

بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کربن و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی

حسن طاهرخانی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

بابک کاظمی ثانی فریمانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

E-mail: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

چکیده:

مخلوط‌های آسفالتی قشر نهایی روسازی‌های انعطاف پذیر بوده و تحت تاثیر مستقیم آثار مخرب شرایط جوی و تنش‌های ناشی از بارگذاری ترافیک هستند. بنابراین، استفاده از یک عامل مسلح کننده جهت بهبود مشخصات مکانیکی و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی امری منطقی به نظر می‌رسد. در این تحقیق، اثر دو نوع الیاف کربن و نایلون، بر روی مشخصات یک نوع بتن آسفالتی بررسی شده است. الیاف مذکور در سه مقدار مختلف (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزن کل آسفالت) و در سه طول (۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلیمتر) مورد استفاده قرار گرفته و خصوصیات استقامت مارشال، روانی، مقاومت کششی غیرمستقیم، آسیب رطوبتی و خزش استاتیکی آنها مورد بررسی قرار گرفته و برای دو نوع الیاف با هم مقایسه شده اند. بر اساس نتایج آزمایش مارشال، استقامت مارشال و روانی ترکیب‌های حاوی الیاف کربن و نایلون در مقدار ۰/۳ تا ۰/۴ درصد از الیاف با طول ۲۵ میلیمتر، بینه اند. همچنین، تمامی ترکیبات حاوی الیاف دارای استقامت مارشالی بزرگ تر و روانی کمتر از نمونه شاهد بدون الیاف اند. نتایج آزمایش های مقاومت کششی غیر مستقیم نشان دهنده این است که مقاومت کششی غیرمستقیم بتن آسفالتی مسلح شده با الیاف، در اغلب مقادیر الیاف و طولهای مختلف آنها، کمتر از نمونه شاهد بدون الیاف است. در بررسی آسیب‌های رطوبتی مخلوط‌های حاوی الیاف مشاهده می شود که الیاف کربن عملکرد بهتری نسبت به الیاف نایلون دارند. کمترین آسیب رطوبتی در مخلوط حاوی ۰/۴ درصد وزنی الیاف کربن با طول ۱۰ میلی‌متر مشاهده شد. افزایش درصد وزنی و طول الیاف، موجب افزایش آسیب رطوبتی در مخلوط می شود. همچنین نتایج نشان می دهند که استفاده از الیاف موجب کاهش کرنش ماندگار در دمای محیط می شود؛ به طوری که کمترین مقدار کرنش ماندگار در مخلوط حاوی ۰/۵ درصد الیاف کربن با طول ۱۰ میلی‌متر مشاهده می شود

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، الیاف، آسیب رطوبتی، پتانسیل شیارشدگی

۱. مقدمه

این نوع خرابی باعث بروز مشکلاتی برای استفاده کنندگان از راه، پایین آمدن کیفیت راه و کیفیت رانندگی و همچنین جمع شدن آب در آنها و ایجاد پدیده هیدروپلانینگ و در نتیجه کاهش سطح ایمنی راه می‌شود. الیاف به صورت المانهای مجزا در بتن آسفالتی پراکنده شده و برای اصلاح خواص آن به کار می‌روند. در ادبیات فنی موضوع، نتایج تحقیقات مختلف در مورد اثر انواع الیاف بر روی خصوصیات مختلف بتن آسفالتی ارائه گردیده است. با این حال، مطالعه کافی در مورد اثر طول و مقدار الیاف به طور همزمان بر روی خصوصیات عملکردی بتن آسفالتی انجام نشده است. با توجه به اهمیت ویژگی های مقاومت کششی، آسیب رطوبتی، مقاومت در مقابل تغییر شکل و سختی، در این تحقیق، اثر مقدار و طول دو نوع الیاف مختلف بر روی این ویژگی های بتن آسفالتی بررسی شده و با هم مقایسه گردیده است. با ثابت نگه داشتن نوع مصالح سنگی، دانه بندی و قیر، از الیاف در درصدهای وزنی و طولهای مختلف استفاده شده است.

۲. پیشینه تحقیقات

یکی از روشهای بهبود عملکرد بتن آسفالتی مسلح کردن آنها با استفاده از انواع مختلف مواد است که در چند دهه اخیر توسط محققین و مهندسين بکار گرفته شده است. مسلح سازی شامل قرار دادن موادی خاص با ویژگی های مورد نظر در داخل ماده ای دیگر است که فاقد آن ویژگی ها هستند [Maurer Dean and Gerald, 1989]. یکی از روشهای مسلح سازی، استفاده از الیاف در داخل بتن آسفالتی است که به دو صورت توزیع تصادفی در آن و یا استفاده از مواد الیافی جهت دار مانند خانواده ژئوسنتتیکها انجام می شود. قرار دادن الیاف در بتن آسفالتی سنگدانه ها را به هم متصل کرده و می تواند باعث افزایش مقاومت کششی آن شود. این اتصال به مصالح اجازه خواهد داد تا انرژی بیشتری را قبل از بروز شکست تحمل کنند. استفاده از الیاف برای مسلح سازی به دهه ۱۹۵۰ میلادی باز می گردد. زوب^۱ اولین تحقیقات را در مورد مسلح سازی آسفالت انجام داد. پژوهش او برای ارزیابی تاثیر قرار دادن انواع مختلف شبکه های سیمی در زیر لایه

عمده راه های موجود در دنیا و همچنین ایران، راه های با روسازی انعطاف پذیر اند. در این نوع روسازیهها، معمولا از بتن آسفالتی به عنوان رویه استفاده می شود. بتن آسفالتی ماده ای حساس بوده و در اثر عوامل مختلف محیطی و بارگذاری ترافیک انواع خرابیها با مکانیزمهای گوناگون در آن گسترش می یابند. با توجه به افزایش قیمت این مصالح در چند سال اخیر، ملاحظات زیست محیطی و کمبود منابع تامین مصالح، افزایش عمر این مصالح با افزایش مقاومت آنها در برابر انواع خرابیها مورد توجه مهندسين و محققین قرار گرفته، و در چند دهه اخیر تلاش های بسیاری برای بهبود مشخصات و عملکرد این مصالح صورت گرفته است. از جمله این تلاش ها بهبود روشهای طرح اختلاط، اصلاح قیر با روش های مختلف نظیر استفاده از پلیمرها و استفاده از الیاف جهت مسلح کردن آسفالت و بهبود مشخصات آنها است. استفاده از هر روشی برای اصلاح خصوصیات بتن آسفالتی، با ارزیابی اثر آن بر مشخصات عملکردی بتن آسفالتی و مقاومت آن در مقابل انواع خرابی ها همراه است. از جمله خرابی های مهم رویه های آسفالتی می توان به ترکهای خستگی، تغییر شکل ماندگار یا شیار افتادگی، ترک های انقباضی ناشی از تغییر درجه حرارت، جدایی قیر از سنگدانه در اثر تأثیر رطوبت اشاره کرد. مقاومت در برابر ترک خوردگی خستگی و حرارتی به مقاومت کششی آسفالت ارتباط می یابد. آسیب رطوبتی در بتن آسفالتی، معمولا در مناطق با میزان بارندگی زیاد و به علت تاثیر رطوبت اتفاق می افتد. این پدیده به دو صورت موجب خرابی آسفالت می شود. اول با جدا شدن اتصال بین قیر و سنگدانه مقاومت کششی آسفالت کاهش می یابد و دیگر اینکه با نفوذ رطوبت به داخل ملات قیری و نرم شدن قیر در اثر امولسیون شدن، ساختار آسفالت ضعیف شده و مقاومت کششی آن کاهش می یابد. تغییر شکل ماندگار مصالح آسفالتی عامل اصلی خرابی شیارشدگی در روسازی آسفالتی است. تغییر شکل ماندگار در اثر اعمال بارهای سنگین ترافیک و در شرایط دمایی بالا، به دلیل رفتار ویسکوپلاستیک آسفالت ایجاد می شود.

بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کربن و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی

Sahhaf, 2000]. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داد که الیاف به مقدار جزئی مقاومت کششی را کاهش داد، ولی طاقت مخلوط‌های آسفالتی به میزان قابل توجهی افزایش یافت. در پژوهشی توسط میرزائی و نصراللهی (۱۳۸۸)، مشاهده شد که حداکثر مقاومت کششی در حالت خشک مخلوط‌های آسفالتی دارای الیاف پلی استر ضایعاتی از مخلوط شاهد ۱۷/۶ الی ۲۲/۷ درصد کمتر است و با افزایش درصد الیاف مقاومت کششی در حالت خشک کاهش می‌یابد. جنگ و همکارانش آزمایش کشش غیرمستقیم را روی نمونه‌های بتن آسفالتی دارای الیاف پلی استر و پلی‌پروپیلن انجام دادند. نتایج نشان داد که مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی دارای الیاف مقدار کمی بیشتر از مخلوط آسفالتی کنترل بود [Jeng et al. 1993]. فریمن و همکارانش با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم در دو حالت خشک و تر، بتن آسفالتی مسلح شده با الیاف پلی استر را از نظر مقاومت برابر کشش، ترک‌خوردگی و حساسیت رطوبتی بررسی کردند. ملاحظه شد که مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با افزایش درصد الیاف کاهش می‌یابد، به طوری که مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های حاوی الیاف در حالت خشک ۳٪ تا ۱۵٪ از مخلوط کنترل کمتر بود. آنها علت کاهش مقاومت کششی را به این دلیل دانستند که رشته‌های الیاف حتی در زمان اختلاط، تمایل دارند که به هم بچسبند. در نتیجه، به هم چسبیدن الیاف، باعث ایجاد نقاط ضعف و توزیع غیریکنواخت آنها در مخلوط می‌شود [Freeman et al. 1989]. کاظمی (۱۳۹۱)، با توجه به نتایج آزمایش خزش استاتیکی در دو دمای 20°C و 45°C مشاهده کرد که در دمای 20°C افزودن الیاف پلی استر 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 می‌شود [Kazemi, 2012]. نتایج آزمایش‌های چن و همکاران نشان داد که الیاف عمق شیار افتادگی مخلوط آسفالتی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهند، به طوری که الیاف پلی استر، پلی‌اکریلونیتریل، لیگنین و آزبست عمق شیار

آسفالتی بر روی جلوگیری از ترک‌های انعکاسی انجام گرفت. این پژوهش نشان داد که همه انواع مسلح سازی با شبکه‌های سیمی یا از ایجاد ترک‌های طولی جلوگیری می‌کردند و یا به خوبی آن را به تاخیر می‌انداختند [Zube, 1956]. در طول چند دهه اخیر انواع مختلفی از مواد به صورت الیاف برای مسلح سازی بتن آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته اند که از جمله آنها می توان به الیاف پلی استر، نایلون، پلی پروپیلن، سلولز، شیشه، کربن، فولاد و الیاف ضایعاتی اشاره کرد. همچنین، در بعضی موارد، به منظور دسترسی به عملکرد بهتر، از ترکیبی از الیاف مختلف استفاده شده است [Abtahi et al. 2010 and Wu et al. 2013]. در مطالعات مختلف صورت گرفته، اثر الیاف بر روی خصوصیات مختلفی مانند فضای خالی، استقامت مارشال و روانی، سختی، مقاومت به تغییر شکل، ترک خوردگی خستگی، حرارتی و انعکاسی، آسیب رطوبتی، پیر شدگی و یخبندان و آب شدن، و هدایت الکتریکی بررسی شده است. ابطیحی و همکاران مرور جامعی بر روی نتایج مطالعات انجام گرفته بر روی بتن آسفالتی مسلح شده با الیاف انجام داده اند [Abtahi et al. 2010]. در یک پژوهش انجام گرفته توسط تاپکین، بر روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با الیاف پلی‌پروپیلن مشاهده شد که استقامت مارشال افزایش و روانی کاهش یافت. همچنین، نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های خزشی تکراری با الگوهای بارگذاری مختلف، ۵ تا ۱۲ بار بهبود در مقایسه با نمونه‌های شاهد نشان دادند [Tapkin, 2008]. هوانگ^۴ و همکارانش از الیاف پلی‌پروپیلن در ساخت مخلوط‌های بتن آسفالتی استفاده کردند. نتایج آزمایش مارشال نشان داد که مخلوط‌های دارای الیاف درصد فضای خالی بیشتری نسبت به مخلوط‌های معمولی دارند [Huang, 1994]. جیانگ و همکاران از الیاف پلی‌پروپیلن در ساخت مخلوط‌های بتن آسفالتی استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن الیاف سبب بهبود در عملکرد مخلوط در مقابل تغییر شکل دائمی می‌شود [Jiang et al. 1993]. طباطبائی و صحاف از الیاف فولادی برای جلوگیری از ترک خوردگی آسفالت استفاده کردند [Tabatabaiee and

سلولز و پلی استر در نسبت های مختلف استفاده کرده و مقاومت به تغییر شکل، آسیب رطوبتی و خستگی را مطالعه کردند [Wu et al. 2009]. آنها دریافتند که مسلح سازی ترکیبی بتن آسفالتی دارای نسبت عملکرد به هزینه بیشتری است. ابطیحی و همکارانش از ترکیب همزمان الیاف پلی استر و شیشه برای تسلیح بتن آسفالتی استفاده کردند و به یک مقدار از ترکیب دو الیاف دست یافتند که بالاترین مقاومت به تغییر شکل را دارا بود [Abtahi et al. 2013].

در تحقیقات انجام گرفته، اثر همزمان مقدار و طول الیاف بر مشخصات بتن آسفالتی به اندازه کافی مطالعه نشده است. همچنین، بررسی این اثرات به صورت مقایسه بین انواع الیاف نیز می تواند در درک مکانیزم رفتار آسفالت مسلح شده با الیاف موثر باشد. بنابراین، در این تحقیق، مطالعه مقایسه ای در مورد اثر مقدار و طول دو نوع الیاف مختلف بر روی یک نوع بتن آسفالتی انجام گرفته است. با توجه به عدم دسترسی به تجهیزات آزمایشگاهی با بارگذاری دینامیکی، برای بررسی خصوصیات عملکردی بتن آسفالتی از آزمایشهای استاتیکی کشش غیر مستقیم و خزش استاتیکی استفاده گردیده است.

۳. کارهای آزمایشگاهی

۳-۱ مصالح مصرفی

مواد مصرفی در این تحقیق شامل قیر، مصالح سنگی و الیاف کربن و نایلون هستند. قیر مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت نمونه های آسفالتی از نوع قیر خالص ۶۰-۷۰ تولید پالایشگاه تبریز است. مشخصات قیر استفاده شده مطابق جدول (۱) است. در این تحقیق از دو نوع الیاف کربن و نایلون استفاده شد. این الیاف از شرکت دوروچم خاورمیانه تهیه شد. الیاف کربن، الیافی با قطر بسیار کم حدود ۰/۰۰۵ الی ۰/۰۱۰ میلی متر است که اکثراً از اتم های کربن تشکیل شده است. اتم های کربن به صورت کریستال های بسیار کوچک به همدیگر متصل شده اند که این کریستال ها با محور طولی الیاف موازی هستند. آرایش کریستال ها باعث شده اند که مقاومت الیاف در مقایسه با ضخامت آنها زیاد

شدگی را به ترتیب ۱۹/۵۷٪، ۳۲/۵۶٪، ۸/۴۳٪ و ۱۱/۴٪ در ۲۵۰۰ سیکل بارگذاری کاهش می دهند [Chen et al. 2009]. سرفاس و سامانوس نتیجه گیری کردند که افزودن الیاف نایلون باعث افزایش و بهبود خصوصیات مثل مقاومت به ترک خوردگی، پیر شدگی و آسیب رطوبتی مخلوطهای آسفالتی می شود. [Serfass and Samanos, 1996]. کیم و همکارانش بیان می دارند که مخلوطهای تقویت شده با الیاف نایلون عمر خستگی را ۲۰ تا ۲۵ برابر در مقایسه با مخلوطهای بدون الیاف افزایش می دهند [Kim et al. 1999]. لی و همکارانش نتیجه گیری کردند که افزودن الیاف نایلون به بتن آسفالتی می تواند مقاومت به ترک خوردگی را از طریق افزایش انرژی شکست و طاق افزایش دهد [Lee et al. 2005]. پوتمن و امیرخانیان قابلیت استفاده از الیاف به دست آمده از ضایعات فرش را در بتن آسفالتی مطالعه کردند. در این مطالعه، عملکرد مخلوطهای حاوی ضایعات فرش با عملکرد مخلوطهای حاوی الیاف سلولز و پلی استر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مخلوطهای حاوی الیاف ضایعات فرش دارای طاقت بیشتری بوده، ولی از نظر مقاومت به آسیب رطوبتی و تغییر شکل دائمی مخلوطها یکسان بودند [Putman and Amir Khanian, 2004]. جهرمی و خدایی، خصوصیات مخلوطهای آسفالتی حاوی الیاف کربن را با استفاده از آزمایشات کشش غیر مستقیم استاتیکی و دینامیکی، خزش و استقامت مارشال ارزیابی کردند. نتیجه گیری آنها این بود که الیاف کربن باعث کاهش روانی و افزایش فضای خالی مخلوط شده، و مقاومت به تغییر شکل، استقامت مارشال و عمر خستگی را افزایش می دهند [Jahromi and Khodaii, 2008]. ماهرز و همکارانش گزارش کردند که اضافه کردن الیاف شیشه به مخلوط آسفالتی SMA باعث کاهش استقامت مارشال و سختی مخلوطها می شود [Mahrez et al. 2003]. در مطالعه ای دیگر، آنها نشان دادند که مخلوطهای حاوی الیاف شیشه، مقاومت در برابر تغییر شکل بیشتری را نشان دادند [Mahrez et al. 2005].

برخی از محققین، ترکیبی از دو الیاف را برای مسلح سازی بتن آسفالتی استفاده کرده اند. Wu و همکارانش از ترکیب الیاف

بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کربن و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی

جدول ۱. مشخصات قیر تهیه شده از پالایشگاه تبریز

نتیجه	روش آزمایش	حدود	مشخصه
۶۶	ASTM-D5	۶۰-۷۰	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، بر حسب ۰/۱ میلیمتر
۴۹/۱	ASTM-D36	۴۹-۵۶	نقطه نرمی، بر حسب درجه سانتی‌گراد
۱۵۰	ASTM-D113	بیش از ۱۰۰	مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی‌گراد، بر حسب سانتی‌متر
۲۹۸	ASTM-D92	حداقل ۲۵۰	درجه اشتعال، بر حسب درجه سانتی‌گراد
۹۹/۸	ASTM-D2042	حداقل ۹۹/۵	حلالیت در تری کلرواتیلن، بر حسب درصد
۱/۰۱۶	ASTM-D70	۱/۰۱-۱/۰۶	وزن مخصوص در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد
۰/۰۳	ASTM-D6	حداکثر ۰/۲	افت حرارتی، بر حسب درصد وزنی
۲	ASTM-D6&D5	حداکثر ۲۰	نسبت افت درجه نفوذ بعد حرارت دهی، بر حسب درصد

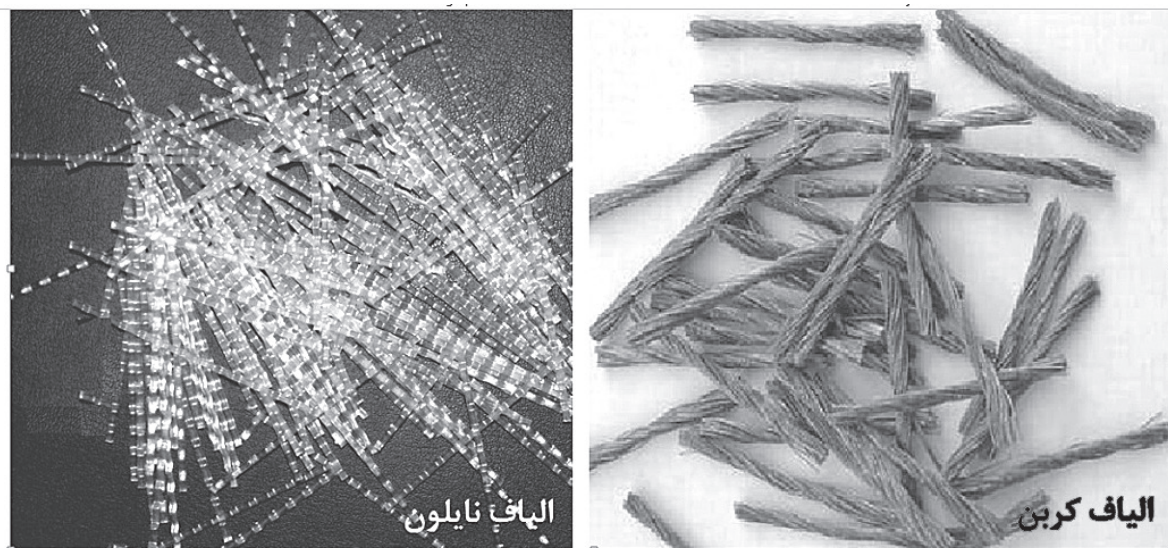
ضایعات، اثر این نوع الیاف بر روی مشخصات بتن آسفالتی با الیاف کربن مقایسه گردیده است. مشخصات الیاف مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین تصاویر الیاف مذکور در شکل (۱) نشان داده شده است.

مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از نوع سنگ سیلیس بوده و در ۴ اندازه، ۱۲-۱۹ میلی‌متر، ۶-۱۲ میلی‌متر، ۰-۶ میلی‌متر و فیلر از کارخانه آسفالت زنجان رهساز تهیه شد. با انجام آزمایش دانه‌بندی بر روی هر کدام و انتخاب محدوده دانه‌بندی استاندارد که دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰) است، درصد هر کدام از این مصالح برای ساخت نمونه‌ها محاسبه شد. شکل (۲) دانه‌بندی آیین‌نامه و دانه بندی مخلوط مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. آزمایشهای تعیین ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T176)، تعیین حدود اتربرگ (AASHTO-T89, T90)، تعیین شاخص تورق (BS-812)، تعیین درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس

باشد. برای تشکیل یک رشته نخ از جنس الیاف کربن چندین هزار لیف کربن باید در کنار یکدیگر قرار گیرند. از خصوصیات الیاف کربن می‌توان به مقاومت کششی بالا، وزن کم و انبساط حرارتی کم اشاره کرد که باعث محبوبیت و استفاده از آن در کارهای فضایی، مهندسی عمران و کاربردهای نظامی گردیده است. از معایب آن می‌توان به قیمت زیاد آن نسبت به مصالح مشابه و مقاومت کم در برابر ضربه و فشار اشاره کرد. اگر بتوان الیافی با همان عملکرد و قیمت کمتر جایگزین کرد، مفید خواهد بود. نایلون یکی از پرکاربردترین پلیمرها است. این ماده یک پلیمر ترموپلاستیک بوده و یک اسم عمومی برای خانواده پلیمرهای الفاتییک پلی امید است. از نایلون در صنایع مختلف پوشاک، فرش، بسته‌بندی، اتومبیل سازی، آلات موسیقی و... استفاده می‌شود. نایلون‌ها در انواع مختلف و با خصوصیات گوناگون تولید می‌شوند. انعطاف پذیری، مقاومت کششی و سایشی بالا از مزایای اصلی این الیاف محسوب می‌شود. با توجه به قیمت کمتر الیاف نایلون، و امکان دسترسی به این الیاف از طریق بازیافت

جدول ۲. مشخصات الیاف مورد استفاده

نوع الیاف	طول (mm)	مقاومت کششی (MPa)	نقطه ذوب (°C)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	مدول الاستیک (MPa)	جذب آب (%)
کربن	۵۰	۶۰۰	۲۳۰	۰/۹۱	۳۵۰۰	۰/۰۱-۰/۰۲
نایلون	۵۰	۴۸۰	۱۷۲	۰/۹	۳۶۷۰	۰



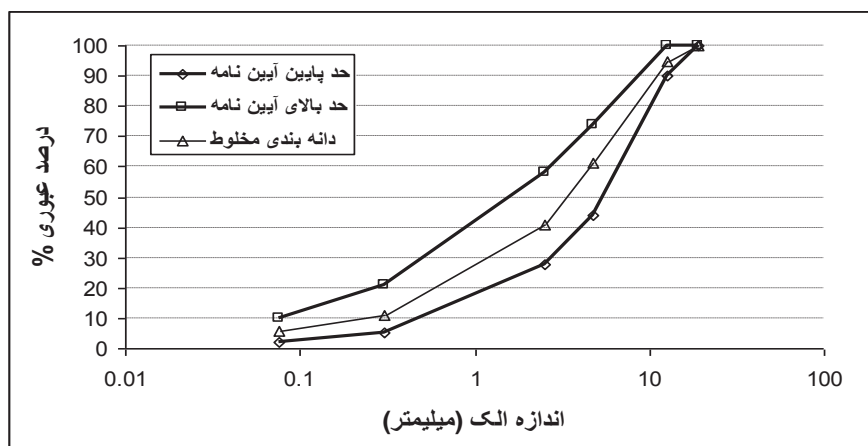
شکل ۱. تصاویر الیاف کربن و نایلون

شد. در همه نمونه‌ها، جنس مصالح سنگی، نوع دانه‌بندی و قیر مصرفی ثابت بودند. الیاف کربن و نایلون، در سه درصد وزنی مختلف (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد) و سه طول (۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر) استفاده شدند. بنابراین، ۱۹ ترکیب مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. ابتدا، با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال، درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی بدون الیاف ۲/۵ درصد تعیین شد. در ساخت نمونه‌های حاوی الیاف، نحوه افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی، به خصوص در الیاف کربن با طول‌های ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر اهمیت خاصی داشت. جهت اطمینان از توزیع یکنواخت الیاف در مخلوط، از روش خشک استفاده گردید که در آن، ابتدا الیاف با مصالح سنگی مخلوط شده و سپس قیر به آن اضافه شد. برای

(AASHTO-T96)، تعیین افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO-T104)، تعیین درصد شکستگی در دو جبهه (ASTM-D5821)، و تعیین درصد اندود قیر به مصالح سنگی (AASHTO-T182)، بر روی مصالح سنگی انجام پذیرفته که نتایج آنها در جدول (۳) درج گردیده‌اند. همچنین، وزن مخصوص واقعی اجزاء مختلف درشت دانه، ریزدانه و فیلر تعیین شد که به ترتیب، ۲/۶۰۷، ۲/۵۹۳ و ۲/۷۲۲ است. جذب آب درشت دانه و ریزدانه نیز به ترتیب ۱/۶ و ۲ در صد اندازه گیری شد.

۲-۳ برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق، برای ساخت نمونه‌ها از روش مارشال استفاده



شکل ۲. دانه بندی مصالح سنگی مخلوط مورد استفاده در این تحقیق

بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کربن و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی

جدول ۳. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

نتایج آزمایش					مشخصه
فیلر مصالح	۰-۶ میلیمتر	مخلوط درشت دانه	شن ۱۲-۶ میلیمتر	شن ۱۹-۱۲ میلیمتر	
-	۵۳	-	-	-	ارزش ماسه‌ای
-	-	C	C	B	درصد افت نوع دانه‌بندی
-	-	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	وزنی در مقابل تعداد دور
-	-	۲۲	۲۲	۱۹	سایش درصد سایش
N.P	N.P	-	-	-	دامنه خمیری
-	-	-	-	-	حدود اتربرگ حد خمیری
غیرقابل تعیین	غیرقابل تعیین	-	-	-	حد روانی
درصد شکستگی					
-	-	۸۶	۹۲	۸۰	در دو جبهه مصالح روی الک شماره ۴
-	-	بیش از ۹۵	بیش از ۹۵	بیش از ۹۵	درصد اندود قیر به مصالح سنگی
-	-	۱۳	۱۱	۱۳	درصد دانه‌های پولکی
-	۲/۱۲	۰/۵۹	-	-	درصد افت ریزدانه
-	-	۰/۹۰	۰/۴۴	۰/۱۷	وزنی در مقابل سولفات سدیم درشت‌دانه

بنابراین تصمیم گرفته شد که نمونه‌های حاوی الیاف با ۶ درصد قیر تهیه شوند.

۳-۳ ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش های این تحقیق استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ mm و ارتفاع حدود ۶۵ mm بوده که با روش مارشال و مطابق استاندارد ASTM D1559 و با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف متراکم شدند. نمونه ها ۲۴ ساعت بعد از تراکم با جک‌های مخصوص از داخل قالب بیرون آورده شده و برای استفاده در آزمایش ها آماده گردیدند.

۳-۴ آزمایش های انجام شده

آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های آماده شده مطابق با استاندارد

ساخت نمونه‌های آسفالتی حاوی الیاف، تصمیم گرفته شد که نمونه‌ها با درصد قیر بیشتری از قیر بهینه مخلوط شاهد ساخته شوند تا مصالح سنگی به طور کامل با قیر اندود شوند و همچنین درصد فضاهای خالی نمونه‌ها در محدوده ۳ تا ۵٪ باشد. برای بررسی فضای خالی مخلوط حاوی الیاف، نمونه مخلوط آسفالتی با ۰/۴ درصد الیاف کربن و با درصد قیر ۵/۲ درصد تهیه شد که درصد فضای خالی آن ۷ درصد بدست آمد. همچنین نمونه مخلوط آسفالتی با ۰/۴ درصد الیاف نایلون نیز با درصد قیر ۵/۲ درصد تهیه شد که درصد فضای خالی آن ۶/۷ درصد بدست آمد. نمونه‌های دیگری نیز با درصد‌های قیر بالاتر (۶ و ۷ درصد) تهیه شده و فضای خالی آنها تعیین شد. مشاهده گردید که با افزایش درصد قیر به مقدار ۶ درصد، میزان فضای خالی هر دو مخلوط با همان درصد الیاف، در محدوده مجاز ۳ تا ۵ درصد قرار می‌گیرد.

۵۵ تا ۸۰ درصد باشد. در انتها نیز این گروه از نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس تحت آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم به وسیله جک مارشال و فک شکست ITS قرار گرفتند. شاخص کمی مقاومت مخلوط آسفالتی گرم در برابر اثر مخرب آب، به صورت نسبت مقاومت کششی پس از عمل‌آوری رطوبتی به مقاومت کششی اولیه و دست نخورده، از رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$TSR = \left(\frac{S_{tm}}{S_{td}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن، TSR: نسبت مقاومت کششی (٪)، S_{tm} : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط رطوبت (کیلوپاسکال) و S_{td} : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط خشک (کیلوپاسکال) است.

در این تحقیق، برای بررسی رفتار تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف و مقایسه آن با مخلوط‌های آسفالتی معمولی از آزمایش خزش استاتیک تک محوره به روش استاندارد BS-598 Part 111 استفاده شد. اما، با توجه به محدودیت امکانات آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش در دمای استاندارد ۴۰ درجه، آزمایش‌های خزش استاتیکی در دمای محیط آزمایشگاه که حدود ۲۴ درجه سانتیگراد بود انجام گرفتند. برای اعمال تنش ثابت و اندازه‌گیری تغییر شکل بوجود آمده نیز، از دستگاه تحکیم خاک موجود در آزمایشگاه استفاده شد. اساس آزمایش خزش استاتیکی اعمال و تداوم یک بار استاتیکی یکنواخت و ثابت به نمونه و اندازه‌گیری تغییر شکل ایجاد شده به صورت تابعی از زمان است. سختی خزشی مخلوط با استفاده از رابطه (۳) و کرنش نمونه‌ها در مدت زمان بارگذاری و بعد از باربرداری، با استفاده از رابطه (۴) محاسبه گردیدند.

$$S_m = \frac{\sigma}{\epsilon_t} \quad (3)$$

$$\epsilon_t = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (4)$$

که در آن S_m سختی خزشی مخلوط به مگاپاسکال؛ σ تنش اعمال شده به مگاپاسکال و $\epsilon_{(t,T)}$ کرنش بوجود آمده پس از t ثانیه بارگذاری در دمای T درجه سانتیگراد، ϵ_t کرنش در زمان t ، Δh تغییر

ASTM D1559 انجام شد. قبل از انجام آزمایش مارشال، با اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها در آب و در هوا، وزن مخصوص مترکم شده و حداکثر وزن مخصوص نظری نمونه‌ها به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM-D 2726 و ASTM-D 2041 تعیین شده و با استفاده از آن‌ها درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی مترکم با استاندارد به روابط موجود در نشریه MS-2 انستیتو آسفالت محاسبه گردید.

روش استاندارد ASTM-D6931 برای ارزیابی مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. بارگذاری آزمایش کشش غیر مستقیم با جک مارشال و سرعت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. نمونه‌ها در جهت قطر بارگذاری شده و نیروی لازم برای شکست نمونه اندازه‌گیری شد و مقاومت کششی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

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

که در آن، S_t : مقاومت کششی (کیلوپاسکال)، P : حداکثر بار (نیوتون)، t : ارتفاع نمونه بلافاصله قبل از آزمایش (میلی‌متر) و D : قطر نمونه بلافاصله قبل از آزمایش (میلی‌متر) است.

ارزیابی آسیب رطوبتی مطابق استاندارد ASTM-D4867 انجام شد. برای این منظور، نمونه‌ها بایستی به نحوی مترکم شوند که درصد فضای خالی آنها بین ۶ تا ۸ درصد باشد، بنابراین با تنظیم تعداد ضربات چکش این مقدار فضای خالی حاصل گردید. از هر ترکیب، دو گروه نمونه استوانه‌ای مارشال با درصد فضای خالی تقریباً برابر، برای ایجاد شرایط عمل‌آوری و عمل‌آوری نشده تهیه شد. برای این منظور، دو گروه نمونه ساخته شد. یک گروه از نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۰ دقیقه در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده و سپس تحت آزمایش کشش غیر مستقیم قرار گرفتند، و گروه دیگر قبل از انجام آزمایش، تحت عمل‌آوری رطوبتی قرار گرفتند که به این منظور نمونه‌ها در معرض اشباع شدگی تحت خلا با اعمال خلا نسبی ۵۲۵ میلی‌متر جیوه برای مدت ۵ دقیقه و غوطه‌وری در آب گرم ۶۰ درجه برای مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. درجه اشباع شدگی این نمونه‌ها بایستی بین

ارتفاع نمونه در زمان t و h_0 ارتفاع اولیه نمونه است.

نمونه‌ها به مدت یک ساعت با تنش برابر 1 kg/cm^2 (98MPa) تحت بارگذاری قرار گرفته و تغییر شکل قائم نمونه در بازه‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری شد. سپس بار از روی نمونه برداشته شده و در مدت زمان یک ساعت، تغییر شکل بازگشتی نمونه در بازه‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری شد.

۴. نتایج آزمایش‌ها

۴-۱ مشخصات مارشال

تغییرات استقامت مارشال با مقدار و طول الیاف کربن و نایلون، به ترتیب، در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، برای هر دو نوع الیاف، بجز مخلوط‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف ۴۰ میلی‌متری، در بقیه موارد مخلوط‌های حاوی الیاف دارای استقامت مارشال بیش از مخلوط شاهد فاقد الیاف هستند. این نتایج که در بخش ۳ ارائه شدند، هماهنگ با نتایج تحقیقات پیشین است. [Jahromi and Khodaii, 2008, Tapkin, 2008]

همچنین، برای هر دو نوع الیاف، و هر سه طول مختلف، مقدار استقامت مارشال با افزایش درصد وزنی تا یک حد معین افزایش، و سپس کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که بالاترین استقامت مارشال مربوط به مخلوطی است که با استفاده از ۰/۳ درصد الیاف کربن با طول ۲۵ میلی‌متر مسلح شده، که استقامت مارشال آن ۲۱٪ بیشتر از استقامت مارشال نمونه‌های شاهد فاقد الیاف است. همچنین، بالاترین مقاومت کسب شده برای مخلوط‌های حاوی الیاف نایلون مربوط به مخلوطی است که با مقدار ۰/۴ درصد از الیاف به طول ۲۵ میلی‌متر مسلح شده، و مقدار استقامت مارشال آن به طور جزئی کمتر از بالاترین استقامت به دست آمده با الیاف کربن است. مقایسه نتایج ارائه شده در شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که تفاوت قابل ملاحظه‌ای در مقادیر استقامت مارشال مخلوط‌های مسلح شده با الیاف کربن و نایلون وجود ندارد، هر چند، به طور کلی، الیاف کربن به طور جزئی استقامت مارشال بالاتری را نتیجه می‌دهند. افزایش استقامت

مارشال با افزایش مقدار الیاف در مخلوط را می‌توان با قانون اساسی مواد کامپوزیت توضیح داد. بر طبق قانون مخلوط‌ها [Vasiliev and Morozov, 2007]، مقاومت مخلوط مسلح شده با الیاف را می‌توان به صورت رابطه (۵) بیان کرد.

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (5)$$

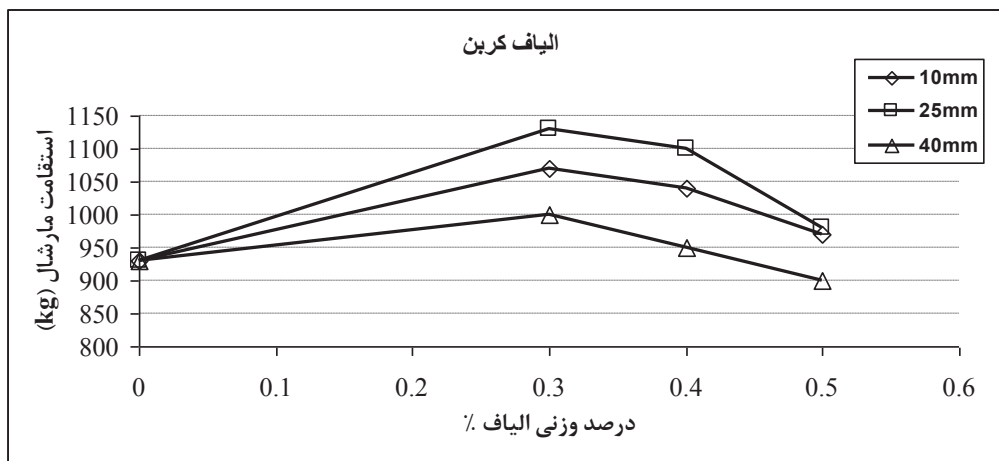
که در آن، σ و V ، به ترتیب، مقاومت نهایی و حجم، و f و m ، به ترتیب، الیاف و مخلوط است. این معادله بیانگر این است که با افزایش حجم الیاف، که دارای مقاومت بیشتر هستند، مقاومت ماده مرکب از مخلوط و الیاف افزایش می‌یابد. این قانون برای مخلوط‌های مطالعه شده در این تحقیق، تا مقدار الیاف بین ۰/۳ تا ۰/۴٪ صادق بوده و در مقادیری بیش از آن نقض می‌شود. دلیل کاهش مقاومت بعد از یک مقدار حداکثر را می‌توان به افزایش فضای خالی با افزایش مقدار الیاف، که نتایج آن در ادامه این بخش ارائه خواهد شد، نسبت داد. همچنین، با افزایش بیش از حد الیاف، قفل و بست سنگدانه‌ها نیز کمتر شده، که دلیلی بر کاهش مقاومت نمونه است. افزایش استقامت مارشال با افزایش طول الیاف را می‌توان با استفاده از مفهوم "نسبت لغزش"، که توسط شاو و همکارانش [Shao et al. 1996] ارائه شد، توضیح داد. بر اساس این تئوری، وقتی که یک بار فشاری به یک مخلوط مسلح شده با الیاف اعمال می‌شود، همانند باری که در آزمایش مارشال اعمال می‌شود، یک تنش برشی بین سطح مشترک الیاف و مخلوط به وجود می‌آید که باعث ایجاد تنش کششی در الیاف می‌شود. فرض می‌شود که در این کشیدگی طولی از الیاف از هر دو انتها می‌تواند بلغزد و قسمتی در وسط به نام ناحیه بدون لغزش است که توسط مخلوط مهار شده است. نسبت لغزش به صورت نسبت طول بخشی که دارای لغزش است به طول کل الیاف تعریف می‌شود. این نسبت نشان دهنده میزان مشارکت الیاف در تحمل تنش‌های کششی ناشی از نیروی فشاری در آزمایش مارشال است. بالاتر بودن نسبت لغزش به معنی کمک کمتر الیاف در تحمل تنش‌های کششی توسط ماده کامپوزیت و کاهش مقاومت است. رابطه (۶) برای این نسبت ارائه شده است [Hejazi et al., 2013].

الیاف نایلون، به دلیل مدول الاستیسیته و قطر بالاتر دارای نسبت لغزش بالاتر بوده و مقاومت مخلوطهای حاوی این الیاف تا حدودی کمتر از مخلوطهای حاوی الیاف کربن هستند.

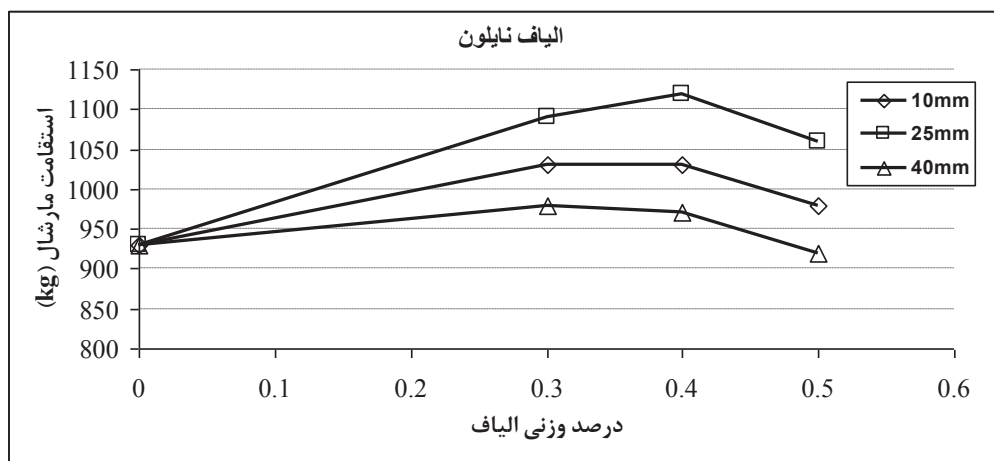
شکل های ۵ و ۶، تغییرات مقدار روانی مخلوط های آسفالتی حاوی الیاف کربن و نایلون را با مقدار الیاف و طول آنها نشان می دهند. همانگونه که ملاحظه می شود، با افزایش مقدار الیاف تا یک حد معین، مقدار روانی کاهش یافته و بعد از آن افزایش می یابد. مشابه نتایج استقامت مارشال، کمترین مقدار روانی در مخلوطهای مختلف در ۰/۳ یا ۰/۴ درصد وزنی الیاف است. با افزایش مقدار الیاف، روانی افزایش می یابد؛ زیرا افزایش مقدار الیاف، موجب افزایش فضای خالی بین مصالح سنگی و کاهش اتصال و درگیری بین سنگدانه ها شده،

$$\lambda = (d_f \cdot E_f \cdot \epsilon_f) / (2 \cdot \mu \cdot G \cdot L_f) \quad (6)$$

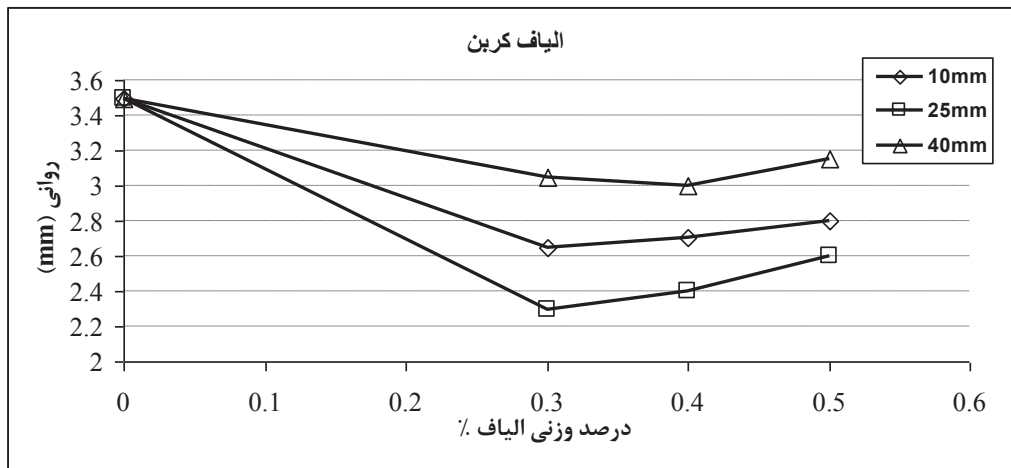
که در آن، μ ضریب اصطکاک بین الیاف و مخلوط، G فشار عمودی، d_f ، E_f و ϵ_f ، به ترتیب، قطر، مدول الاستیسیته و کرنش الیاف و L_f طول الیاف است. مطابق این رابطه، افزایش طول الیاف باعث کاهش نسبت لغزش شده و مقاومت مخلوط مسلح شده با الیاف افزایش می یابد. برای مخلوطهای مطالعه شده در این تحقیق، این قانون با افزایش طول تا ۲۵ میلیمتر صادق است و فراتر از آن، مقاومت کاهش می یابد. دلیل کاهش مقاومت در طولهای بزرگتر از ۲۵ میلیمتر را می توان به افزایش فضای خالی با افزایش بیش از حد طول الیاف نسبت داد. تفاوت تاثیر الیاف کربن و نایلون را نیز می توان با این رابطه توضیح داد. در شرایط مشابه طول و مقدار بار وارده، و با فرض یکسان بودن ضریب اصطکاک،



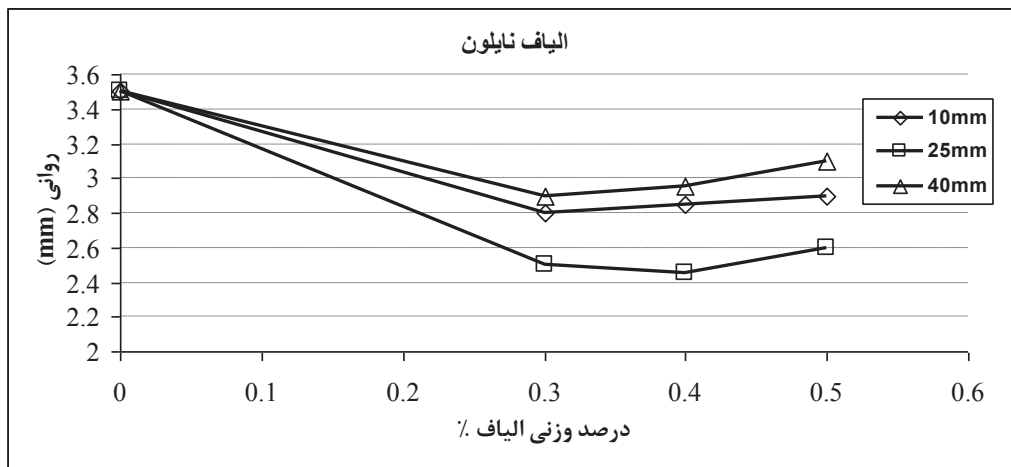
شکل ۳. تغییرات استقامت مارشال با مقدار و طول الیاف کربن



شکل ۴. تغییرات استقامت مارشال با مقدار و طول الیاف نایلون



شکل ۵. تغییرات روانی با مقدار و طول الیاف کربن



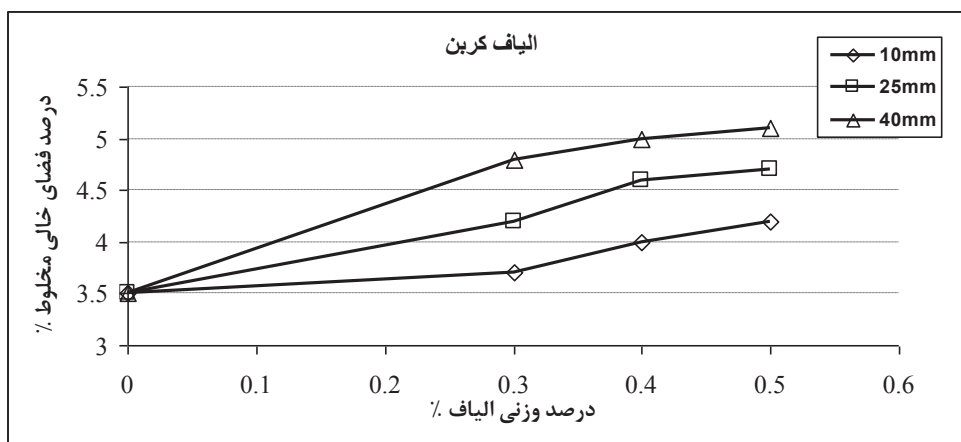
شکل ۶. تغییرات روانی با مقدار و طول الیاف نایلون

می یابد، که تایید کننده تحقیقات پیشین است [Huang, 1994,].
 [Jahromi and Khodaii, 2008] با این حال، اغلب ترکیبات دارای درصد فضای خالی در محدوده مجاز آیین‌نامه هستند. دلیل افزایش فضای خالی جلوگیری از جابجایی سنگدانه‌ها با افزایش مقدار و طول الیاف است. افزایش درصد فضای خالی بر روی سایر خصوصیات عملکردی تاثیر زیادی دارد که در این بخش و بخشهای بعدی توضیح داده می شوند.

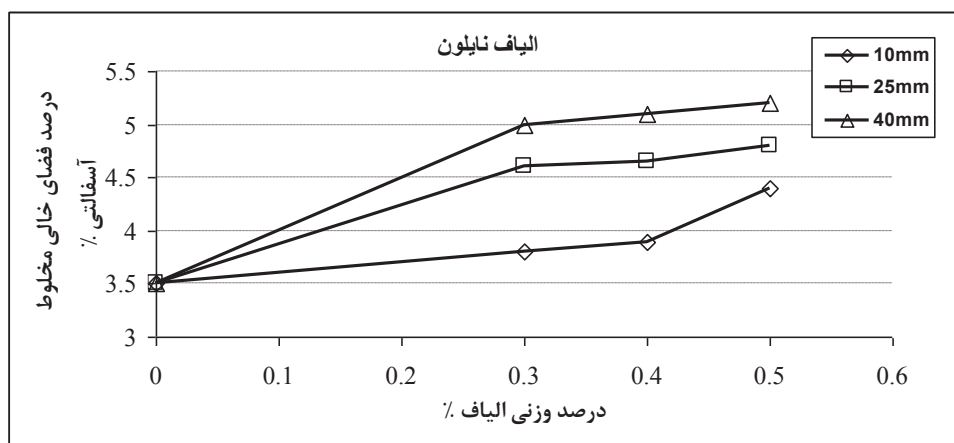
۴-۲ نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

شکل های ۹ و ۱۰، به ترتیب، تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم بتن آسفالتی حاوی الیاف کربن و نایلون را با درصد وزنی الیاف و طول آنها نشان می دهند. همانگونه که ملاحظه می شود، مطابق با

در نتیجه منجر به کاهش اصطکاک داخلی و افزایش روانی می شود. همچنین ملاحظه می شود که برای هر دو نوع الیاف، کمترین مقدار روانی مربوط به مخلوطهای با طول ۲۵ میلیمتر است، و بعد از آن، افزایش طول باعث افزایش روانی شده است. این نتایج مشابه نتایج استقامت مارشال قابل تفسیر هستند، که جهت اختصار در اینجا ارائه نمی شوند. این نتایج بیان گر این است که با افزودن الیاف کربن و نایلون، مقاومت در برابر تغییر شکل افزایش می یابد. تمامی مخلوطهای حاوی الیاف دارای روانی کمتری از مخلوط شاهد هستند. تغییرات درصد فضای خالی مخلوط با مقدار و طول الیاف مخلوطهای مسلح شده با الیاف کربن و نایلون، به ترتیب، در شکل های ۷ و ۸ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، با افزایش درصد و طول الیاف، درصد فضای خالی در مخلوط افزایش



شکل ۷. تغییرات درصد فضای خالی مخلوط با مقدار و طول الیاف کربن



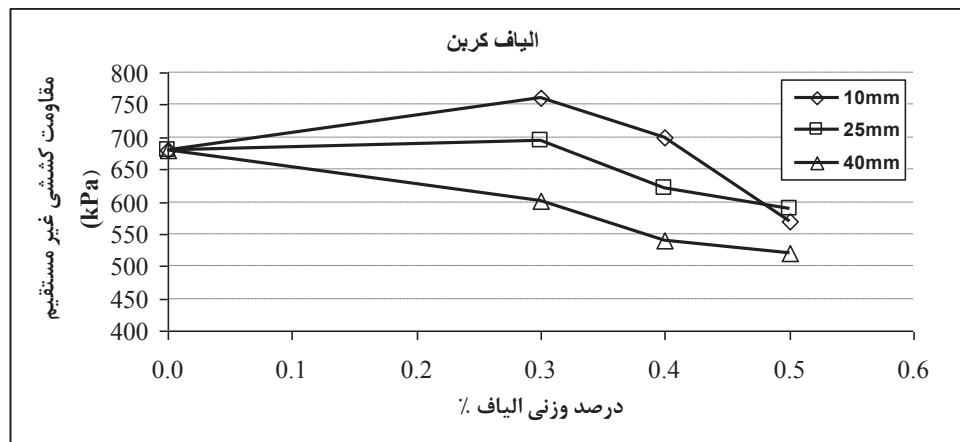
شکل ۸. تغییرات درصد فضای خالی مخلوط با مقدار و طول الیاف نایلون

این است که، در مقدار و طول الیاف یکسان، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی الیاف کربن از الیاف نایلون بیشتر است، که دلیل آن را می‌توان به مقاومت کششی بالاتر الیاف کربن نسبت داد. بیشترین مقدار افزایش در مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به افزودن ۰/۴ درصد الیاف کربن ۱۰ میلیمتری است که مقاومت کششی غیرمستقیم را ۱۲٪ نسبت به بتن آسفالتی فاقد الیاف افزایش داده است.

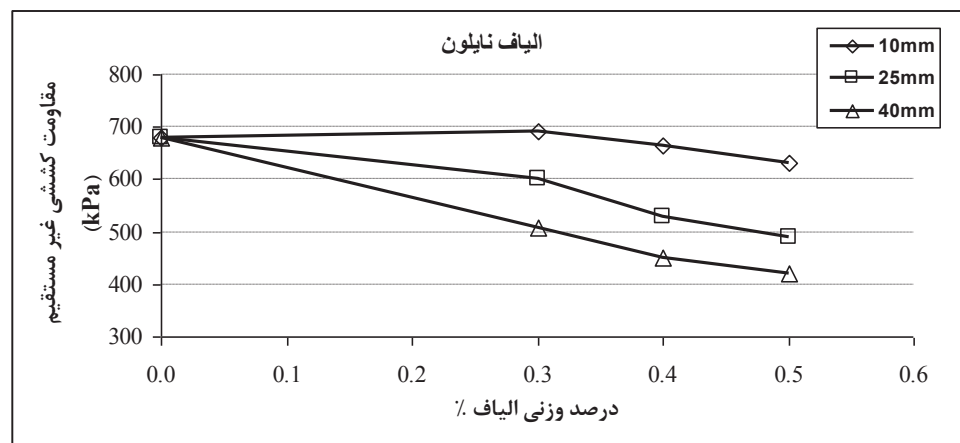
البته، لازم به ذکر است که، اگرچه با انتخاب درست مقدار و طول الیاف می‌توان مقاومت کششی غیرمستقیم را افزایش داد، اما، کاهش مقاومت کششی بتن آسفالتی با افزودن الیاف نیز مسئله چندان مهمی نمی‌تواند باشد. زیرا، اغلب تحقیقات نشان داده اند که الیاف باعث افزایش جذب انرژی مخلوط و مانع از باز شدن ترکها شده و عمر خستگی را افزایش می‌دهند. این موضوع در این

نتایج تحقیقات قبلی که بخشی از آنها در بخش ۲ ارائه گردید، در غالب موارد، افزودن الیاف کربن و نایلون باعث کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم بتن آسفالتی شده است. چنین نتایجی توسط محققین دیگر نیز حاصل شده است [Freeman et al.1989, Tabatabaai and Sahaf, 2000, Mirzaii and Nasrolahi, 2009]. با این حال، با افزودن ۰/۴ درصد الیاف کربن به طول ۱۰ و ۲۵ میلیمتر و ۰/۳ درصد الیاف با طول ۱۰ میلیمتر مقاومت کششی غیرمستقیم نسبت به نمونه فاقد الیاف افزایش یافته است. مقاومت کششی بتن آسفالتی مسلح شده با الیاف نایلون، فقط در حالتی که با ۰/۳ درصد از الیاف ۱۰ میلیمتری مسلح شده است به مقدار جزئی بیش از مقاومت کششی بتن آسفالتی فاقد الیاف بوده و در بقیه موارد مقدار آن کمتر از مقاومت کششی بتن آسفالتی فاقد الیاف است. مقایسه نتایج این دو کردار نشان دهنده

بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کربن و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی



شکل ۹. تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم با مقدار الیاف کربن



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم با مقدار الیاف نایلون

همانگونه که ملاحظه می شود، به جز افزودن الیاف کربن با طول ۱۰ میلی متر و مقدار ۰/۴ درصد وزنی، که موجب افزایش نسبت مقاومت کششی به مقدار ۱/۰۲ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است، نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک مخلوهای حاوی الیاف کمتر از مخلوط شاهد است. همچنین، این نسبت با افزایش درصد وزنی و طول الیاف کاهش می یابد. افزایش طول الیاف کربن، موجب به هم پیوستن و مرتبط شدن فضاهای خالی در نمونه بتن آسفالتی می شود. علاوه بر این، توزیع نشدن یکنواخت الیاف در مخلوط آسفالتی و همچنین گلوله شدن الیاف در حین اختلاط به دلیل طول آن، موجب تشدید اثر زیانهای رطوبتی بر روی مخلوط آسفالتی می شود. کاهش مقاومت در مقابل آسیب رطوبتی با افزایش درصد وزنی الیاف را نیز می توان

تحقیق، با ارزیابی نمونه ها پس از پایان آزمایش کشش غیرمستقیم بررسی گردید. بر خلاف مخلوطهای فاقد الیاف، مشاهده شد که نمونه های حاوی الیاف پس از گسیختگی انسجام کلی خود را حفظ کرده اند. با توجه به اینکه روند ایجاد چاله در روسازی پس از ایجاد ترک خوردگی در سطح روسازی و به دلیل عبور ترافیک است، پیش بینی می شود که در رویه های آسفالتی حاوی الیاف، به دلیل حفظ انسجام مخلوط پس از ترک خوردگی، ایجاد چاله در آن به تاخیر می افتد.

۳-۴ نتایج آزمایش آسیب رطوبتی

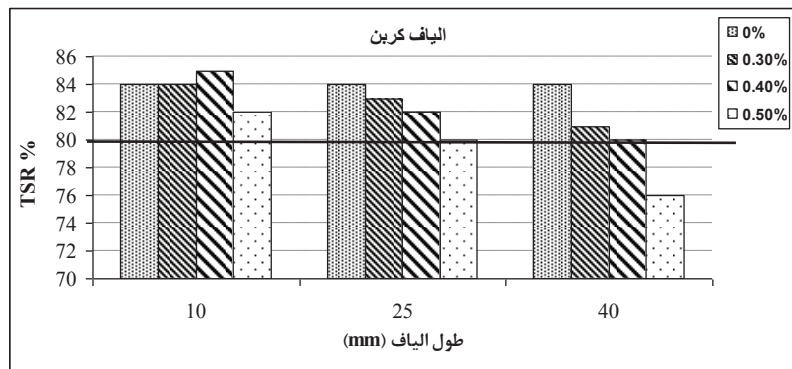
شکل های ۱۰ و ۱۱، به ترتیب، تغییرات نسبت مقاومت کششی حالت خشک به اشباع را با طول و درصد وزنی الیاف برای مخلوطهای آسفالتی حاوی الیاف کربن و نایلون نشان می دهند.

است. با توجه به اینکه مصالح سنگی استفاده شده از جنس سیلیسی بود که دارای قابلیت عریان شدگی هستند، نمونه‌ها پس از شکست به دقت مورد بررسی قرار گرفتند. تاثیر رطوبت بر نمونه‌های آسفالتی، مخصوصا در نمونه‌هایی که دارای فضاهای خالی بیشتر (به علت دارا بودن درصد الیاف بیشتر یا طول بالاتر الیاف) هستند، قابل مشاهده بود؛ به طوری که پس از شکست نمونه در آزمایش کشش غیرمستقیم، جداشدگی قیر از مصالح سنگدانه‌ای قابل مشاهده بود.

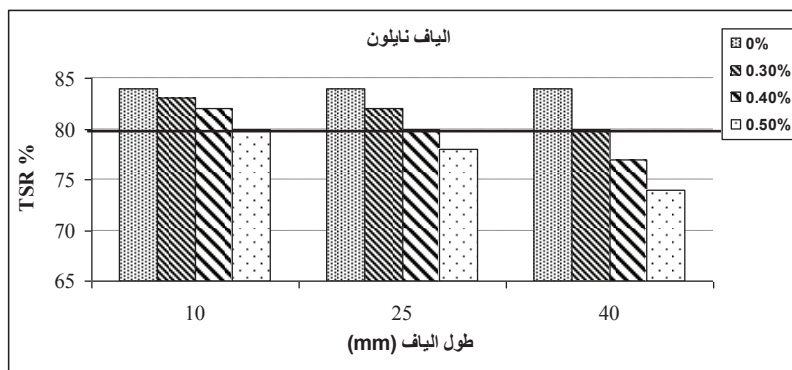
۴-۴ نتایج آزمایش خزش استاتیکی

شکل ۱۲، به طور نمونه، نتایج آزمایش خزش استاتیکی را برای نمونه های حاوی مقادیر مختلفی از الیاف کربن با طول ۱۰ میلیمتر نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، با افزودن الیاف، مقدار کرنش تجمعی و کرنش ماندگار بعد از باربرداری کاهش می‌یابد. خلاصه نتایج آزمایش خزش به

به افزایش درصد فضای خالی و تشدید اثرات مخرب رطوبت نسبت داد. با این حال، اغلب ترکیبات حاوی الیاف دارای نسبت مقاومت کششی بیش از ۸۰٪ هستند که حداقل مقداری است که آئین نامه روسازی آسفالتی ایران الزام کرده است. علاوه بر این، همانگونه که در بخش قبلی نیز توضیح داده شد، وجود الیاف در بتن آسفالتی باعث به تاخیر انداختن گسیختگی شده و عملکرد بهتری را در مقابل آسیب های رطوبتی خواهد داشت. با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که در مجموع، نمونه‌های حاوی الیاف کربن در مقابل آسیب‌های رطوبتی، عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف نایلون دارند. در هنگام استفاده از الیاف نایلون، به دلیل شکل و ماهیت فیزیکی این الیاف، گلوله شدن الیاف در حین اختلاط رخ نداد. اما به دلیل اینکه ضخامت الیاف نایلون نسبت به الیاف کربن بیشتر است، الیاف نایلون تاثیر بیشتری در مرتبط ساختن فضاهای خالی مخلوط آسفالتی داشته، اثر زیان‌های رطوبتی در مخلوط‌های حاوی این الیاف بیشتر



شکل ۱۱. تغییرات نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم با درصد وزنی و طول الیاف برای نمونه‌های حاوی الیاف کربن

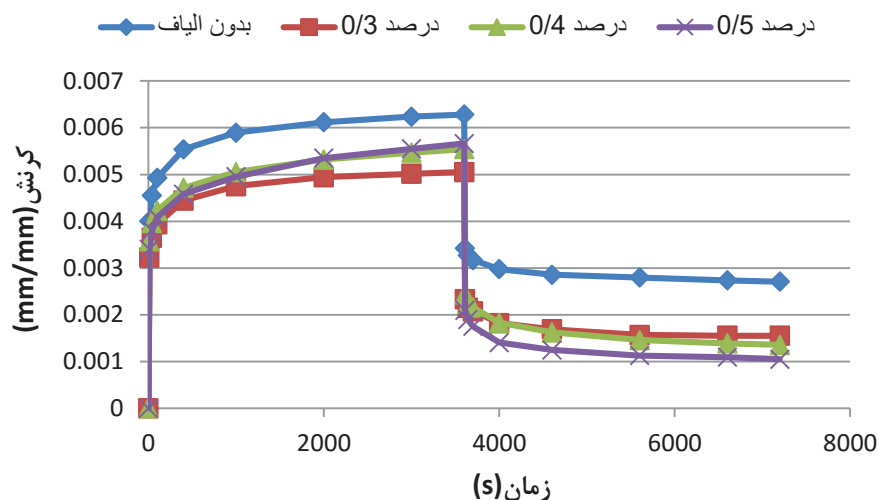


شکل ۱۲. تغییرات نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم با درصد وزنی و طول الیاف برای نمونه‌های حاوی الیاف کربن

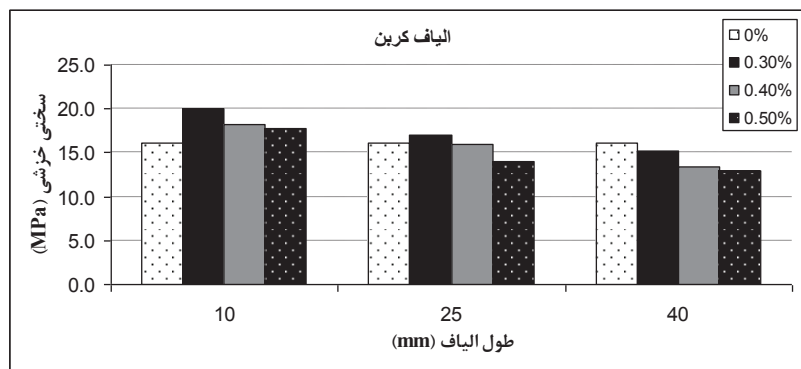
بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کربن و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی

کرنش ماندگار بعد از یک ساعت از زمان باربرداری اندازه گیری شده است. شکل های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب، تغییرات مدول سختی خزشی را با طول و مقدار الیاف برای مخلوطهای مسلح شده با الیاف کربن و نایلون نشان می دهند. همانگونه

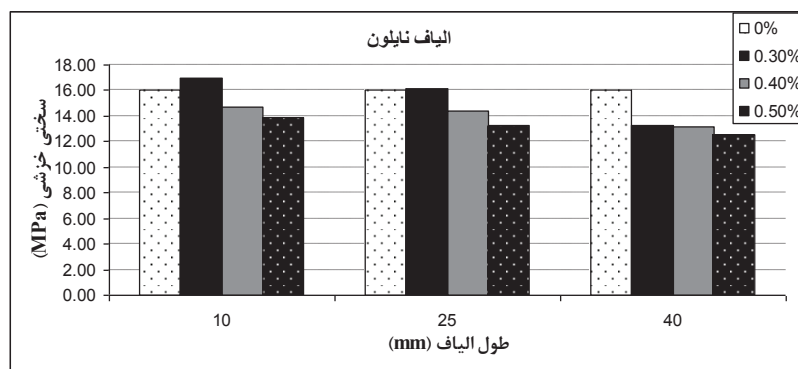
صورت کردارهای تغییرات مدول سختی خزشی و کرنش ماندگار نمونه ها، در شکل های ۱۳ تا ۱۶ ارائه شده است. سختی خزشی از تقسیم مقدار تنش اعمال شده به مقدار تجمعی کرنش عمودی قبل از باربرداری به دست آمده، و



شکل ۱۳. کردار کرنش- زمان برای الیاف کربن با طول ۱۰ میلیمتر در دمای ۲۴°C



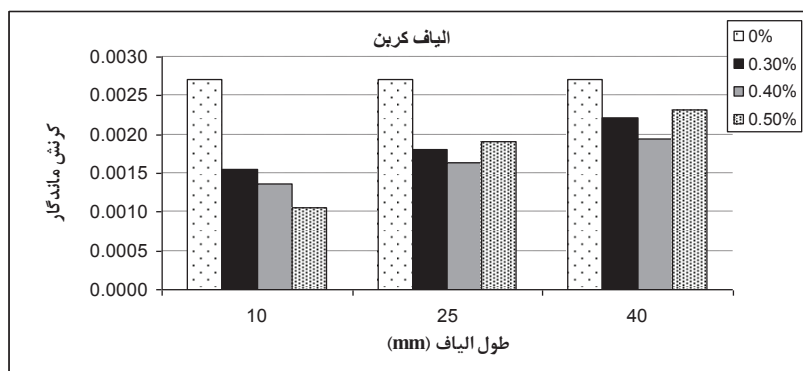
شکل ۱۴. تغییرات سختی خزشی با طول و مقدار الیاف کربن



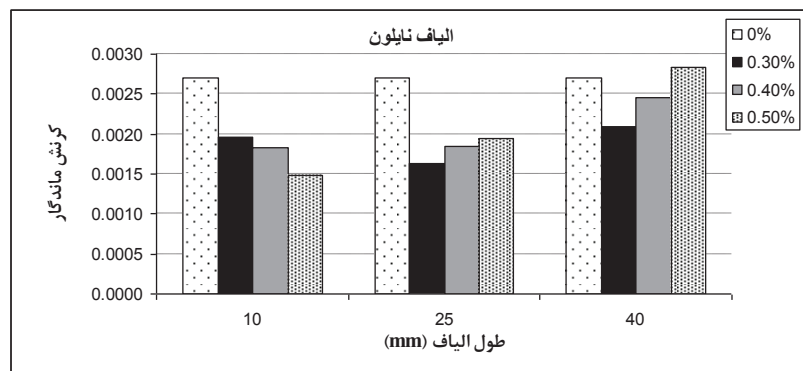
شکل ۱۵. تغییرات سختی خزشی با طول و مقدار الیاف نایلون

باربرداری را برای مخلوط شاهد و مسلح شده با مقادیر و طولهای مختلف از الیاف کربن و نایلون نشان می دهند. همانگونه که ملاحظه می شود، جز مخلوط حاوی ۰/۵ درصد الیاف ۴۰ میلیمتری، بقیه مخلوطهای مسلح شده دارای کرنش ماندگار کمتری از مخلوط شاهد هستند، که نشان دهنده افزایش مقاومت در مقابل تغییر شکل دائمی مخلوطهای مسلح شده با الیاف است. همانگونه که در بخش ۳ ذکر گردید، غالب تحقیقات انجام شده نیز به این نتیجه رسیده اند که استفاده از الیاف باعث افزایش مقاومت در مقابل تغییر شکل می شود. کمترین مقدار کرنش ماندگار مربوط به مخلوط های مسلح شده با ۰/۵ درصد الیاف کربن ۱۰ میلیمتری است. همچنین، نتایج ارائه شده در شکل ۱۵ نشان می دهد که در تمام درصدهای وزنی الیاف (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی)، افزایش طول الیاف کربن سبب افزایش در مقدار کرنش ماندگار می شود. علت این امر می تواند به دلیل تاثیر افزایش فضاهای خالی در نمونه

که در این شکل ها ملاحظه می شود، در مخلوطهای مسلح شده با الیاف کربن و نایلون، بالاترین مدول سختی خزشی مربوط به مخلوطهایی است که دارای ۰/۳ درصد الیاف ۱۰ میلیمتری هستند، و بعد از آن، مدول سختی خزشی با افزایش طول و مقدار الیاف کاهش می یابد. همچنین، کمترین مقدار مدول سختی خزشی مربوط به مخلوطهایی است که دارای ۰/۵ درصد الیاف ۴۰ میلیمتری هستند. نمونه حاوی الیاف کربن به طول ۱۰ میلی متر و با مقدار ۰/۳ درصد وزنی، بیشترین افزایش در مدول سختی خزشی و به مقدار ۲۴ درصد را نشان می دهد. مقایسه نتایج ارائه شده در شکل های ۱۳ و ۱۴ نشان می دهد که مقادیر سختی نمونه های حاوی الیاف کربن در تمام درصدهای وزنی، از الیاف نایلون بیشتر است، که نشان دهنده مقاومت بیشتر در مقابل تغییر شکل برای مخلوطهای مسلح شده با الیاف کربن است. شکل های ۱۶ و ۱۷، به ترتیب، مقادیر کرنش ماندگار بعد از



شکل ۱۶. تغییرات کرنش ماندگار با طول و مقدار الیاف کربن



شکل ۱۷. تغییرات کرنش ماندگار با طول و مقدار الیاف نایلون

بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کربن و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی

- روانی بتن آسفالتی با افزایش مقدار الیاف و طول آنها تا حد معین کاهش و سپس شروع به افزایش می‌کند.

- به طور کلی، مخلوطهای حاوی الیاف کربن و نایلون دارای مقاومت کششی کمتری از مخلوط شاهد هستند، و مقدار مقاومت کششی با افزایش مقدار و طول الیاف کاهش می‌یابد.

- به طور کلی، افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی باعث کاهش نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک می‌شود. با اینحال، مخلوطهای حاوی مقدار بهینه الیاف الزام آیین نامه را در مورد حداقل نسبت مقاومت کششی ارضاء می‌کنند.

- تمام درصدهای وزنی الیاف (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی)، افزایش طول الیاف (کربن و نایلون)، سبب کاهش در مقدار سختی خزشی مخلوط آسفالتی می‌شود.

- به طور کلی، مقادیر سختی نمونه‌های حاوی الیاف کربن در تمام درصدهای وزنی، از الیاف نایلون بیشتر است.

- افزودن هر دو نوع الیاف، سبب کاهش در کرنش ماندگار نمونه‌ها شد، که در نتیجه باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌شود. کمترین کرنش ماندگار در مخلوط حاوی الیاف کربن با طول ۱۰ میلی‌متر، با مقدار ۰/۵ درصد وزنی مخلوط آسفالتی است.

- با توجه به تفاوت ناچیز در مشخصات مخلوطهای مسلح شده با الیاف کربن و نایلون، و قیمت بالاتر الیاف کربن، استفاده از الیاف نایلون به جای الیاف کربن توصیه می‌شود.

- برای استفاده از الیاف در بتن آسفالتی باید علاوه بر بررسی‌های فنی، آنالیز اقتصادی نیز انجام گیرد.

۶. مراجع

- طباطبایی، نادر و صحاف، سیدعلی (۱۳۷۹) "بررسی تاثیر الیاف فولادی در مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین المللی عمران، جلد پنجم، دانشگاه فردوسی مشهد.

- کاظمی، بابک (۱۳۹۱) "بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف

باشد. نتایج ارائه شده بیانگر آن است که، افزایش مقدار الیاف مخلوطهای حاوی الیاف کربن به طول ۱۰ میلی‌متر باعث کاهش کرنش ماندگار شده، ولی برای مخلوطهای مسلح شده با الیاف کربن با طول‌های ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر، افزایش مقدار از ۰/۴ به ۰/۵ درصد وزنی، باعث افزایش در کرنش ماندگار شده است. در مورد الیاف نایلون، با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که در مقدار ۰/۳ درصد از الیاف، افزایش طول الیاف از ۱۰ به ۲۵ میلی‌متر موجب کاهش در کرنش ماندگار شده و با افزایش طول تا مقدار ۴۰ میلی‌متر، میزان کرنش ماندگار بیشتر از الیاف با طول‌های کوتاه‌تر شده است. علت این امر می‌تواند این باشد که گرچه با افزایش طول الیاف نایلون تا ۲۵ میلی‌متر، فضاهای خالی موجود در نمونه افزایش می‌یابد، اما افزایش طول مهار این الیاف در بین سنگدانه‌ها، سبب تثبیت شدن مخلوط و کاهش کرنش ماندگار می‌شود. همچنین، مشابه نتایج مخلوطهای حاوی الیاف کربن، مشاهده می‌شود که در مخلوطهای حاوی الیاف نایلون به طول ۱۰ میلی‌متر، افزایش مقدار الیاف باعث کاهش کرنش ماندگار شده است. اما، برای مخلوطهای حاوی الیاف ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر، افزایش درصد الیاف نایلون از مقدار ۰/۳ درصد وزنی، افزایش در کرنش ماندگار را باعث شده است.

مقایسه نتایج ارائه شده برای الیاف کربن و نایلون نشان دهنده این است که به طور کلی، الیاف کربن نسبت به الیاف نایلون، تاثیر بیشتری در تثبیت مخلوط آسفالتی و کاهش کرنش‌های ماندگار مخلوط آسفالتی دارند.

۵. نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- افزودن الیاف (جز در مورد نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف کربن ۴۰ میلی‌متر)، موجب افزایش در استقامت مارشال و کاهش روانی می‌شود.

- استقامت مارشال با افزایش مقدار الیاف و طول الیاف تا حد معین استقامت مارشال افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

ton D.C, pp. 150-159.

-Jenq, Yeou-Shang, Liaw, C. and Pei, L. (1993) "Analysis of crack resistance of asphalt concrete overlays: A fracture mechanics approach", Transportation Research Record, Vol. 1388, pp. 160-166.

-Kim, K.W., Doh, Y.S. and Lim, S. (1999) "Mode I reflection cracking resistance of strengthened asphalt concretes", Journal of Construction and Building Materials. Vol. 13, pp. 243-251.

-Lee, S. J., Rust, J. P., Hamouda, H., Kim, Y. R. and Borden, R.H. (2005) "Fatigue cracking resistance of fiber-reinforced asphalt concrete", Textile Research Journal, Vol.75, No. 2, pp.123-128.

-Maurer Dean, A. and Gerald, M. (1989) "Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking", Transportation Research Record, vol. 1248, pp. 13-23.

-Mahrez, A., Karim, M. and Katman, H. (2005) "Fatigue and deformation properties of glass fiber reinforced bituminous mixes" Journal of East Asian Society of Transportation Studies, Vol. 6: pp. 997-1007.

-Mahrez, A., Karim, M. and Katman, H. (2003) "Prospect of using glass fiber reinforced bituminous mixes" Journal of East Asian Society of Transportation Studies, vol.5, pp. 794-807.

-Putman, B. J. and Amirkhanian, S. N. (2004) "Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures" Research on Conservation and Recycling, Vol. 42, pp. 265-74.

-Serfass, J. P. and Samanos, J. (1996) "Fiber modified asphalt concrete characteristics, applications and behavior", Association of Asphalt Paving Technologists, 65, pp. 193-230.

-Shao, X., Qiu, Y. and Wang, Y. (1996) "Theoretical modeling of the tensile behavior of low twist staple yarns, Part I – theoretical model", Journal of Textile Institute, vol. 2, pp. 25-32.

-Vasiliev, V., Mozorov, V. (2007) "Advanced mechanics of composite materials" Elsevier, UK, pp. 57-100.

پلی‌استر و اکریلیک بر پتانسیل شیار افتادگی و مقاومت در برابر زیان‌های رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان.

- میرزائی، ابراهیم و نصرالهی، سید مهدی (۱۳۸۸) "بررسی خواص روسازی های آسفالتی تقویت شده با الیاف پلی‌استر بازیافتی"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.

- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh M. and Hejazi, S. M. (2010) "Fiber-reinforced asphalt-concrete - a review", Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 6, June, pp. 871-877.

-Abtahi, S. M., Esfandiarpour, S., Kunt, M., Hejazi, S. M. and Ebrahimi, M. G. (2013) "Hybrid reinforcement of asphalt concrete mixtures using glass and polypropylene fibers", Journal of Engineering Fibers and Fabrics, Vol. 8, Issue 2, pp. 25-35.

- Chen, H., Xu, Q., Chen, S. and Zhang, Z. (2009) "Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures", Materials & Design, Volume 30, Issue 7, August 2009, pp. 2595-2603.

- Freeman, R. B., Burati, J. L., Amirkhanian, S. N. and Bridges, W.C. (1989) "Polyester fibers in asphalt paving mixtures", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.51, AAPT, pp. 387-409.

- Huang, H. and White, T. D. (1994) "Dynamic properties of fiber-modified overlay mixture", Transportation Research Record No.1455, TRB, National Research Council, Washington D.C, pp 98-104.

-Jahromi, S. and Khodaii, A. (2008) "Carbon fiber reinforced asphalt concrete" Arabian Journal of Science and Engineering, Vol. 33: pp.355-64.

-Jiang, Y. and Mcdaniel, R. S. (1993) "Application of cracking and seating and use of fibers to control reflective cracking", Transportation Research Record, No.1388, TRB, National Research Council, Washing-

-Williams, R. I. T. (1986) "Cement-treated pavements: materials, design and construction" London, Elsevier Applied Science Publishers LTD.

-Wu, S. P., Yue, H. B., Ye, Q. S. and Pang, L. (2009) "Performance research of hybrid fiber reinforced asphalt concrete" Journal of materials Science, Vol. 614, pp. 283-288.

-Xu Q., Chen, H. A. and Prozzi J. (2010) "Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects", Construction and Building Materials , Vol. 24, Issue-10 , October, pp. 2003-2010.

-Zube, E. (1956) "Wire mesh reinforcement in bituminous resurfacing" Highway Research Records, vol. 131:pp. 1-18.

