

بررسی تأثیر انواع الیاف تثبیت‌کننده بر خواص خستگی مخلوطهای آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای

ابوالفضل محمدزاده مقدم*، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

یونس نیازی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

E-mail: mohammadzadeh.abolfazl@gmail.com

دریافت: ۸۹/۰۸/۱۲ - پذیرش: ۸۹/۱۰/۲۶

چکیده

در اوایل دهه ۱۹۷۰، صنعت راه اروپا نیاز به روسازیهای مقاوم در مقابل شیارافتادگی سطح راه، ساییدگی و خرابیهای گوناگونی که به وسیله بارهای ترافیکی سنگین و لاستیکهای یخ‌شکن ایجاد می‌شد را احساس کرد. برای برطرف کردن این نیاز متولیان روسازی راهها، مخلوطهای آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) را ابداع کردند. بالا بودن فضای خالی بین مصالح درشت‌دانه و مصرف نسبتاً زیاد قیر و اندود ضخیم قیری مصالح سنگی درشت‌دانه در مخلوطهای SMA، عاملی برای ریزش و بیرون زدن قیر از این مخلوط در هنگام ذخیره‌سازی، حمل و پخش آن است. الیاف به عنوان نوعی از تثبیت‌کننده‌ها در مخلوطهای SMA برای جلوگیری از ریزش قیر و مسلح‌سازی بکار می‌روند. انواع معمول الیاف مورد استفاده در این مخلوطها الیاف سلولزی و معدنی هستند. هدف از این تحقیق بررسی امکان استفاده از الیاف مصنوعی شامل اکریلیک، پلی‌استر، پلی‌پروپیلن و الیاف سلولزی کف و ویسکوز تولید بومی و یا حاصل از پسماند کارخانه‌های فرش، موکت و لاستیک موجود در کشور و نیز بررسی اثر کاربرد این الیاف بر خواص خستگی و ریزش قیر مخلوطهای SMA است. در این تحقیق میزان درصد قیر بهینه، ریزش قیر، شاخص سختی مارشال، سختی خمشی و عمر خستگی مخلوطهای SMA حاوی این الیاف ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج آزمایش نشان داد که مخلوطهای SMA حاوی الیاف سلولزی دارای میزان قیر بهینه بیشتری نسبت به مخلوطهای حاوی الیاف مصنوعی هستند. مخلوطهای SMA حاوی الیاف مصنوعی ریزش قیر بیشتری نسبت به مخلوطهای حاوی الیاف سلولزی از خود نشان دادند. مخلوطهای SMA حاوی الیاف اکریلیک دارای بیشترین مقدار شاخص سختی مارشال بودند. همچنین با افزایش سطح کرنش اعمالی سختی خمشی مخلوطها کاهش می‌یابد که این امر در سطح کرنشهای بالاتر محسوس‌تر است. وجود الیاف مختلف نشان داد که نوع الیاف تأثیر قابل توجهی بر عمر خستگی مخلوطها بویژه در سطح کرنشهای پایین‌تر دارد.

واژه‌های کلیدی: مخلوطهای SMA، الیاف، ریزش قیر، شاخص سختی مارشال، سختی خمشی، عمر خستگی

۱. مقدمه

رویه‌های آسفالتی گرم با دانه‌بندی توپر در راهها با آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین به ویژه در مناطق گرمسیری، گاهی خرابیهایی نظیر ترکهای پوست سوسماری، شیارشدگی مسیر چرخ و روزدگی قیر را به دنبال دارد. این خرابیها مستلزم اجرای عملیات تعمیر و بهسازی در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه پس از بهره‌برداری است که هزینه زیادی را در بر خواهد داشت.

افزایش عمر رویه‌های آسفالتی، اجرای رویه آسفالتی مقاوم در برابر آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین و تغییرات دما و فراهم کردن رویه‌ای غیرلغزنده، همراه با تأمین جریان مطمئن آمد و شد، مورد توجه دست‌اندرکاران صنعت راهسازی است. از طرف دیگر ساخت رویه‌های آسفالتی مقاوم در برابر تغییر شکل برای جاده‌ها با آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین حائز اهمیت است. اجرای

مخلوطهای آسفالتی، افزایش مقاومت کششی، عمر خستگی و نیز برای تثبیت قیر در این مخلوطها استفاده می‌شود. الیاف معدنی و الیاف سلولزی، متعارف‌ترین نوع الیاف مورد استفاده در مخلوطهای SMA است و استفاده گسترده تری دارد و برخی از این الیاف بسته به منبع و روش تولیدشان نسبتاً گران هستند [Putman and Amirkhani, 2004].

روسازیها تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرند که بر عمر آنها تأثیر دارد. معایب و نواقص گوناگونی در قسمتهای مختلف راه به وجود می‌آید که به علت تفاوت نوع خاک، حجم ترافیک، نوع ترافیک و میزان بارندگی مناطق مختلفی است که راه از آن عبور می‌کند و در صورت عدم بازرسی و ارزیابی بموقع و مرمت نکردن آنها، باعث خرابی سریع راه و از بین رفتن سرمایه‌های عظیم مالی و ناراحتی کاربران راهها خواهد شد [طباطبایی، ۱۳۸۲]. خرابی در روسازیهای انعطاف‌پذیر اغلب در اثر دو عامل ترک خوردگی یا شیارافتادگی روی می‌دهد. عامل شیارافتادگی عموماً در اثر عبور بارهای بیش از توان روسازی است، اما ترکها معمولاً در اثر عبور زیاد وسایل نقلیه و انقباض و انبساط روسازی در اثر تغییرات دمایی حاصل می‌شوند.

از میان این دو مکانیزم، ترکهای مربوط به خستگی به تعداد زیاد در رویه‌های آسفالتی دیده می‌شوند. خستگی عبارت است از پدیده شکست بر اثر تکرار بار، تغییر و تناوب دینامیکی بار که ممکن است حتی کمتر از مقاومت نهایی استاتیکی آسفالت باشد. مقاومت در برابر خستگی یک مخلوط آسفالتی، توانمندی مخلوط در مقابل بارهای خمشی تکراری بدون شکست است [خدادادی، فخری و امیری حسینی، ۱۳۸۴]. خراب شدن رویه‌های آسفالتی با توجه به خستگیهای ناشی از تکرار بارگذاری و وجود شرایط آب و هوایی مختلف متغیر است. در اثر تکرار بارگذاری با مرور زمان، سطح رویه به علت ترک خوردن، خرد شدن و تغییر شکل ناهموارتر می‌شود. بررسیهای انجام شده بر روی روسازیها نشان می‌دهد که اگرچه خرابی روسازیها با عمر آنها متناسب است، ولی این رابطه خطی نیست به نحوی که در اوایل عمر روسازی شدت خرابیها کم بوده و با گذشت زمان بر شدت آنها افزوده می‌شود [طباطبایی، ۱۳۸۲].

فاز خستگی، مرحله نهایی عمر روسازی، پس از سپری شدن فازهای تحکیم و کشسانی است. مرحله تحکیم اولین فاز از عمر

اکنون در برخی از کشورهای اروپایی، ایالات متحده آمریکا و کانادا برای تأمین برخی از انتظارات خاص روسازی، نظیر مقاومت در مقابل شیارافتادگی جای چرخ، جلوگیری از گسترش ترکهای انعکاسی و تحمل بارمحوری سنگین از مخلوطهای آسفالتی با استخوانبندی سنگدانه‌ای (SMA) استفاده شده است [نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹]. SMA یک مخلوط با دانه‌بندی میان‌تهی، شامل مقدار زیادی مصالح درشت‌دانه برای بیشینه کردن تماس سنگدانه به سنگدانه^۱ و ایجاد یک شبکه کارا برای توزیع بار است که ذرات مصالح درشت‌دانه به وسیله یک ملات غنی از فیلر، الیاف و یا پلیمر با لایه نسبتاً ضخیم قیر به یکدیگر متصل شده‌اند [Georgia Department of Transportation, 2002]. مخلوطهای SMA به وسیله ساختار سنگدانه‌ای آن از دیگر مخلوطها متمایز می‌شود.

این مخلوط درصد بالایی از مصالح درشت‌دانه را که با یکدیگر تماس دارند در خود جای می‌دهد. این استخوانبندی سنگدانه‌ای در برابر بارهای سنگین توسط پخش و انتقال آنها به لایه‌های زیرین روسازی استقامت می‌کند، و اگر لایه‌های زیرین به اندازه کافی قوی باشند، مخلوطهای SMA در برابر بارهای سنگین تر به طور مؤثرتری مقاومت خواهد کرد استخوانبندی درشت‌دانه با ایجاد تماس سنگدانه به سنگدانه به مخلوط استحکام و مقاومت می‌بخشد و مقدار ملات قیری زیاد آن باعث افزایش دوام مخلوط می‌شود [Asi, 2006, Pierce, 2000, Brown and Manglokar, 1993]. از دیگر ویژگیهای این مخلوطها، جلوگیری از لغزنده بودن سطح راه و عدم ایجاد ترکهای ناشی از خستگی است [Asi, 2006]. مخلوطهای SMA بکار رفته در رویه، ترکهای انعکاسی کمتری را که ناشی از ترک خوردگی رویه‌های زیرین روسازی است به علت انعطاف‌پذیری ملات قیری آن از خود نشان می‌دهد [Troutbeck and Kennedy, 2005].

به علت دانه‌بندی میان‌تهی و مقدار فیلر زیاد، میزان قیر این مخلوطها در مقایسه با آسفالتهای متعارف بیشتر است [State of Ohio Department of Transportation, 1998] به همین دلیل ریزش قیر - جدا شدن ملات قیری از مخلوط هنگام حمل در مخلوطهای SMA را باید بزرگ‌ترین نقطه ضعف این گونه مخلوطها دانست [Asi, 2006]. الیاف به منظور مسلح‌سازی این

[Tangella (et al.), 1990]. مخلوطهای آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای به دلیل مصرف قیر زیاد خاصیت انعطاف‌پذیری دارند، علاوه بر این استفاده از الیاف، مخلوط را مسلح کرده و خواص آن را بهبود می‌بخشد، از جمله بالا بردن مقاومت کششی و افزایش تغییر شکل نهایی آن می‌شود. مقایسه نسبی سختی نمونه‌های مخلوط بتن آسفالتی و مخلوطهای آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای ساخته شده در آزمایشگاه نشان می‌دهد که سختی نمونه مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای کمتر از سختی نمونه بتن آسفالتی است، بنابراین قابلیت تحمل تغییر نسبی کششی بیشتری در برابر تعداد دفعات بارگذاری و باربرداری تا شکست در اثر خستگی خواهد داشت. در تحقیق کومار و همکارانش در سال ۲۰۰۵ دریافت شد که با افزایش سطح کرنش، تعداد چرخه‌های بارگذاری تا رسیدن به مرحله گسیختگی کاهش می‌یابد. از نظر مقایسه این نوع مخلوط با بتن آسفالتی مخلوطهای SMA دارای عمر خستگی بسیار بزرگ‌تری نسبت به مخلوطهای آسفالتی متعارف هستند [Kumar, Chandra, Bose, 2005]. اما پارامتر دیگری که گاهی اوقات برای سنجش مخلوطهای آسفالتی بکار می‌رود، شاخص سختی مارشال است که از تقسیم پایداری مارشال به روانی متناظر آن محاسبه می‌شود. هرچه این نسبت بیشتر باشد مخلوط دارای سختی بیشتری بوده و می‌تواند دارای مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل دائم باشد. تحقیقات [Brown, Kandhal and Zahang, 2001] نشان داده است، مخلوطهای آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای مقاومت خوبی در برابر شیار افتادگی و تغییر شکل دائمی از خود نشان می‌دهند. با توجه به آنچه گفته شد تأثیر نوع تثبیت کننده بر خواص خستگی مخلوطهای SMA هنوز به طور کامل شناخته شده نیست و همچنین خلأ یک تحقیق در این زمینه در سطح وسیع‌تر احساس می‌شود، از طرف دیگر در بسیاری از صنایع کشور الیاف به صورت دست نخورده تولید و یا به صورت پسماند کارخانه‌های فرش و لاستیک در دسترس‌اند. اما الیاف پسماند کارخانه‌های فرش و لاستیک یک مشکل عمده از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی برای کارخانه‌های تولید کننده‌اند که باید محلهایی برای انبار و ذخیره‌سازی آنها در نظر گرفته شود. اگر چه بخش اندکی از این الیاف به طور محدود برای استفاده‌های خاص مصرف

مفید روسازی است که در طی آن لایه‌های مختلف روسازی از طریق عبور بارهای گوناگون ترافیکی تحکیم می‌یابد. مدت زمان اتمام این فاز نسبتاً کوتاه بوده و میزان تحکیم به مقدار تراکم به دست آمده برای لایه‌های گوناگون در طی عملیات اجرا و ساخت وابسته است. فاز کشسانی، بلافاصله بعد از فاز تحکیم آغاز می‌شود و در طول این فاز به علت عبور وسایل نقلیه تغییر شکلهای الاستیک یا کشسان در سازه روسازی ایجاد می‌شود و باعث پدید آمدن یک تغییر شکل مشخص و گذرا در روسازی می‌شود، طول این فاز تأثیر ویژه‌ای در طول عمر مفید روسازی دارد [نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹، Asphalt Research Program Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley, 1994]. اگر نقطه‌ای مشخص از روسازی آسفالتی در نظر گرفته شود، هنگامی که چرخ وسیله نقلیه در این نقطه قرار می‌گیرد، تغییرشکلی در لایه بتن آسفالتی ایجاد می‌شود که باعث ایجاد کرنش (تنش) کششی در لایه می‌شود. با عبور وسیله نقلیه از این نقطه، لایه بتن آسفالتی تمایل بازگشت به موقعیت قبلی را دارد. با تکرار این عمل در صورتی که تنش یا کرنش کششی در لایه آسفالتی از تنش یا کرنش کششی قابل تحمل لایه آسفالتی تجاوز کند، ترکهایی در لایه آسفالتی ایجاد می‌شود که به مرور زمان، این ترکها در لایه آسفالتی حرکت و در سطح لایه ظاهر می‌شوند. از به هم پیوستن این ترکها، ترکهای موسوم به ترکهای خستگی به وجود می‌آیند. ترکهای ناشی از خستگی در روسازیهما عموماً در اثر تغییرات شرایط محیطی به ویژه تغییرات دمایی و تکرار بار وسایل نقلیه به وجود می‌آیند، این ترکها را می‌توان به سه گروه دسته‌بندی کرد: ترکهای طولی، ترکهای عرضی و ترکهای پوست سوسماری. گسترش این ترکها در سه مرحله انجام می‌شود: مرحله اول، مرحله آغاز ترک است که ترکهای ریز در اثر تمرکز تنش در رویه ایجاد می‌شوند. در مرحله دوم، ترکهای ریزی که در مرحله اول ایجاد شده‌اند شروع به گسترش می‌کنند و ترکهای بزرگ‌تر تشکیل می‌شوند. مرحله سوم مرحله شکست است [عامری و منصوریان، ۱۳۸۶].

عامل مهم دیگر در میزان عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی دوره استراحت است و معلوم شده است که دوره استراحت ۰/۳ ثانیه بین بارگذاریها، عمر خستگی را می‌تواند تا ۲۵ برابر افزایش دهد

تعیین خصوصیات مصالح سنگی جهت استفاده در تهیه مخلوطهای SMA از آن جهت مهم است که مواردی چون درصد شکستگی، سختی، جنس مصالح و تیزگوشگی بر روی خواص مخلوط اثر می‌گذارد و باید با مقادیر آیین‌نامه‌ای ارائه شده برای مخلوطهای SMA مطابقت داشته باشد.

مصالح مورد استفاده در این تحقیق عمدتاً سیلیسی است که در ساخت آسفالت گرم در کارخانه آسفالت شهرداری مشهد بکار برده می‌شوند.

در این تحقیق ویژگیهای ارائه شده توسط کار گروه فنی FHWA برای مخلوطهای SMA، برای تعیین دانه‌بندی، انتخاب مصالح سنگی و طرح مخلوط مبنا قرار گرفت (Brown et al., 1997). مشخصات مصالح سنگی و دانه‌بندی انتخابی در جداول (۲) و (۳) ارائه شده است.

در این تحقیق به منظور حصول اطمینان از تماس سنگدانه به سنگدانه از روش تعیین فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه و مقایسه آن با فضای خالی مصالح سنگی درشت‌دانه نمونه آسفالتی استفاده شد. شرط ایجاد تماس سنگدانه به سنگدانه کوچک‌تر بودن فضای خالی مصالح سنگی درشت‌دانه نمونه SMA از فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه است. به منظور تعیین فضای خالی بین مصالح سنگی درشت دانه، از تراکم به روش خشک میل خورده^۲ بر طبق استاندارد AASHTO-T19 استفاده شد [Brown and Haddock, 1997]. نتیجه این آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است.

می‌شوند ولی مشکل همچنان وجود دارد. اگر بتوان از این الیاف برای مقاصد دیگر استفاده کرد، می‌توان علاوه بر کاهش مشکل انبار و ذخیره‌سازی آنها، از هزینه تولید الیاف کاست.

یکی از زمینه‌های استفاده از این الیاف به منظور کاهش مشکلات و هزینه‌های یاد شده، کاربرد در مخلوطهای آسفالتی گرم و به‌خصوص در مخلوطهای SMA است. الیاف مصنوعی اکریلیک، پلی‌استر، پلی‌پروپیلن و الیاف سلولزی کنف و ویسکوز در ایران به صورت دست نخورده و یا پسماند کارخانه‌های تولید فرش و لاستیک وجود دارد که از میان آنها الیاف اکریلیک، پلی‌استر و پلی‌پروپیلن به صورت بومی برای کاربردهای خاص تولید می‌شوند و برخی دیگر وارداتی هستند. از این رو در این تحقیق بر آن شدیم که به بررسی امکان استفاده از این الیاف بومی به‌عنوان تثبیت کننده در مخلوطهای SMA، ارزیابی اثر آنها بر رفتار خستگی مخلوطهای فوق، و ارائه یک مدل آزمایشگاهی ساده برای پیش‌بینی عمر خستگی این مخلوطها بپردازیم تا نتایج آن بتواند پتانسیل کاربرد این الیاف را در مخلوطهای SMA بسنجد و برای کاربردهای آینده راهگشا باشد.

۲. مشخصات مصالح

در این تحقیق از قیر با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ استفاده شد که بیشتر در نواحی با آب و هوای گرم و معتدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این قیر از محل پالایشگاه اصفهان بارگیری شده و پس از گرم کردن در بشکه‌های مخصوص ذخیره شده بود. مشخصات قیر این تحقیق در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

نتایج	مشخصات مصالح سنگی
۲۹/۳	درصد افت سایشی مصالح درشت‌دانه (%)
۱۰۰	شکستگی مصالح سنگی درشت‌دانه یک جبهه (%)
۹۱	شکستگی مصالح سنگی درشت‌دانه دو جبهه (%)
۱/۳۹	جذب آب (%)
۲/۶۸۴	وزن مخصوص واقعی
۲/۷۸۳	وزن مخصوص ظاهری
/	فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه در تراکم به روش خشک میل خورده (%)

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر مصرفی

نتایج	شماره استاندارد	مشخصات فیزیکی
۶۷	ASTM-D5	درجه نفوذ در دمای ۲۵°C (دهم میلی‌متر)
۴۹	ASTM-D36	نقطه نرمی (°C)
۳۵۰	ASTM-D92	نقطه آتش (°C)
۲۹۶		نقطه اشتعال (°C)
۳۲۸	ASTM-D2170	کندروانی جنبشی در دمای ۱۳۵°C (سانتی استوکس)
۱/۰۱۳	ASTM-D70	وزن مخصوص

جدول ۴. مشخصات فیزیکی الیاف

مشخصات فیزیکی نوع الیاف	وزن مخصوص	دینر *	حداکثر طول الیاف (mm)	نقطه نرمی (°C)	نقطه ذوب (°C)	جذب آب (%)
پلی- پروپیلن	۰/۹۱	۱۵	۶	۱۱۰	۱۶۰	۰
کنف	۱/۵	۱۵	۶	-	۲۲۰	۱۲
اکریلیک	۱/۱۶	۱۴/۳	۶	۲۳۵	-	۱
پلی استر	۱/۳۹	۱/۸	۶	۲۳۰	۲۵۵	۰/۴
ویسکوز	۱/۵۱	۱/۸	۶	۱۸۵	-	۱۳

*جرم بر حسب گرم در طول ۹۰۰۰ متر از الیاف که یک سیستم جهانی برای توصیف دانسته خطی، جرم واحد طول الیاف (نمره متر یک نخ) است.

الیاف ویسکوز، پلی استر نیز به صورت دست نخورده از کارخانه نخریسی رضوی تأمین شد. مقدار الیاف مورد استفاده در مخلوطهای SMA برای الیاف سلولزی بین ۰/۲۵ تا ۰/۴۵ درصد وزنی مصالح سنگی یا حدود ۰/۳ درصد وزن مخلوط آسفالتی و حدود ۰/۲۵ تا ۰/۵ درصد وزن مصالح سنگی و یا حدود ۰/۴ درصد نسبت به کل وزن مخلوط برای الیاف معدنی است [Brown (et al.), 1997, Pierce, 2000, Asi, 2006,] و نشریه ۲۰۶] و برای الیاف مصنوعی مقدار خاصی ارائه نشده است. ولی در تحقیقی دیگر [Putman and Amirkhanian, 2004]. بر روی مخلوطهای SMA حاوی الیاف پلی استر مقدار ۰/۳ از این الیاف استفاده شد. قابل ذکر است که پارامتر متغیر در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر شامل نوع الیاف بوده و میزان این افزودنی برای تمام الیاف یاد شده به منظور مقایسه مناسب به تبعیت از سوابق تحقیق، ۰/۳ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی در نظر گرفته شده است.

۳. روش انجام آزمایشها و طرح اختلاط

در این تحقیق طرح مارشال برای تعیین میزان قیر بهینه و برای محاسبه شاخص سختی مارشال مخلوطهای حاوی الیاف مختلف صورت گرفت، همچنین بر اساس استاندارد AASHTO-T305 آزمایش ریزش قیر جهت سنجش پتانسیل ریزش قیر مخلوطهای SMA مختلف و نیز عمر خستگی بر طبق استاندارد SHRP

پنج نوع الیاف شامل، ویسکوز^۳ و کنف^۴ که از گروه الیاف سلولزی هستند و اکریلیک^۵، پلی استر^۶ و پلی پروپیلن^۷ که از الیاف مصنوعی هستند، تهیه شد. در مورد الیاف اکریلیک، کنف و پلی پروپیلن چون از پسماندهای کارخانههای فرش مشهد پیمان موکت استفاده شد که قیمت آنها بسیار ارزان بود. نمائی از این الیاف در شکل (۱) مشاهده می شود و نیز مشخصات فیزیکی این الیاف در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات دانه بندی بکاررفته در طرح مخلوط SMA

[Brown (et al.), 1997]

اندازه الک (میلی متر)	بازه آیین نامه ای (درصد عبوری)	دانه بندی بکاررفته (درصد عبوری)
۱۹	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۸۵-۹۵	۹۰
۹/۵	حداکثر ۷۵	۶۲
۴/۷۵	۲۸-۲۰	۲۴
۲/۳۶	۲۴-۱۶	۲۰
۰/۶	۱۶-۱۲	۱۴
۰/۳	۱۵-۱۲	۱۳
۰/۰۷۵	۱۰-۸	۹



شکل ۱. الیاف مختلف مورد استفاده

آزمایش طبق استاندارد AASHTO-T305 بر اساس اندازه‌گیری میزان تجمع ریزش ملات قیری در طی یک ساعت توسط سبد مخصوص به ابعاد $6/35 \times 6/35$ میلی‌متر برحسب وزن کل مخلوط در دمای 175°C انجام می‌شود، هدف از این آزمایش شبیه‌سازی شرایطی است که برای مخلوط هنگام تولید، ذخیره‌سازی، حمل و پخش ممکن است رخ دهد [Shakouri (et al.), 2005]. نمونه‌های آزمایش ریزش قیر، نمونه‌های آسفالتی متراکم نشده 1200 گرمی بودند که جهت ارزیابی در درصد قیر بهینه ساخته شدند [Brown and Mallick, 1995, South Carolina Department of Transportation, 2006]. میزان ریزش قیر برای هر یک از نمونه‌ها در فواصل زمانی مورد نظر طبق رابطه زیر به دست آمد:

$$D = \frac{P_f - P_i}{W} \quad (1)$$

در این رابطه P_i وزن اولیه کاغذ برحسب گرم، P_f وزن کاغذ در انتهای یک ساعت برحسب گرم و W وزن کل مخلوط بر حسب گرم است. دو نمونه برای هر مخلوط جهت اندازه‌گیری ریزش قیر آزمایش شدند. حساسیت به ریزش قیر در دمای 175°C به وسیله درصد ریزش قیر مخلوط در طی ۱ ساعت اندازه‌گیری شد که مقدار آن نباید از $0/3$ درصد وزن مخلوط بیشتر باشد [Brown and Mallick, 1995, Brown (et al.), 1997, Shakouri (et al.), 2005]. نمایی از سبد مخصوص آزمایش ریزش قیر را در شکل (۲) مشاهده می‌شود، نتایج آزمایش ریزش قیر در جدول (۶) و شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۲. سبد استفاده شده برای انجام آزمایش ریزش قیر

M009 توسط تیرچه آسفالتی در دمای 20°C جهت ارزیابی تاثیر نوع الیاف بر رفتار خستگی مخلوط انجام شد.

۱-۳ طرح مخلوط SMA

نمونه‌های مارشال SMA برای الیاف ویسکوز، پلی استر، کنف، پلی پروپیلن و اکریلیک به ازای درصدهای قیر $6/5$ ، $7/5$ و $7/5$ با 50 ضربه به هر طرف برای شبیه‌سازی ترافیک سنگین در مخلوطهای SMA ساخته شد [Brown (et al.), 1997, Asi, 2006]. برای ساخت این مخلوطها به منظور مقایسه میان الیاف در این بخش و در آزمایشهای بعدی میزان $0/3$ درصد وزنی کل مخلوط، الیاف به طور ثابت به مصالح اضافه شد. برای ساخت این نمونه‌ها قیر و مصالح سنگی جداگانه توزین و تا دمای 165°C حرارت دیدند و سپس الیاف به آنها اضافه شده و مخلوط شدند. در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های مارشال دمای اختلاط 3°C \pm 160 استفاده شده و نمونه‌ها در دمای 150°C متراکم شدند [نشریه 2006 ، 1379 ، 206]. [Shakouri (et al.), 2005, 1379, 206].

از آنجا که در طرح مخلوطهای SMA فاکتور اصلی فضای خالی نمونه متراکم شده است [Brown (et al.), 1997, Asi, 2006, Putman and Amir Khanian, 2004] مقدار میانی بازه 4% فضای خالی ارائه شده توسط کار گروه فنی FHWA برای تعیین قیر بهینه، یعنی میزان فضای خالی $3/5\%$ در نظر گرفته شد و مقدار حداقل فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و فضای خالی مصالح سنگی درشت‌دانه به ترتیب به عنوان عامل کنترلی و حصول اطمینان از تماس سنگدانه به سنگدانه در تعیین مقدار قیر بهینه کنترل شد [Brown (et al.), 1997]. نتایج طرح مارشال برای مخلوطهای مختلف در جدول (۵) ارائه شده است.

۲-۳ پتانسیل ریزش قیر

پدیده ریزش قیر عمده‌ترین عیب مخلوطهای آسفالتی با دانه‌بندی میان تهی است و از آنجا که مخلوطهای SMA از نوع مخلوطها با دانه‌بندی میان تهی هستند، بنابراین دارای پتانسیل ریزش قیر هستند [Asi, 2006].

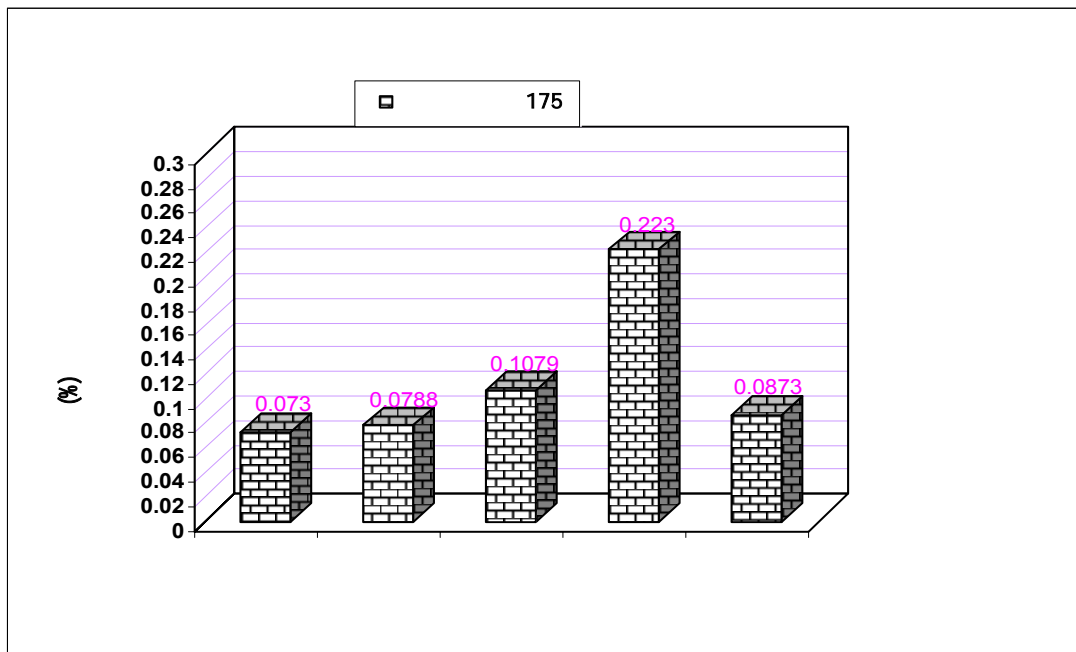
آزمایش ریزش قیر روشی برای ارزیابی پتانسیل ریزش قیر یا همان جدا شدن ملات قیری از مخلوطهای SMA است، این

جدول ۵. نتایج مارشال برای مخلوطهای SMA حاوی الیاف مختلف در درصد قیر بهینه

مخلوطهای آسفالتی حاوی الیاف					شرح
پلی استر	ویسکوز	پلی پروپیلن	اکریلیک	کنف	
۶/۲۲۶	۶/۶۳۲	۵/۷۶۹	۶/۰۸۹	۶/۳۷۵	درصد وزنی قیر بهینه
۷۸/۴۴۳	۷۹/۹۷۹	۷۸/۷۷۹	۸۰/۲۶۱	۷۹/۷۵۴	درصد فضای خالی پر شده با قیر
۱۷/۵۰۴	۱۸/۱۳۷	۱۷/۰۳۲	۱۷/۱۹۷	۱۷/۱۵۵	درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA)
۲/۳۵۲	۲/۳۵۶	۲/۳۶۵	۲/۳۷۰	۲/۳۷۴	وزن مخصوص واقعی نمونه آسفالتی (G_{mb})
۷/۹۹۷	۸/۲۸۶	۶/۹۰۳	۷/۷۹۲	۷/۰۶۳	استقامت مارشال (KN)
۳/۰۹	۳/۰۶۸	۲/۴۵۶	۲/۷۶۰	۲/۵۴۷	روانی (mm)
۲/۵۸۸	۲/۷۰۱	۲/۸۱۱	۲/۸۲۳	۲/۷۷۳	شاخص سختی مارشال (KN/mm)

جدول ۶. ریزش قیر مخلوطهای SMA حاوی ۰/۳ درصد وزنی الیاف مختلف

ریزش قیر مخلوطهای حاوی الیاف					نوع مخلوط	
					دما (°C)	
پلی استر	پلی پروپیلن	اکریلیک	کنف	ویسکوز		
۰/۰۸۷۳	۰/۲۲۳	۰/۱۰۷۹	۰/۰۷۸۸	۰/۰۷۳	۱۷۵	اساعت



شکل ۳. مقایسه ریزش قیر مخلوطهای SMA حاوی ۰/۳ درصد وزنی الیاف در دمای ۱۷۵°C

۳-۳ آزمایش خستگی

در این بخش، به بررسی آزمایشگاهی رفتار خستگی مخلوطهای حاوی الیاف مختلف مورد استفاده در این تحقیق پرداخته و شرح کاملی از روش انجام آزمایش، نتایج و تحلیل آنها ارائه خواهد شد. کلیه مراحل آزمایش مطابق با استاندارد SHRP-M009 بر روی خستگی^۴ تیرچه تحت خمش تکراری صورت گرفته است. دستگاه مورد استفاده در این تحقیق برای بررسی رفتار خستگی، دستگاه UTM 14-P^۵ است، که قابلیت بارگذاری پالسی با شکل موجهای مختلف را دارد. شمای کلی این دستگاه در شکل (۴) مشاهده می‌شود.

در این دستگاه آزمون خستگی به روش خمش ساده در نقاط یک سوم دهانه صورت می‌پذیرد. در این آزمون نمونه مکعب مستطیل شکل در ابعاد طولی $381 \pm 6/35$ ، عرضی $60 \pm 6/35$ و ارتفاع $50/8 \pm 6/35$ میلی‌متر تهیه می‌شود و نمونه از دو طرف روی تکیه‌گاههای ساده قرار می‌گیرد. سپس با دو نیروی متمرکز و مساوی P/2 که در فاصله‌های یک سوم دهانه اعمال می‌شوند، تحت خمش قرار می‌گیرد و این عمل آنقدر تکرار می‌شود تا نمونه به معیار خاتمه آزمایش برسد. [Tangella (et al.), 1990 and Hung, 2000].



شکل ۴. قاب بارگذاری آزمایش خستگی خمشی تیرچه آسفالتی

این دستگاه همچنین شامل یک بدنه اصلی، چهار سیستم گرهی، یک سیستم اعمال بار و یک تغییر شکل سنج خارجی (LVDT)^۶ است. بر روی دستگاه سیستمهای الکترونیکی جهت تنظیم

عملکرد دستگاه در داخل آن قرار دارد و از طریق کلیدهای تعبیه شده بر روی بدنه دستگاه، قابلیت تنظیم آن فراهم شده است. چهار نقطه گرهی کنترلی در دستگاه تعبیه شده که دو گره در دو انتهای دستگاه نقش تکیه‌گاهی تیرچه را دارند و از طریق دو گره داخلی بارگذاری به صورت پالسی بر روی نمونه آسفالتی اعمال می‌شوند. در این استاندارد یک خمش ساده به صورت تکراری بر روی تیرچه آسفالتی اعمال شده و خیز ناشی از اعمال نیرو توسط یک کرنش سنج که روی نمونه قرار دارد، اندازه‌گیری می‌شود. شایان ذکر است که این دستگاه قابلیت اعمال بارگذاری در فرکانس بین ۵ تا ۱۰ هرتز را داراست و یک سیستم کامپیوتر کنترل است که امکان انجام آزمایش در دو حالت کنترل کرنش و کنترل تنش را دارد.

در حالت کنترل، تنش بار ثابت مانده و کرنشهای ناشی از این بار ثابت در هر چرخه محاسبه می‌شود، ولی در حالت کنترل کرنش، در طی هر چرخه بارگذاری خیز تیرچه اندازه‌گیری شده و کرنش تیرچه محاسبه می‌شود، سپس بار به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نمونه در هر چرخه بارگذاری، کرنش ثابتی را تجربه کند. شکل موج بارگذاری توسط این دستگاه به صورت سینوسی یا نیم سینوسی مثبت^{۱۱} با فرکانس مختلف و با زمانهای استراحت متفاوت، قابل تنظیم است. [Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1996, خدادادی، فخری و امیری حسینی، ۱۳۸۴، محمدزاده، ۱۳۸۷].

۳-۴ ساخت نمونه‌های آزمایش خستگی

به منظور ارزیابی تأثیر تغییر نوع الیاف بر خواص خستگی مخلوطهای SMA در ساخت نمونه‌های آسفالتی از پنج نوع الیاف، ویسکوز، کنف، اکریلیک، پلی‌استر و پلی‌پروپیلن استفاده شد. برای تهیه تیرچه‌های آسفالتی ابتدا یک دال آسفالتی متراکم شده توسط چرخ غلتک که شرایط تراکم واقعی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند، ساخته شد، سپس تیرچه‌ها با استفاده از اهر مخصوص از دال آسفالتی مطابق ابعاد پیشنهادی استاندارد SHRP-M009 (ابعاد طولی $381 \pm 6/35$ ، عرضی $60 \pm 6/35$ و ارتفاع $50/8 \pm 6/35$ میلی‌متر) بریده شدند. تمام تیرچه‌ها براساس نتایج به دست آمده از آزمایش مارشال تهیه شدند، به این ترتیب که دال آسفالتی مربوط به هر یک از نوع الیاف، در یک نوع

آزمایش در دمای 20°C قرار گرفتند. بر طبق استاندارد SHRP-M009 فرکانس بارگذاری باید بین ۵ تا ۱۰ هرتز باشد که براساس تجربیات گذشته و برای افزایش سرعت آزمایش، مقدار ۱۰ هرتز انتخاب شد، همچنین بارگذاری نیز براساس توصیه همین استاندارد از نوع سینوسی و بدون دوره استراحت بر نمونه-ها اعمال شد. معیار خاتمه آزمایش در آزمایشهای خستگی با کرنش ثابت، کاهش میزان سختی اولیه مخلوط پس از بارگذاریهای متوالی به ۵۰ درصد میزان اولیه آن یا حداکثر ۱۰۰۰۰۰۰ مرتبه بارگذاری بود که این شرایط نیز مطابق پیشنهاد استاندارد SHRP-M009 توسط دستگاه آزمایش اعمال شد [Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1996, محمدزاده, ۱۳۸۷].



شکل ۵. دال و تیرچه‌های آسفالتی ساخته شده در آزمایشگاه

۴. بحث درباره نتایج

۴-۱ طرح مخلوط

همان طور که در جدول (۵) مشاهده می شود، درصد قیر بهینه برای ۵ نوع مخلوط کاملاً متفاوت است که نشانگر تأثیر قابل توجه جنس الیاف بر مقدار قیر بهینه است، به این صورت که کمترین و بیشترین مقدار قیر بهینه به ترتیب مربوط به مخلوطهای حاوی پلی پروپیلن و ویسکوز است و به طور کلی مخلوطهای حاوی الیاف سلولزی دارای درصد قیر بهینه بیشتری نسبت به مخلوطهای حاوی الیاف مصنوعی هستند. اما بین مخلوطهای حاوی الیاف مصنوعی، مخلوطهای حاوی الیاف پلی استر، اکریلیک و پلی پروپیلن به ترتیب دارای مقادیر حداکثر، میانی و

دانه بندی، یک نوع مصالح سنگی، یک میزان الیاف، یک روش تراکم، یک میزان درصد فضای خالی و درصد قیر بهینه مربوط به خودش ساخته شد. بنابراین تنها تمایز بین دالهای آسفالتی، نوع الیاف و میزان قیر بهینه مربوط به آنها بود. به این طریق تأثیر سایر پارامترهای مخلوط آسفالتی که در رفتار خستگی اثر دارند کنترل می شود و تنها تأثیر تغییرات ایجاد شده در اثر نوع الیاف در رفتار خستگی مخلوطهای SMA ارزیابی می شود.

۳-۵ تعداد نمونه‌ها و چگونگی انجام آزمایش خستگی

از آنجا که این آزمایش بر طبق استاندارد SHRP-M009 صورت پذیرفت، طبق پیشنهاد همین استاندارد آزمایش در حالت کرنش ثابت انتخاب شد. بر طبق این استاندارد سطح کرنش باید به گونه‌ای باشد که حداقل و حداکثر تعداد دفعات اعمال بار به ترتیب در بازه بین ۱۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ مرتبه قرار گیرد. از آنجا که تجربیات گذشته در مورد انتخاب سطح کرنشها برای مخلوطهای SMA حاوی الیاف مختلف در این زمینه کم بود، علاوه بر سه سطح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکروکرنش (10^{-6} mm/mm) که برای یک نوع مخلوط SMA حاوی خرده لاستیک در تحقیقات گذشته تجربه شده است [Shakouri (et al.), 2005]، سه سطح کرنش انتخابی دیگر نیز به منظور قضاوت بهتر درباره عمر خستگی مخلوطهای SMA حاوی الیاف مختلف، در این تحقیق، مدنظر قرار گرفت که این سطح کرنشها برابر ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش بودند، بنابراین این آزمایش در شش سطح کرنش صورت پذیرفت. حداقل دو نمونه در هر سطح کرنش برای هر یک از مخلوطهای SMA حاوی الیاف مختلف انتخاب شدند تا از آنها برای تولید مدل و یا مقایسه استفاده شود. بنابراین حداقل ۱۲ دال آسفالتی برای ۵ نوع مخلوط SMA ساخته شد و از هر دال ۴ عدد تیرچه به دست آمد و تیرچه‌ها توسط اهر مخصوص از دالها بریده شده و با توجه به توصیه استاندارد تمام وجوه جانبی آن به وسیله سطح جانبی اهر صاف و صیقلی شدند. به این ترتیب برای هر یک از مخلوطهای SMA حاوی الیاف ویسکوز، کنف اکریلیک، پلی استر و پلی پروپیلن حداقل ۳ دال یا ۱۲ تیرچه جهت انجام آزمایش خستگی تهیه شد. در شکل (۵) نمایی از دال و تیرچه‌های مخلوطهای SMA دیده می شود. نمونه‌ها بر اساس استاندارد SHRP-M009 حداقل ۲ ساعت قبل از شروع

الیاف و همچنین افزایش میزان جذب آب، مخلوط دارای قیر بهینه بیشتر و پتانسیل ریزش قیر کمتر خواهد بود.

۴-۳ بررسی سختی خمشی^{۱۲}

در این قسمت به بررسی تغییرات سختی خمشی در سطح کرنشهای متفاوت برای مخلوطهای حاوی الیاف مختلف پرداخته می‌شود. شایان ذکر است که همه نمونه‌های آسفالتی حاوی الیاف مختلف در سطح ۴۰۰ میکرو کرنش، عمر خستگی بیشتر از ۱۰۰۰۰۰۰ سیکل بارگذاری را از خود نشان دادند که سبب توقف آزمایش در این سطح شد. نتایج آزمایش در جداول (۷ تا ۱۱) و شکل (۷) مشاهده می‌شود.

جدول ۷. نتایج آزمایش خستگی مخلوط SMA حاوی الیاف ویسکوز

در دمای ۲۰°C

میانگین عمر خستگی (چرخه)	میانگین سختی خمشی (Mpa)	سطح کرنش (۱۰ ^{-۶} mm/mm)
- ^a	۱۵۷۹	۴۰۰
۸۷۴۹۸۵	۱۳۶۸/۵	۵۰۰
۵۷۰۵۵۰	۱۲۷۱/۵	۶۰۰
۲۰۶۹۰۵	۱۲۰۴/۵	۷۰۰
۱۹۳۸۴۵	۱۲۱۸	۸۰۰
۱۸۲۸۷۵	۹۸۵	۹۰۰

ا. علامت (-) برای نمونه‌هایی است، که عمر خستگی آنها بیشتر از ۱۰۰۰۰۰۰ چرخه بارگذاری است.

جدول ۸. نتایج آزمایش خستگی مخلوط SMA حاوی الیاف کنف در

دمای ۲۰°C

میانگین عمر خستگی (چرخه)	میانگین سختی خمشی (Mpa)	سطح کرنش (۱۰ ^{-۶} mm/mm)
-	۱۶۵۳	۴۰۰
۹۴۳۵۲۲	۱۴۱۲	۵۰۰
۵۰۳۳۶۵	۱۲۴۸/۵	۶۰۰
۴۶۹۲۸۰	۱۱۱۷/۵	۷۰۰
۲۹۶۹۰۷/۵	۱۱۴۷	۸۰۰
۱۳۸۷۳۷	۱۱۹۷/۵	۹۰۰

حداقل قیر بهینه هستند و بین مخلوطهای حاوی الیاف سلولزی، مخلوط حاوی الیاف ویسکوز دارای قیر بهینه بیشتر نسبت به مخلوط حاوی الیاف کنف بود. آنچه از نتایج آزمایش و شواهد آن در مقایسه با مشخصات الیاف بر می‌آید، نشانگر رابطه بین درصد قیر بهینه، میزان جذب آب الیاف و دنیبر آنها است، به این ترتیب که هر چه الیاف دارای جذب آب بیشتر و دنیبر کمتر باشند، میزان قیر بهینه مخلوطهای حاوی این الیاف بیشتر خواهد بود.

۴-۲ ریزش قیر

همان طور که در جدول (۶) و شکل (۳) مشاهده می‌شود، تمامی مخلوطهای SMA حاوی الیاف مختلف دارای میزان ریزش قیر کمتر از حداکثر ارائه شده توسط کار گروه فنی FHWA یعنی ۳/۰ درصد هستند، بنابراین کل طرح مخلوط و میزان قیر بهینه از نظر ریزش قیر صحیح است، اما شاهد اختلافات قابل توجه در میزان ریزش قیر مخلوطهای حاوی الیاف مختلف هستیم، به طوری که میزان ریزش قیر از کمتر به بیشتر، به ترتیب در مخلوطهای حاوی الیاف ویسکوز، کنف، پلی استر، اکریلیک و پلی پروپیلن اتفاق می‌افتد.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مخلوطهای حاوی الیاف با پایه سلولزی مانند ویسکوز و کنف علیرغم داشتن میزان قیر بهینه بیشتر در کاهش میزان ریزش قیر مؤثرترند، ولی در میان الیاف مصنوعی مخلوط حاوی پلی استر علیرغم داشتن میزان قیر بهینه بیشتر از مخلوطهای حاوی الیاف اکریلیک و پلی پروپیلن در برابر ریزش قیر بسیار بهتر عمل می‌کند، به طوری که مخلوط حاوی الیاف پلی استر دارای ریزش قیر نزدیک به مخلوطهای حاوی الیاف سلولزی و بخصوص کنف است. اما میزان جذب آب الیاف ویسکوز کمی بیشتر از الیاف کنف بوده و همچنین دنیبر آن نیز به مراتب کمتر از الیاف کنف است که می‌تواند نشانگر تأثیر عمده این پارامترها بر پدیده ریزش قیر باشد. در الیاف پلی استر نیز دنیبر این الیاف به مراتب کمتر از الیاف اکریلیک و پلی پروپیلن است، ولی میزان جذب آب الیاف اکریلیک از الیاف پلی استر کمی بیشتر است که شاید بتوان این پدیده را به این صورت توجیه کرد که تأثیر دنیبر الیاف بر میزان قیر بهینه و ریزش قیر مخلوط بیشتر از تأثیر میزان جذب آب است، ولی آنچه مسلم است با کاهش دنیبر

همان طور که در جداول (۷ تا ۱۱) ملاحظه می شود، تغییرات سختی خمشی مخلوطهای SMA حاوی الیاف، ویسکوز، کنف، اکریلیک، و پلی استر در شش سطح کرنش مورد آزمایش ارائه شده است. برای درک بهتر تغییرات سختی خمشی در مقابل سطح کرنش با توجه به نتایج، انواع مدل‌های توانی، لگاریتمی، سهموی و خطی به نتایج سختی خمشی-کرنش برازش داده شد و مدل دارای بیشترین نیکویی برازش داده‌ها، که مدل توانی بود، به منظور توجیه و مقایسه میان مخلوطها، انتخاب شد. نمودار مدل توانی مربوط به هر یک از مخلوطهای حاوی الیاف مختلف و داده‌های آزمایش، در شکل (۶) مشاهده می شود. مقدار مجذور مربعات (R^2) مربوط به مدل توانی برای مخلوطهای حاوی الیاف پلی پروپیلن، اکریلیک، کنف، ویسکوز و پلی استر به ترتیب ۹۶/۷۴، ۹۱/۵۷، ۸۰/۵۹، ۸۹/۲ و ۹۰/۵۳ درصد است که نشانه برازش مناسب تابع توانی به این منحنی‌ها است.

۴-۴ بررسی عمر خستگی

شکل (۷) و جداول (۷ تا ۱۱) تغییرات عمر خستگی مخلوطهای SMA حاوی پنج نوع الیاف مختلف را در سطح کرنشهای اعمالی متفاوت نشان می دهد. مدل‌های زیادی مانند مدل شل، انستیتو آسفالت، مدل ناتینگهام و غیره برای ارزیابی عمر خستگی ارائه شده است. در این تحقیق به علت تعداد نمونه‌ها و بر اساس سابقه تحقیق، برای صحت کالیبراسیون مدل‌های دیگر حداقل به ۲۴ نمونه نیاز است، مدل مشهور مانیسمیت به صورت [Institute of Transportation, 1996, Hung, 2000,]

خدادادی، فخری و امیری حسینی، ۱۳۸۴، محمدزاده، ۱۳۸۷]:

$$N_f = a \left(\frac{1}{\epsilon_f} \right)^b \quad (9)$$

در نظر گرفته شد و به صورت رگرسیون خطی لگاریتم طبیعی به شکل $\ln(N_f) = \ln(a) + b \ln(1/\epsilon_f)$ به داده‌های عمر خستگی-سطح کرنش هریک از مخلوطهای SMA حاوی الیاف ارائه شده در جداول (۷ تا ۱۱) برازش داده شد. در این مدل ϵ_f مقدار کرنش کششی، N_f عمر خستگی مخلوط به ازای کرنش مورد نظر، a و b ضرایب ثابت مدل هستند. مدل‌های خستگی به دست آمده برای مخلوطهای SMA حاوی الیاف اکریلیک، کنف، پلی-پروپیلن، ویسکوز و پلی استر در جدول (۱۲) ارائه شده‌اند و در شکل (۷) مشاهده می شوند.

جدول ۹. نتایج آزمایش خستگی مخلوط SMA حاوی الیاف

اکریلیک در دمای ۲۰°C

سطح کرنش (mm/mm) ⁻¹ (۱۰)	میانگین سختی خمشی (Mpa)	میانگین عمر خستگی (چرخه)
۴۰۰	۱۷۸۶	-
۵۰۰	۱۴۴۲	۹۱۶۰۴۵
۶۰۰	۱۴۷۳	۶۱۵۱۱۲
۷۰۰	۱۳۳۷/۵	۳۸۲۹۷۰
۸۰۰	۱۰۹۶	۳۴۰۵۵۵
۹۰۰	۱۰۶۷/۵	۱۵۷۵۱۰

جدول ۱۰. نتایج آزمایش خستگی مخلوط SMA حاوی الیاف

پلی استر در دمای ۲۰°C

سطح کرنش (mm/mm) ⁻¹ (۱۰)	میانگین سختی خمشی (Mpa)	میانگین عمر خستگی (چرخه)
۴۰۰	۱۴۹۰	-
۵۰۰	۱۳۳۷	۵۶۴۱۲۱
۶۰۰	۱۱۴۷	۴۱۹۳۸۵/۵
۷۰۰	۱۲۲۴/۵	۱۵۲۱۱۰
۸۰۰	۱۰۶۷/۵	۱۰۳۵۲۰
۹۰۰	۹۶۱	۱۲۰۳۹۶

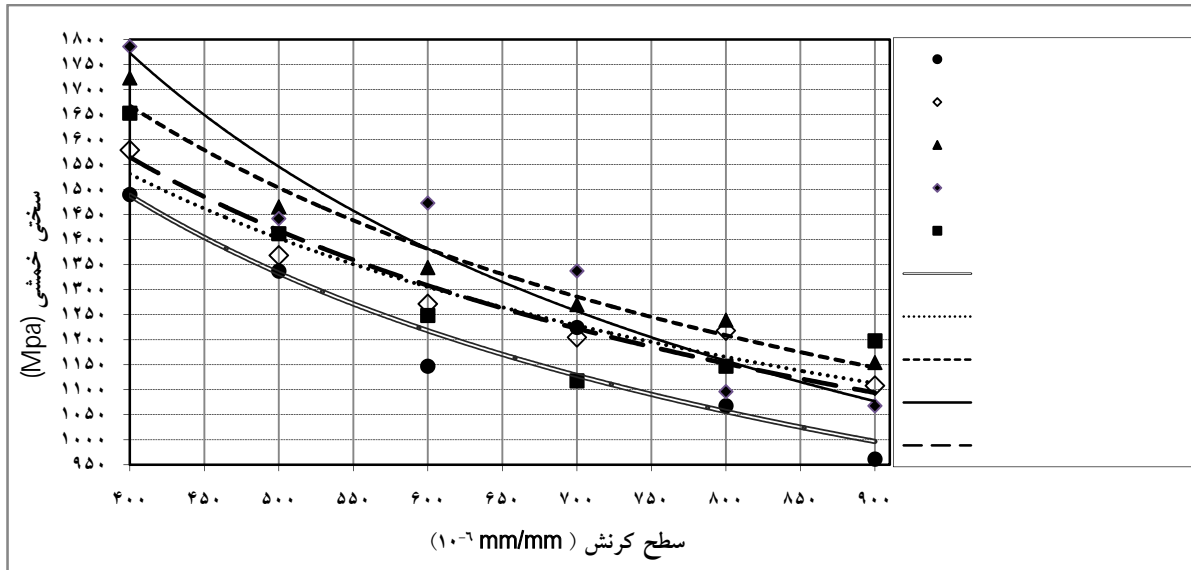
جدول ۱۱. نتایج آزمایش خستگی مخلوط SMA حاوی الیاف

پلی پروپیلن در دمای ۲۰°C

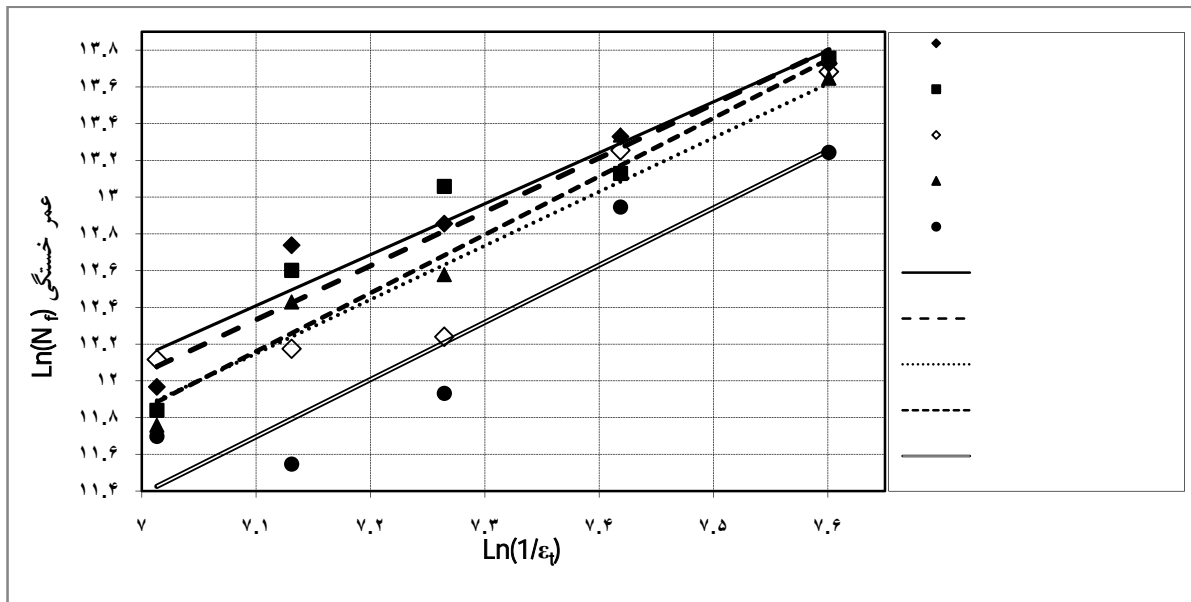
سطح کرنش (mm/mm) ⁻¹ (۱۰)	میانگین سختی خمشی (Mpa)	میانگین عمر خستگی (چرخه)
۴۰۰	۱۷۲۳	-
۵۰۰	۱۴۶۵/۵	۸۴۴۸۶۲
۶۰۰	۱۳۴۴	۶۲۰۱۰۰
۷۰۰	۱۲۷۰	۲۹۰۱۴۰
۸۰۰	۱۲۳۹	۲۴۹۹۰۰
۹۰۰	۱۱۵۴	۱۲۷۷۹۵

جدول ۱۲. مدل‌های خستگی به دست آمده برای مخلوط‌های SMA حاوی الیاف مختلف

ضریب تعیین (R^2)	مدل مانیسمیت	مخلوط SMA حاوی الیاف
۰/۹۳۹	$\ln(N_f)=2.7732\ln(1/\epsilon)-7.2804$	اکریلیک
۰/۹۱۶	$\ln(N_f)=2.9315(1/\epsilon)-8.48$	کنف
۰/۸۸۶	$\ln(N_f)=2.9356\ln(1/\epsilon)-8.694$	ویسکوز
۰/۹۵۶	$\ln(N_f)=3.1731\ln(1/\epsilon)-10.368$	پلی پروپیلن
۰/۸۸۳	$\ln(N_f)=3.1122\ln(1/\epsilon)-10.401$	پلی استر



شکل ۶. مقایسه داده‌ها و مدل‌های سختی خمشی - سطح کرنش، برای مخلوط‌های SMA حاوی الیاف مختلف



شکل ۷. مقایسه مدل‌های خطی برازش داده شده به مخلوط‌های SMA حاوی الیاف مختلف

۵. نتیجه گیری

بر اساس تحلیل اطلاعات این تحقیق نتایج زیر به دست آمده‌اند:

۱- مخلوطهای SMA حاوی الیاف ویسکوز، کنف، پلی‌استر، اکریلیک و پلی‌پروپیلن به ترتیب دارای بیشترین تا کمترین میزان قیر بهینه هستند. بنابراین می‌توان گفت مخلوطهای SMA حاوی الیاف سلولزی دارای درصد قیر بهینه بیشتر نسبت به مخلوطهای SMA حاوی الیاف مصنوعی هستند و از آنجا که قیر گران‌ترین بخش مخلوطهای آسفالتی است، بنابراین مخلوطهای حاوی الیاف مصنوعی بخصوص پلی‌پروپیلن و اکریلیک از سایر مخلوطها، به لحاظ مصرف قیر به منظور ساخت اقتصادی‌تر است.

۲- دنیر و جذب آب الیاف دارای تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر درصد قیر بهینه و ریزش قیر مخلوطهای SMA هستند

۳- مخلوطهای SMA حاوی الیاف سلولزی علیرغم داشتن میزان قیر بهینه بیشتر، پتانسیل ریزش قیر کمتری نسبت به مخلوطهای SMA حاوی الیاف مصنوعی دارند. بنابراین از لحاظ کاهش میزان ریزش قیر مخلوطهای حاوی الیاف سلولزی بسیار بهتر عمل می‌کنند.

۴- استفاده از الیاف پسماند کارخانه‌های فرش، موکت و یا لاستیک در این مخلوطها امکان‌پذیر است و ثانیاً کاربرد الیاف اکریلیک در مخلوطهای SMA به طور کلی و در مقایسه با سایر الیاف بخصوص از لحاظ خستگی که یکی از معیارهای اصلی در طول عمر روسازی است، مناسب‌تر است.

۵- سختی خمشی مخلوطهای SMA نسبت به سطح کرنش حساس است، به طوری که با افزایش سطح کرنش اعمالی بر نمونه‌ها با کاهش میزان سختی خمشی روبرو هستیم. این به معنای این است که سختی این مخلوطها، بسیار وابسته به سطح کرنش اعمالی است، به طوری که در سطح کرنشها پایین‌تر از ۶۰۰ میکروکرنش، این وابستگی بسیار زیاد است، ولی در سطح کرنشهای بالاتر این وابستگی بسیار کم می‌شود، بنابراین تعیین سختی مخلوط SMA بسیار وابسته به سطح کرنش اعمال شده توسط بار در زیر لایه آسفالتی است.

۶- شیب منحنی‌های سختی خمشی، سطح کرنش نشان می‌دهد که سختی خمشی مخلوطهای حاوی الیاف مصنوعی نسبت به

مخلوطهای حاوی الیاف سلولزی دارای حساسیت بیشتر نسبت به سطح کرنش اعمالی است.

۷- عمر خستگی مخلوطهای SMA نسبت به سطح کرنش بکار رفته در آزمایش حساس است، به طوری که با افزایش سطح کرنشها از ۴۰۰ تا ۹۰۰ میکروکرنش کاهش بسیار قابل توجهی در عمر خستگی مخلوطها مشاهده می‌شود. علت این امر این است که بالا رفتن سطح کرنشها باعث افزایش مقدار تنشهای وارد بر مخلوط می‌شود و این افزایش، به سرعت پیشروی فرآیندهای مخرب مانند رشد ترکهای مویین و گسیخته شدن پیوند بین قیر و مصالح سنگی کمک می‌کند و در نتیجه باعث کاهش سریع سختی مخلوطها و رسیدن آنها به شرایط گسیختگی می‌شود.

۸- مخلوطهای حاوی اکریلیک و کنف تقریباً دارای عمر خستگی بیشتری هستند و بعد از آنها مخلوطهای حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و ویسکوز و پلی‌استر قرار می‌گیرند.

۹- با توجه به نرخ تغییرات عمر خستگی مخلوطها نسبت به سطح کرنشهای مختلف می‌توان چنین بیان کرد که عمر خستگی مخلوط حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلی‌استر بیشترین حساسیت را نسبت به افزایش سطح کرنش اعمالی نشان می‌دهند و بعد از آنها مخلوطهای حاوی الیاف ویسکوز، کنف و اکریلیک قرار می‌گیرند.

۱۰- نمودار سختی خمشی و مدلهای به دست آمده برای خستگی نشان می‌دهند که به استثنای پلی‌پروپیلن، مخلوطهای دارای سختی بیشتر دارای مدل لگاریتمی خطی شکل با شیب کمتر هستند، به این معنا که مخلوطهای SMA با سختی بیشتر، عمر خستگی آنها حساسیت کمتری نسبت به سطح کرنش اعمالی دارد. علت این رفتار مخلوط پلی‌پروپیلن شاید این باشد که در دمای بالای ۱۱۰۰ C ساختمان و پیوندهای این الیاف شکسته شده و به جای یک لیف رفتاری مانند یک پلیمر در ارتباط با قیر و مخلوطهای آسفالتی نشان می‌دهد.

۱۱- بر خلاف بتن آسفالتی متعارف [Hung, 2000]، مخلوطهای SMA دارای سختی خمشی بیشتر الزاماً دارای عمر خستگی کمتری نبودند، که این نشانگر اثر ویژه و قابل توجه نوع تثبیت‌کننده الیافی، بر سختی خمشی و عمر خستگی مخلوطهای SMA است.

- Asi, I. M. (2006) "Laboratory comparison study for the use of stone matrix asphalt in hot weather climates", Journal of Construction and Building Materials, No. 20, Issue 10, pp. 982-989.

- Asphalt Research Program. Institute of Transportation Studies. University of California, Berkeley. (1994) "Fatigue response of asphalt-aggregate mixes", Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington, DC.

- Brown, E. R. and Manglorkar, H. (1993) "Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures", National Center for Asphalt Technology Auburn University, Research Report, Sponsored by NAPA and the NAPA Education Foundation.

- Brown, E. R. and Mallick, R.B. (1995) "Laboratory study on drain down of asphalt cement in stone matrix asphalt", Transportation Research Record, NCAT, Auburn.

- Brown, E. R. Haddock, J. E., Mallick, R. B. and Lynn, T.A. (1997) "Development of mixture design procedure for stone matrix asphalt (SMA) "NCAT Report No. 97-3.

- Brown, E. R. and Haddock, J. E. (1997) "Method to ensure stone on stone contact in stone matrix asphalt paving mixtures", Transportation Research Record, 1583, Paper No. 970159.

- Brown, E. R. Kandhal, P. S and Zahang, J. (2001) "Performance testing for hot mix asphalt", National Center for Asphalt Technology, NCAT report 01-05.

- Georgia Department of Transportation, Homepage (2002) "SMA Research", Website: <http://www.dot.state.ga.us/dot/construction/material-research/b-admin/research/online-report/r-SMA-2002.pdf>

- Hung, Y. H. (2004) "Pavement analysis and design, second edition", University of Kentucky, Pearson Prentice Hall, Englewood Cliffs issued, New Jersey 07458.

- Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley (1996) "Summary report on fatigue response of asphalt mixtures project A-003A", Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.

۶. سپاسگزاری

از همکاری آزمایشگاه روسازی دانشگاه فردوسی مشهد و نیز جناب آقای دکتر توکلی زاده و جناب آقای حاجی نژاد سپاسگزاریم.

۷. پی نوشت ها

1. Stone on stone contact
2. Dry- rodded method
3. Viscous
4. Jute
5. Acrylic
6. Polyester
7. Polypropylene
8. Beam fatigue test
9. Universal Testing Machine
10. Linear Variable Differential Transducer
11. Haversine
12. Flexural stiffness

۸. مراجع

- ایران، وزارت راه و ترابری، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، مرکز تحقیقات و آموزش (۱۳۷۹) "طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوطهای آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای"، نشریه شماره ۲۰۶، چاپ اول، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، مرکز مدارک علمی و انتشارات.

- خدادادی، احمد، فخری، منصور و امیری حسینی، حمیدرضا (۱۳۸۴) "اثر ژئوستنتیکها بر عمر خستگی روسازیهای آسفالتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۸۴، ص. ۱۳۷-۱۴۴.

- طباطبائی، نادر (۱۳۸۲) "روسازی راه"، ایران: چاپ نهم، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی.

- عامری، محمود و منصوریان، احمد (۱۳۸۶) "استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم جهت ارزیابی مدلی برای پیش بینی عمر خستگی نمونه های آسفالتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهارم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۶، ص. ۶۹-۸۲.

- محمدزاده مقدم، ابوالفضل (۱۳۸۷) "بررسی تأثیر نوع الیاف بر خواص خستگی و ریزش قیر مخلوطهای آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای"، پایان نامه کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد.

- South Carolina Department of Transportation. Office of Materials and Research (2006) "Laboratory procedures manual".
- State of Ohio Department of Transportation (1998) "Asphalt concrete with fibers", Supplemental Specification 826. Website: www.dot.state.oh.us/Divisions/ConstructionMgt/default.htm
- Tangella, S. C. S, Craus, J., Deacon, J. A. and Monismith, C. L. (1990) "Summary report on fatigue response of asphalt mixtures", Prepared for Strategic Highway Research Program Project A-003-A, Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley, California, February.
- Troutbeck, R. and Kennedy, Ch. (2005) "Review of the use of stone mastic asphalt (SMA) surfacing ", Queensland Department of Main Road. 10.
- Kumar, P., Chandra, S. and Bose, S. (2005) "Comparative study on stone matrix asphalt mixes with different stabilizers", TRB, Annual Meeting .
- Pierce, L.M. (2000) "Stone matrix asphalt -SR-524 , 64th Avenue West to I-5", State Pavement Engineer Washington State Department of Transportation, Post Construction Report, WA-RD 504.1.
- Putman, B. J. and Amirkhanian, S. N.(2004) "Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures", Journal of Resources Conservation and Recycling, No. 42, pp. 265- 274 .
- Shakouri, G. H., Nikraves, K. Y., Menhaj, M. B., Kumar, P., Chandra, S. and Bose, S. (2005) "Comparative study on stone matrix asphalt mixes with different stabilizers", Transportation Research Board Annual Meeting.