



استفاده از سیم پلاستیکی ضایعاتی در مخلوط های آسفالت ماستیک درشت دانه (SMA)

سبحان سلیمانی گلسفیدی

دانشجوی دکترا، مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد

soleimanigolsefidi@alumni.um.ac.ir

ارسال: مهر ماه ۱۴۰۰ پذیرش: مهر ماه ۱۴۰۰

چکیده

سیم پلاستیکی ضایعاتی در حین تولید محصولات سیم برس مانند مسواک، برس مو، برس رنگ و غیره تولید می شود. نحوه بازیافت و استفاده مجدد از سیم پلاستیکی ضایعاتی یک مساله جدید می باشد. این تحقیق به بررسی رفتار سیم پلاستیکی ضایعاتی بر روی مخلوط های آسفالت ماستیک درشت دانه (SMA) با استفاده از روش طراحی مارشال می پردازد. نمونه ها با استفاده از چندین روش آزمایشگاهی از قبیل آزمایش پایداری مارشال، آزمایش شیارشدگی، آزمایش خمش سه نقطه ای و آزمایش حساسیت رطوبتی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان می دهد که سیم پلاستیکی ضایعاتی به طور موثری می تواند مقاومت دمای بالا، مقاومت ترک خوردگی دمای پایین و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت ماستیک درشت دانه را بهبود بخشد. همچنین جذب روغن، چسبندگی و اثر تاخیری در انتشار ترک مخلوط آسفالتی به مکانیزم تقویت کننده سیم پلاستیکی ضایعاتی نسبت داده می شود. نتیجه این پژوهش می تواند پشتیبانی فنی از سیم پلاستیکی ضایعاتی مورد استفاده در مصالح ساخت روسازی را ارائه دهد.

کلمات کلیدی: آسفالت ماستیک درشت دانه، سیم پلاستیکی ضایعاتی، مقاومت ترک خوردگی، انتشار ترک، حساسیت رطوبتی.

۱- مقدمه

با افزایش حجم ترافیک و بار وسایل نقلیه در بزرگراه ها، لزوم ایجاد روسازی هایی با دوام و امنیت بالا جهت ایجاد سرویس دهی قابل قبول برای کاربران راه ضروری می باشد. مخلوط های آسفالتی با دوام بالا باعث کاهش هزینه های نگهداری و بهره برداری در طول عمر سرویس دهی روسازی می شوند. در کشورهای در حال توسعه، استفاده از مخلوط های آسفالتی مقاوم و با دوام مانند مخلوط های آسفالت ماستیک درشت دانه (SMA¹) در لایه سطح روسازی در حال افزایش است [۱]. این مخلوط ها دارای رفتار ساختاری و عملکردی بالایی بوده و با ارائه دانه بندی ناپیوسته با سنگدانه های درشت غالب (۷۰ الی ۸۰ درصد وزنی مخلوط) مشخص شده و یک اسکلت جامد با ثبات بالا را فراهم می آورند. مخلوط های SMA به دلیل دانه بندی خاص، جهت جلوگیری از ریزش قیر از طریق فضای خالی مخلوط نیاز به افزودن الیاف دارند [۲]. الیاف افزوده شده به مخلوط SMA می تواند از مواد آلی، غیر آلی یا معدنی باشند تا از ریزش قیر در هنگام ساخت (تولید، حمل و نقل و بهره برداری مخلوط) جلوگیری شود. به طور کلی، الیاف هیچ تاثیری بر عملکرد مخلوط پس از تراکم ندارند اما درصد قیر بالاتری را ایجاد می کنند که باعث می شود یک فیلم قیری ضخیم تر در اطراف سنگدانه ایجاد شود [۳]. فیلم قیری ضخیم تر، اکسیداسیون را به تاخیر انداخته و از نفوذ رطوبت و عریان شدگی سنگدانه ها جلوگیری می کند. این مزایا باعث افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی می شود [۴].

¹ Stone Matrix Asphalt

الیاف تقویت شده معمولاً شامل الیاف معدنی مانند الیاف فولاد، الیاف کربن، الیاف شیشه و الیاف آلی مانند پلی استر، الیاف پلی پروپیلن و لیگنین می باشد [۵]. الیاف فولادی و الیاف کربن به دلیل قیمت بالا معمولاً استفاده نمی شوند. الیاف شیشه نیز با وجود استحکام بالا و قیمت پایین به دلیل شکنندگی و تجزیه ناپذیری، مورد توجه قرار نمی گیرند [۶ و ۷]. الیاف آلی مانند پلی استر، پلی پروپیلن و لیگنین به راحتی در مخلوط آسفالتی با یکدیگر در هم آمیخته می شوند [۸ و ۹]. الیاف باید دارای ویژگی هایی مانند مقاومت حرارتی، مدول بالا و پراکندگی آسان باشد تا عملکرد مخلوط آسفالتی را افزایش دهد [۱۰].

حدود ۱۰ درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی در حین تولید محصولات سیم برس مانند مسواک، برس مو و غیره تولید می شوند. اگر این ضایعات قابل بازیافت و استفاده مجدد نباشند باعث آلودگی محیط زیست می شوند [۱۱ و ۱۲]. بنابراین بازیافت و استفاده مجدد از سیم پلاستیکی ضایعاتی یک مشکل ضروری است که باید به آن توجه شود. سیم پلاستیکی ضایعاتی خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوبی داشته و به عنوان مواد تقویت کننده در محصولات لاستیکی و بتنی می تواند مورد استفاده قرار گیرد. در مقایسه با الیاف معدنی، سیم پلاستیکی ضایعاتی دارای چگالی و قیمت کمتر بوده و قابل بازیافت است. در مقایسه با الیاف آلی، سیم پلاستیکی ضایعاتی دارای خصوصیات مقاومتی بالا بوده و به راحتی در مخلوط آسفالتی پراکنده می شود.

این پژوهش با هدف ارزیابی کارپذیری سیم پلاستیکی ضایعاتی در مخلوط های آسفالتی با دانه بندی ناپیوسته انجام شده است. برای ارزیابی عملکرد، مخلوطهای SMA با روش مارشال طراحی شده و آزمایشات مکانیکی شامل پایداری مارشال، شیارشدگی، خمش سه نقطه ای و حساسیت رطوبتی انجام شد.

۲- مصالح و آزمایشات

۲-۱- قیر آسفالتی و مصالح سنگی

قیر مورد استفاده در این پژوهش، قیر لاستیکی می باشد که مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

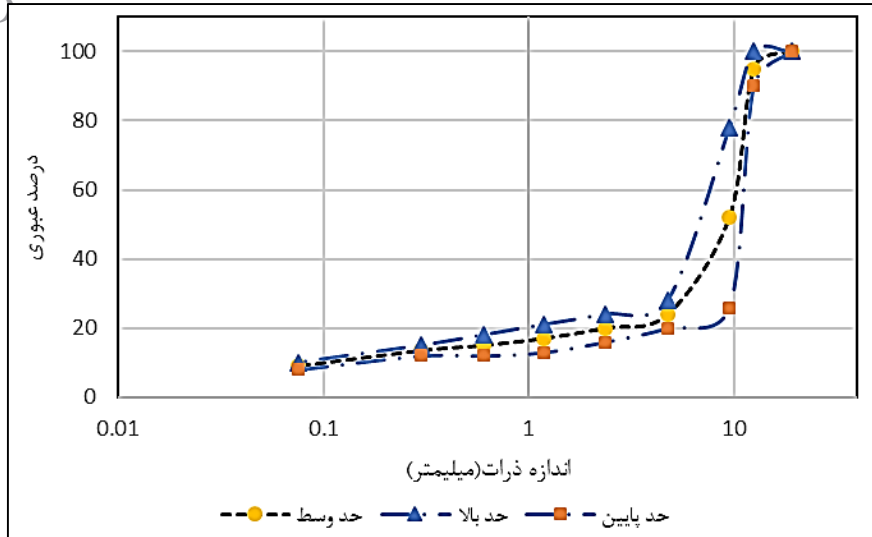
جدول ۱- خصوصیات قیر لاستیکی

مقدار	پارامتر
۶۰	درجه نفوذ (۲۵ درجه سانتیگراد، ۵ ثانیه، ۱۰۰ گرم)، ۰/۱ میلیمتر
۷۸	نقطه نرمی، درجه سانتیگراد
>۱۰۰۰	شکل پذیری (۱۵ درجه سانتیگراد، ۵۰ میلیمتر بر دقیقه)، میلیمتر
۳/۲	ویسکوزیته (۱۷۰ درجه سانتیگراد)، پاسکال-ثانیه
۰/۰۵	درصد افت وزنی، درصد
۷۵٪	نرخ نفوذ، درصد
>۶۰۰	شکل پذیری (۲۵ درجه سانتیگراد، ۵۰ میلیمتر بر دقیقه)، میلیمتر

همچنین مشخصات مصالح سنگی آهکی مورد استفاده و دانه بندی مربوط به طرح مخلوط به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲- حدود دانه بندی و دانه بندی انتخابی در طرح آسفالت ماستیک درشت دانه

اندازه ذرات (میلیمتر)	۰/۰۷۵	۰/۳	۰/۶	۱/۱۸	۲/۳۶	۴/۷۵	۹/۵	۱۲/۵	۱۹
درصد عبوری حد بالا	۱۰	۱۵	۱۸	۲۱	۲۴	۲۸	۷۸	۱۰۰	۱۰۰
درصد عبوری حد پایین	۸	۱۲	۱۲	۱۳	۱۶	۲۰	۲۶	۹۰	۱۰۰
درصد عبوری حد وسط (انتخابی)	۹	۱۳/۵	۱۵	۱۷	۲۰	۲۴	۵۲	۹۵	۱۰۰



شکل ۱- منحنی دانه بندی طرح آسفالت ماستیک درشت دانه

۲-۲- سیم پلاستیکی ضایعاتی

شکل ۲ سیم پلاستیکی ضایعاتی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد. جدول ۳ مشخصات و خواص سیم پلاستیکی ضایعاتی را بیان می کند.



شکل ۲- سیم پلاستیکی ضایعاتی

جدول ۳- مشخصات سیم پلاستیکی ضایعاتی

مقدار	خاصیت
۱/۱۱	وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)
۲۰	طول (میلیمتر)
۰/۲	قطر (میلیمتر)
۳۵۷	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۲۲۰	نقطه ذوب (درجه سانتیگراد)

۳-۲- ساخت مخلوط SMA

در این پژوهش مقدار قیر بهینه لاستیکی بر اساس طرح مخلوط مارشال و طبق آیین نامه روسازی راه های ایران (نشریه ۲۳۴)، ۶ درصد تعیین شده و درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی مخلوط استفاده گردید. ابتدا سنگدانه ها

در دمای ۱۶۳ درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت نگهداری شده و سپس سیم پلاستیکی ضایعاتی به طور کامل و یکنواخت مطابق با شکل ۳ مخلوط می شوند. پس از ۳ دقیقه اختلاط، مخلوط نهایی همان طرح مخلوط SMA خواهد بود.



شکل ۳- اختلاط مصالح سنگی با سیم پلاستیکی ضایعاتی

۴-۲- آزمایش پایداری مارشال

آزمایش پایداری مارشال یک آزمایش گسیختگی است که در آن نمونه به صورت افقی قرار گرفته و بار قطری با سرعت کرنش ۵۰ میلیمتر بر دقیقه اعمال می شود. آزمایش ها در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و مطابق با استاندارد ASTM D-6927 مخلوط های آسفالتی انجام شد.

۵-۲- آزمایش شیارشدگی

آزمایش شیارشدگی با استفاده از ابزار آزمایش عمق شیار انجام شد (ASTM D-8292). مخلوط متراکم نشده SMA در قالب فولادی ریخته شده و با استفاده از یک غلتک فولادی متراکم می شود. ابعاد دال SMA، طول ۳۰ سانتیمتر، عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۵ سانتیمتر می باشد که متناسب با درصد فضای خالی ۴ درصد ساخته شده است. پس از ساخت نمونه، یک چرخ تک با فشار تایلر استاندارد خودرو به میزان ۰/۷ مگاپاسکال بر سطح دال SMA اعمال شد. چرخ بر روی دال SMA در فاصله ۲۳ سانتیمتری با سرعت ۴۲ دور در دقیقه (۱۶/۱ سانتیمتر در ثانیه) در یک جهت چرخانده شد. طی زمان آزمایش، دما در وضعیت ۶۰ درجه سانتیگراد نگه داشته می شود. در آزمایش شیارشدگی، تغییر شکل مسیر چرخ با زمان متغیر می باشد. تغییر شکل کاذب در مرحله تنظیم اولیه آزمایش رخ می دهد لذا ظرفیت مقاومت تغییر شکل دائمی با اندازه گیری تغییر شکل بین ۴۵ الی ۶۰ دقیقه پس از تغییر شکل ثابت محاسبه شد. سه نمونه یکسان برای هر آزمایش از طرح مخلوط یکسان استفاده شد. پایداری دینامیکی با استفاده از فرمول ۱ محاسبه می شود.

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times N}{d_2 - d_1} \quad (1)$$

پارامترهای ارائه شده در فرمول ۱ شامل، DS پایداری دینامیکی مخلوط آسفالتی، d_1 تغییر شکل بر حسب میلیمتر در t_1 (معمولاً ۴۵ دقیقه)، d_2 تغییر شکل بر حسب میلیمتر در t_2 (معمولاً ۶۰ دقیقه)، N سرعت چرخش چرخ های آزمایش (۴۲ دور در دقیقه) می باشد.

۶-۲- آزمایش خمش سه نقطه ای

دال SMA با استفاده از غلتک فولادی متراکم شده و نمونه های لازم جهت انجام آزمایش در ابعاد عرض ۳۰ میلیمتر، ارتفاع ۳۵ میلیمتر و طول ۲۵۰ میلیمتر بریده می شوند (ASTM D-790). آزمایش خمش سه نقطه ای روی نمونه تیر با طول دهانه ۲۰۰ میلیمتر انجام شد. ماشین بارگذاری^۱ UTM، یک سیستم هیدرولیک مجهز به محفظه کنترل دما، به عنوان یک فریم بارگذاری برای اعمال

^۱ Universal Testing Machine

بار فشاری در نقطه میانی نمونه تیر استفاده شد. دمای آزمایش در ۱۰- درجه سانتیگراد نگه داشته شد. چهار نمونه یکسان برای هر آزمایش از طرح مخلوط یکسان استفاده شد. مقاومت خمشی (بر حسب مگاپاسکال) مطابق با فرمول ۲ محاسبه می شود.

$$R_B = \frac{3LP_B}{2bh^2} \quad (2)$$

پارامترهای ارائه شده در فرمول ۲ شامل، P_B ، بار نهایی در لحظه گسیختگی (نیوتون)، b عرض تیر (۳۰ میلیمتر)، h ارتفاع تیر (۳۵ میلیمتر) و L طول دهانه تیر (۲۰۰ میلیمتر) است. کرنش خمشی نهایی با فرمول ۳ تعیین می شود.

$$\varepsilon_B = \frac{6hd}{L^2} \quad (3)$$

پارامتر d ، انحراف وسط دهانه در گسیختگی نمونه بر حسب میلیمتر است. مدول سختی نهایی خمشی S_B با استفاده از فرمول ۴ محاسبه می شود.

$$S_B = \frac{R_B}{\varepsilon_B} \quad (4)$$

۲-۷- آزمایش حساسیت رطوبتی

تراکم نمونه ها مطابق با تراکم نمونه مارشال و درصد فضای خالی ۷ درصد بر روی نمونه ها اعمال شد (ASTM D-6931). نمونه ها به دو گروه تقسیم می شوند. گروه اول در دمای اتاق و بدون هیچ گونه عمل آوری قرار می گیرند. در گروه دوم عمل آوری به شرح زیر است.

نمونه ها با اشباع کردن بین ۵۵ تا ۸۰ درصد آب، قرار دادن در آب داغ ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت، و سرانجام یک چرخه یخبندان-ذوب (حداقل ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد، ۲۴ ساعت ذوب یخ) تحت شرایط عمل آوری قرار داده می شوند. اشباع کردن بخشی نمونه ها با اعمال خلا نسبی ۲۵۴ تا ۶۶۰ میلیمتر جیوه به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه در حالی که نمونه ها در یک ظرف خلا در داخل آب قرار دارند، انجام می شود. پس از عمل آوری، هر دو گروه نمونه ها برای تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم مورد آزمایش قرار می گیرند. نتیجه آزمایش به صورت نسبت میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های عمل آوری شده (RT_2) به میانگین مقاومت کششی نمونه های عمل آوری نشده (RT_1) گزارش می شود (فرمول ۵). مخلوط هایی که نسبت مقاومت کششی (TSR) آنها کمتر از ۷۵ درصد باشد، حساس به رطوبت شناخته می شوند.

$$TSR = \frac{R_{T2}}{R_{T1}} \times 100 \quad (5)$$

۳- بحث و تحلیل نتایج

۳-۱- پایداری مارشال

برای نشان دادن رابطه بین شاخص های فیزیکی و مکانیکی SMA و درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی، شاخص هایی مانند وزن مخصوص توده ای، درصد فضای خالی مخلوط (VA^1)، درصد فضای خالی در مصالح سنگی (VMA^2)، درصد فضای خالی در مصالح سنگی پر شده با قیر (VFA^3)، پایداری و روانی مارشال، طبق طرح مخلوط به روش مارشال اندازه گیری شد. نتایج آزمایش در جدول ۴ و شکل های ۴ الی ۶ نشان داده شده است.

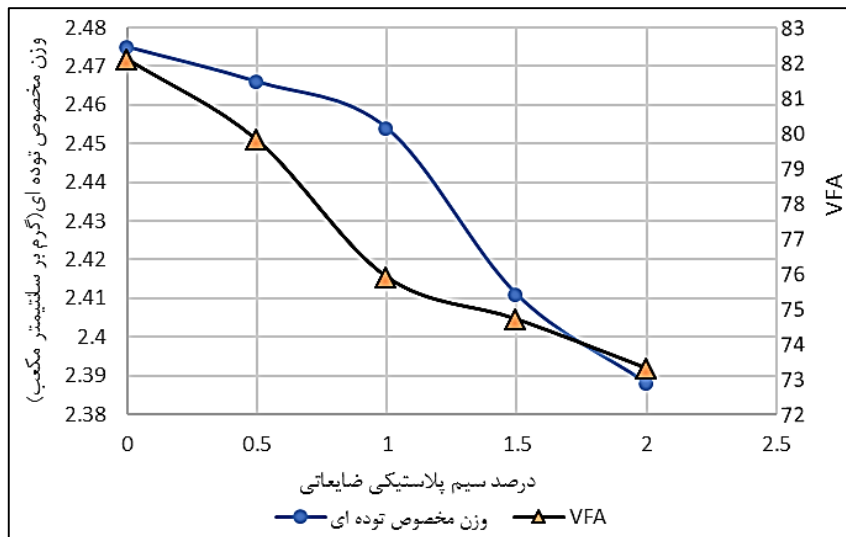
¹ Air Void

² Voids in Mineral Aggregate

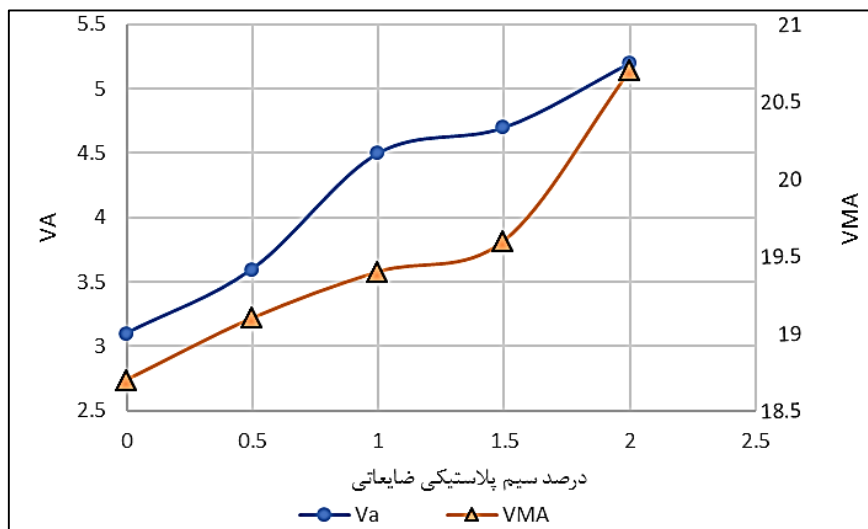
³ Voids Filled with Asphalt

جدول ۴- نتایج شاخص های فیزیکی و مکانیکی آزمایش مارشال

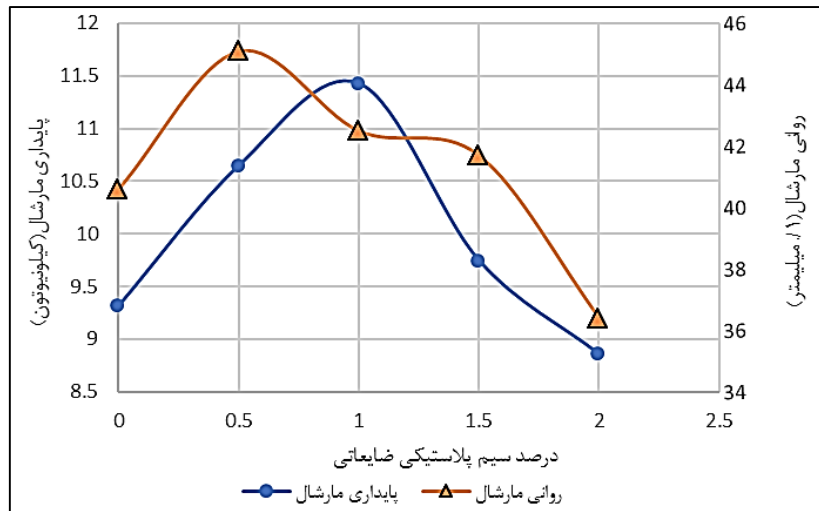
روانی مارشال (۰/۱ میلیمتر)	پایداری مارشال (کیلو نیوتون)	درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر (VFA)	درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA)	درصد فضای خالی مخلوط (VA)	وزن مخصوص توده ای (g/cm ³)	درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی	درصد قیر بهینه
۴۰/۶۰	۹/۳۲	۸۲/۱	۱۸/۷	۳/۱	۲/۴۷۵	۰	
۴۵/۱۰	۱۰/۶۵	۷۹/۸	۱۹/۱	۳/۶	۲/۴۶۶	۰/۵	
۴۲/۵۰	۱۱/۴۳	۷۵/۹	۱۹/۴	۴/۵	۲/۴۵۴	۱	۶
۴۱/۷۰	۹/۷۵	۷۴/۷	۱۹/۶	۴/۷	۲/۴۱۱	۱/۵	
۳۶/۴۰	۸/۸۶	۷۳/۳	۲۰/۷	۵/۲	۲/۳۸۸	۲	



شکل ۴- تاثیر درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی بر وزن مخصوص توده ای و درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر (VFA)



شکل ۵- تاثیر درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی بر درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر (VFA) و درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA)

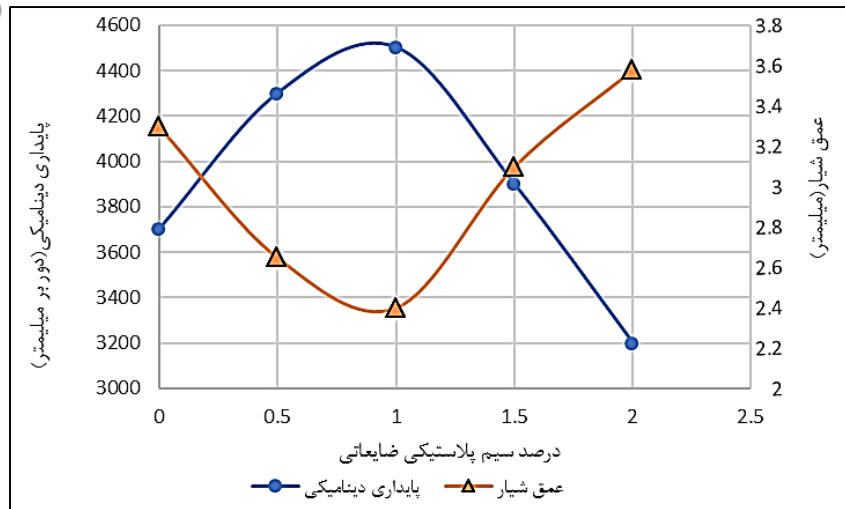


شکل ۶- تاثیر درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی بر پایداری و روانی مارشال

همانطور که در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است، با افزایش درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی، وزن مخصوص توده ای و VFA کاهش می یابد، در حالی که VA و VMA افزایش می یابد. هنگامی که سیم پلاستیکی ضایعاتی مستقیماً به SMA اضافه می شود، تعداد کمی از سنگدانه ها با سیم پلاستیکی ضایعاتی جایگزین می شوند که منجر به کاهش جرم و حجم سنگدانه ها می شود. از آنجایی که وزن مخصوص سیم پلاستیکی ضایعاتی کوچکتر از سنگدانه ها است، وزن مخصوص توده ای SMA حاوی سیم پلاستیکی ضایعاتی کوچکتر از SMA بدون این افزودنی می باشد. به طور مشابه، VA و VMA بزرگتر می شوند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، افزودن سیم پلاستیکی ضایعاتی باعث بهبود پایداری مارشال SMA می شود. با افزایش درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی، پایداری مارشال ابتدا افزایش یافته و سپس به طور چشمگیری کاهش می یابد. وقتی مقدار سیم پلاستیکی ضایعاتی، ۱ درصد باشد، پایداری مارشال SMA به حداکثر می رسد (۱۱/۴۳ کیلو نیوتون)، که در مقایسه با SMA بدون افزودن سیم پلاستیکی ضایعاتی، ۲۳ درصد بهبود می یابد. پس می توان نتیجه گرفت که افزودن مقدار مناسب سیم پلاستیکی ضایعاتی می تواند توانایی مقاومت در برابر تغییر شکل تحت بار عمودی را بهبود بخشد. این پدیده به دلیل سطوح مشترک سنگدانه و قیر تقویت شده با سیم پلاستیکی ضایعاتی است که به طور موثر از لغزش نسبی بین سنگدانه ها جلوگیری می کند و منجر به افزایش ظرفیت باربری سطوح مفصلی می شود.

۳-۲- پایداری دینامیکی و عمق شیار

پایداری دینامیکی و عمق شیار از دیگر شاخص های مهم مورد استفاده برای ارزیابی مقاومت در دمای بالای مخلوط آسفالتی است. میانگین پایداری دینامیکی و عمق شیار SMA با استفاده از آزمایش شیارشدگی محاسبه شده و در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۷ نشان می دهد با افزایش درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی، پایداری دینامیکی SMA ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد، در حالی که عمق شیار روندی معکوس دارد. با افزودن ۱ درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی، پایداری دینامیکی به حداکثر مقدار خود (۴۵۰۳ دور بر میلیمتر) رسیده و در مقایسه با SMA بدون افزودن سیم پلاستیکی ضایعاتی، ۲۰ درصد بهبود می یابد. در این مرحله، عمق شیار به حداقل میزان ۲/۴۳۱ میلیمتر رسیده و ۲۶ درصد در مقایسه با SMA بدون افزودن سیم پلاستیکی ضایعاتی کاهش می یابد.



شکل ۷- تاثیر درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی بر پایداری دینامیکی و عمق شیار

این نتایج نشان می دهد که توانایی مقاومت در برابر تغییر شکل مخلوط آسفالتی با افزودن سیم پلاستیکی ضایعاتی افزایش می یابد. دو دلیل به این امر نسبت داده می شود: (۱) سیم پلاستیکی ضایعاتی می تواند قیرهای چسبناک را تثبیت کرده و روی سطح خود نگه دارد تا در برابر جریان قیرها در دمای بالا مقاومت کند [۱۳]. (۲) سیم پلاستیکی ضایعاتی باعث می شود که سنگدانه ها در ماستیک قیر حرکت نکنند. همچنین این مواد می تواند ساختار اسکلتی مخلوط را برای مقاومت در برابر نیروی برشی تقویت کرده و سیالیت را کاهش دهد [۱۴].

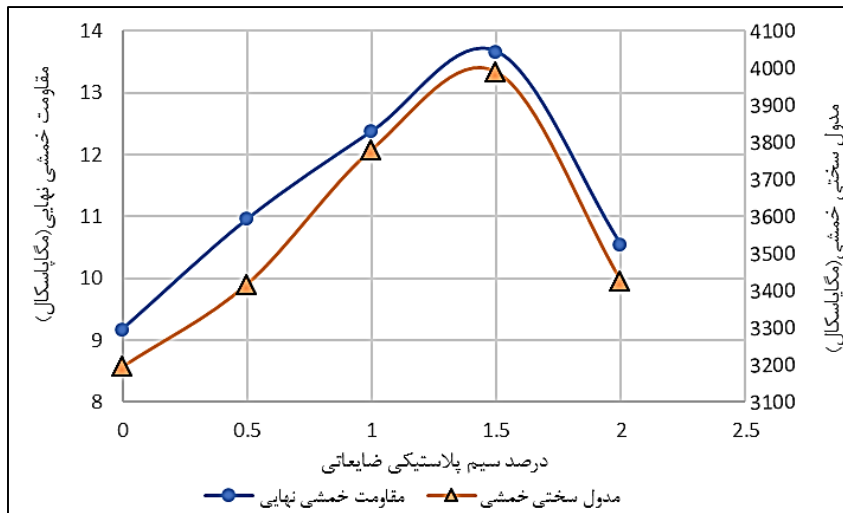
۳-۳- مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین

از مقاومت خمشی نهایی و مدول سختی خمشی برای ارزیابی مقاومت ترک خوردگی آسفالت در دمای پایین استفاده شد. میانگین مقاومت خمشی نهایی و مدول سختی خمشی SMA از طریق آزمون خمش سه نقطه ای محاسبه و نتایج در جدول ۵ و شکل ۸ نشان داده شده است.

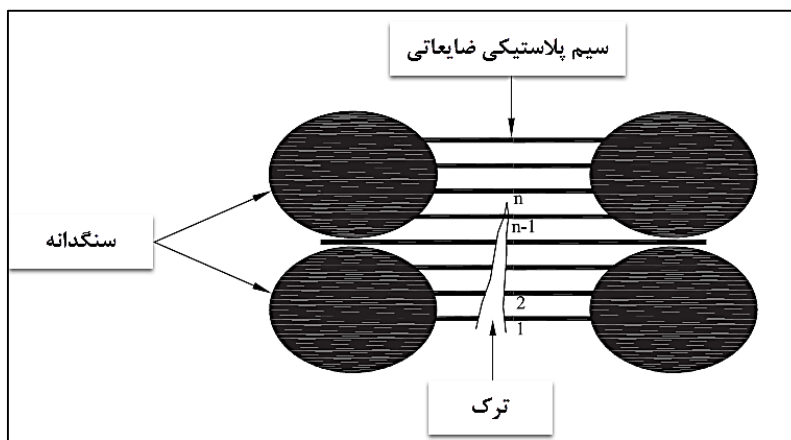
جدول ۵- نتایج آزمایش خمش سه نقطه ای در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد

درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی	بار نهایی (کیلو نیوتون)	تغییر شکل میانه (میلیمتر)	مقاومت خمشی نهایی (مگاپاسکال)	مدول سختی خمشی (مگاپاسکال)	کرش خمشی نهایی (میکرو استرین)
۰	۱/۱۲۴	۰/۵۴۷	۹/۱۸	۳۱۹۵/۱	۲۸۷۲
۰/۵	۱/۳۴۳	۰/۶۱۱	۱۰/۹۶	۳۴۱۷/۷	۳۲۰۸
۱	۱/۵۱۷	۰/۶۲۴	۱۲/۳۸	۳۷۸۰/۱	۳۲۷۶
۱/۵	۱/۶۷۵	۰/۶۵۳	۱۳/۶۷	۳۹۸۸/۵	۳۴۲۸
۲	۱/۲۹۱	۰/۵۸۶	۱۰/۵۴	۳۴۲۵/۶	۳۰۷۷

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزایش درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی، مقاومت خمشی نهایی و مدول سختی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. هنگامی که درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی ۱/۵ درصد باشد، در مقایسه با SMA فاقد این افزودنی، مقاومت خمشی نهایی ۴۹ درصد و مدول سختی خمشی ۲۵ درصد بهبود می یابد که نشان می دهد مقاومت ترک خوردگی SMA در حضور این افزودنی بهبود یافته است. علت تاخیر در ایجاد ترک در حضور سیم پلاستیکی ضایعاتی را می توان توسط شکل ۹ نشان داد.



شکل ۸- تاثیر درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی بر مقاومت خمشی نهایی و مدول سختی خمشی



شکل ۹- مقاومت ترک خوردگی سیم پلاستیکی ضایعاتی

هنگامی که نوک ترک با اولین سیم پلاستیکی ضایعاتی برخورد می کند، یک بازشدگی ترک در SMA ایجاد می شود. با توجه به اینکه انرژی انتشار ترک بیشتر از انرژی شکست سیم پلاستیکی ضایعاتی است، اولین سیم پلاستیکی شکسته شده و ترک همچنان به گسترش خود ادامه می دهد. این در حالی است که انرژی انتشار ترک کاهش می یابد [۱۵-۱۶]. هنگامی که نوک ترک با سیم پلاستیکی برخورد می کند، انرژی انتشار ترک دوباره کاهش می یابد. به همین ترتیب، انتشار ترک پایان نمی یابد تا زمانی که انرژی انتشار تخلیه شود.

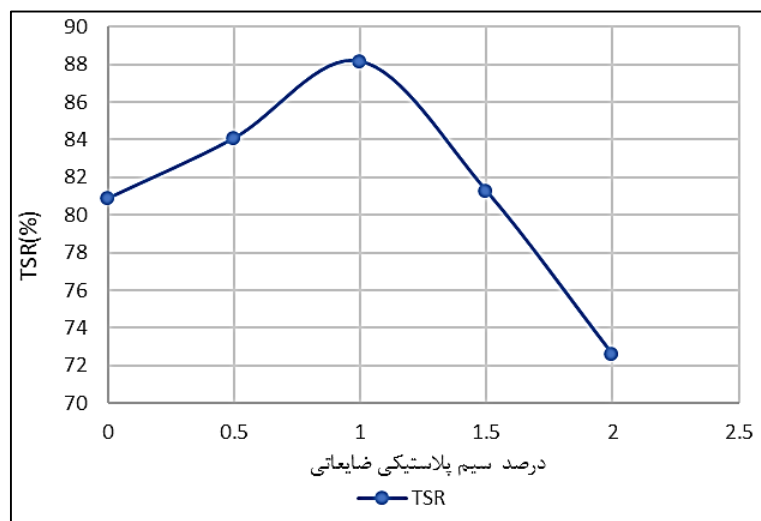
۴-۳- حساسیت رطوبتی

نسبت مقاومت کششی TSR برای ارزیابی حساسیت رطوبتی SMA استفاده می شود. نتایج آزمایش و تحلیل حساسیت رطوبتی در جدول ۶ و شکل ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۶- تاثیر درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی بر مقاومت کششی غیرمستقیم در دو حالت عمل آوری شده و عمل آوری نشده و مقدار پارامتر حساسیت

رطوبتی TSR

TSR (%)	گروه ۲ (عمل آوری شده)			گروه ۱ (عمل آوری نشده)			درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی
	مقاومت کششی RT2 (مگاپاسکال)	ارتفاع نمونه (میلیمتر)	بار پیک (کیلونیوتون)	مقاومت کششی RT1 (مگاپاسکال)	ارتفاع نمونه (میلیمتر)	بار پیک (کیلونیوتون)	
۸۰/۹	۰/۷۶	۶۲/۶	۷/۵۸	۰/۹۴	۶۲/۵	۹/۳۶	۰
۸۴/۱	۰/۸۳	۶۴/۱	۸/۴۶	۰/۹۹	۶۴/۵	۱۰/۱۲	۰/۵
۸۸/۲	۰/۹۵	۶۴/۲	۹/۷۵	۱/۰۸	۶۴/۲	۱۱/۰۶	۱
۸۱/۳	۰/۷۵	۶۴/۸	۷/۷۸	۰/۹۳	۶۴/۶	۹/۵۴	۱/۵
۷۲/۶	۰/۶۱	۶۴/۶	۶/۲۷	۰/۸۴	۶۴/۸	۸/۶۶	۲



شکل ۱۰- تاثیر درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی بر پارامتر حساسیت رطوبتی TSR

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، بدیهی است که نسبت مقاومت کششی TSR با افزایش درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی، ابتدا افزایش و سپس کاهش یابد. هنگامی که مقدار سیم پلاستیکی ضایعاتی ۲ درصد باشد، نسبت مقاومت کششی TSR، ۹ درصد بهبود می یابد که نشان می دهد این افزودنی، حساسیت رطوبتی مخلوط SMA را بهبود بخشیده است. با افزودن سیم پلاستیکی ضایعاتی، ساختار SMA تقویت شده و مانع از بین رفتن ساختار توسط آب می شود. اما با افزایش درصد سیم پلاستیکی ضایعاتی، فضای خالی مخلوط به اندازه ای بزرگ می شود که توسط مقدار زیادی آب اشباع شده و منجر به فشار آب منفذی بزرگتر می شود. بنابراین آسیب رطوبتی را تشدید کرده و مقاومت کششی SMA را تضعیف می نماید. علاوه بر این؛ الیاف اضافی نیز به عنوان یک روان کننده عمل می کند و اثر قفل و بست سنگدانه را قطع می کند.

۴- نتیجه گیری

افزودن مستقیم سیم پلاستیکی ضایعاتی به مخلوط آسفالتی یک راه موثر برای بازیافت این افزودنی در مصالح ساخت روسازی می باشد. این تحقیق به بررسی رفتار سیم پلاستیکی ضایعاتی بر روی مخلوط های SMA با استفاده از روش طراحی مارشال می پردازد. نمونه ها با استفاده از روش های رایج آزمایشگاهی از قبیل آزمایش پایداری مارشال، شیارشدگی، خمش سه نقطه ای و حساسیت رطوبتی مورد ارزیابی قرار گرفتند. عملکرد SMA تقویت شده با سیم پلاستیکی ضایعاتی مورد ارزیابی و نتایج به شرح ذیل حاصل گردید:

(۱) افزودن سیم پلاستیکی ضایعاتی می تواند پایداری و مقاومت در دمای بالای SMA را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد، مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین را تقویت کرده و حساسیت رطوبتی را افزایش دهد. درصد مطلوب سیم پلاستیکی ضایعاتی در

SMA بین ۱ تا ۱/۵ درصد است. مکانیزم تقویت کنندگی به دلیل تاخیر در انتشار ترک هنگام حضور سیم پلاستیکی ضایعاتی می باشد. این افزودنی ها باعث کاهش سرعت آزاد سازی انرژی و جلوگیری از انتشار ترک می شود.

(۲) افزودن مستقیم سیم پلاستیکی ضایعاتی به مخلوط آسفالتی یک روش ساده و کارآمد جهت بازیافت این افزودنی به عنوان ماده تقویت کننده در مخلوط آسفالتی است و باعث می شود مسیر جدیدی را برای بازیافت این افزودنی هموار نماید.

۵- مراجع

1. Aline Colares do Vale, 2013. A study of behavior of natural fiber in stone matrix asphalt mixtures using two design methods. *J Mater. Civil Eng.* 9, 59–70.
2. Casey, D. et al., 2008. Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resour. Conserv. Recy.* 52, 1167–1174.
3. Xue, Q. et al., 2013. Evaluation of pavement straw composite fiber on SMA pavement performances. *Constr. Build. Mater.* 41, 834–843.
4. Oda, S. et al., 2012. Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 26, 13–20.
5. Paredes, M.M. et al., 2016. Rubber modified binders as an alternative to cellulose fiber – SBS polymers in Stone Matrix Asphalt. *Constr. Build. Mater.* 121, 727–732.
6. Wu, J.R., Ma, Q.Y., Dong, X.H., 2016. Test and analysis on asphalt content for fatigue performance of polyester fiber asphalt concrete. *Mater. Sci. Forum.* 852, 1488–1492.
7. Guo, D.D., 2013. Impact of rheological properties of fiber asphalt mortar on mixture road performance. *Adv. Mater. Res.* 7342287–2291.
8. Zhang, H., Du, X.H., Hao, P.W., Liu, L., 2014. Grey relational analysis of fiber asphalt mixture based on pavement performance and economic benefits. *Appl. Mech. Mater.* 587, 1058–1061.
9. Gao, C.M., Zhang, Q., Zhang, H.Z., 2014. Research on basalt fiber asphalt concrete's water stability. *Appl. Mech. Mater.* 505, 117–122.
10. Liu, L.X., 2006. *The Viscoelastic Mechanics of Asphalt Mixture and its Material Science Principle*. China Communications Press, BeiJing, China (In Chinese).
11. Ogunbiyi, A.W. et al., 2016. Smelting of waste nylon and low-density plastics (ldps) in a fluidized bed system. *Procedia Environ. Sci.* 35, 491–497.
12. Wang, W. et al., 2017. Hydrolysis of waste monomer casting nylon catalyzed by solid acids. *Polym. Degrad. Stabil.* 136, 112–120.
13. Chen, H.X., Xu, Q.W., 2010. Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder. *Fuel* 89, 1616–1622.
14. Tapkin, S., 2008. The effect of polypropylene fibers on asphalt performance. *Build. Environ.* 43, 1065–1071.
15. Klimkeit, B. et al., 2011. Fatigue damage mechanisms in short fiber reinforced in PBT+PET GF30. *Mat. Sci. Eng. A.* 528, 1577–1588.
16. Yin, J.M., Wang, S.Y., Du, Y.F., 2015. Intensifying the road performance of asphalt concrete by matching the size distribution of short-thin straw pieces and aggregate framework. *J. Mater. Civil Eng.* 27, 1–9.