

ارزیابی رفتار خستگی مخلوط آسفالت گرم حاوی الیاف پلی اتیلن بازیافتی

به روش خمش چهار نقطه‌ای

زهرة دهقان، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران

امیرمدرس (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران

E-mail: modares@nit.ac.ir

پدیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱

دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۰۲

چکیده

در تحقیق حاضر تاثیر استفاده از الیاف پلی اتیلن بازیافتی بر رفتار خستگی مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قرار گرفت. مقدار الیاف برابر با ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ درصد وزن قیر و طول آنها یک و دو سانتیمتر انتخاب شد. همچنین تاثیرات خرده پلاستیک بازیافتی با اندازه ۱/۱۸-۰/۴۲۵ میلیمتر که در دو مقدار ۱/۰ و ۲/۰ درصد وزن قیر اضافه گردید، با الیاف مورد مقایسه قرار گرفت. آزمایش خستگی به روش خمش چهار نقطه‌ای در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در سه سطح کرنش ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میکروکرنش انجام گرفت. براساس نتایج به دست آمده، سختی خمشی نمونه‌های حاوی هر دو افزودنی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. همچنین این روند کاهش با افزایش مقدار افزودنی‌ها ادامه داشت. عمر خستگی نمونه‌های حاوی الیاف برای تمام مقادیر، بیشتر از نمونه شاهد بود. در کرنش ۳۰۰ میکروکرنش، بیشترین افزایش عمر خستگی برای الیاف یک و دو سانتیمتری به ترتیب ۱/۴۹ و ۱/۷۷ برابر نمونه شاهد بود. همچنین در کرنش ۷۰۰ میکروکرنش، این افزایش به ترتیب ۱/۳۸ و ۱/۶۳ برابر نمونه شاهد بوده است. تاثیرات خرده پلاستیک بازیافتی تا حد زیادی مشابه با الیاف بوده است. بیشترین مقدار افزایش عمر خستگی برای نمونه‌های حاوی خرده پلاستیک برای ۱/۰ و ۲/۰ درصد از این افزودنی به ترتیب ۱/۴۸ و ۱/۶۳ برابر نمونه شاهد بود. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، استفاده از ۱/۰ درصد وزن قیر الیاف دو سانتیمتری و ۲/۰ درصد وزن قیر خرده پلاستیک جهت تقویت رفتار خستگی مخلوط آسفالتی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الیاف پلی اتیلن بازیافتی، ترک خستگی، خمش چهار نقطه‌ای، سختی خمشی، مخلوط آسفالتی گرم

۱. مقدمه

به طور مشخص می‌توان به ویژگی‌هایی چون جنس الیاف، میزان واکنش پذیری یا اثرپذیری آن از قیر یا سنگدانه در دماهای بالای اختلاط و تراکم، قطر الیاف، طول آنها و میزان استفاده اشاره نمود. [Mansourian, Razmi and Razavi, 2016]. پخش یکنواخت و همگن الیاف در سرتاسر مخلوط آسفالتی نیز یکی از پارامترهای بسیار مهم به شمار می‌رود [Mahrez and Karim, 2010; Abtahi, Ghorban Ebrahimi and Kunt, 2011]. براین اساس برخی از انواع الیاف برای تسلیح مخلوط‌های آسفالتی به کار می‌روند و برخی دیگر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی قیر تاثیر بیشتری دارند.

تاکنون تحقیقات بسیاری در ارتباط با استفاده از الیاف به عنوان افزودنی مسلح کننده در آسفالت انجام شده‌است [Xue and Qian, 2016]. الیاف طبیعی مورد استفاده بیشتر شامل الیاف معدنی بوده و استفاده از الیاف گیاهی و حیوانی اصلاح نشده در آسفالت به دلیل حساسیت بالای آنها به پارگی و خرد شدن و مشکلات کاهش دوام، چندان مورد توجه نبوده‌است [Guo et al. 2015, Herráiz et al. 2016, Zhang et al. 2014]. در مقابل الیاف مصنوعی به دلیل مقاومت کششی و دوام مناسب، بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. برخی از الیاف‌های پرکاربرد در مسلح‌سازی آسفالت شامل الیاف پلی‌پروپیلن، پلی‌استر، آزبست، سلولز، کربن، شیشه و نایلن هستند. [Abtahi, Sheikhzadeh and Hejazi, 2010]

براساس نتایج بدست آمده از چندین مطالعه، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن سبب افزایش استقامت مارشال، کاهش روانی مارشال، بهبود رفتار خستگی و تغییر شکل‌های ماندگار می‌گردد [Tapkin, 2008, Abtahi, Ghorban Ebrahimi and Kunt, 2011].

گروه دیگر، الیاف کربن است که تطابق مناسبی با قیر داشته و به علت حساسیت کم دمایی، در دمای تولید مخلوط آسفالتی ویژگی‌های اولیه خود را حفظ می‌نماید [Moghadas Nejad, Vadood and Baetabar, 2014]. افزودن الیاف کربن به مخلوط آسفالتی سبب افزایش مقاومت کششی، مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی دمای پایین، ارتقا خصوصیات رفتاری و عملکردی و ارتقا رسانایی الکتریکی آسفالت می‌گردد. [Abtahi, Sheikhzadeh, and Hejazi, 2010]

ترک‌های خستگی یکی از خرابی‌های اصلی و سازه‌ای در روسازی‌های آسفالتی به شمار می‌روند. کنترل و محدود نمودن این ترک‌ها در طول دوره بهره‌برداری از روسازی یک چالش اساسی برای متخصصین روسازی است. عوامل بسیاری بر مقاومت خستگی آسفالت تاثیرگذارند. برخی از این عوامل شامل ویژگی‌های رفتاری آسفالت طراحی شده، شرایط آب و هوایی منطقه، شرایط ترافیکی شامل نوع وسایل نقلیه، وزن محورها و سرعت حرکت آنها است. [and Sousa, 2010]. در بین عوامل فوق اصلاح و ارتقای ویژگی‌های رفتاری مخلوط آسفالتی به عنوان یکی از عوامل اصلی تاثیرگذار بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی همواره مورد توجه محققین بوده‌است. تلاش اصلی در اکثر تحقیقات انجام شده معطوف به استفاده از افزودنی‌هایی جهت افزایش انعطاف‌پذیری قیر مورد استفاده و افزایش مقاومت کششی آسفالت بوده‌است [Mahrez and Karim, 2010; Guo et al. 2015, Mansourian, Razmi and Razavi, 2016]

یکی از روش‌های پرکاربرد در بهبود مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی، استفاده از الیاف است. الیاف مسلح‌کننده معمولاً به دو شکل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در دسته اول، الیاف به صورت شبکه‌ای که دارای شکل منظم هستند، به کار می‌روند. این شکل از مسلح‌کننده‌ها جزئی از گروه بزرگ ژئوستتیک‌ها هستند که دارای کاربردهای متعددی در مهندسی عمران هستند [Abtahi, Ghorban Ebrahimi, Kunt, 2011, Norambuena-Contreras et al., 2016]. دسته دوم شامل رشته الیاف مجزا هستند که به صورت تصادفی در مخلوط توزیع می‌شوند. به دلیل تعدد پارامترهای تاثیرگذار از جمله قطر الیاف، طول الیاف، شکل ظاهری الیاف و غیره، دسته دوم یعنی رشته الیاف مجزا با توزیع تصادفی علی‌رغم مطالعات گسترده و طولانی چه از نظر مکانیزم تسلیح و چه از نظر بهینه‌سازی خصوصیات الیاف، کمتر از شکل اول شناخته شده هستند. [Abtahi, Ghorban Ebrahimi, Kunt, 2011]. الیاف مورد استفاده در مخلوط آسفالتی شامل طیف وسیعی است که در دو گروه عمده الیاف طبیعی و مصنوعی دسته‌بندی می‌شوند. ویژگی‌های مهم الیاف که می‌تواند بر نتیجه نهایی تاثیرگذار باشد شامل خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آن است.

ارزیابی رفتار خستگی مخلوط آسفالت گرم حاوی الیاف.....

گرفته‌است. علاوه بر ارزان بودن و صرفه اقتصادی، غلبه بر معضل دپو و دفن این مواد در طبیعت که با خطرات بسیاری برای محیط‌زیست همراه است یک عامل محرک در استفاده از مواد ضایعاتی می‌باشد. بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به طور جدی در معرض مشکلات ناشی از مواد زائد می‌باشند. یکی از این مواد ضایعاتی که تولید آن در سال‌های اخیر رو به گسترش بوده، ضایعات ظروف و بطری‌های پلاستیکی است. این ضایعات که از خانواده پلی‌اتیلن است از پلیمر پلی‌اتیلن ترفتالات^۱ (PET) تشکیل شده‌اند. PET یک رزین پلیمری ترموپلاستیک از خانواده پلی‌استر بوده و به طور گسترده در تولید بطری‌های پلاستیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه استفاده از PET در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده‌است. این تحقیقات اکثراً شامل استفاده از این ماده بازیافتی به صورت خرده پلاستیک با دانه‌بندی مشخص در آسفالت گرم بوده‌است [Ahmadinia et al. 2011, Ahmadinia et al., 2012, Baghaee Moghaddam, RehanKarim and Syammaun, 2012, Modarres and Hamedi, 2014 (a)] معمولاً افزودنی‌ها به دو روش خشک و تر به مخلوط آسفالتی یا قیر افزوده می‌شوند. در روش خشک، افزودنی به عنوان بخشی از مواد جامد به سنگ‌دانه‌ها افزوده می‌شود. در روش تر، ابتدا قیر با افزودنی ترکیب شده و قیر اصلاح شده تولیدی به مصالح‌سنگی افزوده می‌شود. در تحقیقات فوق در اکثر موارد PET به صورت خشک به مخلوط آسفالتی اضافه گردید. این مساله به دمای ذوب بالاتر این ماده نسبت به سایر افزودنی‌های پلیمری ربط داده شده‌است. براساس گزارش‌های ارائه شده دمای ذوب PET معمولاً بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. با توجه به دمای قیر در زمان اختلاط که کمتر از مقادیر فوق است امکان ذوب و توزیع یکنواخت PET در روش تر وجود ندارد [Baghaee Moghaddam, RehanKarim, Syammaun, T, 2012, Modarres and Hamedi, 2014 (b)]

براساس مطالعات گذشته، PET قابلیت مناسبی برای استفاده به عنوان اصلاح‌کننده در آسفالت دارد. نتایج به دست آمده از چند تحقیق نشان داد که افزودن این ماده باعث افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار و شیارافتادگی می‌گردد. [Baghaee

الیاف پلی‌استر نیز دارای عملکردی مناسب در تسلیح طولانی مدت مخلوط‌های قیری به خصوص در شرایط دمایی بالا بوده‌اند. [Shiuh and Kuei-Yi, 2005]. در مقایسه با پلی‌پروپیلن، الیاف پلی‌استر معمولاً دارای نقطه ذوب بالاتری بوده و از نظر سهولت اجرا و عدم نیاز به تجهیزات اضافی مناسب می‌باشند. براساس نتایج به دست آمده از تحقیقات، استفاده از این الیاف تاثیر متوسطی بر عمر خستگی آسفالت داشته و بیشترین تاثیرات در کرنش‌های پایین مشاهده گردید. [Shaopeng et al. 2008]

مطالعات محدودی در ارتباط با استفاده از الیاف نایلن در تاریخچه تسلیح آسفالت وجود دارد. براساس این مطالعات در صورت انتخاب طول و مقدار مناسب، این الیاف اثرات مفیدی بر خصوصیات خستگی آسفالت خواهند داشت. [Taherkhani and Amini, 2016]

الیاف آزبست از معدود الیاف معدنی هستند که به عنوان مسلح‌کننده در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج بررسی‌ها حاکی از تاثیرات مثبت این الیاف بر خصوصیات تغییر شکلی مخلوط آسفالتی است [Majoryl, 1986].

استفاده از الیاف سلولز باعث افزایش مقدار قیر مورد نیاز، کاهش مقدار قیرزدگی و مقاومت در برابر شیار افتادگی می‌گردد. بیشترین کاربرد این الیاف در مخلوط‌های آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای می‌باشد. به منظور جلوگیری از پدیده جداشدن قیر یا ریزش قیر در این نوع آسفالت از الیاف سلولزی یا الیاف معدنی استفاده می‌شود [NCHRP synthesis, 2015].

تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از الیاف شیشه حاکی از تاثیرات مفید این الیاف بر مقاومت آسفالت و خصوصیات خستگی آن می‌باشد. همچنین مقدار قیر مورد نیاز در این نوع آسفالت الیافی تفاوتی با آسفالت متداول نداشته و این مساله باعث کاهش پتانسیل قیرزدگی و تغییر شکل‌های ماندگار در دماهای بالای عملکرد می‌گردد [Zhang and Najd, 2012]

صرف‌نظر از تاثیر الیاف مختلف بر خصوصیات فنی آسفالت، توجیه اقتصادی استفاده از این مواد در پروژه‌های راهسازی یکی از معضلات اساسی به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر استفاده از مواد پسماند به عنوان مواد دست‌دوم، بسیار مورد توجه قرار

جهت ارزیابی تاثیر الیاف PET، چهار درصد مختلف از این الیاف در دو طول متفاوت به مخلوط آسفالتی که حاوی درصد قیر بهینه بود اضافه گردید. همچنین آزمایش اصلی در این تحقیق خمس چهارنقطه‌ای^۲ بود که جهت ارزیابی رفتار خستگی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا نمونه‌های دالی شکل از آسفالت حاوی الیاف و نمونه شاهد با استفاده از مترکم کننده غلتکی آزمایشگاهی ساخته شده و با اره مخصوص برش داده شدند. در نهایت نمونه‌های تیرچه ساخته شده با استفاده از دستگاه UTM-14^۳ مورد آزمایش قرار گرفتند. در ادامه جزئیات بیشتری از روش تحقیق و آزمایش‌ها ارائه می‌گردد.

۲-۱ مصالح مورد استفاده و طرح اختلاط

قیر خالص مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های آسفالت گرم از نوع ۶۰/۷۰ بوده که از پالایشگاه تهران تهیه گردید. خصوصیات این قیر در جدول ۱ ارائه شده است.

Moghaddam, Soltani, Rehan Karim, 2013, Nazmi, Abdul Rahman, Abdul Wahab, 2013]

همچنین نتایج گذشته نشان داد که افزودن این ماده به آسفالت باعث کاهش مقاومت کششی، مدول سفتی، افزایش انعطاف‌پذیری و مقاومت خستگی آسفالت می‌گردد. [Baghaee Moghaddam, Rehan Karim, Syammaun, 2012, Modarres and Hamed, 2014 (a).

برخلاف تحقیقات فوق، بررسی بسیار کمی در زمینه استفاده از الیاف PET در مخلوط‌های آسفالت گرم انجام شده است. تحقیق حاضر تاثیر افزودن این الیاف را بر رفتار خستگی آسفالت گرم مورد بررسی قرار داده است. بدین منظور تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله طول الیاف، مقدار الیاف و سطح کرنش اعمالی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

۲. روش تحقیق

جدول ۱. مشخصات پایه‌ای قیر خالص مورد استفاده در تحقیق

مشخصه	استاندارد	قیر	نتیجه
وزن مخصوص	ASTM D70	-	۱,۰۱
درجه نفوذ (۰,۱ میلی‌متر)	ASTM D5	۶۰/۷۰	۶۳
نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)	ASTM D36	۴۹/۵۶	۵۲
انگمی (سانتی متر)	ASTM D113	>۱۰۰	بزرگتر از ۱۰۰
درجه اشتعال (سانتیگراد)	ASTM D92	>۲۵۰	۲۸۴
درصد افت وزنی قیر (دراثر حرارت)	ASTM D6	<۰,۲	۰,۱
نسبت درجه نفوذ جدید به درجه نفوذ اولیه پس از انجام آزمایش لعاب نازک قیر	ASTM D1754	>۵۴	۷۲
کندروانی سینماتیک در ۱۳۵ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)	ASTM D2170	-	۲۶۳
نشانه درجه نفوذ (PI)	-	-	-۰,۴

جدول ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آسفالت

اندازه الک (mm)	۱۹/۰	۱۲/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۳۰	۰/۰۷۵
درصد ریزتر	۱۰۰	۹۵	۵۶	۳۶	۱۳	۵
حد بالا و پایین دانه‌بندی	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۵۵-۸۵	۳۲-۶۷	۷-۲۳	۲-۱۰

ارزیابی رفتار خستگی مخلوط آسفالت گرم حاوی الیاف.....

جدول ۳. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت آسفالت

نتیجه	حدود مشخصات سنگدانه	واحد	استاندارد	ویژگی
مصالح سنگی درشت‌دانه				
۱۳	۳۵>	%	ASTM C131	سایش لوس آنجلس
۱/۷	۱۲>	%	ASTM C88	سلامت (افت وزنی با سولفات سدیم)
۱۰	۱۵>	%	ASTM D4791	دانه‌های دراز (تطویل)
۷	۱۵>	%	ASTM D4791	دانه‌های پهن (تورق)
۱/۸	-	%	ASTM C127	جذب آب
۲/۴۷۵	-	g/cm ³	ASTM C127	وزن مخصوص حقیقی
۲/۵۹۳	-	g/cm ³	ASTM C127	وزن مخصوص ظاهری
مصالح سنگی ریزدانه				
۲/۴	۲/۵>	%	ASTM C128	جذب آب
۲/۲	۱۵>	%	ASTM C88	سلامت (افت وزنی با سولفات سدیم)
۲/۴۲۴	-	g/cm ³	ASTM C128	وزن مخصوص حقیقی
۲/۶۰۷	-	g/cm ³	ASTM C128	وزن مخصوص ظاهری

جدول ۴. مشخصات الیاف مورد استفاده در تحقیق

نتیجه	واحد	استاندارد	مشخصه
۱,۳۵	g/cm ³	ASTM D792	وزن مخصوص
۲۹۰	oC	ASTM F2625	نقطه ذوب
۹۱۰	MPa	ASTM D638	مقاومت کششی
۲۰	%	ASTM D638	کرنش شکست
۱۰,۲	GPa	ASTM C1557	مدول یانگ

جدول ۵. خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی

نتیجه	واحد	مشخصه
۵,۳	%	درصد قیربهمینه
۴,۱	%	فضای خالی آسفالت
۶۹	%	فضای خالی پر شده با قیر
۱۴,۶	%	فضای خالی مصالح سنگی
۱۳۵۰	kg	استحکام مارشال
۳۰۱	%	روانی مارشال

مناسب الیاف، قیر اضافه گردید. پس از افزودن قیر، مخلوط آسفالتی به مدت ۱۰ دقیقه در میکسر مخلوط گردید. سپس نمونه‌های دالی شکل مخلوط شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف با استفاده از دستگاه متراکم کننده غلتکی مطابق شکل ۲ متراکم شدند. دمای مخلوط در زمان تراکم نمونه‌ها با توجه به مقدار ویسکوزیته قیر 140 ± 3 درجه سانتیگراد و تعداد سیکل‌های رفت و برگشت متراکم کننده برای هر نمونه برابر با ۵۰ مرتبه بود. براساس بررسی‌های انجام شده، فضای خالی مخلوط‌های آماده شده در این روش برابر با 4 ± 0.2 درصد که حد متوسط برای آسفالت رویه است، به دست آمد.

پس از اتمام تراکم نمونه‌های دالی شکل و خارج نمودن آنها از قالب تراکم، نمونه‌ها مطابق شکل ۳-الف با استفاده از اهر برقی برش داده شده و تیرچه‌های آسفالتی به ابعاد $30 * 10 * 5$ سانتیمتر آماده شدند (شکل ۳-ب).



شکل ۱. الف) الیاف پلیاستیکی (PET ب) خرده پلیاستیک PET



شکل ۲. تراکم نمونه‌های دالی شکل با استفاده از متراکم کننده غلتکی آزمایشگاهی

مصالح سنگی که از جنس سنگ آهک بوده از دپوی مصالح فرآوری شده یک کارخانه آسفالت در حال بهره‌برداری تهیه شده و دارای دانه‌بندی ۱۹-۰ میلی‌متر از نوع پیوسته بود. دانه‌بندی مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده است. سایر مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

الیاف PET از ضایعات بطری‌های پلیاستیکی تهیه شده است. مشخصات الیاف مطابق اطلاعات ارائه شده توسط تولیدکننده در جدول ۴ ارائه شده است.

شکل ۱-الف تصویری از الیاف مورد استفاده را نشان می‌دهد. الیاف از کارخانه واقع در شهرک صنعتی شهر ساری تهیه گردید. در پروسه تبدیل مواد پلیاستیکی بازیافتی در این کارخانه تبدیل به الیافی با ابعاد مختلف می‌شوند. قطر متوسط الیاف مورد استفاده در این تحقیق برابر با ۳۰ میکرومتر و طول الیاف برابر با ۱ و ۲ سانتیمتر بوده است. طول اولیه الیاف تهیه شده ۲ سانتیمتر بوده که برای تهیه الیاف ۱ سانتیمتری این الیاف با کاتر برش داده شدند. همچنین درصد الیاف مورد استفاده برابر با ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ درصد نسبت به وزن قیر انتخاب گردید.

شکل ۱-ب تصویری از افزودنی خرده PET را نشان می‌دهد که جهت مقایسه با الیاف، مورد استفاده قرار گرفت. این مصالح دارای دانه‌بندی یک اندازه بین ۰/۴۲۵ تا ۱/۱۸ میلی‌متر بودند. براساس مطالعات قبلی انجام شده مقدار بهینه خرده PET حداکثر برابر با دو درصد وزن قیر به دست آمده است [Modarres and Hamedi, 2014]. بنابراین به منظور مقایسه، دو مقدار خرده PET شامل ۱/۰ و ۲/۰ درصد وزن قیر نیز مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور تعیین درصد قیر بهینه از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های طرح اختلاط در جدول ۵ ارائه شده است.

براین اساس، آسفالت طراحی شده با مقدار قیر ۵/۳ درصد، تمامی معیارهای طرح اختلاط مارشال که توسط موسسه آسفالت ارائه شده است را برآورده می‌نماید.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌های تیرچه

جهت ساخت نمونه‌های آزمایش خمش چهارنقطه‌ای ابتدا مصالح مورد استفاده در ساخت آسفالت مخلوط شدند. به منظور جلوگیری از تجمع الیاف و گلوله شدن آنها ابتدا الیاف به صورت خشک به سنگدانه‌ها اضافه شده و پس از اطمینان از توزیع

[Tayebali, Rowe and Sousa, 2010]. به همین دلیل حداقل کرنش در این تحقیق ۳۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین براساس استاندارد EN-12697-24 سطح کرنش‌ها در آزمایش خستگی نباید به حدی افزایش یابد که خستگی در کمتر از ۱۰۰۰ سیکل رخ دهد. [EN 12697-24, 2004]. براساس مشاهدات آزمایشگاهی در این تحقیق کرنش ۷۰۰ میکروکرنش به عنوان سطح بالای کرنش انتخاب گردید. کرنش ۵۰۰ به عنوان میانگین مقادیر فوق و سطح کرنش نرمال انتخاب شد.

به منظور بررسی چگونگی توزیع الیاف در مخلوط آسفالتی، نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف ساخته شد و تحت عکسبرداری با استفاده از میکروسکوپ نوری قرار گرفت. توزیع مناسب الیاف یک پارامتر کلیدی برای افزایش اثرات تقویت‌کنندگی در مخلوط آسفالتی است. شکل ۵-الف نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف PET و شکل ۵-ب نمونه حاوی ۱ درصد الیاف PET را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵-الف می‌توان دید، الیاف به طور منحصر به فردی توزیع شده‌اند اما از هم دور بوده و به سختی می‌توانند اثرات تقویت‌کنندگی را ایجاد کنند. برای نمونه های حاوی ۱ درصد الیاف، (شکل ۵-ب) الیاف شبکه قوی با اثرات تقویت‌کنندگی خوب تشکیل می‌دهند. الیاف از هم فاصله مناسب دارند و هیچ تجمع و انباشتگی شناسایی نشد. شکل های ۶-الف و ۶-ب تصاویر میکروسکوپی از مخلوط آسفالتی حاوی ۲ و ۴ درصد الیاف PET را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۶-الف یک شبکه متراکم تر توسط الیاف با نواحی دارای انباشتگی جزئی ایجاد شد. در مقادیر بالای الیاف چندین ناحیه انباشتگی و تجمع در تصویر شناسایی شد. بنابراین با در نظر گرفتن جنبه های فنی و اقتصادی میزان حداکثر الیاف PET به ۲ درصد وزن قیر محدود شد.



شکل ۳. الف) برش دال توسط اهر برقی ب) نمونه های تیرچه

۳-۲ آزمایش خستگی به روش خمش چهارنقطه ای

آزمایش خستگی با استفاده از دستگاه UTM-14 و مطابق استاندارد EN 12697-24 انجام شد، [EN 12697-24, 2004]. مطابق شکل ۴-الف این دستگاه شامل محفظه کنترل دما بوده و براساس دستورالعمل استاندارد، تمام نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها حداقل به مدت ۵ ساعت قبل از شروع آزمایش در محفظه دستگاه قرار داده شدند تا به دمای موردنظر برسند. محفظه دستگاه دارای یک نمونه مرجع بوده که از طریق آن دمای هسته و پوسته نمونه در هر لحظه قابل اندازه‌گیری بود. همچنین از طریق یک حرارت‌سنج، دمای محفظه در مدت زمان قرارگیری نمونه درون محفظه و در طول آزمایش اندازه‌گیری می‌شد. مطابق شکل ۴-ب دستگاه به یک سیستم جانبی مجهز بود که دمای محفظه، پوسته و هسته نمونه را در هر لحظه ثبت می‌نمود. همچنین در طول دوره بارگذاری نیز امکان کنترل این سه دما وجود داشت.



شکل ۴. الف- قرارگیری نمونه‌ها در محفظه کنترل دما، ب-

کنترل ورودی‌ها و ثبت خروجی‌ها توسط نرم‌افزار آزمایش

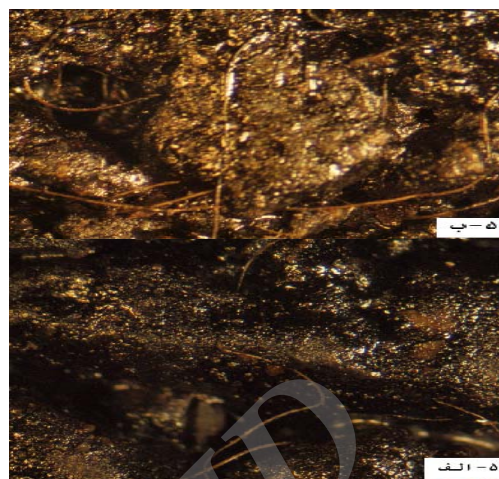
در این تحقیق از بارگذاری نیم‌سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز استفاده شده و آزمایش به روش کرنش ثابت انجام شد. هر سیکل بارگذاری شامل ۰/۰۵ ثانیه بارگذاری و ۰/۰۵ ثانیه دوره استراحت بوده است. مقدار کرنش‌های اولیه برابر با ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میکروکرنش^۷ به ترتیب به عنوان کرنش پایین، متوسط و بالا انتخاب گردید. منظور از کرنش پایین حدودی از کرنش تعریف می‌شود که تحت آن کرنش تعداد سیکل های عمر خستگی به طور نامحدود افزایش می‌یابد. بسیاری از مراجع این محدوده را کرنش ۷۰ تا ۳۰۰ میکرواسترین تعریف می‌کنند.

a: فاصله بین گیره‌های داخلی قاب بارگذاری که برابر با ۰/۱۱۹ متر است.

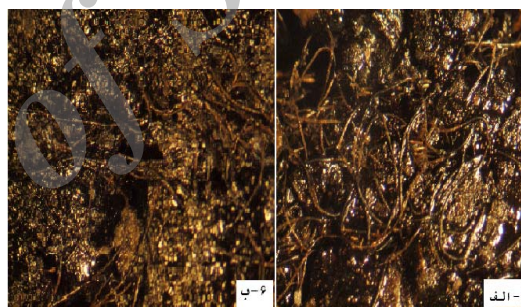
جدول ۶. نتایج آزمایش تیر خمشی

عمر خستگی (سیکل)	نمونه	سطح کرنش (میکرواسترین)
۱۶۱۲۵۲	شاهد	۳۰۰
۱۹۶۴۵	شاهد	۵۰۰
۵۰۰۳	شاهد	۷۰۰
۱۵۰۱۷۲	۱cm-۰,۵%	۳۰۰
۳۴۸۱۹	۱cm-۰,۵%	۵۰۰
۵۰۳۹	۱cm-۰,۵%	۷۰۰
۲۰۹۱۲۱	۱cm-۱%	۳۰۰
۳۹۶۹۳	۱cm-۱%	۵۰۰
۶۰۹۲	۱cm-۱%	۷۰۰
۲۴۲۱۹۸	۱cm-۱,۵%	۳۰۰
۱۹۵۶۷	۱cm-۱,۵%	۵۰۰
۶۹۸۷	۱cm-۱,۵%	۷۰۰
۱۲۵۴۴۱	۱cm-۲%	۳۰۰
۲۲۸۴۵	۱cm-۲%	۵۰۰
۶۰۲۸	۱cm-۲%	۷۰۰
۲۳۹۵۴۷	۲cm-۰,۵%	۳۰۰
۲۵۰۳۲	۲cm-۰,۵%	۵۰۰
۴۲۱۲	۲cm-۰,۵%	۷۰۰
۲۷۶۴۴۶	۲cm-۱%	۳۰۰
۳۹۸۱۴	۲cm-۱%	۵۰۰
۸۰۲۷	۲cm-۱%	۷۰۰
۲۹۰۷۱۱	۲cm-۱,۵%	۳۰۰
۲۳۰۴۵	۲cm-۱,۵%	۵۰۰
۷۰۸۹	۲cm-۱,۵%	۷۰۰
۲۷۱۴۲۸	۲cm-۲%	۳۰۰
۲۸۹۴۲	۲cm-۲%	۵۰۰
۷۹۰۲	۲cm-۲%	۷۰۰

L: فاصله بیرونی گیره‌های خارجی که برابر با ۰/۳۵۶ متر است. با محاسبه تنش و کرنش کششی حداکثر سختی خمشی^۱ با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه خواهد بود.



شکل ۵. الف) تصویر میکروسکوپی از مخلوط آسفالتی حاوی ۰,۵ درصد الیاف PET (ب) تصویر میکروسکوپی از مخلوط آسفالتی حاوی ۱ درصد الیاف PET



شکل ۶. الف) تصویر میکروسکوپی از مخلوط آسفالتی حاوی ۲ درصد الیاف PET (ب) تصویر میکروسکوپی از مخلوط آسفالتی حاوی ۴ درصد الیاف PET

در این روش مقادیر کرنش و تنش کششی حداکثر با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌گردد.

$$\sigma_t = 0.357 \frac{P}{bh^2} \quad (۱)$$

$$\varepsilon_t = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4a^2} \quad (۲)$$

که در این روابط:

σ_t : تنش کششی حداکثر، پاسکال

ε_t : کرنش کششی حداکثر، میکروکرنش

P: مقدار بار اعمالی، نیوتن

b: عرض متوسط نمونه، متر

h: ارتفاع متوسط نمونه، متر

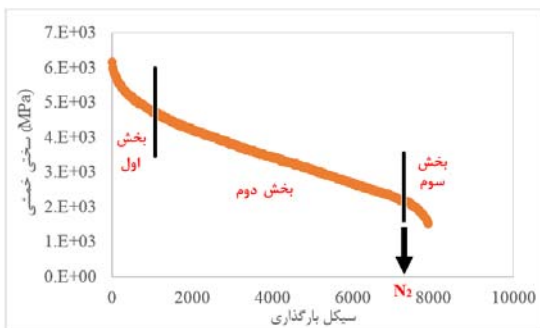
δ : حداکثر خیز تیر در مرکز تیر، متر

خستگی آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. به هر حال اکثر محققین از معیار ۵۰ درصد سختی خمشی اولیه در تحقیقات خود استفاده نموده و به نتایج نسبتاً بهتری دست یافته‌اند. [Tayebali, Rowe, and Sousa, 2010; Zhang et al. 2014] در تحقیق حاضر این معیار به عنوان یکی از معیارهای عمر خستگی در نظر گرفته شده است (N₁).

به علت اختلاف نظر موجود در تعریف سختی اولیه و در برخی از موارد پراکندگی موجود در نتایج، معیار دیگری برای تعریف عمر خستگی پیشنهاد شده است. [Shen et al. 2006; Yuan et al. 2013] در این معیار پایان مرحله دوم و شروع مرحله سوم به عنوان عمر خستگی در نظر گرفته می‌شود (N₂).

شکست نمونه طبق تعریف اول با توجه به مقدار سختی خمشی اولیه در بخش‌های مختلفی از نمودار می‌تواند رخ دهد که معمولاً در بخش دوم نمودار قرار می‌گیرد. بنابراین به دلیل متغیر بودن محل رخداد، این تعریف قابل نمایش در نمودار نیست. در مقابل، تعریف دوم قابل نمایش در نمودار بوده و در شکل ۷ ارائه شده است (N₂).

در شکل ۸ نمودار تغییرات سختی خمشی برای نمونه شاهد (فاقد افزودنی) و نمونه حاوی ۱/۰ درصد الیاف با طول ۱/۰ و ۲/۰ سانتیمتر در کرنش اولیه ۳۰۰ میکروکرنش نشان می‌دهد. مطابق شکل نمونه حاوی الیاف ۲ سانتیمتری در تمامی سیکل‌های بارگذاری مقاومت خستگی بالاتری نسبت به دو نمونه دیگر داشته است. نمونه فاقد الیاف در سیکل‌های اولیه رفتار خستگی نسبتاً بهتری نسبت به نمونه حاوی الیاف ۱ سانتیمتری داشت. با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری و بعد از حدود ۱۰۰ هزار سیکل بارگذاری، نمونه حاوی الیاف بهتر بوده و در نهایت نمونه شاهد زودتر از نمونه‌های حاوی الیاف به خستگی رسیده است.



$$S = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (3)$$

که در این رابطه:

S: سختی خمشی نمونه، پاسکال است.

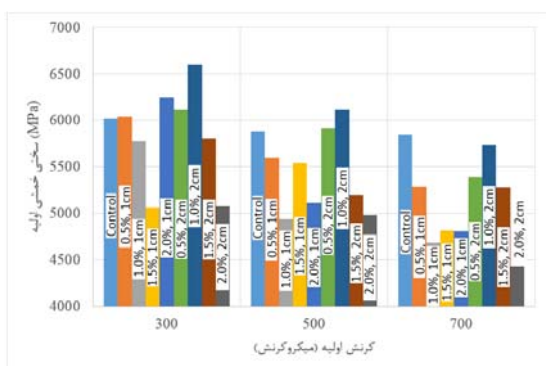
۳. نتایج و تفسیر

در جدول ۶ داده‌های به دست آمده از آزمایش خستگی برای نمونه‌های شاهد و حاوی الیاف در سطح کرنش‌های مختلف ارائه شده است. لازم به توضیح است که در این جدول عمر خستگی معادل تعداد سیکل‌های بارگذاری در نظر گرفته شده است که منجر به کاهش سختی اولیه به ۵۰ درصد مقدار آن شده است.

شکل ۷ تغییرات سختی خمشی با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری را برای یک نمونه مورد آزمایش در کرنش اولیه ۷۰۰ میکروکرنش نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، نمودار در روش کرنش ثابت معمولاً دارای سه قسمت است. در قسمت اول، مدول سختی نمونه سریعاً کاهش می‌یابد. براساس تحقیقات گذشته این قسمت حدود ده درصد از عمر خستگی را شامل می‌شود. [Tayebali, Rowe and Sousa, 2010] در قسمت دوم، سختی خمشی به صورت خطی کاهش یافته و این مرحله با تشکیل ترک‌های ریز و مویی در نمونه همراه است. در انتهای این قسمت نمونه به حدود ۹۰ درصد از عمر خستگی خواهد رسید. ویژگی بارز قسمت سوم نمودار، کاهش ناگهانی در سختی خمشی نمونه است. در این قسمت ترک‌های اولیه گسترش قابل توجهی پیدا نموده و در نهایت شکست کامل به وقوع می‌پیوندد. در روش کرنش ثابت، به علت کاهش قابل توجه تنش‌های اعمالی در سیکل‌های انتهایی، نمونه می‌تواند مدت زمان زیادی در مرحله سوم بدون کاهش چشمگیر در میزان سختی خمشی باقی بماند. [Mahrez and Karim, 2010]. به این علت معمولاً کاهش سختی تا درصدی از سختی اولیه را به عنوان معیار شکست یا عمر خستگی تعریف می‌نمایند.

استاندارد EN 12697-24 این میزان را ۵۰ درصد سختی خمشی اولیه تعریف نموده است. محققین بسیاری در ارتباط با میزان دقت تعریف اخیر در برآورد عمر خستگی آزمایشگاهی و همبستگی نتایج و مدل‌های به دست آمده از آن با عملکرد میدانی مخلوط‌های آسفالتی مطالعه نموده‌اند. در برخی از گزارش‌ها معیار ۳۰ درصد سختی خمشی اولیه به عنوان تعریف عمر

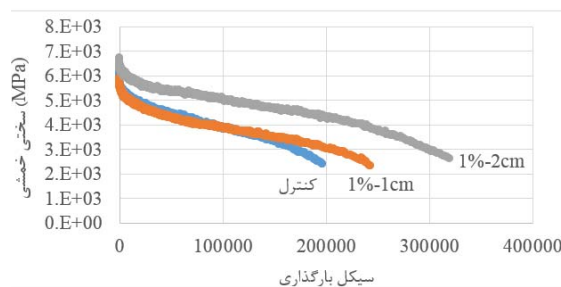
کمتری دارند یکی از عوامل کاهش سختی در ترکیب حاوی PET ذکر شده است. همچنین براساس گزارشهای ارائه شده در تحقیقات قبلی، این مساله می تواند باعث افزایش انعطاف پذیری و رفتار بهتر مخلوط در برابر بارگذاری های تکراری و در نهایت افزایش عمر خستگی گردد. Baghaee Moghaddam, RehanKarim and Syammaun, 2012, Modarres and Hamedi, 2014 (a)]



شکل ۹. تاثیر مقدار و طول الیاف PET بر سختی خمشی اولیه شکل ۱۰ تاثیر مقدار الیاف یک و دو سانتیمتری را بر عمر خستگی نمونه ها طبق تعریف اول (N_1) و در کرنش اولیه ۳۰۰ میکروکرنش نشان می دهد. با توجه به شکل، افزودن الیاف تا ۱/۵ درصد برای هر دو طول مورد تحقیق، باعث افزایش عمر خستگی در این سطح کرنش شده است. به طور مشابه افزودن مقدار الیاف تا ۲/۰ درصد تاثیرات معکوسی داشته و باعث افت عمر خستگی شده است. اگرچه برای الیاف دو سانتیمتری عمر خستگی نمونه های حاوی ۲/۰ درصد الیاف همچنان از نمونه های شاهد بیشتر بوده است.

نتایج به دست آمده در کرنش اولیه ۵۰۰ میکروکرنش در شکل ۱۱ ارائه شده است. مطابق شکل، روند به دست آمده برای هر دو طول یک و دو سانتیمتری تقریباً مشابه است. در این سطح کرنش مقدار مفید الیاف برابر با ۱/۰ درصد وزن قیر برای هر دو طول به دست آمده است.

شکل ۷. نمودار تغییرات سختی خمشی در روش کرنش ثابت و معیار دوم عمر خستگی (N_2)



شکل ۸. مقایسه نمودار سختی خمشی با افزایش سیکل های بارگذاری در کرنش اولیه ۳۰۰ میکروکرنش

استاندارد EN 12697-24 سختی خمشی اولیه را برابر با مقدار این پارامتر که از رابطه (۳) و در ۵۰ امین سیکل بارگذاری محاسبه می گردد، تعریف می نماید. با در نظرگیری این تعریف، مقدار سختی خمشی اولیه نمونه های مورد آزمایش در کرنش های مختلف محاسبه گردید. نتایج به دست آمده در شکل ۹ ارائه شده است. مطابق شکل در کرنش اولیه ۳۰۰ میکروکرنش، به غیر از نمونه حاوی ۲ درصد الیاف یک سانتیمتری، سایر نمونه های حاوی الیاف یک سانتیمتری، کاهش سختی خمشی را نسبت به نمونه شاهد نشان داده اند. روند کلی نتایج در این سطح کرنش برای نمونه های حاوی الیاف ۲ سانتیمتری نیز همین طور بوده و فقط نمونه حاوی ۰,۵ و ۱ درصد الیاف، افزایش در مقدار سختی خمشی اولیه را نشان می دهد. روند کاهش سختی خمشی در کرنش های ۵۰۰ و ۷۰۰ علی رغم وجود پراکندگی اندک در نتایج به طور واضح تری کاهش است. می توان اینگونه برداشت نمود که با افزودن الیاف PET به خصوص برای مقادیر بالاتر از ۱٪، سختی خمشی اولیه روند کاهشی داشته است. مطابق شکل های ۵ و ۶ در مقادیر کمتر از ۱ درصد، الیاف توزیع نسبتاً مناسبی در مخلوط داشته و تجمع و به هم پیوستگی الیاف کمتر مشاهده شده است. در مقادیر بالاتر از ۱ درصد و به خصوص برای نمونه های حاوی ۲ درصد الیاف در شکل نواحی تجمع یافته مشاهده می شود. به هم پیوستگی الیاف در این نواحی باعث ایجاد یک ناحیه ضعیف در مخلوط شده و می تواند تاثیرات معکوسی بر مقاومت خستگی داشته باشد. بنابراین روند کاهشی عمر خستگی برای نمونه های حاوی بیش از ۱ درصد الیاف با توجه به نواحی تجمع یافته قابل توجیه است. در مطالعات گذشته، جایگزینی بخشی از سنگدانه ها توسط الیاف که سختی

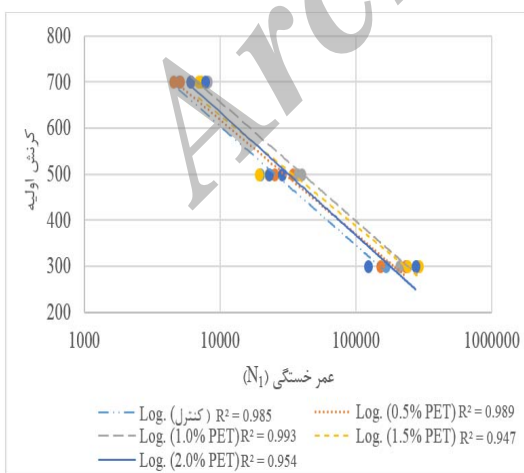
ارزیابی رفتار خستگی مخلوط آسفالت گرم حاوی الیاف.....

مطابق شکل ۱۲ در سطح کرنش ۷۰۰ میکروکرنش روند تغییرات عمر خستگی برای هر دو طول مورد تحقیق، صعودی بوده است. مقدار حداکثر عمر خستگی برای الیاف یک و دو سانتیمتری به ترتیب در ۱/۵ و ۱/۰ درصد وزنی الیاف به دست آمده است.

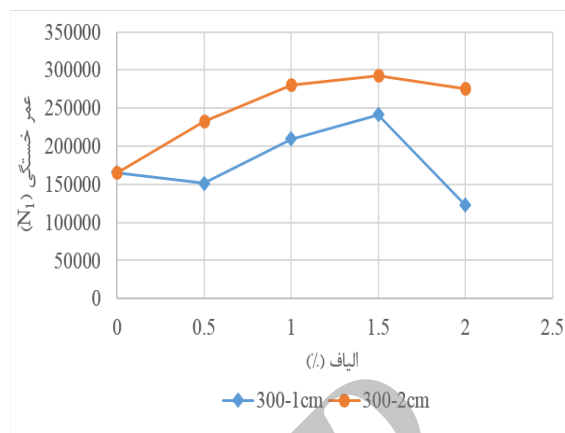
در شکل ۱۳ نمودار عمر خستگی در مقابل تغییرات سطح کرنش برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف ترسیم شده است. در این شکل محور افقی دارای مقیاس لگاریتمی است. در تکنولوژی آسفالت به این نمودارها قانون خستگی گفته می‌شود. مطابق این شکل، پایین‌ترین نمودار مربوط به نمونه‌های شاهد می‌باشد که فاقد الیاف بوده‌اند. بنابراین در تمامی درصدها استفاده از الیاف باعث افزایش عمر خستگی نمونه‌ها در یک سطح کرنش ثابت شده است.

نمودارهای خستگی نمونه‌های حاوی ۰/۵ و ۲/۰ درصد الیاف بسیار نزدیک به هم بوده و بالاتر از نمودار خستگی نمونه شاهد قرار گرفته‌اند. همچنین در کرنش‌های بالا (بزرگتر از حدود ۵۵۰ میکروکرنش) نمودار خستگی نمونه‌های ۲/۰ درصد از نمونه ۱/۵ درصدی نیز نتایج بهتری را نشان می‌دهد. به هر حال در سطح کرنش‌های پایین‌تر عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد الیاف بیشتر از نمونه‌های ۲/۰ و ۰/۵ درصد بوده است.

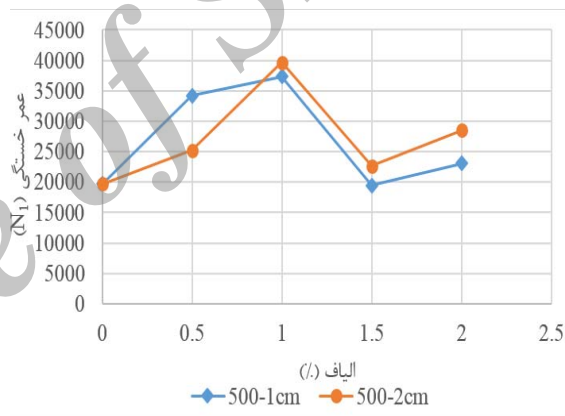
براساس این شکل بیشترین عمر خستگی برای نمونه‌های حاوی ۱/۰ درصد الیاف به دست آمده است. این نمونه‌ها در تمامی سطوح کرنش مورد مقایسه مقاومت خستگی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته‌اند.



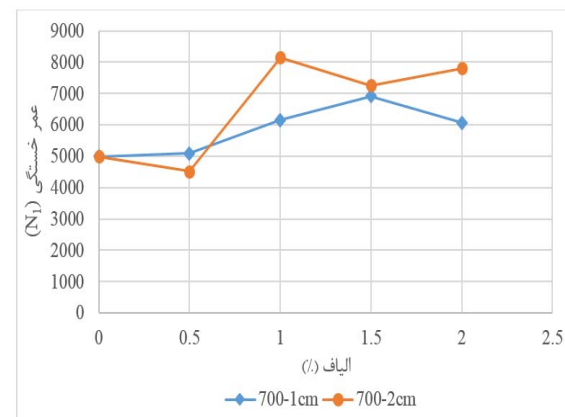
شکل ۱۳. نمودارهای خستگی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف PET برای تعریف اول عمر خستگی (N_f)



شکل ۱۰. تاثیر مقدار الیاف بر عمر خستگی (N_f) در کرنش اولیه ۳۰۰ میکروکرنش

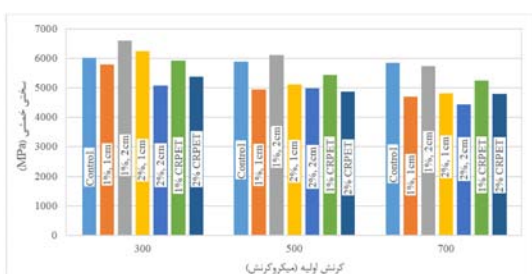


شکل ۱۱. تاثیر مقدار الیاف بر عمر خستگی (N_f) در کرنش اولیه ۵۰۰ میکروکرنش



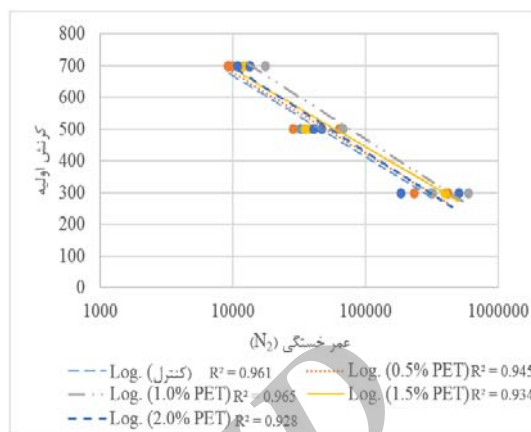
شکل ۱۲. تاثیر مقدار الیاف بر عمر خستگی (N_f) در کرنش اولیه ۷۰۰ میکروکرنش

خمشی مخلوط آسفالتی حاوی PET نسبت به مخلوط شاهد شده است. نتایج به دست آمده از مطالعات گذشته که بیشتر معطوف به خرده پلاستیک بازیافتی بوده است نیز نتایج کم و بیش مشابهی را نشان می‌دهد. [Ahmadinia et al. 2011, Ahmadinia et al. 2012, Baghaee Moghaddam, RehanKarim and Syammaun, 2012] به طور متوسط سختی خمشی نمونه‌های حاوی خرده پلاستیک از نمونه‌های حاوی ۲٪ درصد الیاف بیشتر و از نمونه‌های حاوی ۱٪ درصد الیاف کمتر بوده است.



شکل ۱۵. مقایسه تاثیر الیاف و خرده PET بر سختی خمشی

شکل ۱۶ نمودارهای خستگی به دست آمده از الیاف PET را با خرده پلاستیک مقایسه می‌نماید. این مقایسه براساس تعریف اول عمر خستگی (N_1) انجام شده است. مطابق شکل تمامی نمونه‌های حاوی افزودنی‌های مورد مقایسه، مقاومت خستگی بالاتری نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند. رفتار خستگی نمونه‌های حاوی ۱/۰ درصد خرده پلاستیک و ۲/۰ درصد الیاف بسیار به هم نزدیک بوده است. در کرنش‌های بالا ترکیب حاوی ۲/۰ درصد الیاف و در کرنش‌های پایین ترکیب حاوی ۱/۰ درصد خرده پلاستیک عمر خستگی بالاتری داشته‌اند. براساس نمودارهای به دست آمده نمونه‌های حاوی ۱/۰ درصد الیاف بیشترین عمر خستگی را در تمام کرنش‌های اولیه داشته‌اند. در کرنش‌های پایین (حدود ۳۰۰ میکروکرنش) عمر خستگی نمونه حاوی ۲/۰ درصد خرده PET به نمونه حاوی ۱/۰ درصد الیاف نزدیک شده است.



شکل ۱۴. نمودارهای خستگی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف

الیاف PET برای تعریف دوم عمر خستگی (N_2)

شکل ۱۴ نمودارهای خستگی به دست آمده براساس تعریف دوم عمر خستگی (N_2) را برای نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد که ضرایب R^2 در تعریف اول بزرگتر از تعریف دوم است. اگرچه این ضرایب برای هر دو تعریف مناسب بوده و بزرگتر از ۰/۹۰ می‌باشند اما می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که توابع ریاضی و مدل‌های خستگی به دست آمده از تعریف اول می‌توانند با دقت بیشتری عمر خستگی مخلوط آسفالتی حاوی الیاف را پیش‌بینی نمایند. مطابق شکل ۱۴ نمونه‌های فاقد الیاف در تمامی سطوح کرنش کمترین مقدار مقاومت خستگی را از خود نشان داده‌اند. مخلوط‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف در کرنش‌های بالا (بزرگتر از حدود ۵۰۰ میکروکرنش) در اولویت دوم قرار می‌گیرند. در سطوح کرنش پایین، رفتار خستگی مخلوط آسفالتی ۰/۵ و ۲/۰ درصد الیاف، بسیار به هم نزدیک است. مشابه نتایج به دست آمده از تعریف اول، افزودن الیاف به میزان ۱/۰ درصد وزن قیر بیشترین کارایی را در ارتقا رفتار خستگی داشته است. همچنین مطابق شکل در سطوح کرنش بسیار پایین، (حدود ۳۰۰ میکروکرنش) عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۱/۵ و ۲/۰ درصد الیاف بسیار نزدیک بوده و از سایر نمونه‌ها بیشتر است.

شکل ۱۵ مقدار سختی خمشی اولیه را برای نمونه‌های حاوی الیاف و خرده PET مورد مقایسه قرار می‌دهد. در این شکل نمونه‌های حاوی ۱/۰ و ۲/۰ درصد خرده PET به ترتیب با نام اختصاری 1%CRPET و 2%CRPET نشان داده شده‌اند. همانند الیاف، استفاده از خرده پلاستیک نیز باعث کاهش سختی

پلاستیک از نمونه‌های حاوی ۲٪ درصد الیاف بیشتر و از نمونه‌های حاوی ۱٪ درصد الیاف کمتر بوده‌است.

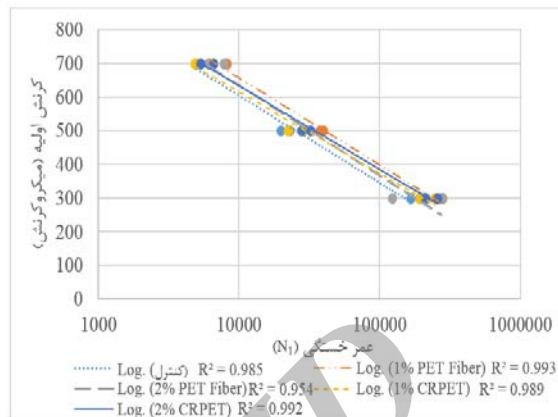
۳- دو تعریف برای عمر خستگی در نظر گرفته شد. در تعریف اول کاهش سختی خمشی به میزان ۵۰ درصد مقدار اولیه به عنوان وقوع خستگی در نمونه در نظر گرفته شد. در تعریف دوم افزایش شیب کاهش سختی در شروع ناحیه سوم نمودار تغییرات سختی خمشی به عنوان عمر خستگی تعریف گردید. برای هر دو تعریف، در مقایسه با نمونه شاهد، تمام مقادیر الیاف مقاومت خستگی مخلوط را بهبود دادند. اگرچه نتایج به دست آمده از تعریف اول دارای همبستگی بیشتری بود.

۴- براساس مقایسه انجام شده بین نمودارهای خستگی نمونه حاوی ۱/۰ درصد الیاف بیشترین مقاومت خستگی را در تمام سطوح کرنش داشته‌است. در کرنش‌های پایین نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف در اولویت دوم قرار داشت. درحالی‌که در کرنش‌های بالا نمونه حاوی ۲/۰ درصد الیاف رفتار خستگی بهتری از خود نشان داد. همچنین مقاومت خستگی نمونه‌های حاوی الیاف دو سانتیمتری بیشتر از نمونه‌های یک سانتیمتری بود.

۵- با توجه به تحلیل‌های انجام شده استفاده از ۱/۰ درصد وزن قیر الیاف دو سانتیمتری و ۲/۰ درصد وزن قیر خرده پلاستیک جهت تقویت رفتار خستگی مخلوط آسفالتی پیشنهاد می‌شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Polyethylene terephthalate
2. 4-point bending beam
3. Laboratory roller compactor
4. Universal testing machine
5. Crumb PET
6. Reference specimen
7. Microstrain
8. Flexural stiffness



شکل ۱۶. مقایسه نمودارهای خستگی مخلوط‌های حاوی ۱ و ۲ درصد الیاف PET و خرده PET

براساس نتایج به دست آمده و تحلیل‌های انجام شده، الیاف پلاستیک بازیافتی (PET) در صورتی که به مقدار مناسب به مخلوط اضافه شوند می‌توانند تأثیرات مفیدی بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی داشته باشند. بیشترین عمر خستگی برای نمونه‌های حاوی ۱/۰ درصد الیاف PET با طول دو سانتیمتر به دست آمده‌است.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر الیاف پلی اتیلن تولید شده از پلاستیک‌های بازیافتی بر خصوصیات خستگی آسفالت گرم به روش خمش چهارنقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مقدار الیاف برابر با ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ درصد وزن قیر در نظر گرفته شد. در این بررسی تأثیر الیاف با خرده پلاستیک بازیافتی مقایسه شد. براساس نتایج به دست آمده و تحلیل‌های انجام شده نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- افزودن الیاف پلی اتیلن بازیافتی باعث کاهش سختی خمشی آسفالت گردید. این مورد برای نمونه‌های حاوی بیشترین مقدار الیاف (۱/۵ و ۲/۰ درصد) واضح تر بود.
- ۲- تأثیرات خرده پلاستیک بازیافتی که به میزان ۱/۰ و ۲/۰ درصد وزن قیر به مخلوط آسفالتی اضافه شده بود، تا حد زیادی مشابه با الیاف بوده‌است. به طور متوسط سختی خمشی نمونه‌های حاوی خرده

oceanica used as a new natural fibre to enhance the performance of asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials*, Vol.102, Part 1, pp.601-612.

- Mahrez, A. and Karim, M. R. (2010) “Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiber glass”, *Int. J. Phys. Sci.*, Vol.5, No.12, pp.1840-7.

- Majoryl, L. (1986) “Introductory textile science”, 5th ed. Holet, Rinehart and Winston Pub.

- Mansourian, A., Razmi, A. and Razavi, M. (2016) “Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers”, *Construction and Building Materials*, Vol.117, pp.37-46.

- Mod

Arres, A. and Hamed, H. (2014 (a)) “Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes”, *Materials and Design*, Vol.61, pp.8-15.

- Modarres, A. and Hamed, H. (2014 (b)) “Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET)”, *Construction and Building Materials*, Vol.68, pp.259-267.

- Moghadas Nejad, F., Vadood, M. and Baetabar, S. (2014) “Investigating the mechanical properties of carbon fibre-reinforced asphalt concrete”, *Road Materials and Pavement Design*, Vol.15, No.2, pp.465-475.

- Nazmi, W.M., Abdul Rahman, W. and Abdul Wahab, A.F. (2013) “Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt”, *Proc Eng*, Vol.53, pp.124-8.

- NCHRP synthesis 475 (2015) “Fiber additives in asphalt mixtures”, *Transportation Research Board*, Washington D.C., USA.

- Norambuena-Contreras, J., Gonzalez-Torre, I., Fernandez-Arnau, D. and Lopez-Riveros, C. (2016) “Mechanical damage evaluation of geosynthetics fibres used as anti-reflective

-Abtahi, S. M., Ghorban Ebrahimi, M. and Kunt, M. M. (2011) “Production of polypropylene reinforced asphalt concrete mixtures based on dry procedure and superpave gyratory compactor”, *Iranian Polymer Journal*, Vol.20, No.10, pp.813-823.

- Abtahi, S.M., Sheikhzadeh, M., Hejazi, S.M. (2010) “Fiber-reinforced asphalt concrete- A review”, *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp.871-877.

- Ahmadiania, E., Zargar, M., Karim, M. R., Mahrez, A. and Shafiqh, P. (2011) “Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt”, *Mater Design*, Vol.32, pp.4844-4849.

- Ahmadiania, E., Zargar, M., Rehan Karim, M. and Abdelaziz, M. (2012) “Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt”, *Construc Build Mater*, Vol.36, pp.984-989.

- Baghaee Moghaddam, T., Rehan Karim, M. and Syammaun, T. (2012) “Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles”, *Constr Build Mater*, Vol.34, pp.236-242.

- Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M., Rehan Karim, M. (2013) “Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and poly-ethylene terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test”, *Materials and Design*, Vol.53, pp.317-24.

- EN 12697-24. (2004) “Bituminous mixtures-test methods for hot mix asphalt - part 24: resistance to fatigue”, *European committee for standardization*, July 2004.

- 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 and Design*, Vol.66, Part A, pp.51-59.

- Herráiz, T.R., Real Herráiz, J. I., Domingo, L.M. and Domingo, F. C. (2016) “Posidonia

- Tapkin, S. (2008) "The effect of polypropylene fibers on asphalt performance", Construction and Building Materials, Vol.43, No.6, pp.1065-1071.
- Tayebali, A., Rowe, A. G. M. and Sousa, J. B. (2010) "Fatigue response of asphalt aggregate mixtures", J. Assoc Asphalt Paving Technol, Vol.61, pp.333-60.
- Xue, Y. and Qian, Z. (2016) "Development and performance evaluation of epoxy asphalt concrete modified with mineral fiber", Construction and Building Materials, Vol.102, Part1, pp.378-383.
- Zhang, C. C. and Najd, A. (2012) "Effects of glass fiber/grid reinforcement on the crack growth rate of an asphalt mix", 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Volume 4 of the series RILEM Bookseries, pp.1145-1155.
- Zhang, Y., Cai, Y., Zhang, G. and Fang, H. (2014) "Fatigue property of basalt-modified asphalt mixture under complicated environment", Materials and Structures, Vol.29, No.5, pp.996-100
- cracking systems in asphalt pavements", Construction and Building Materials, Vol.109, pp.47-54.
- Shen, S., Airey, G.D., Carpenter, S. H., Huang, H. A. (2006) "Dissipated energy approach to fatigue evaluation", Road Materials and Pavement Design, Vol. 7, No. 1, pp. 85-92.
- Yuan, M.M., Zhang, X.N., Chen, W.Q., Zhang, SX. (2013) "Ratio of dissipated energy change -based failure criteria of asphalt mixtures", Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol. 6, No. 14, pp. 2514-2519.
- Shiuh, J. and Kuei-Yi, L. (2005) "Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers", J. Mater Sci, Vol.40, pp.87-95.
- Taherkhani, H. and Amini, H. (2016) "Investigating the properties of Nylon fiber reinforced asphalt concrete", International Journal of Science and Engineering Investigations, Vol.5, No.48, pp.6-11.

زهرة دهقان، امير مدرس

امير مدرس، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه مازندران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۸۴ را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود. در سال ۱۳۸۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل و طراحی روسازی آسفالتی و بتنی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیاری در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل است.



زهرة دهقان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهبود عملکرد روسازی آسفالتی بوده و در حال حاضر سرپرست کارگاه دارای پروانه اشتغال به کار پایه ۳ از سازمان نظام مهندسی ساختمان استان مازندران است

