

بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف پلی استر و اکریلیک بر پتانسیل شیار افتادگی و مقاومت در برابر زیان‌های رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم

علیرضا خاوندی خیابوی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان ایران
 حسن طاهرخانی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
 بابک کاظمی*، دانش‌آموخته کارشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ایران
 پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Babak.msi@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۰۶ - پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۱۶

چکیده

اکثر خرابی‌های اتفاق افتاده در رویه‌های آسفالتی ناشی از تاثیر شرایط آب و هوایی و بارگذاری ترافیک می‌باشد. کاهش چسبندگی بین قیر و سنگدانه در اثر تاثیر رطوبت که باعث کاهش مقاومت کششی آسفالت و فروپاشی آن می‌گردد و همچنین به وجود آمدن تغییر شکل‌های ماندگار در مسیر عبور چرخ‌ها که در اصطلاح شیار افتادگی نامیده می‌شود، دو نوع از خرابی‌های معمول در روسازی‌های آسفالتی می‌باشند. مسلح کردن آسفالت یکی از راهکارهایی است که می‌تواند با بهبود خصوصیات و عملکرد مخلوط آسفالتی سبب افزایش دوام آن گردد. در این تحقیق نقش الیاف پلی‌استر و اکریلیک به عنوان عامل مسلح کننده در بهبود مقاومت کششی آسفالت و عملکرد آن در مقابل زیان‌های رطوبتی و همچنین تاثیر استفاده از این الیاف بر پتانسیل شیار افتادگی و تغییر شکل ماندگار آسفالت با انجام آزمایش خزش استاتیکی در شرایط دمایی مختلف بررسی گردیده است. نتایج آزمایشات نشان داد که الیاف سبب بهبود عملکرد مخلوط در مقابل تغییر شکل ماندگار خصوصاً در دمای بالا می‌شوند. نقش الیاف در مقاومت کششی نیز تابع پارامترهایی نظیر طول و درصد الیاف و قابلیت توزیع شدن یکنواخت الیاف در مخلوط می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بتن آسفالتی، زیان‌های رطوبتی، خزش، الیاف، مقاومت کششی غیر مستقیم

۱- مقدمه

گردید. الیاف به منظور ایجاد مانعی در مقابل تشکیل ترک و همچنین مسلح‌سازی آسفالت برای تحمل تنش‌های کششی و همچنین بهبود مشخصات قیر و افزایش سختی آن برای افزایش عمر خستگی و کاهش تغییر شکل خزشی آسفالت بکار رفته‌اند. رطوبت یکی از عوامل تاثیر گذار در خرابی زودرس مخلوط‌های آسفالتی است. اثر زیان‌های رطوبتی بر مخلوط‌های آسفالتی که عریان شدگی نیز نامیده می‌شود، علت ایجاد و گسترش بسیاری از خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی است. تاثیر مخرب آب بر مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند به دو صورت کاهش چسبندگی قیر و سنگدانه به صورت جدا شدن فیلم یا اندود قیری از روی سنگدانه و یا کاهش پیوستگی مخلوط آسفالتی به صورت نرم شدن ماده چسباننده قیری با نفوذ آب به

مخلوط‌های آسفالتی گرم یکی از پرکاربردترین مصالح در روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌باشند. مواجهه با بارگذاری رو به رشد ترافیک و تاثیر شرایط آب و هوایی باعث گردیده که خرابی‌های زودرس در رویه‌های آسفالتی به وجود آمده و عمر مفید آنها کاهش یابد. مخلوط‌های آسفالتی همانند بتن، که از سنگدانه‌ها و یک ماده چسباننده تشکیل گردیده‌اند مخلوط‌هایی دو فازی هستند که ذاتاً دارای مقاومت کششی پایینی می‌باشند. مسلح کردن مخلوط‌های دوفازی یکی از راهکارها برای جبران ضعف آنها می‌باشد. قدیمی‌ترین مسلح‌سازی آسفالت توسط زوب (Zube, 1956) با استفاده از شبکه‌های توری سیمی زیر لایه رویه آسفالتی برای کاهش ترک‌های انعکاسی انجام شد. استفاده از الیاف نرفته در آسفالت از اوایل دهه ۱۹۶۰ مطرح

مختلفی انجام گردیده است. نتایج آزمایشات سیمپسون و همکارانش (Simpson et al., 1994) نشان داد که مخلوط آسفالتی حاوی الیاف پلی پروپیلن مقاومت کششی و مقاومت در برابر ترک خوردگی بیشتری داشته و همچنین تغییر شکل ماندگار کمتری نسبت به آسفالت معمولی دارد. ولی الیاف باعث بهبود عملکرد مخلوط در برابر زیانهای رطوبتی و زیانهای ناشی از ذوب و انجماد نگردیدند.

پارتل و همکارانش (Partl, Vinson and Hicks, 1994) تاثیر الیاف سلولز را بر مقاومت کششی مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای بررسی کردند. آنها در طی عمل اختلاط با مشکل توده شدن و بهم پیچیدن الیاف مواجه شدند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که الیاف سلولز تاثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت کششی آسفالت SMA ندارند. به عقیده آنها توزیع نامناسب الیاف می تواند در این زمینه نقش داشته باشد. براساس نتایج یک تحقیق دیگر توسط سلیم و همکارانش (Selim, Ramzi and Fouad, 1994) الیاف سلولز باعث افزایش مقاومت کششی و بهبود اثر زیانهای رطوبتی (نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک) آسفالت SMA می گردد.

استوارت و همکارانش (Stuart and Malmquist, 1994) نیز اثر الیاف سلولز بافته نشده و همچنین یک نوع الیاف سلولز ساچمه ای را بر شیار افتادگی و اثر زیانهای رطوبتی آسفالت بررسی کرده و نتیجه گیری کردند که این الیاف باعث افزایش مقاومت آسفالت در برابر شیار افتادگی می گردند. ولی آنها نتوانستند از آزمایشات بررسی اثر زیانهای رطوبتی نتیجه گیری قاطعی انجام دهند.

براساس تحقیقات آنوراگ و همکارانش (Anurag, Xiao and Amirkhanian, 2009) طول الیاف و درصد الیاف هر دو در نتایج آزمایشات کشش غیر مستقیم و اثر زیانهای رطوبتی تاثیر گذارند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های حاوی الیاف پلی استر در حالت خشک کمتر از نمونه های معمولی بوده ولی در حالت اشباع نمونه های حاوی الیاف دارای مقاومت کششی بیشتری نسبت به آسفالت معمولی بوده و در نتیجه عملکرد بهتری در مقابل اثر زیان های رطوبتی دارند.

براساس نتایج آزمایش خزش دینامیکی کالوش و همکارانش (Kaloush and Zeiada)، عدد روانی مخلوط آسفالتی حاوی الیاف پلی پروپیلن و آرامید، پانزده برابر بیشتر از مخلوط

درون قیر و پدیده امولوسیونی شدن قیر مشاهده گردد (Kim, 2009).

هر دو پدیده فوق در نهایت منجر به کاهش مقاومت کششی آسفالت می گردد. بنابراین بهترین روش برای بررسی اثر زیان های رطوبتی بر مخلوط های آسفالتی بررسی مقاومت کششی مخلوط می باشد. چسبندگی بین قیر و سنگدانه در اصل تابع خصوصیات شیمیایی قیر و سنگدانه بوده و افزودن الیاف به آسفالت نمی تواند به این امر کمک نماید ولی الیاف با پخش شدن در لابلای مصالح سنگی و در داخل ملات قیری می توانند خاصیت مسلح کنندگی در مخلوط ایجاد کرده و به عنوان مانعی در برابر تشکیل ترک کششی و همچنین به قفل و بست بهتر مصالح سنگی و انسجام بهتر مخلوط حتی پس از تضعیف اتصال بین قیر و سنگدانه و یا نرم شدن قیر در اثر نفوذ آب کمک نمایند.

مصالح ویسکوالاستیک نظیر مخلوط های آسفالتی علاوه بر رفتار الاستیک از خود رفتار روانی و جاری شدن نیز نشان می دهند. به این نوع تغییر شکل که در اثر بارگذاری ایجاد می شود خزش گفته می شود. خزش به صورت رفتار تغییر شکل وابسته به زمان تعریف می شود. خزش در مخلوط های آسفالتی رایج بوده و در اثر تغییر حجم و متراکم شدن آسفالت و همچنین تغییر شکل های برشی در آسفالت به وجود می آید. شدت تغییر شکل خزشی تابع پارامترهایی نظیر مدت زمان بارگذاری، درجه حرارت، میزان تنش وارده و سختی مخلوط می باشد. الیاف با پخش شدن در داخل مخلوط می توانند به جلوگیری از سر خوردن مصالح سنگی روی یکدیگر و کاهش تغییر شکل برشی مخلوط آسفالتی در اثر لغزیدن مصالح سنگی کمک کنند. همچنین با افزایش سختی ملات قیری و در نتیجه افزایش سختی مخلوط آسفالتی باعث کاهش تغییر شکل خزشی آسفالت گردند. در این تحقیق اثر استفاده از الیاف پلی استر و اکریلیک در مقاومت کششی و عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر زیانهای رطوبتی و همچنین تاثیر این الیاف در خصوصیات شیار افتادگی و تغییر شکل ماندگار مخلوط های آسفالتی با استفاده از آزمایش خزش استاتیکی بررسی گردیده است.

۲- پیشینه تحقیق

در خصوص تاثیر استفاده از الیاف گوناگون بر مقاومت کششی و عملکرد آسفالت در برابر زیان های رطوبتی تحقیقات

۳- مشخصات مواد و مصالح مورد استفاده

۳-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی ریزدانه و درشت دانه مورد استفاده، از نوع سنگ آهکی کوهی می باشد فیلر مورد استفاده نیز از جنس پودر سنگ آهک می باشد. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

۳-۲- قیر

قیر مورد استفاده از نوع قیر خالص ۷۰-۶۰ تولید شرکت نفت پاسارگاد کارخانه قیرسازی تبریز می باشد. نتایج درجه نفوذ، نقطه نرمی، وزن مخصوص، خاصیت انگمی، درصد افت حرارتی با آزمایش لعاب نازک قیر (RFO) و درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی مطابق جدول ۲ می باشد.

معمولی بوده و در نتیجه عملکرد بهتری در مقابل تغییر شکل دائمی و شیارافتادگی دارد. همچنین براساس نتایج آزمایشات خزش دینامیکی با بارگذاری مثلثی شکل کلیوین (Cleven, 2000)، الیاف کربن باعث کاهش کرنش جمعی ماندگار در اثر تکرار بارگذاری می گردد. براساس نتایج تحقیقات انجام شده می توان نتیجه گیری کرد که مخلوط های آسفالتی حاوی الیاف در مواقعی که الیاف به صورت یکنواخت و مناسب در مخلوط توزیع شود عملکرد بهتری نسبت به آسفالت معمولی در برابر زیان های رطوبتی خواهند داشت. ولی در مواقعی که الیاف به صورت یکنواخت و مناسب در مخلوط توزیع نشود می تواند باعث کاهش مقاومت کششی و آسیب پذیر شدن مخلوط در برابر زیان های رطوبتی گردد. نتایج تحقیقات مختلف در زمینه تاثیر استفاده از الیاف بر خصوصیات شیار افتادگی مخلوط های آسفالتی نشان می دهد که مخلوط های حاوی الیاف دارای عدد روانی و سختی خزشی بیشتر هستند که می تواند به عملکرد بهتر مخلوط آسفالتی در برابر شیار افتادگی کمک نماید.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی

مشخصات مصالح	ارزش ماسه ای ASTM D2419	لوس آنجلس ASTM C131	درصد سایش به روش AASTM D4318	خاصیت خمیری ASTM D5821	شکستگی دو وجه ASTM D854	وزن مخصوص ASTM C127, C128 ASTM D854	درصد جذب آب B.S 812	درصد تورق ASTM C88	سولفات سدیم درصد افت در مقابل
مصالح درشت دانه	-	۱۱	-	۹۳	۲/۶۵۵	۰/۷	۱۸	۱	
مصالح ریزدانه	۷۰	-	N.P	-	۲/۶۴۸	۰/۹	-	۱	
فیلر	-	-	N.P	-	۲/۶۹۴	-	-	-	

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده

نتایج	آزمایشات قیرهای خالص	
	روش آزمایش	ASTM
۱/۰۱۸	D70	وزن مخصوص در ۱۵ °C
۶۸	D5	درجه نفوذ در ۲۵ °C (۱۰۰ گرم - ۵ ثانیه) بر حسب ۰/۱ میلیمتر
۴۹/۴	D36	نقطه نرمی (ساجمه - حلقه) بر حسب درجه سانتیگراد
۱۴۰	D113	مقدار کشش در ۲۵ °C بر حسب سانتیمتر
۹۹/۸	D2042	حلالیت در تری کلرواتیلن بر حسب درصد
۲۹۹	D92	درجه اشتعال (روپاز - کلولند) بر حسب درجه سانتیگراد
۰/۰۲۵	D1754	افت حرارتی به درصد آزمایش لعاب نازک قیر (۱۶۳ °C - پنج ساعت)
۶۴	-	درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی بر حسب ۰/۱ میلیمتر
۹۴	-	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه

۳-۳- الیاف

الیاف مورد استفاده، دو نوع الیاف پلی استر به طول ۳۸ میلیمتر و اکریلیک به طول ۱۲۰ میلیمتر ساخت شرکت پلی اکریل می باشد. مشخصات الیاف مورد استفاده در جدول ۳ ارائه گردیده است.

۴- برنامه آزمایشگاهی

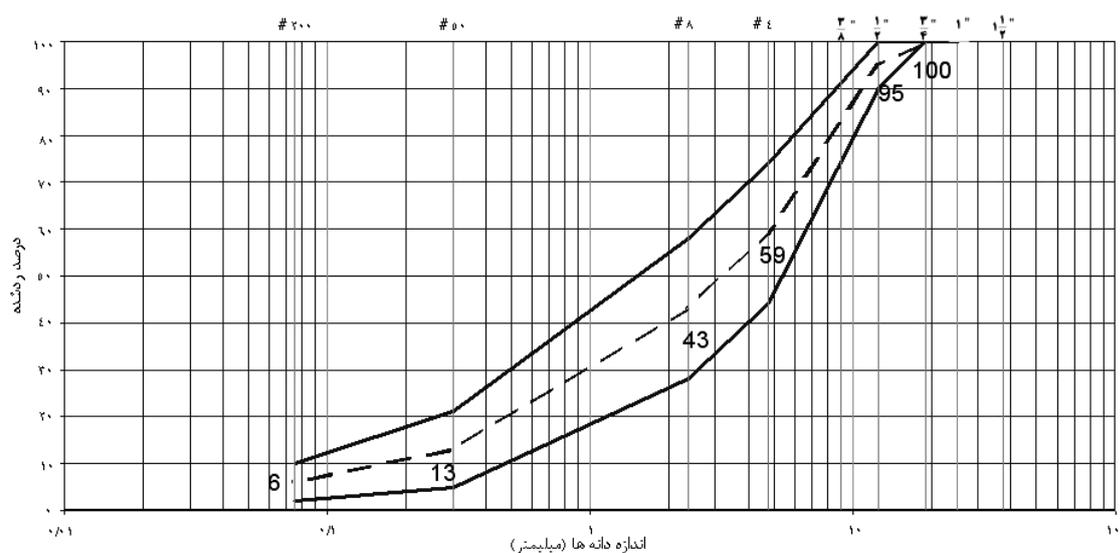
در این تحقیق برای بررسی تاثیر استفاده از الیاف پلی استر و اکریلیک بر خصوصیات تغییر شکل ماندگار مخلوط آسفالتی از آزمایش خزش استاتیکی مطابق استاندارد BS-598 Part 111 و برای بررسی عملکرد مخلوط در برابر اثر زیان های رطوبتی از آزمایش کشش غیر مستقیم مطابق استاندارد ASTM-D4867 استفاده گردیده است. آزمایش خزش در دو دمای 20°C و 45°C انجام گردید. متغیرهای اصلی برای بررسی اثر زیان های رطوبتی درصد قیر، درصد الیاف و نوع الیاف و متغیرهای اصلی برای آزمایش خزش درصد قیر، درصد الیاف، نوع الیاف و دمای آزمایش می باشد.

۴-۱- ساخت نمونه های آزمایشگاهی

ابتدا مصالح سنگی و فیلر به گونه ای با هم ترکیب شد تا دانه بندی مخلوط مصالح سنگی به میانگین حدود مشخصات دانه بندی شماره D5 استاندارد ASTM-D3515 با حداکثر اندازه دانه ۱۹ میلیمتر نزدیک باشد. این دانه بندی یکی از دانه بندی های رایج برای قشرهای بیندر و توپکا در کشور ایران می باشد. درصد قیر بهینه برای مصالح سنگی مورد استفاده براساس طرح اختلاط موجود ۴/۵ درصد نسبت به وزن مخلوط آسفالتی بود. برای مخلوط های حاوی الیاف پس از بررسی پارامترهای حجمی آسفالت میزان قیر مناسب حدود ۵/۵ درصد تشخیص داده شد. در نتیجه آزمایشهای کشش غیر مستقیم و خزش در درصد قیر ۵/۵ درصد انجام شد. همچنین برای بررسی تاثیر میزان قیر در نتایج آزمایشات تصمیم گرفته شد برای هر آزمایش یک نمونه با درصد ثابت الیاف (۳/۰ درصد) در درصد قیر پایین تر (۴/۵ درصد) و یک نمونه در درصد قیر بالاتر (۶/۵ درصد) تهیه شده و مورد آزمایش قرار گیرد.

جدول ۳. مشخصات الیاف مورد استفاده

نوع الیاف	طول (mm)	ظرافت (dtex)	مقاومت کششی g/dtex	نقطه ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	وزن مخصوص
پلی استر	۳۸	۱/۴	۵	۲۶۰	۱/۳۶ - ۱/۳۸
اکریلیک	۱۲۰	۸/۲	۲/۲	۲۵۰	۱/۱۴ - ۱/۱۸



شکل ۱. توزیع دانه بندی مخلوط مصالح سنگی

استاندارد ASTM-D4867 استفاده گردید. نمونه‌های تهیه شده به دو گروه تقسیم گردید. یک گروه با قرارگیری در آب و با استفاده از پمپ خلاء به میزان ۵۵ الی ۸۰ درصد فضای خالیشان اشباع شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب 60°C قرار گرفته و سپس قبل از تعیین مقاومت کششی به مدت یکساعت در حمام آب 25°C قرار گرفتند. گروه دیگر نیز به صورت بدون اشباع شدن و پس از ۳۰ دقیقه قرار گیری در حمام آب 25°C مورد آزمایش قرار گرفتند. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$S_t = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (1)$$

که در آن S_t مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلو پاسکال، P حداکثر بار وارده بر حسب نیوتن، D قطر نمونه بر حسب میلیمتر و t ضخامت نمونه بر حسب میلیمتر می‌باشد. سپس نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اشباع شده و عمل آوری شده به مقاومت کششی نمونه‌های خشک (TSR) که ملاکی برای ارزیابی اثر زیان‌های رطوبتی می‌باشد محاسبه گردید. نتایج آزمایشات کشش غیر مستقیم در جداول ۴ و ۵ آورده شده است.

برای بررسی اثر الیاف در درصد‌های مربوطه، میزان استفاده از الیاف ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزن مخلوط انتخاب گردید. باتوجه به تحقیقات مختلف انجام شده توسط سایر محققان نیز میزان استفاده از الیاف عموماً بین ۰/۲ تا ۰/۸ درصد وزن مخلوط آسفالتی می‌باشد. نحوه اضافه کردن الیاف به آسفالت اهمیت خاصی داشت. جهت اطمینان از توزیع یکنواخت الیاف در مخلوط، روش‌های مختلفی بررسی گردید. مشخص گردید که اگر الیاف در آخرین مرحله اختلاط افزوده شده و در حداقل زمان ممکن مخلوط شود، از گلوله شدن الیاف جلوگیری می‌شود. در نتیجه الیاف در آخرین مرحله اختلاط و پس از افزوده شدن قیر به مصالح سنگی و اندود شدن کامل مصالح سنگی با قیر به مخلوط اضافه شد.

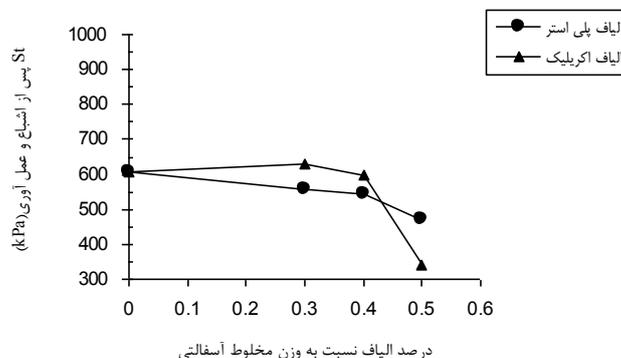
نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تراکم مارشال و با تنظیم تعداد ضربات طوری ساخته شدند که درصد فضای خالی آنها مشابه آسفالت در محل یعنی بین ۶ تا ۸ درصد باشد.

۴-۲- آزمایش کشش غیر مستقیم و بررسی اثر زیان‌های رطوبتی

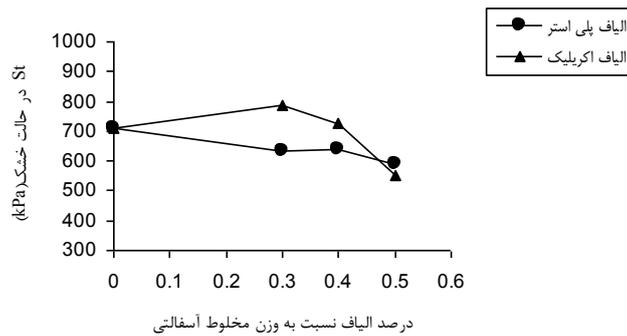
در این تحقیق برای بررسی اثر زیان‌های رطوبتی بر مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف پلی استر و اکریلیک از روش

جدول ۴. نتایج آزمایشات کشش غیر مستقیم در درصد قیر ۵/۵ درصد

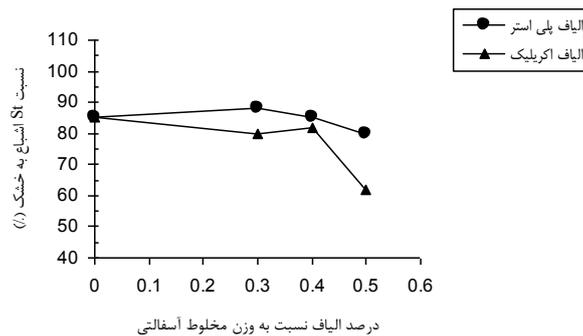
نوع الیاف درصد الیاف	الیاف پلی استر			الیاف اکریلیک		
	S_t (kpa) خشک	S_t (kpa) اشباع	TSR (%)	S_t (kpa) خشک	S_t (kpa) اشباع	TSR (%)
۰	۷۱۰	۶۰۶	۸۵	۷۱۰	۶۰۶	۸۵
۰/۳	۶۳۵	۵۵۶	۸۸	۷۸۸	۶۲۸	۸۰
۰/۴	۶۳۹	۵۴۵	۸۵	۷۲۷	۵۹۶	۸۲
۰/۵	۵۹۲	۴۷۲	۸۰	۵۵۳	۳۴۱	۶۲



شکل ۲. نمودار تغییرات S_t اشباع نسبت به درصد الیاف در درصد قیر ۵/۵ درصد



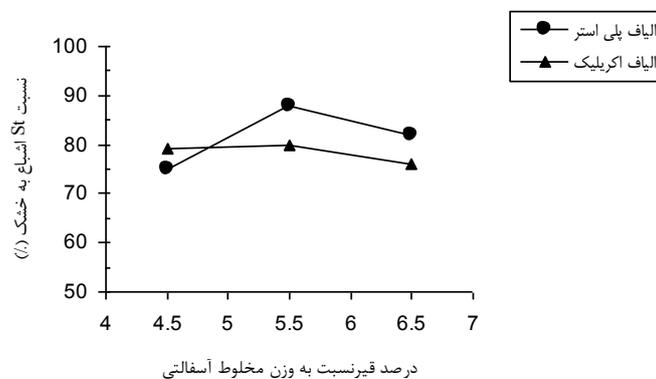
شکل ۳. نمودار تغییرات S_t خشک نسبت به درصد الیاف در درصد قیر ۵/۵



شکل ۴. نمودار تغییرات نسبت S_t اشباع به خشک با تغییرات درصد الیاف در درصد قیر ۵/۵

جدول ۵. نتایج آزمایشات کشش غیر مستقیم به ازای درصدهای مختلف قیر برای مخلوط‌های با ۰/۳ درصد الیاف

نوع الیاف	درصد قیر	S_t (kpa) خشک	S_t (kpa) اشباع	نسبت S_t اشباع به خشک (%) TSR
پلی استر	۴/۵	۴۷۷	۳۷۹	۷۹
	۵/۵	۶۳۵	۵۵۶	۸۸
	۶/۵	۵۱۱	۴۱۷	۸۲
اکریلیک	۴/۵	۷۳۵	۵۸۴	۷۹
	۵/۵	۷۸۸	۶۲۸	۸۰
	۶/۵	۵۴۹	۴۱۸	۷۶



شکل ۵. نمودار تغییرات نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع به خشک نسبت به تغییرات درصد قیر برای مخلوط آسفالتی با ۰/۳ درصد الیاف

$$R_d = C_m \times H_0 \times \frac{\sigma_{av}}{S_m} \quad (۳)$$

که R_d عمق شیار تخمینی بر حسب میلیمتر، C_m ضریبی بین ۱ و ۲ که مربوط به تاثیر دینامیکی بار می باشد، H_0 ضخامت اولیه لایه آسفالتی بر حسب میلیمتر، σ_{av} تنش متوسط وارد به روسازی بر حسب مگاپاسکال و S_m مدول سختی خزشی مخلوط بر حسب مگاپاسکال می باشد.

آزمایش در دو دمای ۴۵°C و دمای محیط (۲۰°C) انجام شد. برای آزمایش در دمای ۴۵°C نمونه ها به مدت ۱۲ ساعت در اون با دمای ۴۵°C قرار گرفته و در هنگام آزمایش نیز برای جلوگیری از افت دمای نمونه ها از یک وسیله گرمایشی تابشی استفاده گردید. در حین آزمایش دمای نمونه با استفاده از یک نمونه کنترلی مشابه که در مرکز آن سوراخی ایجاد شده و یک داماسنج در داخل آن قرار داده شده بود کنترل گردید.

نمونه به مدت یکساعت با سطح تنش ۱ kg/cm^2 (۹۸ kPa) تحت بارگذاری قرار گرفته و تغییر شکل قائم نمونه در بازه های زمانی مشخص اندازه گیری شد. سپس بار از روی نمونه برداشته شده و در مدت زمان یک ساعت، تغییر شکل بازگشتی نمونه در بازه های زمانی مشخص اندازه گیری شد. نتایج آزمایشهای خزش استاتیکی در جداول ۶ و ۷ آورده شده است.

۴-۳- آزمایش خزش استاتیکی

در حال حاضر برای بررسی رفتار تغییر شکل مخلوط های آسفالتی آزمایشهای گوناگونی وجود دارد. در این تحقیق برای بررسی پتانسیل شیار افتادگی مخلوط های آسفالتی حاوی الیاف آزمایش خزش استاتیکی مطابق استاندارد BS-598 Part 111 انجام گردید. اساس آزمایش خزش استاتیکی اعمال و تداوم یک بار استاتیکی یکنواخت و ثابت به نمونه و اندازه گیری تغییر شکل ایجاد شده به صورت تابعی از زمان می باشد. سختی خزشی مخلوط را با استفاده از رابطه ۲ می توان محاسبه کرد.

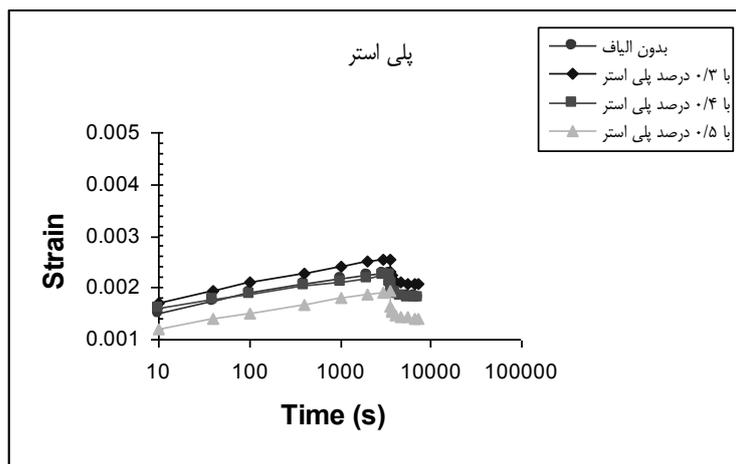
$$S_m = \frac{\sigma}{\epsilon_{(t,T)}} \quad (۲)$$

که در آن S_m سختی خزشی مخلوط به مگاپاسکال، σ تنش اعمال شده به مگاپاسکال و $\epsilon_{(t,T)}$ کرنش به وجود آمده پس از t ثانیه بارگذاری در دمای T درجه سانتی گراد می باشد.

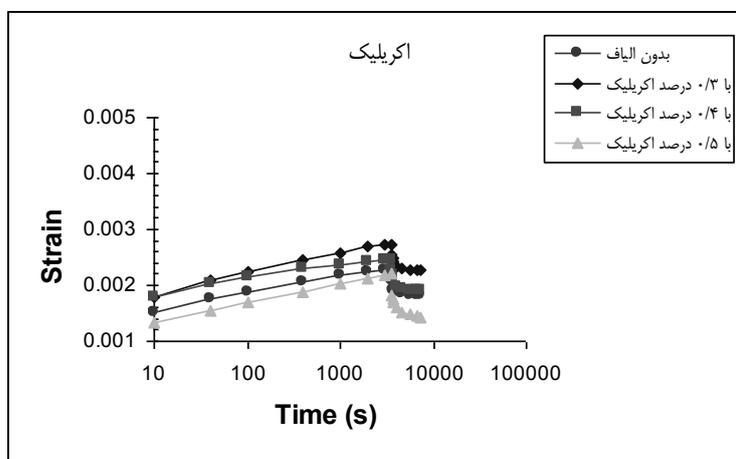
محققانی از کمپانی شل از جمله وان دلوو همکارانش [Van de Loo, 1974] مطالعات زیادی درخصوص استفاده از نتایج آزمایش خزش استاتیکی تک محوره محدود نشده برای پیشگویی عمق شیار در بتن آسفالتی انجام داده اند. براساس رابطه پیشنهادی آنها با استفاده از مدول سختی محاسبه شده از آزمایش خزش استاتیکی، عمق شیار در روسازی آسفالتی را می توان با استفاده از رابطه ۳ تخمین زد.

جدول ۶. نتایج آزمایشات خزش استاتیکی در درصد قیر ۵/۵ درصد

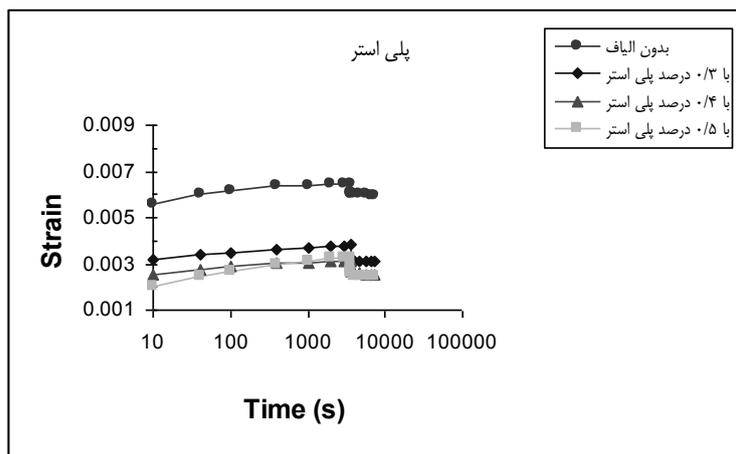
نوع الیاف	دمای آزمایش	دمای ۲۰°C					دمای ۴۵°C				
		کرنش	کرنش	کرنش	درصد	مدول سختی	کرنش	کرنش	کرنش	درصد	مدول سختی
		تجمعی پس از یکساعت بارگذاری (%)	ماندگار پس از یکساعت باربرداری (%)	بازگشت پذیر پس از یکساعت باربرداری (%)	بازگشت پذیر نسبت به کرنش اولیه (%)	خزشی مخلوط پس از یکساعت بارگذاری (MPa)	تجمعی پس از یکساعت بارگذاری (%)	ماندگار پس از یکساعت باربرداری (%)	بازگشت پذیر پس از یکساعت باربرداری (%)	بازگشت پذیر نسبت به کرنش اولیه (%)	خزشی مخلوط پس از یکساعت بارگذاری (MPa)
پلی استر	۰	۲/۲۸	۱/۸۲	۰/۴۶	۲۰	۴۴	۶/۴۶	۵/۹۷	۰/۴۹	۸	۱۶
	۰/۳	۲/۵۸	۲/۰۷	۰/۵۱	۲۰	۳۸	۳/۸۲	۳/۰۸	۰/۷۴	۱۹	۲۶
	۰/۴	۲/۲۵	۱/۸۰	۰/۴۵	۲۰	۴۴	۳/۱۱	۲/۵۳	۰/۵۸	۱۹	۳۲
	۰/۵	۱/۹۴	۱/۳۹	۰/۵۵	۲۸	۵۰	۳/۲۸	۲/۴۶	۰/۸۲	۲۵	۳۰
اکریلیک	۰	۲/۲۸	۱/۸۲	۰/۴۶	۲۰	۴۴	۶/۴۶	۵/۹۷	۰/۴۹	۸	۱۶
	۰/۳	۲/۷۵	۲/۲۷	۰/۴۸	۱۸	۳۶	۵/۵۱	۴/۸۳	۰/۶۸	۱۲	۱۸
	۰/۴	۲/۴۷	۱/۹۱	۰/۵۶	۲۳	۴۰	۴/۸۶	۴/۰۵	۰/۸۱	۱۷	۲۰
	۰/۵	۲/۲۰	۱/۴۳	۰/۷۷	۳۵	۴۴	۳/۷۲	۲/۷۲	۱/۰۰	۲۷	۲۶



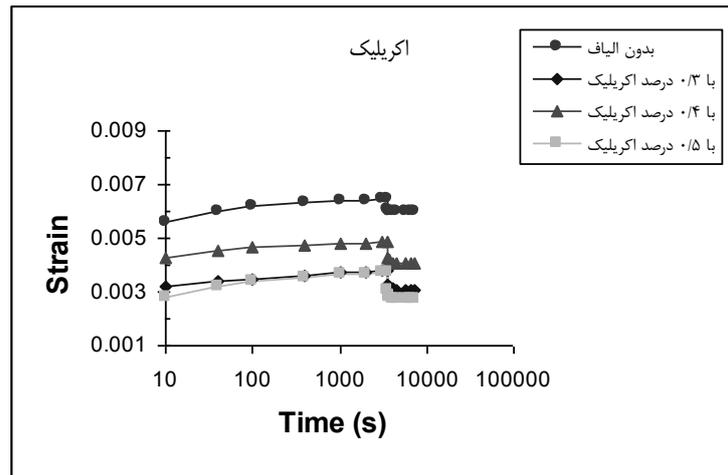
شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای کرنش- زمان در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های با درصد‌های مختلف الیاف پلی‌استر



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای کرنش- زمان در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های با درصد‌های مختلف الیاف اکریلیک



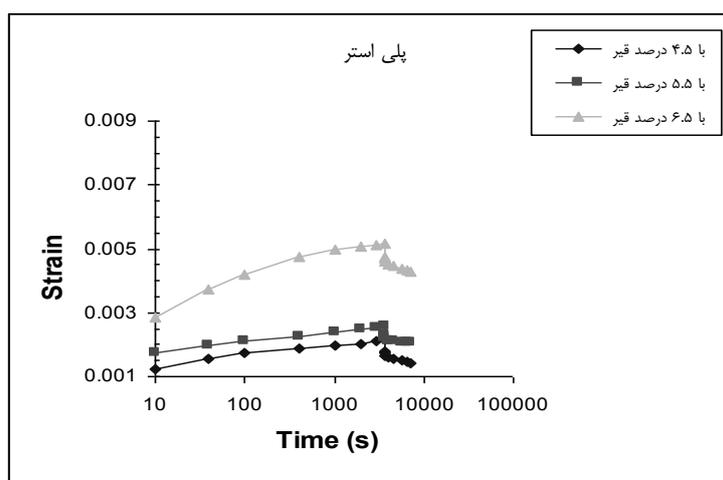
شکل ۸. نمودار مقایسه‌ای کرنش- زمان در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های با درصد‌های مختلف الیاف پلی‌استر



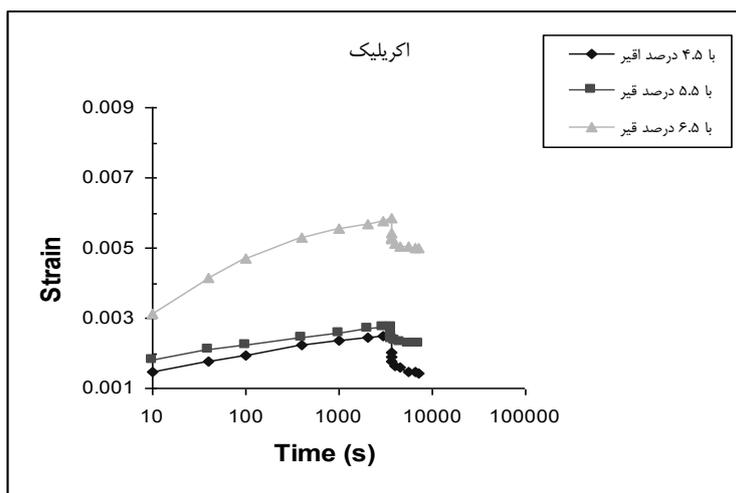
شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای کرنش - زمان در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های با درصد‌های مختلف الیاف اکریلیک

جدول ۷. نتایج آزمایش خزش استاتیکی برای مخلوط‌های با ۰/۳ درصد الیاف به ازای درصد‌های مختلف قیر

نوع الیاف	درصد قیر	دمای آزمایش ۲۰ °C				
		کرنش تجمعی پس از یکساعت بارگذاری (%)	کرنش ماندگار پس از یکساعت باربرداری (%)	کرنش بازگشت پذیر پس از یک ساعت باربرداری (%)	درصد کرنش بازگشت پذیر نسبت به کرنش اولیه (%)	مدول سختی خزشی مخلوط پس از یکساعت بارگذاری (MPa)
پلی استر	۴/۵	۲/۱۶	۱/۵۹	۰/۵۷	۲۶	۴۶
	۵/۵	۲/۵۸	۲/۰۷	۰/۵۱	۲۰	۳۸
	۶/۵	۵/۱۷	۴/۷۳	۰/۴۴	۹	۱۸
اکریلیک	۴/۵	۲/۵۰	۱/۹۴	۰/۵۶	۲۲	۴۰
	۵/۵	۲/۷۵	۲/۲۷	۰/۴۸	۱۷	۳۶
	۶/۵	۵/۸۵	۵/۴۰	۰/۴۵	۸	۱۶



شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای کرنش - زمان در دمای ۲۰ °C برای مخلوط آسفالتی با ۰/۳ درصد الیاف پلی استر در درصد‌های مختلف قیر



شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ای کرنش- زمان در دمای 20°C برای مخلوط آسفالتی با ۰/۳ درصد الیاف اکریلیک در درصدهای مختلف قیر

می‌شود مقاومت کششی در حالت اشباع افت بیشتری نسبت به حالت خشک داشته باشد. به نظر می‌رسد طول بلندتر الیاف باعث ایجاد فضاهای خالی مرتبط و بهم پیوسته در مخلوط می‌گردد که باعث می‌شود رطوبت راحت‌تر و بیشتر به عمق مخلوط نفوذ کرده و آسیب بیشتری به مخلوط آسفالتی وارد کند. در نتیجه می‌توان گفت که افزودن الیاف اکریلیک به طول ۱۲۰ میلی‌متر علیرغم افزایش مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع باعث تضعیف مخلوط در برابر زیان‌های رطوبتی می‌گردد و افزودن الیاف پلی‌استر با طول ۳۸ میلی‌متر علیرغم کاهش مقاومت کششی خشک و اشباع می‌تواند باعث افزایش دوام مخلوط آسفالتی در برابر زیان‌های رطوبتی گردد.

۵-۲- نتایج آزمایش خزش استاتیکی

باتوجه به نتایج آزمایش خزش در دو دمای 20°C و 45°C مشاهده می‌شود که در دمای 20°C افزودن الیاف پلی‌استر و اکریلیک به میزان ۰/۳ درصد وزن مخلوط آسفالتی تاثیر مثبتی در بهبود خصوصیات شیار افتادگی آن نداشته و حتی اندکی باعث افزایش کرنش پس از یک ساعت بارگذاری و کرنش ماندگار پس از یک ساعت باربرداری می‌گردد. باتوجه به اینکه افزودن الیاف تا اندازه‌ای باعث افزایش فضای خالی مخلوط می‌شود و از آنجائی‌که یکی از پارامترهای موثر بر رفتار خزش مخلوط‌های آسفالتی درصد فضای خالی مخلوط است، این امر کاملاً منطقی بنظر می‌رسد. ولی با افزایش میزان الیاف تا ۰/۴ درصد وزن مخلوط، افزایش میزان الیاف، ضعف ناشی از افزایش فضای خالی مخلوط را جبران کرده و مشخصات

۵- ارزیابی و تحلیل نتایج

۵-۱- نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم

همانطور که از نتایج به دست آمده مشاهده می‌گردد، افزودن الیاف پلی‌استر با طول ۳۸ میلی‌متر باعث کاهش مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع می‌گردد. علت این امر توزیع نشدن یکنواخت الیاف در مخلوط و گلوله شدن الیاف هنگام عمل اختلاط می‌باشد. این امر می‌تواند باعث تولید مخلوط غیر یکنواخت گردد. در نتیجه تنش وارد شده به آن به صورت غیر یکنواخت توزیع شده و مقاومت کششی کاهش می‌یابد. ولی از طرفی پس از نرم شدن و امولسیون شدن قیر در اثر نفوذ آب، وجود این الیاف در مخلوط باعث جلوگیری از گسیختگی آسفالت شده و علیرغم توزیع غیر یکنواخت تنش در مخلوط، از افت زیاد مقاومت کششی در حالت اشباع نسبت به حالت خشک جلوگیری کرده و مخلوط عملکرد بهتری در مقابل زیان‌های رطوبتی داشته باشد.

افزودن الیاف اکریلیک به طول ۱۲۰ میلی‌متر تا میزان ۰/۳ درصد وزن مخلوط باعث افزایش مقاومت کششی در حالت خشک و تا میزان ۰/۴ درصد وزن مخلوط باعث افزایش مقاومت کششی در حالت اشباع می‌گردد و مقادیر بیشتر الیاف باعث کاهش مقاومت کششی خشک و اشباع می‌گردد. با توجه به طول بلندتر این الیاف، اختلاط و توزیع یکنواخت آنها در مخلوط مشکل‌تر است ولی از طرفی به دلیل طول مهارتی زیاد الیاف در داخل مخلوط و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک الیاف در داخل مخلوط، این ضعف جبران شده و مقاومت کششی افزایش پیدا می‌کند. ولی افزودن الیاف اکریلیک باعث

شیار افتادگی و کاهش تغییر شکل ماندگار آن می‌گردد. در دمای بالاتر که قیر نرم‌تر می‌گردد تاثیر الیاف قابل ملاحظه‌تر است.

۴. باتوجه به اینکه استفاده از الیاف با درصدهای مختلف علیرغم بهبود برخی مشخصات عملکردی مخلوط ممکن است باعث کاهش سایر خصوصیات عملکردی آن شود، بایستی با توجه به سایر خصوصیات عملکردی مورد انتظار (از قبیل خصوصیات خستگی یا مقاومت در برابر ترکهای حرارتی و ...) میزان بهینه‌ای جهت استفاده از آن مشخص گردد.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Adhesion
- 2- Cohesion
- 3- Stone Mastic Asphalt

مراجع

- Anurag, K., Xiao, F., & Amir Khanian, S. N. (2009) "Laboratory investigation of indirect tensile strength using roofing polyester waste fibers in hot mix asphalt." *Journal of Construction and Building Materials* 23.
- ASTM (1997), Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures, D4867 (2004), Annual Books of ASTM Standards, Section 4, Vol.04.03, Road Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems.
- ASTM (1997), Standard Specification for Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures, D3515 (2001), Annual Books of ASTM Standards, Section 4, Vol.04.03, Road Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems.
- British Standards Institution (1995), Method for determination of resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subject to unconfined uniaxial loading, 598 Part 111.
- Cleven, M. A. (2000). Investigation of properties of carbon fiber modified asphalt mixtures. Master of science dissertation, dep. civil and environmental engineering, Michigan technological university.
- Huang, Y. H. (2004) *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed. USA: Pearson Education Press.
- Kaloush, K. E., & Zeiada, W. A. (n.d). Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization tests.

خزشی مخلوط تا حد زیادی به مشخصات مخلوط بدون الیاف (علیرغم فضای خالی بیشتر مخلوط) نزدیک می‌شود. با افزایش میزان الیاف تا ۰/۵ درصد وزن مخلوط آسفالتی خصوصیات شیار افتادگی مخلوط تا اندازه‌ای بهبود می‌یابد. ولی در دمای 45°C که تقریباً نزدیک نقطه نرمی قیر بوده و قیر نرم‌تر می‌باشد، در تمامی درصدهای الیاف خصوصیات شیار افتادگی مخلوط بطور قابل توجهی بهبود نشان می‌دهد. به طوری که در درصد الیاف ۰/۵ درصد مدول سختی مخلوط تقریباً به دو برابر مدول سختی مخلوط بدون الیاف می‌رسد.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که افزودن الیاف پلی استر و اکریلیک به مخلوط آسفالتی باعث تقویت جزء الاستیک مخلوط آسفالتی می‌گردد. در دمای متوسط (20°C) که سهم جزء الاستیک مخلوط بیشتر از سهم جزء ویسکوز است، این تاثیر چندان قابل ملاحظه نیست ولی در دمای بالاتر (45°C) که رفتار مخلوط آسفالتی به حالت ویسکوز تمایل بیشتری پیدا می‌کند، این تاثیر قابل توجه‌تر است. در نتیجه افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی در دمای بالا باعث افزایش میزان کرنش بازگشت پذیر (الاستیک) و کاهش کرنش ماندگار (پلاستیک) که عامل اصلی ایجاد خرابی شیار افتادگی است، می‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

- باتوجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، نتیجه‌گیری‌های زیر را می‌توان انجام داد:
۱. افزودن الیاف پلی استر به طول ۳۸ میلیمتر تا میزان ۰/۴ درصد وزن مخلوط آسفالتی بدلیل توزیع نشدن یکنواخت الیاف باعث کاهش مقاومت کششی در حالت‌های خشک و اشباع شده ولی از طرفی باعث بهبود عملکرد مخلوط در مقابل زیانهای رطوبتی می‌گردد.
 ۲. افزودن الیاف اکریلیک با طول ۱۲۰ میلیمتر به هر میزان بدلیل طول مهاری زیاد الیاف در داخل مخلوط و افزایش نیروی اصطکاک الیاف، علیرغم افزایش مقاومت کششی در حالت‌های خشک و اشباع، بدلیل ایجاد فضاهای خالی مرتبط و بهم پیوسته باعث آسیب پذیر شدن مخلوط در برابر زیانهای رطوبتی می‌گردد.
 ۳. افزودن هر دو نوع الیاف پلی استر و اکریلیک به مخلوط آسفالتی باعث تقویت رفتار الاستیک مخلوط آسفالتی شده و در نتیجه باعث افزایش مدول سختی مخلوط، کاهش پتانسیل

- Materials Engineering Conference 804 Oct 1994, ASCE pp. 88-96.
- Stuart, Kevin D.; Peter Malmquist. (1994) "Evaluation of using different stabilizers in the U.S. route 15 (Maryland) stone matrix asphalt" Transportation Research Record n.1454 pp. 48-57.
 - Van de Loo, R.J. (1974). Creep testing, a simple tool to judge asphalt stability. Proc. A.A.P.T., Vol. 43.
 - Zube E. (1956). Wire mesh reinforcement in bituminous resurfacing. (Highway Research Record, Bulletin No.131, pp 1-18).
 - Kim, Y. R. (2009). Modeling of asphalt concrete (pp. 391). USA: Mc Graw Hill Press.
 - Partl, M.N.; T.S. Vinson, R.G. Hicks. (1994). "Mechanical properties of stone mastic asphalt" Proceedings of the Third Materials Engineering Conference 804 Oct 1994, ASCE pp. 849-858.
 - Selim, Ali A.; Ramzi Taha, Fouad Bayomy. (1994) "Laboratory performance of quartzite based Stone Matrix Asphalt Mixtures (SMAM)" Proceedings of the Third Materials Engineering Conference 804 Oct 1994, ASCE pp. 635-642.
 - Simpson, Amy L.; Kamyar C. Mahboub. (1994) "Case study of modified bituminous mixtures: Somerset, Kentucky" Proceedings of the Third