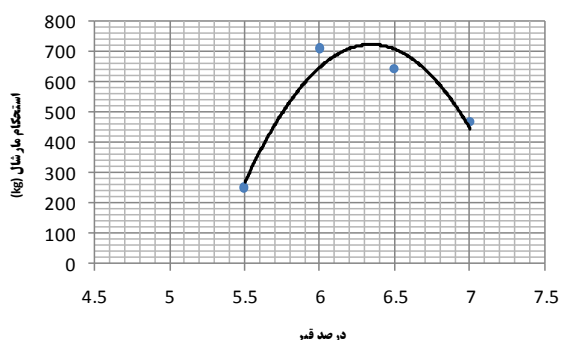
وزن واحد حجم (gr/cm ³)	خاکستر (%)	پلاستیک (%)	دوده (%)	پلیمر (%)	میزان رد شده از الک ۳۰ (%)
۱/۱۶	۵	۱۰	۲۹	۵۰	۱۰۰

با توجه به منحنی‌های حاصل از آزمایش مارشال و با در نظر گرفتن این نکته که درصد ریزش قیر از سنگ‌دانه طبق استاندارد AASHTO T305 برای نمونه‌ها نباید بیش از ۰/۳ درصد باشد، درصد قیر بهینه برای نمونه‌های

برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی SMA از روش طرح اختلاط مارشال (ASTM D1559) استفاده شد. برای این منظور، نمونه‌ها با ۵۰ ضربه چکش مارشال که به هر طرف نمونه وارد شد متراکم شدند.

به دست آمد. شکل ۲ نمونه‌ای از نمودارهای آزمایش مارشال را برای افزودنی پودر لاستیک نشان می‌دهد.

حاوی پودر شیشه، پودر لاستیک و نمونه‌های شاهد به ترتیب ۶/۵، ۶/۳ و ۶/۵ درصد وزنی مخلوط آسفالتی



شکل ۲. نتایج آزمایش مارشال برای یک نمونه از مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای حاوی پودر لاستیک

۴۵ درجه سلسیوس، مقدار بارگذاری برابر ۳۰۰ کیلوپاسکال و نسبت پواسون نیز برابر ۰/۳۵ در نظر گرفته شد. بارگذاری به صورت سیکل‌های بارگذاری و استراحت (۱ ثانیه بارگذاری و ۱ ثانیه استراحت)، تا لحظه شکست نمونه انجام گرفت و مقدار کرنش محوری از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\varepsilon_d(n, T) = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (1)$$

۳. آزمایش خزش دینامیک

در این تحقیق، برای تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی SMA در برابر تغییر شکل دائمی، از آزمایش خزش دینامیک محدود نشده به روش استاندارد BS DD226 استفاده شد. قبل از اعمال بارگذاری اصلی، ابتدا یک تنش پیش‌بارگذاری به میزان ۱۲ کیلوپاسکال به مدت ۱۲۰ ثانیه بر نمونه‌های آسفالتی اعمال گردید. دمای انجام آزمایش

شکل ۳ نمایی از آزمایش خزش دینامیک در این تحقیق که با دستگاه UTM14P انجام شده است را نشان می‌دهد.

که در آن کرنش محوری نمونه پس از n بار اعمال بار در دمای T ، تغییر فاصله بین دو صفحه بارگذاری و h_0 فاصله اولیه بین دو صفحه بارگذاری است.



شکل ۳. دستگاه UTM14P و قالب مورد استفاده برای آزمایش خزش دینامیک

تغییر شکل می‌شود، عدد روانی^۱ نامیده می‌شود. هرچه مقدار عدد روانی یک مخلوط آسفالتی بزرگتر باشد، آن مخلوط در برابر شیاردگی مقاومت بیشتری خواهد داشت (ویتزاک و همکاران، ۲۰۰۲). در این تحقیق، برای تحلیل و مقایسه اثر افزودنی‌های مختلف بر مقاومت شیاردگی مخلوط‌های آسفالتی SMA از مفهوم عدد روانی استفاده شده است. شکل ۴ نمونه‌ای از نمودار تغییرات کرنش دائمی بر حسب تعداد بارگذاری را برای یکی از نمونه‌های آسفالتی SMA که حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک (نسبت به وزن قیر) است نشان می‌دهد.

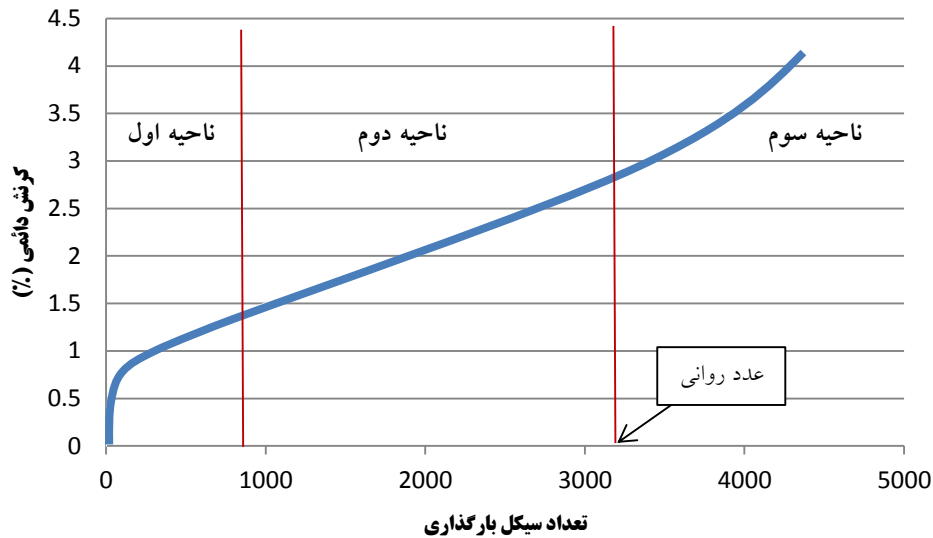
برای محاسبه عدد روانی، روش‌های متفاوتی معرفی شده است که در این تحقیق از روش افزایش تدریجی ساده^۲ استفاده شده است (گوه و یو، ۲۰۰۹). در این روش، ابتدا تغییر شکل‌های دائمی به دست آمده از آزمایش به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند سپس مقدار شیب در هر سیکل بارگذاری (حاصل تقسیم کرنش دائمی بر تعداد سیکل

نمودار تغییر کرنش تجمعی (تغییر شکل تجمعی) بر حسب دفعات بارگذاری نمونه‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد هر نمونه در سه فاز مختلف تغییر شکل می‌دهد. در فاز اول، نرخ تغییر شکل‌های نمونه در هر سیکل روند کاهشی به خود می‌گیرد تا جایی که مقادیر این تغییر شکل‌ها در هر سیکل یکسان گردد. یا به عبارتی، شیب نمودار تغییر شکل - تعداد سیکل بارگذاری به صورت خطی درآید. در این وضعیت، نمونه وارد مرحله دوم یا مرحله خطی بارگذاری خود شده است. مرحله دوم تا زمانی که نمونه تاب خزشی تحمل بار دینامیک وارده را داشته باشد ادامه می‌یابد. هنگامی که شیب نمودار تغییر شکل - تعداد سیکل بارگذاری از حالت خطی در آمده و روند افزایشی به خود گیرد یا به عبارتی کرنش‌ها در هر سیکل نسبت به سیکل ماقبل افزایش یابند، در واقع نمونه توان خود را از دست داده و وارد فاز سوم تغییر شکل خود شده است. این مرحله تا خرابی ۱۰۰٪ نمونه ادامه می‌یابد. نقطه‌ای که نمونه از مرحله دوم وارد مرحله سوم

1 - Flow number
2- Simple stepwise method

سیکل بارگذاری در آزمایش خزش دینامیک برای یکی از نمونه‌های SMA حاوی ۲۵ درصد خرده لاستیک نشان می‌دهد.

بارگذاری) محاسبه می‌شود. کمترین مقدار شیب به‌دست آمده همان عدد روانی خواهد بود. انجام این فرایند در نرم‌افزارهایی مانند Excel به راحتی امکان‌پذیر است. شکل ۵ تغییرات نرخ کرنش دائمی را بر حسب تعداد



شکل ۴. تغییرات کرنش دائمی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری در آزمایش خزش دینامیک برای یکی از نمونه‌های آسفالتی SMA حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک



شکل ۵- تغییرات نرخ کرنش دائمی در آزمایش خزش دینامیک برای یکی از نمونه‌های SMA حاوی ۲۵٪ خرده لاستیک

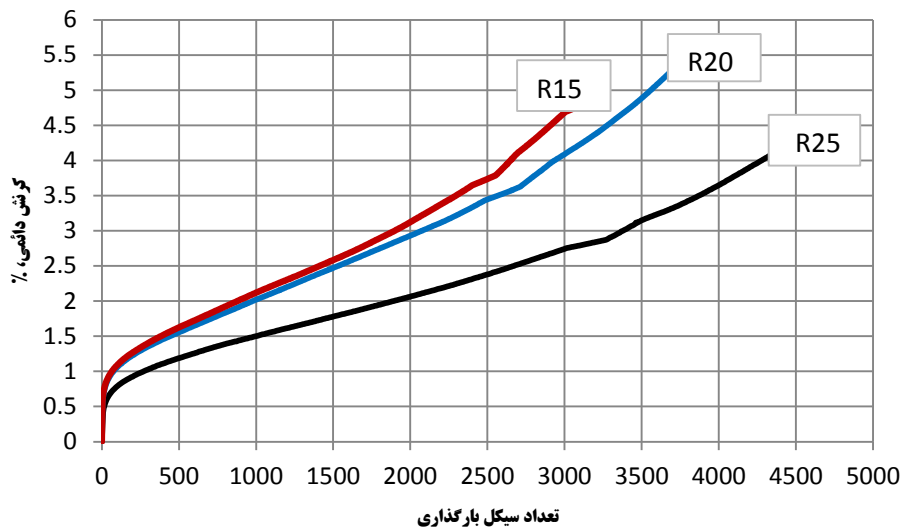
که از آزمایش خزش دینامیک به‌دست آمده‌اند را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، G بیانگر نمونه‌های SMA با افزودنی خرده شیشه و R نشان‌دهنده نمونه‌های SMA با

۴. نتایج و بحث

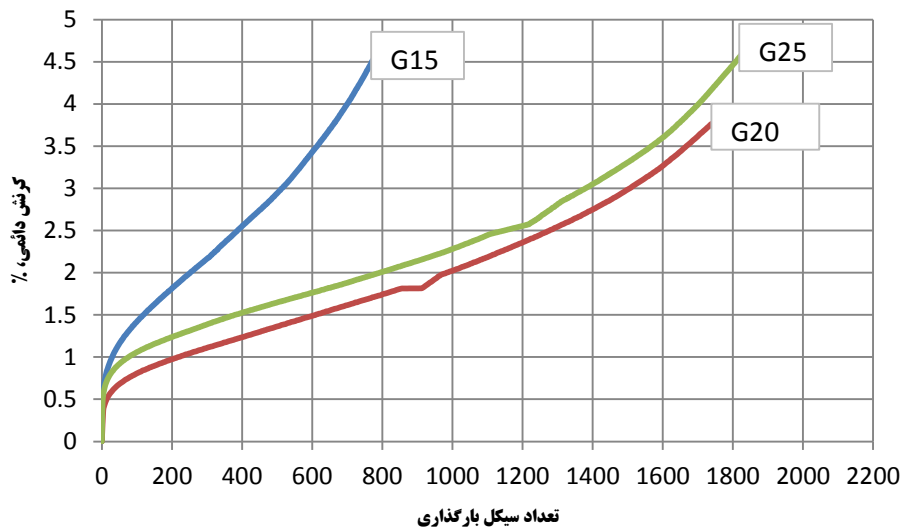
شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب تغییرات کرنش دائمی نمونه‌های آسفالتی SMA حاوی خرده لاستیک و خرده شیشه

قبل، در این تحقیق از روش افزایش تدریجی ساده استفاده شده است. شکل ۸ عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی SMA حاوی مواد افزودنی مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل، B بیانگر مخلوط‌های SMA پایه (بدون افزودنی) است.

افزودنی خرده لاستیک است. همچنین، اعداد مندرج در جلوی هر یک از حروف R و G بیانگر درصد افزودنی می‌باشد. با توجه به اینکه تشخیص نقطه شروع مرحله سوم (نقطه روانی) در این نمودارها به صورت بصری مشکل است، لازم است از یکی از روش‌های پیشنهادی در این زمینه استفاده شود که بر اساس توضیحات قسمت



شکل ۶. تغییرات کرنش دائمی نمونه‌های آسفالتی SMA حاوی خرده لاستیک



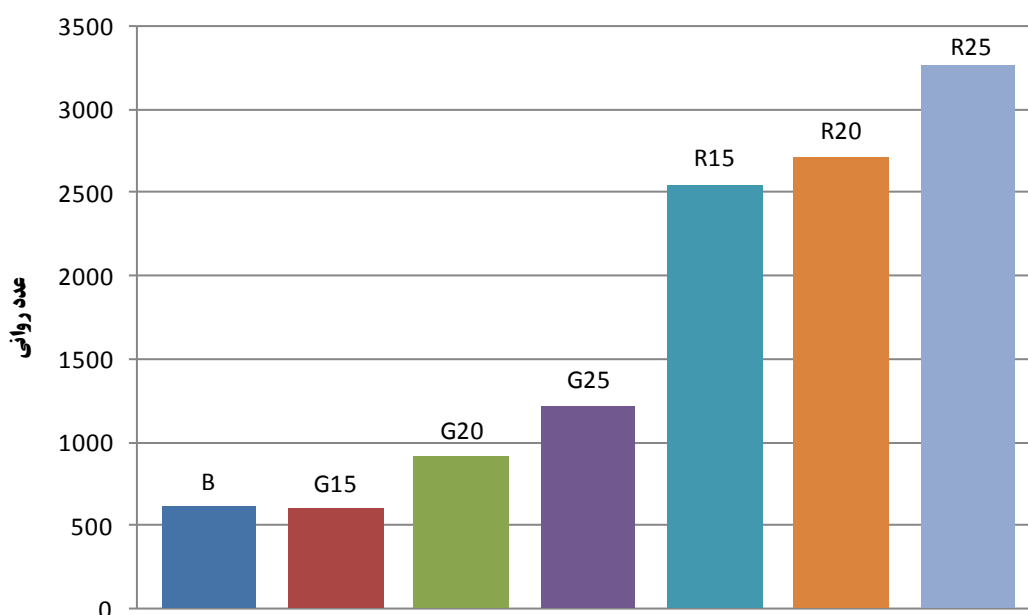
شکل ۷. تغییرات کرنش دائمی نمونه‌های آسفالتی SMA حاوی خرده شیشه

شیارشدگی می‌شوند. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیک، اثر افزودنی خرده لاستیک بر افزایش مقاومت شیارشدگی SMA به مراتب بیش از اثر خرده شیشه است. در این تحقیق، به نظر می‌رسد افزودنی خرده

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، به‌طور کلی می‌توان گفت افزودنی‌های پودر شیشه و پودر لاستیک باعث افزایش عدد روانی و به عبارت دیگر موجب افزایش مقاومت مخلوط‌های SMA در برابر پدیده

و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌شود (براون و مانگلوکار، ۱۹۹۳؛ سوسا و همکاران، ۱۹۹۱).
 افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های SMA حاوی خرده لاستیک (عبوری از الک نمره ۳۰) نیز می‌تواند به علت افزایش کندروانی قیر مخلوط آسفالتی و در نتیجه افزایش سختی مخلوط آسفالتی باشد. همانطور که گفته شد اصولاً مخلوط‌های آسفالتی با سختی بیشتر، مقاومت بیشتری در برابر پدیده شیارشدگی دارند.

شیشه (عبوری از الک نمره ۲۰۰) به علت حل نشدن در قیر تا حدود زیادی نقش فیلر را در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای ایفا نموده است. همین امر موجب افزایش مقاومت این مخلوط‌ها در برابر تغییر شکل‌های دائمی شده است. تحقیقات نشان می‌دهد فیلر (عبوری از الک نمره ۲۰۰) در مخلوط‌های آسفالتی SMA علاوه بر پر کردن فضای خالی باعث سختی بیشتر مخلوط



شکل ۸. عدد روانی نمونه‌های آسفالتی SAM حاوی مواد افزودنی

می‌شوند. از آنجا که عدد روانی معیاری برای مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار شدگی است، بنابراین می‌توان گفت افزودنی‌های مذکور باعث افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی SMA در برابر پدیده شیارشدگی می‌شوند که در این بین البته اثر خرده لاستیک به مراتب بیش از اثر خرده شیشه است.

۵. نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده در این تحقیق روی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA) حاوی مواد افزودنی خرده لاستیک (عبوری از الک نمره ۳۰) و خرده شیشه (عبوری از الک نمره ۲۰۰) نشان می‌دهد که این مواد باعث افزایش عدد روانی مخلوط‌های SMA

۶. مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۷۹. "طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای". وزارت راه و ترابری، نشریه شماره ۲۰۶.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۹۰. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". پژوهشکده حمل و نقل، نشریه شماره ۲۳۴.

- Akisetty, C. K., Lee, S. L. and Amirkhanian, S. N. 2009. "High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives". *J. Constr. Build. Mater.* 23: 565-573.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2000. "Standard Specification for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)". Designation: MP8-00, Washington, D. C.
- Arabani, M. 2011. "Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete". *J. Constr. Build. Mater.* 25: 1181-1185.
- Brown, E. R. and Manglorkar, H. 1993. "Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures". National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Alabama.
- Goh, S. W. and You, Z. 2009. "A simple step wise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test". *J. Constr. Build. Mater.* 23: 3398-3405.
- Kaloush, K. E., Witzak, M. W., Sotil, A. C. and Way, G. B. 2003. "Laboratory Evaluation of Asphalt Rubber Mixtures using the Dynamic Modulus (E^*) Test". Transportation Research Board, Annual Meeting.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). 2013. "Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications". Volume 7: Scrap Tire Byproducts, Transportation Research Board, Washington, D. C.
- Sousa, J. B., Craus, C. and Monismith, C. L. 1991. "Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete". Strategic Highway Research Program (SHRP), National Research Council Washington, D. C.
- Witzak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M. and Von Quintus, H. 2002. "Simple Performance Test for Superpave Mix Design", NCHRP Report 465.
- Wu, S., Yang, W. and Xue, Y. 2004. "Preparation and Properties of Glass-Asphalt Concrete". University of Technology, China.
- Yildirim, Y. 2005. "Polymer modified asphalt binders". *J. Constr. Build. Mater.* 21: 66-72.