

ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی

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

سیامک افروزی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

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

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۵

دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۷

چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر الیاف نایلونی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، الیاف با طول ثابت ۱۲ میلی‌متر و در مقادیر ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۳ درصد (بر اساس وزن مخلوط) به یک نوع بتن آسفالتی افزوده شدند. پس از تعیین قیر بهینه مربوط به ترکیب‌های مختلف، خصوصیات حجمی مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف، بررسی شد. مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف، تحت آزمایش‌های استقامت و روانی مارشال و کشش غیر مستقیم قرار گرفتند. همچنین، آزمایش خزش دینامیکی با استفاده از دستگاه UTM-10، در سطوح تنش مختلف (۲۰۰ kPa و ۴۰۰ kPa) و دماهای مختلف (۴۰ °C، ۵۰ °C و ۶۰ °C)، به منظور ارزیابی تغییر شکل ماندگار (شیار افتادگی) مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف نایلونی، به کار گرفته شد. پارامترهای تغییر شکل ماندگار، همچون منحنی خزش دینامیکی، عدد روانی و شیب کرنش خزشی (CSS)، برای تحلیل نتایج استفاده شدند. در نهایت رفتار خزشی نمونه‌ها، با مدل خزش سه مرحله‌ای ژو مدلسازی شدند. همچنین در این تحقیق، به منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها، از نسبت مقاومت کششی (TSR) و نسبت مقاومت مارشال (MSR) استفاده گردید. بر اساس نتایج، استفاده از ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، موجب بهبود مشخصات مکانیکی مخلوط‌ها، از جمله استقامت و نسبت مارشال می‌شود. همچنین، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با افزایش مقدار الیاف، تا ۰/۱ درصد ابتدا کاهش یافته، سپس با افزایش مقدار الیاف در مخلوط، افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی و مدل ژو، نشان دادند که، افزودن ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، طول ناحیه اول منحنی خزش و عدد روانی مخلوط‌ها را افزایش داده و شیب کرنش خزشی (CSS) را کاهش می‌دهد، این نشان دهنده افزایش مقاومت مخلوط‌های حاوی مقدار بهینه الیاف، در برابر تغییر شکل دایمی است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، الیاف نایلونی، آسیب رطوبتی، خزش دینامیکی، مدل سه مرحله‌ا

۱. مقدمه

قیر بیشتر نسبت به قیر بهینه، عملکرد مخلوطها را در برابر رطوبت بهبود می‌دهد [Keymanesh, Kie-badroodi and Haghightpour, 2014].

همچنین، در روسازی‌های آسفالتی، شیار افتادگی، به‌عنوان تجمع تغییر شکل‌های ماندگار هر یک از لایه‌های ساختار روسازی، تحت بار ترافیک، تعریف می‌شود [Khodaii and Mehrara, 2009]. شیار افتادگی در لایه‌های روسازی، یکی از انواع بسیار مهم خرابی‌های روسازی آسفالتی است و بسته به سطح آن، می‌تواند مانع مهمی در برابر ایمنی ترافیک، راحتی رانندگی و عمر سرویس‌دهی ساختار روسازی باشد [Miljkovic and Radenberg, 2011]. از عواملی که شیار افتادگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارتند از افزایش تنش ناشی از بارگذاری، دامنه‌های طولانی شیب‌دار، کامیون‌های با سرعت پایین، خواص مصالح و شرایط آب و هوایی. با افزایش بارگذاری ناشی از ترافیک و فشار لاستیک، تغییر شکل دائمی لایه‌های بالایی روسازی، افزایش می‌یابد. مشخصه اساسی روسازی‌های آسفالتی، که نقش تعیین‌کننده‌ای در دوام و استقامت سازه‌ای دارد، مقاومت در برابر شیار افتادگی است [Shafabakhsh and Jafari, 2015].

روسازی‌های آسفالتی به منظور ارائه سرویس با کیفیت در عمر سرویس‌دهی، بایستی دارای خصوصیات عملکردی و ساختار رضایت‌بخشی باشند. همواره اقداماتی که موجب افزایش دوام، کیفیت و عمر روسازی و همچنین، جلوگیری از خرابی‌های زودرس در لایه آسفالتی گردند، مورد توجه قرار گرفته است. به همین منظور، امروزه محققان با استفاده از افزودنی‌های مختلف سعی بر اصلاح خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی در جهت کاهش خرابی‌ها و هزینه‌های نگهداری رویه‌های آسفالتی دارند.

در میان طیف وسیعی از افزودنی‌های موجود در بازار جهانی، الیاف به‌طور گسترده‌ای در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده‌اند. در سال‌های اخیر به دلیل استفاده گسترده از الیاف در زمینه‌های مهندسی و صنعتی، تکنولوژی الیاف به سرعت به سمت تولید الیاف با عملکرد بالا که توانایی ایفای نقش مهم و نو در مخلوط‌های آسفالتی را داشته باشند، هدایت می‌شود. به همین دلیل، مطالعاتی در مورد استفاده از الیاف بعنوان افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی،

روسازی انعطاف‌پذیر به دلیل عملکرد بالای آن، به‌طور گسترده‌ای در سطح جهان استفاده می‌شود. این روسازی با استفاده از بتن آسفالتی، که مخلوطی از قیر و سنگدانه بوده، ساخته می‌شود و ماده حساسی در مقایسه با مواد دیگر در مهندسی عمران است [Guo et al., 2015]. مخلوط‌های آسفالتی، قشر نهایی روسازی‌های انعطاف‌پذیر بوده، که نقش محافظت از جسم راه و انتقال تنش‌های فشاری از لایه‌های فوقانی به لایه‌های زیرین را دارا بوده و تحت تأثیر مستقیم آثار مخرب شرایط جوی هستند. همچنین، این لایه از روسازی در معرض ترک‌خوردگی و شیار افتادگی (تغییر شکل دائمی)، که در اثر تنش‌های ناشی از بارگذاری ترافیک وسایل نقلیه و تغییرات دمایی به وجود می‌آیند، می‌باشد.

مدهای خرابی روسازی آسفالتی معمولاً به خرابی‌های مربوط به استقامت (در برابر بار) و دوام، دسته‌بندی می‌شوند. مدهای خرابی مربوط به استقامت با مشکلات در طراحی مخلوط آسفالتی و جابه‌جایی در مخلوط‌های آسفالتی گرم تحت بارگذاری، مرتبط هستند، در حالی که، مدهای خرابی مربوط به دوام، با سن روسازی و شرایط هوا، در ارتباط هستند. آسیب رطوبتی، به‌عنوان از دست دادن مقاومت یا دوام در یک روسازی آسفالتی به دلیل تأثیرات رطوبت، شناخته می‌شود و ممکن است بر اساس از دست دادن خواص مکانیکی در مخلوط‌های آسفالتی، مورد ارزیابی قرار گیرد [Hamzah, Kakar and Hanin, 2015].

آسیب رطوبتی معمولاً به یک مکانیسم محدود نمی‌شود و نتیجه ترکیب فرآیندهای مختلفی است [Shen et al. 2012]. آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، درون مخلوط سنگ‌دانه-قیر، در حضور آب رخ می‌دهد، و در حالت کلی به دو مکانیسم، از بین رفتن چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه (adhesion) و از بین رفتن چسبندگی قیر (cohesion)، تقسیم‌بندی می‌شود. از بین رفتن چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه، به علت ورود آب بین قشر قیری است که سنگ‌دانه‌ها را پوشانده است. از بین رفتن چسبندگی قیر به علت نرم شدن قیر پرکننده‌ای است که در مخلوط وجود دارد [Kavussi and Barghabani, 2014]. همچنین، مقدار قیر بهینه تأثیر مهمی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارد. استفاده از مقدار

داشت. بنابراین، تعیین اثرات و مکانیسم‌های مختلف انواع الیاف، برای تعیین نوع مناسب الیاف به منظور طرح مخلوط‌های آسفالتی، منطقی است [Chen et al. 2009].

بر اساس تحقیقات گذشته، مطالعات نسبتاً کمی روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف نایلونی، انجام شده است و هنوز مطالعات کامل و همه جانبه‌ای بر روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی این نوع الیاف، انجام نشده است. در این پژوهش، از الیاف نایلونی در درصدهای مختلف، به منظور مسلح نمودن مخلوط‌های آسفالتی، استفاده شده است. در واقع هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر الیاف نایلونی بر خصوصیات مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی و همچنین، تعیین مقدار بهینه الیاف نایلونی، جهت بهبود عملکرد این مخلوط‌ها، است.

۲. مروری بر پیشینه تحقیق

طی سال‌های گذشته، محققان از الیاف مختلف برای مسلح سازی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند، که از جمله این الیاف می‌توان به الیاف پلی استر [Shiu and Kuei, 2005; Shaopeng, 2008]، الیاف آزبست، الیاف پلی پروپیلن [Qunshan and Ning, 2008]، الیاف کربن [Tapkin, 2008; Abtahi et al., 2009]، الیاف کربن [Jahromi, 2008]، الیاف سلولز [and Khodaii, 2008]، الیاف سلولز [Decoene, 1990; Partl, 1994]، الیاف شیشه [et al., 1994]، الیاف شیشه [Mahrez et al., 2003; Najd et al., 2005] و الیاف زائد بازیافتی [Putman and Amirkhanian, 2005]، اشاره کرد. [2004; Lee et al., 2005].

مخلوط‌های اصلاح شده با الیاف کربن افزایش قابل توجهی در سفتی، عمر خستگی و مقاومت در برابر شیار افتادگی داشتند و همبستگی خوبی بین سفتی و عمر خستگی و تغییر شکل ماندگار وجود داشت [Jahromi and Khodaii, 2008]. همچنین، یکی دیگر از الیاف مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی، الیاف سلولزی است که پایه‌ی گیاهی داشته، و معمولاً از بوته‌های چوبی به دست می‌آیند، و در برخی موارد از روزنامه‌های بازیافتی نیز تولید می‌شوند. این الیاف خاصیت جذب بالایی دارند به همین دلیل مقدار بیشتری از قیر را در مخلوط‌ها حفظ می‌کنند و اغلب در آسفالت ماستیک درشت دانه استفاده می‌شوند [NCHRP-475, 2015].

با تمرکز بر نقش مسلح سازی الیاف و تاثیر آن‌ها بر مشخصات شکست و خزش، انجام می‌شود [Crispino, Mariani and Toraldo, 2013].

استفاده از الیاف در آسفالت ماستیک درشت دانه و مخلوط‌های با دانه بندی باز یا متخلخل برای جلوگیری از پدیده ریزش قیر بسیار معمول است. همچنین، در مخلوط‌های با دانه بندی پیوسته برای افزایش پایداری (کاهش شیار افتادگی) و بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مخلوط‌های آسفالتی در برابر نیروهای فشاری مقاوم، ولی در برابر کشش ضعیف می‌باشند. افزودن الیاف با مقاومت کششی بالا، می‌تواند در افزایش مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی کمک کند. در تئوری، با انتقال تنش‌ها به الیاف مقاوم می‌توان تنش‌های وارده به آسفالت کم مقاومت را کاهش داد. برای انتقال مؤثرتر تنش‌ها، بایستی چسبندگی خوبی بین قیر و الیاف برقرار باشد و وجود مساحت سطح بیشتر الیاف می‌تواند به این چسبندگی کمک کند. علاوه بر این، برای جلوگیری از تمرکز تنش، بایستی الیاف به‌طور یکنواخت در مخلوط پخش شوند [NCHRP-475, 2015].

در حالت کلی، الیاف می‌توانند خصوصیات ویسکوالاستیسیته مخلوط را تغییر داده و موجب بهبود مدول دینامیکی [Abtahi et al., 2010]، بهبود آسیب رطوبتی [Xu and Wang, 2011] و مقاومت در برابر شیار افتادگی [Han et al., 2012] شده و ترک‌های خستگی را کاهش دهند [Ye et al., 2009]. افزودن الیاف قیر را سفت کرده و همچنین با ایجاد شبکه سه بعدی موجب پایداری قیرهای مخلوط می‌شود و پدیده ریزش قیر را کاهش می‌دهد [Kumar et al. 2009]. از طرف دیگر الیاف با افزایش مقدار فضای خالی موجب افزایش مقدار قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند، درحالی‌که حداکثر وزن مخصوص مخلوط را کاهش می‌دهند. مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف، متفاوت با مخلوط‌های آسفالتی معمولی است. همچنین، مقدار الیاف نیز تأثیر مهمی روی تعیین مشخصات مهندسی و حجمی مخلوط‌های آسفالتی دارد. از این رو، تعیین مقدار بهینه الیاف با هدف طرح اختلاط مؤثرتر، لازم است. علاوه بر این، انواع الیاف، مشخصات و مکانیسم مسلح کنندگی متفاوتی خواهند

بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از الیاف نایلونی با دانسیته خطی ۱۶۰۰denier، طول ۱۲mm و در سه درصد مختلف (۰/۰۶۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵ درصد)، برحسب وزن مخلوط، استفاده شد. همچنین جنس مصالح مصرفی آهکی و دانه‌بندی آن طبق دانه‌بندی شماره ۳ آیین‌نامه ایران بود. برای افزودن الیاف در مخلوط‌ها، از روش خشک استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده در این مطالعه، الیاف نایلونی موجب بهبود استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی می‌شود اما تأثیر الیاف شیشه و الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به الیاف نایلونی و پلی‌استر، بر روی استقامت مارشال، بهتر بوده است. همچنین، در این مطالعه الیاف نایلونی موجب افزایش روانی مارشال مخلوط‌ها، می‌شود. اما تأثیر این الیاف بر روی وزن مخصوص حقیقی مخلوط‌ها، در درصدهای مختلف الیاف، متفاوت بوده است [Hejazi et al., 2008].

در تحقیقی دیگر، از الیاف نایلون و الیاف پلی‌پروپیلن حاصل از توره‌های ماهیگیری بازیافتی، برای مسلح کردن مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد. در این مطالعه سه درصد مختلف از الیاف نایلونی و پلی‌پروپیلن را در مخلوط‌ها استفاده کرده و مقدار قیر بهینه را برای همه ترکیب‌ها ثابت در نظر گرفتند و تأثیر این الیاف‌ها را بر روی مشخصات حجمی و همچنین استقامت و روانی مارشال، مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از الیاف نایلونی در مخلوط‌های آسفالتی موجب کاهش وزن مخصوص حقیقی مخلوط، افزایش فضای خالی و افزایش مقدار روانی مارشال می‌شود. همچنین استقامت مارشال مخلوط‌های حاوی الیاف نایلونی ابتدا به مقدار جزئی افزایش و سپس با افزایش مقدار الیاف، کاهش می‌یابد [Labib and Maher, 1999].

۳. مواد آزمایش و اختلاط

۳-۱ مشخصات مواد و مصالح مصرفی

قیر مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها در این تحقیق از نوع قیر ۷۰-۶۰ تولید شرکت نفت پاسارگاد است. جدول ۱، مشخصات قیر مصرفی در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش از شرکت زنجان ره ساز، تهیه شد. جنس مصالح سنگی استفاده شده، سیلیسی است. مشخصات مصالح سنگی و

اخیراً الیاف سنتتیک همچون الیاف شیشه، کربن، پلیمر و آرامید به دلیل سفتی بالا و خصوصیات کششی، به عنوان اصلاح کننده استفاده می‌شوند. مقدار الیاف و طول آن در رابطه با پایداری و مشخصات حجمی، دو پارامتر مهم هستند [Abiola et al., 2014]. جون لی و همکارانش^۱ که از انرژی شکست برای ارزیابی تأثیر استفاده از الیاف نایلونی حاصل از فرش بازیافتی، بر روی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک خستگی استفاده کردند، به این نتیجه رسیدند که افزودن الیاف نایلونی به بتن آسفالتی می‌تواند مقاومت در برابر ترک خستگی آن را از طریق افزایش انرژی شکست، بهبود دهد. در این مطالعه، مشخصات مکانیکی بتن آسفالتی مسلح شده با الیاف نشان داد که، بتن آسفالتی مسلح شده با الیاف دارای ۱۲ میلی‌متر طول و نسبت حجمی ۱٪، نسبت به طول-ها و نسبت‌های حجمی دیگر، انرژی شکست بیشتری دارد [Lee et al., 2005].

در مطالعه‌ای دیگر، عملکرد الیاف فرش (الیاف نایلونی) و لاستیک ضایعاتی، با الیاف پرکاربرد نظیر الیاف سلولز و پلی‌استر، در آسفالت ماستیک درشت‌دانه ساخته شده با قیر PG76-22 و مصالح سنگی گرانی، مورد مقایسه قرار گرفتند. برای هر کدام از ترکیب‌ها، قیر بهینه مورد نیاز به دست آمد. مخلوط‌های حاوی الیاف فرش، لاستیک ضایعاتی و پلی‌استر، قیر بهینه کمتری نسبت به الیاف سلولز، داشتند. آزمایش‌های ریزش قیر، حساسیت رطوبتی و آزمایش شیار افتادگی برای ارزیابی مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که، الیاف فرش و لاستیک بازیافتی علاوه بر مؤثر بودن در پدیده ریزش قیر، نسبت به الیاف پلی‌استر و سلولز، در مقابل آسیب رطوبتی نیز مقاوم هستند. همچنین این الیاف تفاوت چندانی در تغییر شکل ماندگار، در مقایسه با الیاف سلولزی و پلی‌استر نداشتند. از طرف دیگر سفتی آسفالت ماستیک درشت‌دانه حاوی الیاف نایلونی حاصل از فرش ضایعاتی، الیاف لاستیک ضایعاتی و الیاف پلی‌استر، نسبت به مخلوط‌های حاوی الیاف سلولز، بیشتر بود [Putman and Amir Khanian, 2004]. در پژوهشی که توسط حجازی و همکاران، انجام شد، تأثیر چهار نوع الیاف (نایلون ۶/۶، شیشه، پلی‌پروپیلن و پلی‌استر) بر روی استقامت و روانی مارشال و همچنین وزن مخصوص حقیقی، مورد

ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی

وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی در آزمایش‌ها

| مشخصه | روش آزمایش | نتیجه | حدود آیین نامه |
|--|------------|-------|----------------|
| درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، بر حسب ۰/۱ میلی‌متر | ASTM-D5 | ۶۹ | ۶۰-۷۰ |
| نقطه نرمی، بر حسب درجه سانتی‌گراد | ASTM-D36 | ۴۹ | ۴۹-۵۶ |
| مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی‌گراد، بر حسب سانتی‌متر | ASTM-D113 | ۱۰۰ | حداقل ۱۰۰ |
| درجه اشتعال، بر حسب درجه سانتی‌گراد | ASTM-D92 | ۳۰۸ | حداقل ۲۳۲ |
| وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (gt/cm ³) | ASTM-D70 | ۱/۰۳ | ۱/۰۱-۱/۰۶ |
| کندروانی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (سانتی استوکس) | ASTM-D2170 | ۸۱۰ | - |
| کندروانی در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی استوکس) | ASTM-D2170 | ۴۲۰ | - |
| کندروانی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد (سانتی استوکس) | ASTM-D2170 | ۲۳۲ | - |

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

| مشخصه | روش آزمایش | نتایج آزمایش | | حدود آیین نامه | |
|--|-------------|--------------------------------|---------|----------------|-----------|
| | | درشت‌دانه | ریزدانه | درشت‌دانه | ریز دانه |
| ارزش ماسه‌ای | AASHTO-T176 | - | ۵۸ | - | حداقل ۵۰ |
| درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس | AASHTO-T96 | ۲۲ | - | حداکثر ۲۵ | - |
| درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ | ASTM-D5821 | در یک جبهه ۹۴ در دو جبهه ۹۰ | - | - | - |
| درصد سیلیس مصالح سنگی (SiO ₂) | - | ۵۵ | - | - | - |
| درصد تورق | BS-812 | ۱۱ | - | حداکثر ۱۵ | - |
| درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم | AASHTO-T104 | ۰/۷ | ۰/۹ | حداکثر ۸ | حداکثر ۱۲ |

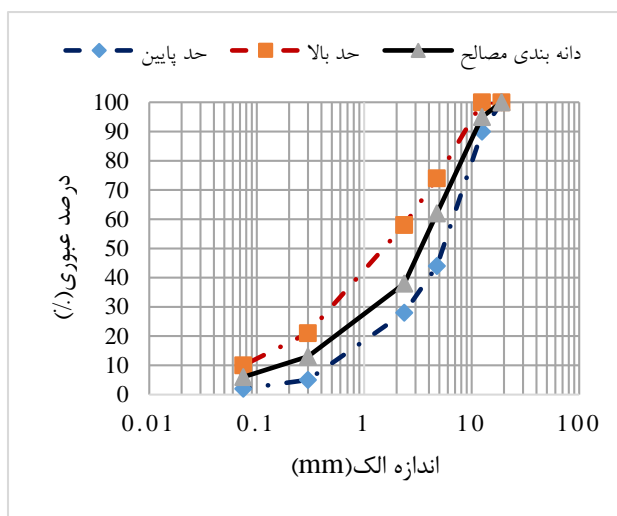
جدول ۳. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

| وزن مخصوص (g/cm ³) | درصد جذب آب | ظاهری | حقیقی |
|--------------------------------|-------------|-------|-------|
| ۲/۶۰ | ۱/۸ | ۲/۷۲ | ۲/۶۰ |
| ۲/۶۰ | ۲/۵ | ۲/۷۸ | ۲/۶۰ |
| ۲/۷۹ | - | - | - |

مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰

جدول ۴. مشخصات الیاف به کار رفته در آزمایشات

| جنس الیاف | استحکام (CN/Tex) | مقاومت کشیدگی (%) | دانسیته خطی نخ (Denier) |
|------------|------------------|-------------------|-------------------------|
| نایلون ۶/۶ | ۸۵ | ۲۴ | ۸۴۰ |



شکل ۱. محدوده دانه بندی آیین نامه و دانه بندی مخلوط مورد استفاده در مطالعه



شکل ۲. شکل ظاهری الیاف نایلون

الیاف به کار رفته در آزمایشها، در جدول ۴ آمده است. شکل ظاهری الیاف نایلونی در شکل ۲، نشان داده شده است.

۲-۳ طرح اختلاط و آماده سازی نمونه ها

مخلوط های حاوی الیاف، به دلیل خاصیت جذب کنندگی الیاف و افزایش فضای خالی مخلوط توسط آن، دارای مقدار قیر بهینه

دانه بندی مورد استفاده، دانه بندی شماره ۴ از آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران، انتخاب گردید. شکل ۱ نشان دهنده محدوده دانه بندی آیین نامه و دانه بندی مخلوط مورد استفاده در این مطالعه، است. الیاف نایلونی مورد استفاده در این تحقیق از نوع نخ نایلون ۶/۶ بوده و از شرکت نخ تایر صبا تهیه شد. مشخصات

ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی

برای بررسی تأثیر الیاف نایلونی، بر خصوصیات مکانیکی مخلوط-های آسفالتی، از آزمایش‌های استقامت و روانی مارشال، کشش غیر مستقیم و آزمایش خزش دینامیکی (جهت بررسی پتانسیل شیار افتادگی مخلوط‌ها)، استفاده شد. همچنین، به منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها، آزمایش‌های لاتمن اصلاح شده (TSR) و نسبت مقاومت مارشال (MSR) مورد استفاده قرار گرفتند. در طی این مطالعه، خصوصیات حجمی مخلوط‌های حاوی الیاف نیز بررسی شد. آزمایش‌های انجام شده به شرح زیر است:

۴-۱ مشخصات حجمی

وزن مخصوص حقیقی (G_{mb}) و حداکثر وزن مخصوص تئوری (G_{mm}) مخلوط‌های آسفالتی، به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D2726 و ASTM D2041 تعیین شدند. در نتیجه، مقدار فضای خالی مخلوط آسفالتی (V_a)، مقدار فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر (VFA)، طبق معادلات زیر مورد محاسبه قرار گرفتند:

$$V_a = 100 \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (1)$$

$$VMA = 100 \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} P_s \right) \quad (2)$$

$$VFA = 100 \left(1 - \frac{V_a}{VMA} \right) \quad (3)$$

در این روابط، G_{sb} وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی و P_s نسبت وزنی مصالح سنگی در بتن آسفالتی، است [طباطبایی، ۱۳۹۰].

۴-۲ آزمایش استقامت و روانی مارشال

آزمایش استقامت و روانی مارشال بر روی نمونه شاهد و نمونه‌های دارای درصدهای مختلف الیاف نایلونی، طبق استاندارد ASTM D1559 انجام شدند. در این آزمایش یک بار فشاری با نرخ 50 mm/min ، تا شکست نمونه اعمال می‌شود. حداکثر بار اعمال شده در زمان شکست نمونه را استقامت مارشال می‌گویند و تغییر شکل پلاستیک نمونه در لحظه شکست را روانی مارشال گویند [Chen et al., 2009]. علاوه بر این، نسبت مارشال (MQ) (نسبت استقامت (KN) به روانی مارشال (mm)) نیز روی نمونه‌های

بیشتری هستند [Chen et al., 2009; NCHRP-475, 2015]. در این مطالعه، مقدار قیر بهینه برای مخلوط شاهد و مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف، با استفاده از روش مارشال تعیین شد. طول الیاف بر اساس مطالعات انجام شده در گذشته، ۱۲ میلیمتر در نظر گرفته شد. مقدار قیر بهینه برای مخلوط‌های بدون الیاف، بر اساس طرح اختلاط مارشال، ۵/۳ درصد و برای مخلوط‌های با درصد الیاف ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد، به ترتیب ۵/۶، ۵/۹ و ۶/۲ درصد به دست آمد.

نمونه‌های آسفالتی، بر اساس روش مارشال با ارتفاع تقریبی ۶۷ میلیمتر و قطر ۱۰۱/۶ میلیمتر در شرایط آزمایشگاهی، طبق استاندارد ASTM D1559 ساخته شدند. نمونه‌ها با استفاده از چکش مارشال، با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با در نظر گرفتن شرایط ترافیک سنگین، متراکم شدند. به منظور مطالعه تأثیر مقدار الیاف نایلونی بر مشخصات مهندسی و مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی، این الیاف در مقادیر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد بر اساس وزن مخلوط، به نمونه‌های آسفالتی اضافه شده و با نمونه‌های شاهد مقایسه شدند.

یکی از موارد مهم در ساخت نمونه‌های الیافی، نحوه افزودن الیاف در مخلوط است. روش‌های مختلفی برای ساخت مخلوط‌های حاوی الیاف وجود دارد. الیاف می‌تواند به قیر اضافه شده و سپس سنگدانه‌ها و قیر حاوی الیاف، باهم مخلوط شوند که به روش تر موسوم است. اما، در روش خشک، الیاف ابتدا با سنگدانه مخلوط شده سپس قیر به سنگدانه‌های حاوی الیاف افزوده می‌شود [NCHRP-475, 2015]. روش دیگر، افزودن الیاف در حین اختلاط قیر با سنگدانه‌ها است. در این تحقیق، نمونه‌های حاوی الیاف به هر سه روش ذکر شده، ساخته شده و تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند و بهترین روش ساخت مخلوط‌های حاوی الیاف نایلونی، بر اساس حداکثر مقاومت کششی به دست آمده، تعیین شد. بر اساس نتایج حاصل، در این مطالعه، برای ساخت نمونه‌های الیافی، الیاف حین اختلاط قیر با سنگدانه‌ها، به مخلوط اضافه شده و تا آغشته شدن کامل الیاف و سنگدانه به قیر، عمل اختلاط ادامه یافت.

۴. شرح آزمایش‌های انجام شده

بهتری نسبت به آزمایش غوطه وری-فشار (ASTM D1075) یا روش غوطه وری مارشال است و علت آن عدم توانایی این دو روش، در تعیین مؤثر حساسیت رطوبتی مخلوطها است [Yusoff et al., 2014].

طبق استاندارد AASHTO T283، شش نمونه با قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع تقریبی ۶۷ میلی‌متر، برای هر کدام از ترکیبها آماده می‌شوند. نمونه‌ها پس از خارج شدن از قالب‌ها، به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده می‌شوند و سپس وزن مخصوص حقیقی و فضای خالی آن‌ها تعیین می‌شوند. فضای خالی نمونه‌ها بایستی 7 ± 0.5 درصد باشد. نمونه‌ها به دو گروه خشک و تر تقسیم بندی می‌شوند. گروه خشک قبل از انجام آزمایش، در کیسه پلاستیکی قرار داده شده و در حمام آب 25°C به مدت ۲ ساعت قرار می‌گیرند. گروه دیگر از نمونه‌ها، توسط دستگاه خلا، بین ۷۰ تا ۸۰ درصد، اشباع شده و در کیسه پلاستیکی محتوی 10 ± 0.5 میلی‌لیتر آب، قرار داده می‌شوند. سپس این نمونه‌ها، در فریزر، با دمای -18°C به مدت ۱۶ ساعت، نگهداری می‌شوند. در مرحله بعد، نمونه‌ها در حمام مارشال 60°C به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می‌شوند. در مرحله آخر عمل آوری و قبل از آزمایش، نمونه‌ها در حمام آب 25°C به مدت ۲ ساعت نگهداری می‌شوند.

نمونه‌های عمل‌آوری شده و نمونه‌های خشک تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار می‌گیرند. نسبت مقاومت کششی نمونه‌های عمل-آوری شده به مقاومت کششی نمونه‌های خشک، نسبت مقاومت کششی (TSR) بوده و مطابق معادله ۵ است:

$$\text{TSR} = 100 \left(\frac{\text{ITS}_w}{\text{ITS}_d} \right) \quad (5)$$

که در آن، TSR: نسبت مقاومت کششی، ITS_w : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده (kPa)، ITS_d : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط خشک (kPa).

۴-۴-۲ آزمایش نسبت استقامت مارشال (غوطه‌وری مارشال)

استقامت باقیمانده، می‌تواند برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های مورد آزمایش، استفاده شود. نسبت استقامت مارشال نمونه‌های عمل‌آوری شده به نمونه‌های عمل‌آوری نشده، معیاری برای شناسایی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، است. روش انجام این آزمایش به شرح زیر است:

مختلف محاسبه شد. نسبت مارشال بالاتر نشان دهنده مقاومت بهتر در برابر تنش برشی و تغییرشکل‌های دایمی می‌باشد [Ameri et al., 2013].

۴-۳ آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS^*)

یکی از ویژگی‌های مهم بتن آسفالتی، مقاومت آن در برابر بارهای کششی و در نتیجه ترک‌خوردگی است. مقاومت کششی بتن آسفالتی از طریق آزمایش کشش غیرمستقیم تعیین می‌شود. این آزمایش در اصل یک آزمایش فشاری قطری است که در آن نمونه استوانه‌ای شکل تحت تأثیر نیروی فشاری وارد بر سطح جانبی قرار می‌گیرد. این نحوه بارگذاری سبب ایجاد تنش‌های کششی در امتداد قطر بارگذاری می‌شود و در نتیجه نمونه در امتداد قطر بارگذاری شده می‌شکند.

روش استاندارد ASTM-D6931 برای ارزیابی مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش در دمای 25°C و با جک مارشال که دارای سرعت $50/8 \text{ mm/min}$ بود، صورت گرفت. مقدار فضای خالی نمونه‌های آسفالتی در این آزمایش، 7 ± 0.5 درصد بود. معادله ۴ برای محاسبه مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، استفاده می‌شود:

$$S_t = \frac{2000 P}{\pi t D} \quad (4)$$

که در آن، S_t : مقاومت کششی (Kpa)، P : حداکثر بار اعمالی (N)، t : ارتفاع نمونه (mm) و D : قطر نمونه (mm) است.

۴-۴-۴ آزمایش‌های حساسیت رطوبتی

در این تحقیق برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها، از آزمایش‌های نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (لاتمن اصلاح شده) و آزمایش نسبت استقامت مارشال (MSR) استفاده شد. روش انجام این آزمایش‌ها به شرح زیر است.

۴-۴-۱-۴ آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (لاتمن اصلاح شده)

آزمایش لاتمن اصلاح‌شده (AASHTO T283) به عنوان روش آزمایش رایج، در حال حاضر برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود و این روش توسط سیستم سوپرپیو تأیید شده است. روش آزمایش AASHTO T283، روش

ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی

سه ناحیه تقسیم می‌شود. در ناحیه اول، نرخ کرنش کاهش می‌یابد و تغییر شکل در این مرحله، به‌طور عمده به صورت تغییر حجمی (تراکم) است.

در ناحیه دوم، نرخ کرنش ثابت است و در این مرحله، تغییر شکل به صورت تغییر حجمی و تغییر شکل برشی است. در ناحیه سوم، نرخ کرنش تا ایجاد شکست افزایش می‌یابد، این مرحله شامل تغییر شکل پلاستیک (برشی) بدون تغییر حجم است [Uzarowski, 2006].

در این تحقیق، به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار افتادگی، آزمایش خزش دینامیکی با استفاده از دستگاه -UTM¹⁰ ساخت کشور آلمان، به منظور اعمال بار محوری تکرار شونده بر روی نمونه‌های آسفالتی، با اندازه‌گیری تغییر شکل‌های عمودی، استفاده شد. در این دستگاه، برای کنترل دمای محیط نمونه‌های آزمایش، سیستم بارگذاری داخل یک محفظه محیطی قرار گرفته است. داده‌های ورودی در این دستگاه، شامل ابعاد نمونه (قطر و ارتفاع)، پیش بارگذاری، مقدار تنش تماسی، تنش انحرافی، فرکانس اعمال تنش، تعداد سیکل بارگذاری و دمای محیط است، که توسط یک نرم افزار کنترل می‌شوند.

آزمایش خزش دینامیکی طبق استاندارد EN 12697-25 انجام شد [Al Nageim et al., 2012]. رفتار نمونه‌ها، تحت سطوح تنش و دماهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. شرایط آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است. سطوح تنش پایین در آزمایش خزش دینامیکی نمی‌تواند رفتار واقعی مخلوط‌های آسفالتی را بخصوص مخلوط‌های اصلاح شده را نشان دهد [Khodaii and Mehrara, 2009]. به همین دلیل، در این مطالعه سطوح تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال برای ارزیابی نمونه‌ها در نظر گرفته شدند. همچنین، به منظور از بین بردن تاثیرات احتمالی تفاوت‌های جزئی در ابعاد نمونه، آزمایش در حالت تنش ثابت انجام شد.

علاوه بر این یک فرآیند پیش بارگذاری به مدت ۱۰ دقیقه، که شامل یک تنش استاتیکی به بزرگی ۱۰ درصد تنش دینامیکی بود، قبل از شروع آزمایش خزش دینامیکی اعمال شد. فرآیند پیش بارگذاری قبل از خزش دینامیکی تضمین می‌کند که سطوح نمونه و صفحات بارگذاری به طور کامل در تماس با یکدیگر قرار گرفته‌اند و

دو گروه از نمونه‌های آسفالتی ترکیب‌های مختلف، با فضای خالی 4 ± 1 درصد ساخته می‌شود. نمونه‌های گروه اول در حمام آب 60°C به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفته، سپس با دستگاه مارشال با سرعت بارگذاری $50/8\text{mm/min}$ ، بارگذاری شده و مقادیر استقامت و روانی مارشال ثبت می‌شوند (نمونه‌های خشک). گروه دوم از نمونه‌ها در حمام آب 60°C به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته، سپس همانند گروه اول تحت بارگذاری قرار می‌گیرند (نمونه‌های عمل آوری شده). نسبت استقامت مارشال (MSR) برای هر کدام از ترکیب‌ها، با استفاده از میانگین استقامت نمونه‌های خشک و نمونه‌های عمل آوری شده، با استفاده از معادله ۶ محاسبه می‌شود:

$$MSR = \frac{MS_{cond}}{MS_{uncond}} \times 100 \quad (6)$$

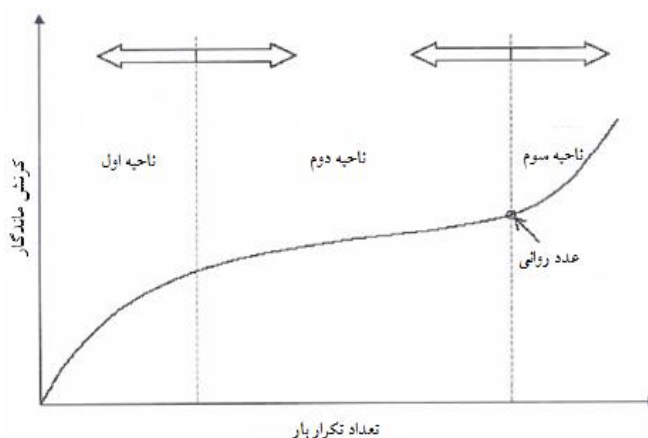
که در آن MSR: نسبت استقامت مارشال، MS_{cond} : استقامت مارشال متوسط برای نمونه‌های عمل آوری شده (kg)، MS_{uncond} : استقامت مارشال نمونه‌های خشک یا عمل آوری نشده (kg)، است [Aksoy et al., 2005].

۴-۵ آزمایش خزش دینامیکی (شیار افتادگی)

آزمون‌های آزمایشگاهی مختلفی همچون خزش استاتیکی، خزش دینامیکی و ویل تراک، برای ارزیابی پتانسیل تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی، استفاده می‌شود. در میان روش‌های ارزیابی پتانسیل تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش خزش دینامیکی، یکی از بهترین روش‌ها است. این آزمایش در سال ۱۹۷۰ میلادی، توسط مون اسمیت^۹ بر اساس مفاهیم آزمایش فشاری محوری، توسعه داده شد. همچنین، بر اساس گزارش NCHRP، در میان آزمون‌های آزمایشگاهی بررسی شده، آزمایش خزش دینامیکی همبستگی بسیار خوبی با عمق شیار اندازه‌گیری شده دارد و دارای ظرفیت بالایی، در تخمین پتانسیل شیار افتادگی لایه‌های آسفالتی، است. آزمایش خزش دینامیکی، به عنوان یک روش آزمایشگاهی، برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده و اصلاح نشده، در برابر تغییر شکل دائمی، مناسب است [Khodaii and Mehrara, 2009].

نمودار کرنش عمودی به ازای تعداد بار اعمالی، که نمونه آن در شکل ۳، نشان داده شده است، مهم‌ترین خروجی آزمایش خزش دینامیکی است که به منحنی خزش موسوم است. منحنی خزش به

قسمت‌های آزاد در سطوح نمونه، حرکات تغییر شکلی خود را انجام داده‌اند.



شکل ۳. نمودار کرنش حاصل از آزمایش خزش دینامیکی

جدول ۵. شرایط آزمایش

| تنش (kPa) | فرکانس (Hz) | شکل بارگذاری | زمان بارگذاری (s) | زمان استراحت (s) | تعداد بار اعمالی | دمای آزمایش (°C) | قطر نمونه (mm) | ارتفاع نمونه (mm) |
|-----------|-------------|--------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-------------------|
| ۲۰۰ و ۴۰۰ | ۰/۵ | مربعی | ۱±۰/۰۵ | ۱±۰/۰۵ | ۱۰۰۰۰ | ۶۰ و ۵۰ و ۴۰ | ۱۰۱/۶ | ۶۷±۱ |

عدد روانی (FN^A)، تعداد تکرار بار متناظر با شروع ناحیه سوم منحنی خزش، است، و نقطه‌ای است که کرنش ماندگار در مخلوط به شدت افزایش می‌یابد. عدد روانی به عنوان معیاری برای مقایسه پتانسیل شیار افتادگی مخلوط‌ها، استفاده می‌شود و با آن، نسبت عکس دارد [Yao et al., 2013]. همچنین، شیب کرنش خزشی (CSS^9)، شیب ناحیه دوم منحنی خزش حاصل از آزمایش خزش دینامیکی است، که از طریق برازش خطی محاسبه شده و نشان دهنده نرخ تغییر شکل، تحت تاثیر بار تکراری است. برای شرایط بارگذاری با تنش ثابت، شیب کرنش در ناحیه دوم خزش تقریباً ثابت است. از اینرو، CSS یکی دیگر از مشخصات تغییر شکل دایمی است که نرخ افزایش تغییر شکل را نشان می‌دهد [Katman et al., 2015].

ژو و همکاران^{۱۰} یک مدل سه مرحله‌ای (مدلی برای هر یک از نواحی منحنی خزش) به همراه الگوریتمی برای تخمین نقاط

همچنین، طبق مطالعات انجام شده در گذشته، برای اطمینان از اینکه دمای نمونه به دمای آزمایش رسیده باشد، تمامی نمونه‌ها به مدت حداقل دو ساعت قبل از شروع آزمایش، در داخل محفظه هم دمای آزمایش (محفظه دستگاه UTM) قرار گرفتند [Khodaii and Mehrara, 2009 and Katman et al., 2015].

۵. مدل‌سازی منحنی خزش

رفتار تغییر شکل ماندگار سه مرحله‌ای، یک ویژگی اساسی مصالح است. بنابراین، مدلی برای توصیف دقیق این رفتار لازم است. در طی سال‌های گذشته، مدل‌های ریاضی مختلفی، که معروفترین آن‌ها عبارتند از مدل نیمه لگاریتمی (۱۹۷۲)، مدل توانی بر اساس مدل مون اسمیت (۱۹۷۵) و مدل تسنگ و لیتون^{۱۱} (۱۹۸۹)، برای برازش منحنی خزش و تخمین پارامتر عدد روانی در مخلوط‌های آسفالتی، توسعه داده شده‌اند [Khodaii and Mehrara, 2009].

ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی

نمایی به ترتیب برای نواحی اول تا سوم استفاده شد. معادلات زیر، هر مرحله از مدل را، نشان می‌دهند [Zhou et al., 2004].

$$N \leq N_{ps} \quad , \quad \varepsilon_p = aN^b$$

مرحله اول (۷)

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{ps} + c(N - N_{ps}), \quad N_{ps} \leq N \leq N_{ST} \text{ و } \varepsilon_{ps} = aN_{ps}^b$$

مرحله دوم (۸)

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{ST} + d(e^{f(N-N_{ST})} - 1), N \geq N_{ST} \text{ و } \varepsilon_{ST} = \varepsilon_{ps} + c(N_{ST} - N_{ps})$$

مرحله سوم (۹)

ابتدایی هر ناحیه و عدد روانی پیشنهاد کردند. در مدل ارائه شده توسط این محققین، یک تابع توانی، یک تابع خطی و یک تابع

VFA مخلوط‌های آسفالتی، با افزایش مقدار الیاف، کاهش می‌یابد. کاهش VFA، نشان دهنده کاهش ضخامت قیر موثر بین سنگدانه‌ها است، که منجر به ترک در دماهای بسیار پایین و دوام کمتر مخلوط-های آسفالتی می‌شود. بنابراین، مقادیر بالای الیاف نایلونی برای استفاده در مخلوط‌های آسفالتی توصیه نمی‌شود.

۶-۲ آزمایش استقامت و روانی مارشال

شکل ۴، نتایج آزمایش استقامت مارشال مربوط به مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف الیاف نایلونی را نشان می‌دهد. نتایج از آزمایش سه نمونه برای هر ترکیب و میانگین‌گیری از آنها بدست آمده است. مطابق نتایج حاصل، استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف، ابتدا افزایش، سپس با افزایش مقدار الیاف، کاهش می‌یابد و بیشترین مقدار استقامت (۱۶۰۳ Kg) متعلق به مخلوط آسفالتی حاوی ۰/۱ درصد الیاف نایلونی است. افزایش استقامت مارشال به نوعی نشان دهنده افزایش پایداری آن در برابر بارهای وارده و افزایش مقاومت در مقابل خرابی‌هایی مثل فرتیله شدن و شارشدگی می‌باشد. در حالت کلی، استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با مقدار مناسب الیاف نایلونی، نسبت به مخلوط‌های آسفالتی فاقد الیاف، بیشتر است. این روند مطابق با تحقیقات انجام شده در گذشته، بر روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف نایلونی، است [Hejazi et al., 2008: Labib and Maher, 1999]. الیاف به هنگام ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی، نقش پل را ایفا می‌کنند و از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کنند و همچنین با ایجاد شبکه سه بعدی موجب استقامت و مقاومت مخلوط می‌شود. اما، مخلوط آسفالتی موادی غیر یکنواخت و ترکیب چند فازی است که شامل سنگدانه و قیر

که در آن: a, b, c, d, f : ثابت مصالح، ε_p : کرنش پلاستیک، N : تعداد تکرار بار، N_{ps} : تعداد تکرار بار متناظر با شروع مرحله دوم، N_{ST} : تعداد تکرار بار متناظر با شروع مرحله سوم (عدد روانی)، ε_{ps} : کرنش ماندگار متناظر با شروع مرحله دوم و ε_{ST} : کرنش ماندگار متناظر با شروع مرحله سوم، می‌باشند. در این مطالعه، برای درک بهتر رفتار تغییر شکل ماندگار مخلوط شاهد و مخلوط‌های حاوی الیاف نایلونی، مدل سه مرحله‌ای ژو، در دماها و سطح تنش-های مختلف، استفاده شد و منحنی خزش مربوط به مخلوط‌های مختلف، در دماها و سطح تنش‌های مختلف، با این مدل برازش داده شدند. برای مدل‌سازی هر یک از نواحی، به منظور دستیابی به پارامترها و نقاط مرزی بین آن‌ها، از نرم افزار متلب استفاده شد. همچنین، عدد روانی مخلوط‌ها در شرایط مختلف نیز بدست آمد.

۶. نتایج و بحث

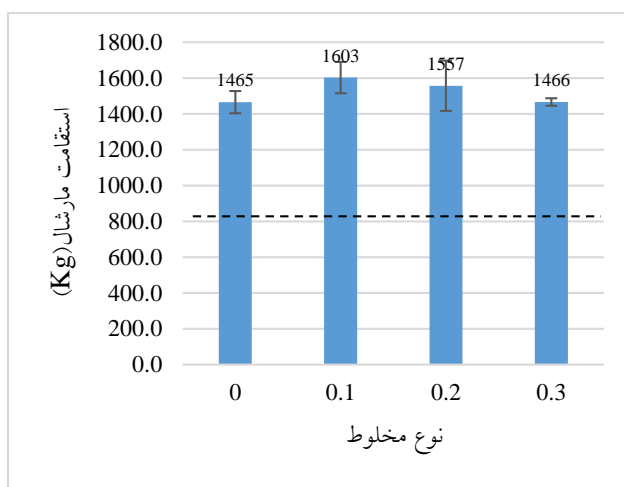
۶-۱ مشخصات حجمی

مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف نایلونی، در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از این بررسی‌ها، نشان می‌دهد که، وزن مخصوص حقیقی مخلوط‌های آسفالتی، با افزایش مقدار الیاف نایلونی، کاهش می‌یابد. الیاف نایلونی وزن مخصوص بسیار پایینی در مقایسه با مصالح سنگی دارد و در شرایط تراکم یکسان (۷۵ ضربه به طرفین نمونه)، افزودن الیاف وزن مخصوص حقیقی مخلوط را کاهش می‌دهد. همچنین، الیاف رفتار الاستیک بیشتری نسبت به قیر داشته و بنابراین مقاومت بیشتری در برابر تراکم مخلوط دارند. در نتیجه، همانگونه که در جدول ۶ آورده شده است، افزایش مقدار الیاف در مخلوط، موجب افزایش VMA مخلوط آسفالتی می‌شود. از طرفی دیگر،

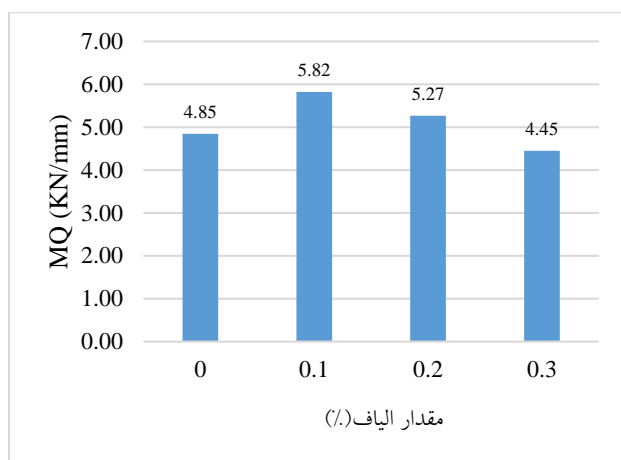
می‌باشد. بنابراین، مقدار الیاف بیشتر ممکن است، به ور یکنواخت در مخلوط ایجاد کند. در نتیجه استقامت مارشال در مقادیر بیشتر الیاف، کاهش می‌یابد. در مخلوط پخش نشده و با گلوله شدگی، قسمت‌های ضعیفی را

جدول ۶. مقدار قیر بهینه و مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف نایلونی

| مقدار الیاف نایلونی (%) | مقدار قیر بهینه (%) | وزن مخصوص حقیقی (g/cm ³) | (%) VMA | (%) VFA |
|-------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------|---------|
| صفر (شاهد) | ۵/۳ | ۲/۳۵ | ۱۴/۷۲ | ۷۲/۱۵ |
| ۰/۱ | ۵/۶ | ۲/۳۲۴ | ۱۶ | ۷۱/۹ |
| ۰/۲ | ۵/۹ | ۲/۳۱ | ۱۶/۸۶ | ۷۱/۵۴ |
| ۰/۳ | ۶/۲ | ۲/۳۰۱ | ۱۷/۵۳ | ۷۱/۴۸ |

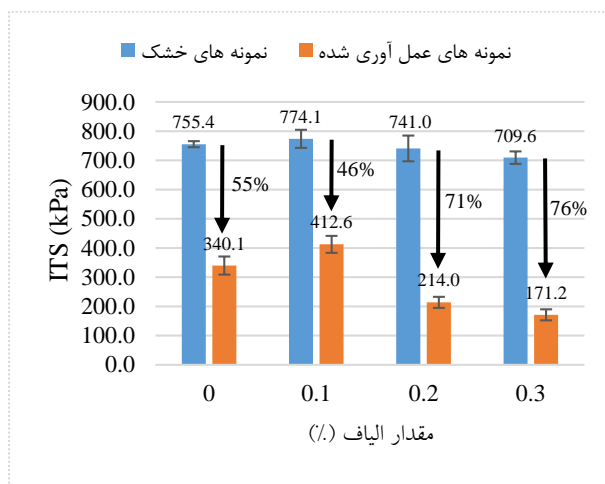


شکل ۴. استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف الیاف نایلونی



شکل ۵. نسبت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف الیاف نایلونی

ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی



شکل ۶. مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های عمل آوری شده و نمونه‌های خشک به ازای مقادیر مختلف الیاف نایلونی

حاوی ۰/۱ درصد الیاف نایلونی افزایش جزئی در مقاومت کششی نسبت به نمونه پایه، در هر دو حالت خشک و عمل آوری شده داشتند و نمونه‌های حاوی ۰/۲ و ۰/۳ درصد الیاف، در حالت خشک بر روی مقاومت کششی تاثیر چندانی نداشته ولی در حالت عمل آوری شده کاهش قابل توجهی را در مقاومت کششی از خود نشان دادند. همچنین، با توجه به شکل ۶، مقدار درصد کاهش مقاومت کششی، برای مخلوط‌های حاوی ۰/۱ درصد الیاف نسبت به مخلوط شاهد کمتر بوده و با افزایش الیاف در مخلوط، این مقدار افزایش می‌یابد. پس می‌توان به این نتیجه رسید که، مقدار زیاد الیاف نایلونی در مخلوط آسفالتی موجب کاهش مقاومت کششی آن می‌شود. دلیل کاهش آن می‌تواند کاهش سطح تماس سنگدانه‌ها، به دلیل حضور الیاف و گلوله شدگی الیاف با افزایش مقدار آن باشد.

۶-۴ آزمایش‌های حساسیت رطوبتی

۶-۴-۱ آزمایش لاتمن اصلاح شده (TSR)

شکل ۷ مقادیر نسبت مقاومت کششی (TSR) مربوط به نمونه‌های ترکیب‌های مختلف را، نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از مقدار مناسبی از الیاف نایلونی در مخلوط‌های آسفالتی، مقاومت در برابر آسیب رطوبتی مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد. همان طوری که از نتایج قابل مشاهده است، مقاومت در برابر آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۰/۱ درصد الیاف نایلونی نسبت به مخلوط بدون الیاف بیشتر است. این

همچنین، شکل ۵ نشان دهنده نتایج بدست آمده برای نسبت مارشال (MQ)، است. استفاده از الیاف در مخلوط، ابتدا موجب افزایش مقدار نسبت مارشال شده و با افزایش مقدار الیاف، MQ کاهش می‌یابد. این روند به این دلیل است که، با افزایش مقدار الیاف، مقدار قیر مصرفی در مخلوط افزایش می‌یابد و افزایش قیر از حدی بیشتر، موجب کاهش مقدار نسبت مارشال مخلوط می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که، استفاده از مقدار بهینه الیاف نایلونی در مخلوط‌های آسفالتی، مقدار نسبت مارشال را افزایش می‌دهد و این نشان دهنده افزایش مقاومت، در برابر تنش برشی و تغییر شکل دائمی مخلوط-های آسفالتی مسلح شده با الیاف نایلونی است و بهترین نتیجه برای مخلوط‌های مسلح شده با ۰/۱ درصد الیاف بدست آمده است و استفاده از این مقدار الیاف در مخلوط، موجب افزایش MQ به مقدار ۱۶/۵ درصد نسبت به مخلوط شاهد می‌شود.

۶-۳ نتایج و تحلیل آزمایش کشش غیر مستقیم (ITS)

متوسط مقادیر مقاومت کششی مربوط به تمامی نمونه‌های عمل آوری شده و نمونه‌های خشک ترکیب‌های مختلف، در شکل ۶ آورده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار ITS مخلوط‌های عمل آوری شده نسبت به مخلوط‌های خشک، کمتر است، و این به دلیل حضور آب در مخلوط و در نتیجه کاهش چسبندگی قیر و همچنین چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها است، و در نتیجه، مقاومت نمونه-های مخلوط آسفالتی تحت بارگذاری کاهش می‌یابد. مخلوط‌های

۶-۵ آزمایش خزش دینامیکی (شیار افتادگی)

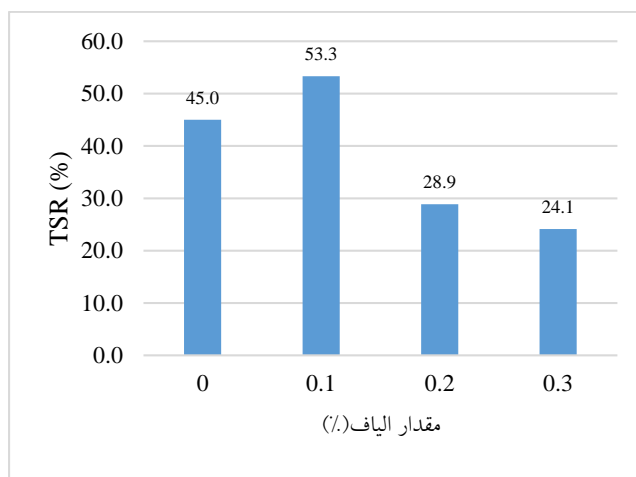
این آزمایش طبق استاندارد EN 12697-25 و در دو سطح تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال و در دمای ۵۰°C انجام شد. همچنین، برای مقدار بهینه الیاف نایلونی، این آزمایش در دو دمای ۴۰°C و ۶۰°C و سطح تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال نیز انجام شد. با استفاده از نمودارهای کرنش بر حسب تعداد سیکل بارگذاری، مقاومت مخلوط‌های مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف نایلونی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب، نمودارهای کرنش ماندگار نمونه شاهد و نمونه‌های مسلح شده با درصد‌های مختلف الیاف نایلونی را، در دمای ۵۰°C و تحت تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال را، نشان می‌دهند. با توجه به نتایج، مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار نمونه‌های مسلح شده با ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، در هر دو سطح تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال نسبت به نمونه شاهد، بیشتر است، و با افزایش مقدار الیاف در مخلوط‌ها، مقاومت آن‌ها در برابر تغییر شکل ماندگار کاهش می‌یابد، که دلیل این روند می‌تواند گلوله شدگی الیاف در درصد‌های بالا و ایجاد نقاط ضعیف در مخلوط باشد و همچنین با افزایش مقدار الیاف در مخلوط، احتمال کاهش سطح تماس سنگدانه‌ها، زیاد است، که این امر می‌تواند منجر به کاهش مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل ماندگار شود.

روند به این دلیل است که استفاده از الیاف در مخلوط، امکان افزایش مقدار قیر را در مخلوط فراهم می‌کند و این افزایش مقدار قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی موجب افزایش مقاومت در برابر آسیب رطوبتی آن می‌شود. اما، مقاومت در برابر آسیب رطوبتی با افزایش مقدار الیاف موجود در مخلوط به شدت کاهش می‌یابد. این در نتیجه افزایش مقدار فضای خالی مخلوط و در نتیجه نفوذ راحت‌تر آب می‌باشد. اما، در این آزمایش‌ها به علت ساخت نمونه‌ها با استفاده از مصالح سنگی و فیلر از جنس سیلیس، که به شدت در برابر رطوبت آسیب پذیر هستند، مخلوط‌های ساخته شده، در حالت کلی، مقاومت کمتری در برابر رطوبت از خود نشان دادند و حداقل آیین نامه (۷۵٪) را برآورده نکردند.

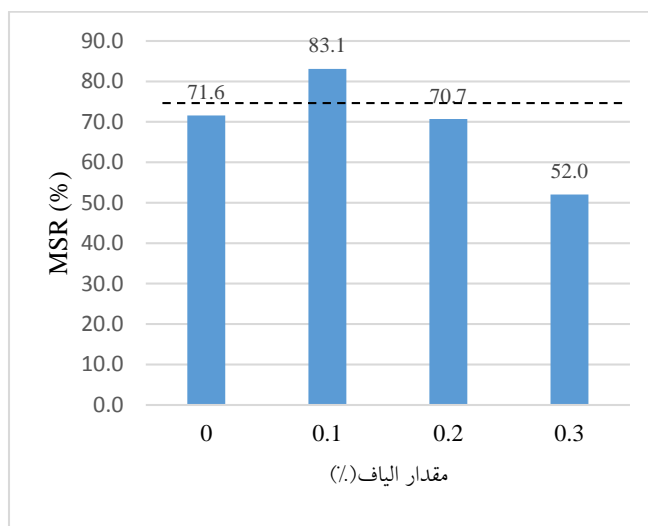
۶-۴-۲ آزمایش نسبت مقاومت مارشال (MSR)

نتایج این آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. روند نتایج بدست آمده در این آزمایش برای تمامی مخلوط‌ها، مشابه روند حاصل از آزمایش TSR است. این نشان دهنده صحت نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها می‌باشد. تفاوت جزئی در نتایج بدست آمده، در روش‌های مختلف ارزیابی حساسیت رطوبتی، می‌تواند به تفاوت در شرایط بارگذاری و مکانیسم‌های عمل آوری در این روش‌ها نسبت داده شود. مطابق آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، مقدار این پارامتر نباید کمتر از ۷۵ درصد باشد. همانطوریکه اشاره شد، در حالت کلی، علت پایین بودن مقاومت مخلوط‌ها در برابر رطوبت، استفاده از مصالح سنگی و فیلر از جنس سیلیس، می‌باشد.

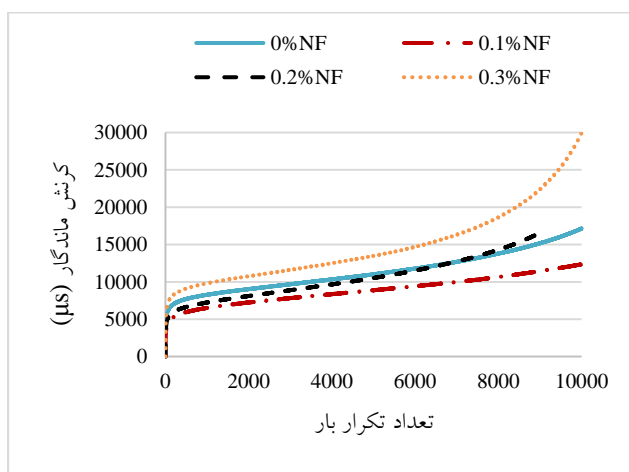


شکل ۷. نتایج آزمایش TSR مربوط به مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف نایلونی

ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی



شکل ۸. نتایج آزمایش MSR مربوط به مخلوط‌های مختلف



شکل ۹. نمودار خزش مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف نایلونی در دمای 50°C و سطح تنش 200 kPa

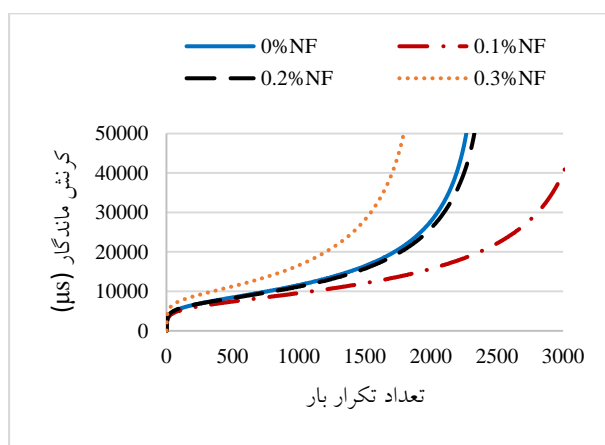
با توجه به نتایج به دست آمده در این مرحله از آزمایش، در حالت کلی مخلوط حاوی ۰/۱ درصد الیاف نسبت به مخلوط شاهد دارای حساسیت دمایی کمتری است، و به عبارت دیگر، وابستگی تغییر شکل ماندگار به دما، در نمونه‌های مسلح شده با ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از نمونه‌های شاهد می‌باشد. علت این امر جذب اجزای سبک قیر توسط الیاف و در نتیجه افزایش کند روانی و نقطه نرمی قیر مخلوط، است، زیرا با افزایش نقطه نرمی و کندروانی قیر، حساسیت دمایی قیر و در نتیجه حساسیت دمایی مخلوط، کاهش می‌یابد.

بنابراین، مقدار ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، به عنوان مقدار بهینه، جهت استفاده در مخلوط‌های آسفالتی انتخاب شد، و به منظور بررسی حساسیت دمایی مخلوط‌های حاوی این مقدار الیاف نایلونی، مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار آن‌ها، در دو دمای 40°C و 60°C و سطح تنش 200 کیلوپاسکال، نیز مورد ارزیابی قرار گرفت، و با مخلوط شاهد مورد مقایسه قرار گرفتند، که نتایج آن در شکل ۱۱ آورده شده است. نتایج ارایه شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که، در دماهای بالاتر، مقاومت مخلوط‌های حاوی ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، نسبت به مخلوط شاهد به طور قابل ملاحظه- ای افزایش می‌یابد.

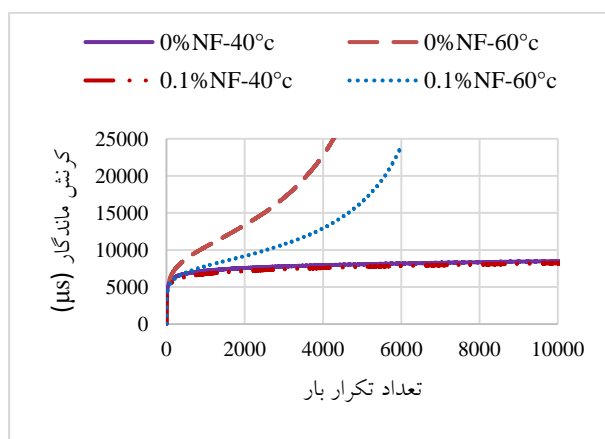
۶-۶ مدل‌سازی منحنی‌های خزش

معادلات ریاضی به دست آمده برای هر مرحله از منحنی‌های خزش، مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف نایلونی، در سطوح تنش و دماهای مختلف، در جدول ۷ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که، تمامی منحنی‌ها از مدل ژو تبعیت می‌کنند و مقادیر کرنش محاسبه شده از طریق معادلات ریاضی به دست آمده از مدل ژو، با کرنش‌های به دست آمده از طریق آزمایش، قابل مقایسه هستند. همچنین، در این تحقیق، عدد روانی با استفاده از الگوریتم ارایه شده توسط ژو و همکاران، برای مخلوط‌های مختلف تعیین شد. شیب کرنش خزشی (CSS)، نیز برای مخلوط‌های مختلف تعیین شد.

در جدول ۸، تعداد تکرار بار در ناحیه اول، عدد روانی و شیب کرنش خزشی مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف نایلونی، در سطوح تنش و دماهای مختلف ارائه شده است. همچنین، عدد روانی و شیب کرنش خزشی (CSS) مخلوط‌ها در سطوح تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال و دمای ۵۰°C، به صورت نمودار، به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، در هر دو سطح تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال، استفاده از الیاف نایلونی در مخلوط‌ها، ابتدا موجب افزایش عدد روانی شده و با افزایش مقدار الیاف، این پارامتر کاهش می‌یابد. همچنین، تعداد تکرار بار در ناحیه اول نمودار خزش، در هر دو سطح تنش، در مخلوط‌های حاوی ۰/۱ درصد الیاف، نسبت به مخلوط شاهد بیشتر است.



شکل ۱۰. نمودار خزش مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف نایلونی در دمای ۵۰°C و سطح تنش ۴۰۰ kPa



شکل ۱۱. نمودار خزش مخلوط شاهد و مخلوط حاوی ۰/۱ درصد الیاف نایلونی در دماهای ۴۰°C و ۶۰°C و سطح تنش ۲۰۰ kPa

ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی

۷. جمع بندی و نتیجه گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف نایلونی، نتایج زیر حاصل شد:

۱- استفاده از الیاف نایلونی در مخلوط‌های آسفالتی، موجب کاهش وزن مخصوص حقیقی و VFA مخلوط شده و VMA آن را افزایش می‌دهد. الیاف نایلونی، با تغییر مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی، موجب افزایش مقدار قیر بهینه آن‌ها می‌شوند.

۲- استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی، با افزودن الیاف نایلونی، ابتدا افزایش یافته، سپس با بالا رفتن مقدار درصد الیاف، شروع به کاهش می‌کند.

بالاترین عدد روانی در بین مخلوط‌های حاوی الیاف، مربوط به مخلوط‌های مسلح شده با ۰/۱ درصد الیاف است. استفاده از ۰/۱ درصد الیاف نایلونی در مخلوط‌های آسفالتی، موجب افزایش عدد روانی به مقدار ۳۰ و ۳۴ درصد بترتیب در سطح تنش‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتیگراد، نسبت به مخلوط شاهد، می‌شود. این نتایج نشان دهنده افزایش مقاومت این نوع مخلوط‌ها در برابر شیار افتادگی، نسبت به مخلوط‌های شاهد می‌باشد. همچنین، در مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف نایلونی، پایین‌ترین CSS، مربوط به مخلوط‌های حاوی ۰/۱ درصد الیاف نایلونی است که نشان دهنده مقاومت بالای این نوع مخلوط، در برابر تغییر شکل‌های دایمی است.

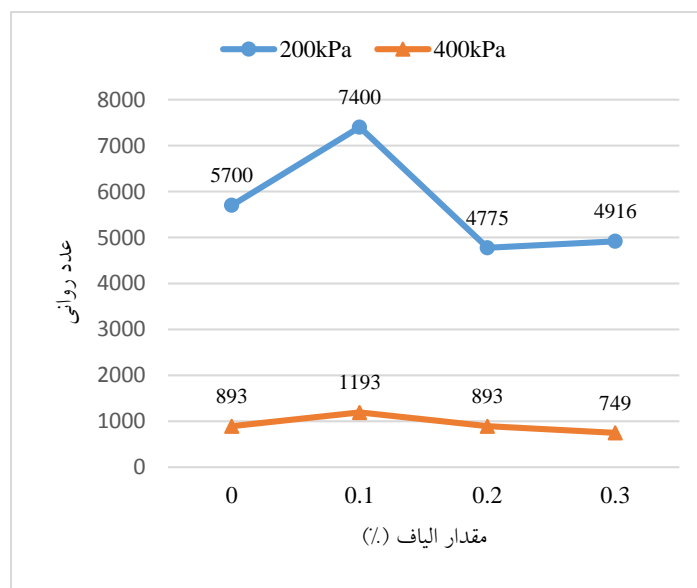
جدول ۷. مدل‌های منحنی‌های خزش بر اساس مدل سه مرحله‌ای ژو، برای مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف، در سطوح تنش و دماهای مختلف

| سطح تنش (kPa) | دما (°C) | مقدار الیاف (%) | مدل ناحیه اول | مدل ناحیه دوم | مدل ناحیه سوم |
|---------------|----------|-----------------|-------------------------------|---|--|
| ۴۰ | ۵۰ | ۰ | $\epsilon_p = 4085.2N^{0.08}$ | n | n |
| | | ۰/۱ | $\epsilon_p = 3526.8N^{0.1}$ | n | n |
| ۲۰۰ | ۵۰ | ۰ | $\epsilon_p = 3429.5N^{0.13}$ | $\epsilon_p = 10145 + 0.7175(N - 4200)$ | $\epsilon_p = 11221 + 594.7(e^{(0.0005(N-5700))} - 1)$ |
| | | ۰/۱ | $\epsilon_p = 2227.7N^{0.16}$ | $\epsilon_p = 8703.5 + 0.5607(N - 5000)$ | $\epsilon_p = 10049 + 314.8(e^{(0.0008(N-7400))} - 1)$ |
| | | ۰/۲ | $\epsilon_p = 2400.2N^{0.17}$ | $\epsilon_p = 9514.7 + 0.8066(N - 3300)$ | $\epsilon_p = 10704 + 656.4(e^{(0.0005(N-4775))} - 1)$ |
| | ۶۰ | ۰/۳ | $\epsilon_p = 4059.9N^{0.13}$ | $\epsilon_p = 11771.6 + 0.9623(N - 3600)$ | $\epsilon_p = 13038 + 804.8(e^{(0.0006(N-4916))} - 1)$ |
| | | ۰ | $\epsilon_p = 2127.7N^{0.23}$ | $\epsilon_p = 11730.5 + 3.1912(N - 1673)$ | $\epsilon_p = 14283 + 1491(e^{(0.0010(N-2473))} - 1)$ |
| | | ۰/۱ | $\epsilon_p = 2407.3N^{0.17}$ | $\epsilon_p = 8909.3 + 1.5351(N - 2203)$ | $\epsilon_p = 9428 + 865.7(e^{(0.0008(N-2541))} - 1)$ |
| ۴۰۰ | ۵۰ | ۰ | $\epsilon_p = 1784.9N^{0.25}$ | $\epsilon_p = 9158 + 6.2341(N - 693)$ | $\epsilon_p = 10405 + 1025(e^{(0.0026(N-893))} - 1)$ |
| | | ۰/۱ | $\epsilon_p = 1707.6N^{0.24}$ | $\epsilon_p = 8721.5 + 4.5267(N - 893)$ | $\epsilon_p = 10079 + 1024(e^{(0.0019(N-1193))} - 1)$ |
| | | ۰/۲ | $\epsilon_p = 2008.2N^{0.23}$ | $\epsilon_p = 9040.2 + 5.8439(N - 693)$ | $\epsilon_p = 10209 + 1029(e^{(0.0025(N-893))} - 1)$ |
| | | ۰/۳ | $\epsilon_p = 2762.2N^{0.23}$ | $\epsilon_p = 11996.6 + 9.9047(N - 593)$ | $\epsilon_p = 13542 + 1543(e^{(0.0031(N-749))} - 1)$ |

۱: در پایان ۱۰۰۰۰ تکرار بار، به ناحیه یا نقطه مورد نظر نرسیده است.

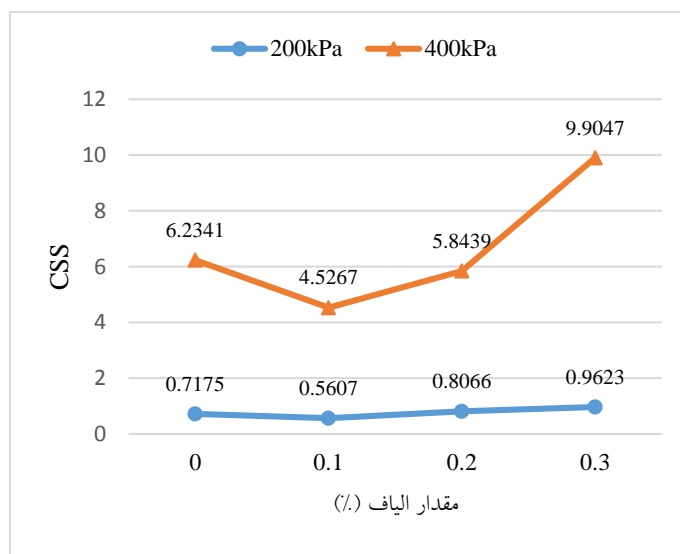
جدول ۸. تعداد تکرار بار در ناحیه اول، عدد روانی و شیب کرنش خزشی مخلوطهای حاوی مقادیر مختلف الیاف در سطوح تنش و دماهای مختلف

| شیب کرنش خزشی (CSS) | عدد روانی | تعداد تکرار بار در پایان ناحیه اول | مقدار الیاف (%) | دما (°C) | سطح تنش (kPa) |
|---------------------|-----------|------------------------------------|-----------------|----------|---------------|
| n | n | n | ۰ | ۴۰ | ۲۰۰ |
| n | n | n | ۰/۱ | ۴۰ | ۲۰۰ |
| ۰/۷۱۷۵ | ۵۷۰۰ | ۴۲۰۰ | ۰ | ۵۰ | ۲۰۰ |
| ۰/۵۶۰۷ | ۷۴۰۰ | ۵۰۰۰ | ۰/۱ | ۵۰ | ۲۰۰ |
| ۰/۸۰۶۶ | ۴۷۷۵ | ۳۳۰۰ | ۰/۲ | ۵۰ | ۲۰۰ |
| ۰/۹۶۲۳ | ۴۹۱۶ | ۳۶۰۰ | ۰/۳ | ۵۰ | ۲۰۰ |
| ۳/۱۹۱۲ | ۲۴۷۳ | ۱۶۷۳ | ۰ | ۶۰ | ۲۰۰ |
| ۱/۵۳۵۱ | ۲۵۴۱ | ۲۲۰۳ | ۰/۱ | ۶۰ | ۲۰۰ |
| ۶/۲۳۴۱ | ۸۹۳ | ۶۹۳ | ۰ | ۵۰ | ۴۰۰ |
| ۴/۵۲۶۷ | ۱۱۹۳ | ۸۹۳ | ۰/۱ | ۵۰ | ۴۰۰ |
| ۵/۸۴۳۹ | ۸۹۳ | ۶۹۳ | ۰/۲ | ۵۰ | ۴۰۰ |
| ۹/۹۰۴۷ | ۷۴۹ | ۵۹۳ | ۰/۳ | ۵۰ | ۴۰۰ |



شکل ۱۲. عدد روانی مخلوطهای حاوی مقادیر مختلف الیاف نایلونی، در دمای ۵۰°C و سطوح تنش ۲۰۰kPa و ۴۰۰kPa

ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی



شکل ۱۳. شیب کرنش خزشی (CSS) مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف نایلونی، در دمای ۵۰°C و سطوح تنش ۲۰۰kPa و ۴۰۰kPa

مخلوط شاهد، دارای حساسیت دمایی کمتری است. به عبارت دیگر، وابستگی تغییر شکل ماندگار به دما، در این نمونه‌ها، به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از نمونه‌های شاهد است.

۷- منحنی‌های خزش مخلوط‌ها، از مدل ژو تبعیت می‌کنند. کرنش‌های پیش‌بینی شده با مدل ژو، با کرنش‌های اندازه‌گیری شده قابل مقایسه هستند. بر اساس مدل ژو، افزودن ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، طول ناحیه اول منحنی خزش و عدد روانی مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، شیب کرنش خزشی (CSS) این مخلوط‌ها، نسبت به مخلوط شاهد، کمتر است. این نشان دهنده افزایش مقاومت مخلوط‌های حاوی مقدار بهینه الیاف، در برابر تغییر شکل دائمی است.

۸. پی‌نوشتها

- 1-Joon Lee et al.
- 2-Marshall Stability Ratio
- 3-Indirect Tensile Strength
- 4-Retaind Stability
- 5-Monismith
- 6-Universal Testing Machine
- 7-Tseng and Lytton
- 8-Flow Number
- 9-Creep Strain Slope
- 10-Zhou et al.

بالاترین مقدار استقامت مارشال، مربوط به نمونه‌های مسلح شده با ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، است. همچنین، افزودن الیاف نایلونی در مخلوط‌های آسفالتی به مقدار ۰/۱ درصد بر اساس وزن مخلوط، موجب افزایش نسبت مارشال (MQ) و در نتیجه افزایش مقاومت آن در برابر تنش برشی و تغییر شکل‌های دائمی می‌شود.

۴- استفاده از ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، مقاومت کششی غیر مستقیم در هر دو حالت خشک و اشباع، مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهد. اما، استفاده بیش از ۰/۱ درصد از این الیاف باعث کاهش این پارامتر در هر دو حالت، می‌شود.

۵- مطابق آزمایش‌های لاتمن اصلاح شده (TSR) و نسبت مقاومت مارشال (MSR)، استفاده از ۰/۱ درصد الیاف نایلونی، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش می‌دهد. در حالی که، درصد‌های بالاتر الیاف، مقاومت مخلوط را در برابر آسیب‌های رطوبتی، کاهش می‌دهد. روند به دست آمده در آزمایش حساسیت رطوبتی، در هر دو روش لاتمن اصلاح شده و نسبت مقاومت مارشال، برای تمامی مخلوط‌ها، یکسان بود.

۶- مطابق نمودارهای حاصل از آزمایش خزش دینامیکی در دو سطح تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال، مقدار ۰/۱ درصد الیاف نایلونی موجب بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار می‌شود. مخلوط حاوی مقدار بهینه الیاف، نسبت به

۹. مراجع

- Decoene, Y. (1990) "Contribution of cellulose fibers to the performance of porous asphalts", Transportation Research Record, No.1265, pp. 82-86.

- Guo, Q., Li, L., Cheng, Y., Jiao, Y. and Xu, C. (2015) "Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture", Materials & Design, Vol. 66, pp. 51-59.

- Hamzah, M.O., Kakar, M.R. and Hainin, M.R. (2015) "An overview of moisture damage in asphalt mixtures", Journal Teknologi, Vol. 73, No. 4, pp. 125-131.

- Han, J. H., Guo, J. J. and Liu, Z. (2012) "Experimental investigation on performance of fiber asphalt mixture", In Advanced Materials Research, Vol. 374, pp. 1396-1399.

- Hejazi, S. M., Abtahi, S.M., Sheikhzadeh, M. and Semnani, D. (2008) "Introducing two simple models for predicting fiber-reinforced asphalt concrete behavior during longitudinal loads", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 109, No. 5, pp. 2872-2881.

- Jahromi, S. and Khodaii, A. (2008) "Carbon fiber reinforced asphalt concrete", Arabian Journal of Science and Engineering, Vol. 33, pp. 355-364.

- Katman, H.Y., Ibrahim, M. R., Karim, M. R., Salim Mashaan, N. and Koting, S. (2015) "Evaluation of permanent deformation of unmodified and rubber-reinforced SMA asphalt mixtures using dynamic creep test", Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2015, pp. 1-11.

- Kavussi, A. and Barghabani, P. (2014) "The Influence of nano materials on moisture resistance of asphalt mixes". Study of Civil Engineering and Architecture, Vol. 3, pp. 36-40.

- Keymanesh, M. R., Kie-Badroodi, S. and Haghghatpour, P. J. (2014) "An examination of the effect of bitumen content on the performance of moisture susceptibility of asphalt mixture under freeze-thaw cycles", IJEIR, Vol. 3, No. 6, pp. 909-914.

- Khodaii, A. and Mehrara, A. (2009) "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test", Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 7, pp. 2586-2592.

- طباطبائی، امیر محمد (۱۳۹۰) "روسازی راه"، تهران، مرکز نشر دانشگاهی.

- Abiola, O. S., Kupolati, W. K., Sadiku, E. R. and Ndambuki, J. M. (2014) "Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review", Construction and Building Materials, Vol. 54, pp. 305-312.

- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., Alipour, R. and Hejazi, S. M. (2009) "Physical and mechanical properties of fibers-reinforced bitumen mixtures", 7th National Conference on Textile Engineering, Rasht, Iran.

- Abtahi, S.M., Sheikhzadeh, M. and Hejazi, S.M. (2010) "Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review", Construction and Building Materials, Vol. 24, No. 6, pp.871-877.

- Aksoy, A., Şamlioglu, K., Tayfur, S. and Özen, H. (2005) "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures", Construction and building materials, Vol.19, No. 1, pp.11-18.

- Al Nageim, H., Al-Busaltan, S.F., Atherton, W. and Sharples, G. (2012) "A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials", Construction and building materials, Vol. 36, pp.743-748.

- Ameri, M., Hesami, S. and Goli, H. (2013) "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag", Construction and Building Materials, Vol. 49, pp. 611-617.

- Chen, H., Xu, Q., Chen, S. and Zhang, Z. (2009) "Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures", Materials & Design, Vol.30, No. 7, pp. 2595-2603.

- Crispino, M., Mariani, E. and Toraldo, E. (2013) "Assessment of fiber-reinforced bituminous mixtures' compaction temperatures through mastics viscosity tests", Construction and Building Materials, Vol. 38, pp. 1031-1039.

- performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates”, *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 692-702.
- Shaopeng, W., Qunshan, Y. and Ning, L. (2008) “Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers”, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 10, pp. 2111–2115.
- Shen, J. N., Xie, Z. X., Xiao, F. P. and Fan, W.Z. (2012) “September evaluations of nano-sized hydrated lime on the moisture susceptibility of hot mix asphalt mixtures”, In *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 174, pp. 82-90.
- Shih, J. and Kuei-Yi, L. (2005) “Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers”, *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 87–95.
- Tapkın, S. (2008) “The effect of polypropylene fibers on asphalt performance”, *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 1065–1071.
- Uzarowski, L. (2006) “The development of asphalt mix creep parameters and finite element modeling of asphalt rutting” (Doctoral dissertation, University of Waterloo).
- Xu, W. and Wang, X. C. (2011) “Study on performance for fiber asphalt mixture resistance to water damage”, *Advanced Materials Research* Vol. 204, pp. 1789-1792.
- Yusoff, N. I. M., Breem, A.A.S., Alattug, H.N., Hamim, A. and Ahmad, J. (2014) “The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials*, Vol. 72, pp. 139-147.
- Zhou, F., Scullion, T. and Sun, L. (2004) “Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, No. 4, pp. 486-494.
- Kumar, P., Mehndiratta, H. and Immadi, S. (2009) “Investigation of fiber-modified bituminous mixes”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2126, pp. 91-99.
- Labib, M. and Maher, A. (1999) “Recycled plastic fibers for asphalt mixtures”, (No. FHWA NJ 2000-04.).
- 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.
- Mahrez, A., Karim, M. and Katman, H. (2003) “Using glass fiber reinforced bituminous mixes”, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.5, pp. 794– 807.
- McDaniel, R. S. (2015) “Fiber additives in asphalt mixtures”, No. Project 20-05 (Topic 45-15). NCHRP-SYNTHESIS 475.
- Miljković, M. and Radenberg, M. (2011) “Rutting mechanisms and advanced laboratory testing of asphalt mixtures resistance against permanent deformation”, *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 407-417.
- Najd, A., Chao, Z. and Ying, G. (2005) “Experiments of fracture behavior of glass fiber reinforced asphalt concrete”, *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, Vol. 25, No. 3, pp. 28–32.
- Partl, N., Vinson, T. and Hicks, R. (1994) “Mechanical properties of stone mastic asphalt”, *Proceedings of the Third Materials Engineering Conference*, ASCE, October, pp. 849–858.
- Putman, B. J. and Amirhanian, S. N. (2004) “Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures”, *Resources, conservation and recycling*, Vol. 42, No. 3, pp. 265-274.
- Shafabakhsh, Gh. and Ani, O. J. (2015) “Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue

حسن طاهرخانی، سیامک افروزی

حسن طاهرخانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری را در سال ۱۳۷۵ را از دانشگاه تربیت مدرس تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه ناتینگهام انگلستان گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مصالح و مواد روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه زنجان است.



سیامک افروزی، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه محقق اردبیلی و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران، راه و ترابری را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه زنجان اخذ نمود. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی راه است.

