

خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)

امیر مدرس (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران
حمیدرضا حامدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران

Email: a.modarres@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۰۱ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۵

چکیده:

در این تحقیق، خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET) مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقادیر مختلف PET (۲ تا ۱۰ درصد نسبت به وزن قیر) به مخلوط آسفالتی با روش خشک اضافه شده و آزمایش‌های مدول برچیندگی و خستگی در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد. نتایج نشان دادند که مقادیر کم PET (تا ۲ درصد نسبت به وزن قیر)، باعث افزایش سختی مخلوط آسفالتی شده و روند نتایج از آن به بعد، نزولی می‌شود. همچنین در دمای کم که مخلوط آسفالتی تمایل به سخت شدن دارد، افزودن PET باعث کاهش سختی آن می‌شود. مقادیر بالای PET (به خصوص ۸ و ۱۰ درصد) عمر خستگی مخلوط آسفالتی را بیشتر افزایش می‌دهد. رابطه بین عمر خستگی و کرنش اولیه نشان می‌دهد که در شرایط بارگذاری سنگین خرابی خستگی در دماهای کم تا متوسط بحرانی‌تر می‌شود. ولی در شرایط بارگذاری سبک و سطح کرنش کمتر از محدوده ۱۶۰-۲۱۰ میکرو، خرابی خستگی در دمای کم بحرانی نخواهد بود.

واژه‌های کلیدی: ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)، سختی، مخلوط آسفالتی اصلاح شده، عمر خستگی

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، مهندسان به دنبال فنون جدید در ساخت و ساز روسازی جاده‌ها هستند که سازگار با محیط زیست باشند (مانند بازیافت آسفالت، استفاده از مواد زائد در آسفالت و ...) و تحقیقات زیادی در این ارتباط انجام شده است [Aravind and Das, 2007, Chen et al. 2011, Rubio et al. 2009]. در طول عمر خدمت‌دهی مخلوط آسفالتی، نیروهای خارجی زیادی به آن وارد می‌شود که می‌تواند منجر به شکست شود. ترک خستگی به عنوان یکی از خرابی‌های اصلی در روسازی‌ها به شمار می‌رود. مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی را می‌توان توانایی در برابر بارهای مکرر بدون وقوع شکست تعریف کرد. معمولاً مخلوط‌های آسفالتی با درصد قیر کم و فضای خالی زیاد مستعد ترک خوردگی از نوع خستگی هستند [Moghaddas-Nejad et al. 2010]. گزارشها داده که روسازی‌های آسفالتی، با سختی، ضخامت، درصد فضای خالی و درصدهای مختلف قیر، می‌توانند در برابر ترک‌های خستگی رفتار متفاوتی داشته باشند [NCHRP APPENDIX, 2004]. همچنین بررسی‌ها نشان داد که مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی ریزتر، عمر خستگی بیشتری نسبت به مخلوط با دانه‌بندی درشت‌تر دارد [Abo-Qudais and Shatnawi, 2007]. برای افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی می‌توان از مواد افزودنی مثل الیاف و پلیمرها استفاده کرد. در یک پروژه تحقیقاتی خصوصیات خستگی مخلوط اصلاح‌شده با سه نوع الیاف بررسی شد. از الیاف‌های سلولزی، پلی‌استر و معدنی برای اصلاح مخلوط آسفالتی استفاده شد. نتایج آزمایش خستگی در سطوح مختلف تنش نشان داد که الیاف پلی‌استری بیشترین عمر خستگی را نسبت به دو الیاف دیگر داراست [Ye et al. 2009]. نتایج تحقیقی دیگر نشان داد که الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی شده و یک درصد از این الیاف، عمر خستگی را ۲۷ درصد نسبت به مخلوط اصلاح

نشده افزایش می‌دهد [Tapkin, 2008]. همچنین استفاده از الیاف کربن در افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی موثر است و نتایج نشان داده که ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد الیاف کربن (نسبت به وزن کل مخلوط) عمر خستگی را نسبت به مخلوط اصلاح نشده به ترتیب ۲۸/۲، ۳۷/۲ و ۴۴/۴ درصد افزایش می‌دهد. در حالی که اصلاح مخلوط آسفالتی با الیاف کربن به طول ۲۰ میلیمتر نسبت به الیاف کربن به طول ۱۲/۵ میلیمتر عمر خستگی بیشتری ارایه می‌کند [Jahromi and Khodaii, 2008].

پلیمرهای مورد استفاده برای اصلاح مخلوط آسفالتی را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد که عبارتند از: الاستومرهای ترموپلاستیک مثل استایرن بوتادین استایرن (SBS) و پودر لاستیک (CR)، پلاستومرها مثل اتیلن‌وینیل استات (EVA) و پلی‌اتیلن (PE) و پلیمرهای با واکنش شیمیایی. شاخص طبقه بندی الاستومرها براساس درصد استایرن، وزن مولکولی و پیکربندی آنهاست. در تحقیقی مقایسه بین پودر لاستیک و استایرن بوتادین استایرن نشان داد که عمر خستگی با این مواد افزودنی نسبت به مخلوط اصلاح‌نشده، افزایش قابل توجهی دارد و رشد ترک در مخلوط‌های اصلاح‌شده، با روند یکسانی افزایش می‌یابد. همچنین برای دستیابی به عمر خستگی بیشتر، پودر لاستیک نیاز به مقادیر بیشتری استایرن بوتادین استایرن دارد، به طوری که مقدار ۴ درصد SBS نتایج مشابهی با ۸ درصد CR دارد [Voralkok and Colak, 2011]. پلاستومرها شامل پلی‌اتیلن و ترکیبات مختلف براساس پلی‌اتیلن و وینیل استات هستند. تحقیقات مختلف نشان دادند که اصلاح مخلوط آسفالتی با پلی‌اتیلن موثر است. نتایج حاصل از آزمون خمش^۵ در دماهای کم بیانگر آنست که مخلوط اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن مدول سختی و مدول گسیختگی^۶ بیشتری نسبت به مخلوط اصلاح‌نشده داشته و پتانسیل ترک‌خوردگی در دمای کم کاهش می‌یابد [Attealmana et al. 2011, Al-Hadidy and yi-qiu, 2009]. در تحقیق دیگری به ارزیابی

خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)

می‌شود [Wan Mohd Nazemi et al. 2013]. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بالاتر PET، مقاومت بهتر در برابر تغییر شکل در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده دارد، به طوری که ۱ درصد PET (نسبت به وزن سنگدانه‌ها)، بالاترین مقاومت در برابر تغییر شکل را داراست. همچنین با افزایش دما و سطح تنش، مقاومت به تغییر شکل مخلوط‌های اصلاح شده با PET کاهش می‌یابد [BaghaeeMoghaddam et al. 2013]. نتایج آزمایش ویل تراک نشان می‌دهد که کمترین عمق شیار مخلوط آسفالتی حاوی PET در مقدار ۴ درصد (نسبت به وزن قیر) اتفاق می‌افتد و نتایج آزمایش مدول برجهنگی (دمای متوسط) نیز این موضوع را تأیید می‌کند که در این درصد، مخلوط آسفالتی اصلاح شده نسبت به مخلوط اصلاح نشده سخت تر شده است. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که استفاده از ضایعات بطری‌های پلاستیکی در نواحی گرم تا ۴ درصد کافی است. بررسی‌ها نشان داد که PET باعث کاهش ریزش قیر در مخلوط‌های آسفالتی SMA می‌شود. افزودن PET باعث ویسکوزتر شدن قیر شده و منجر به ثبات و نگه داشتن قیر بر روی سنگدانه‌ها می‌شود. در نتیجه از ریزش قیر جلوگیری می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که افزودن PET تأثیری در بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی ندارد [Ahmadinia et al. 2012]. افزودن ضایعات بطری‌های پلاستیکی باعث افزایش استحکام مخلوط می‌شود. PET در حالت طبیعی یک رزین نیمه کریستالی است و پس از اضافه شدن به مخلوط آسفالتی و پس از حرارت دیدن، ویژگی‌های آن شروع به تغییر می‌کند و باعث استحکام بالاتر مخلوط می‌شود. این افزایش استحکام تا یک حدی ادامه دارد و با افزودن بیشتر PET، به دلیل آنکه در شکل کریستالی خود در مخلوط باقی می‌ماند، باعث افزایش فضای خالی شده و استحکام مخلوط را کاهش می‌دهد [Ahmadinia et al. 2011]. در تحقیق دیگری اثر ضایعات بطری‌های پلاستیکی بر سختی و خستگی مخلوط آسفالتی

خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با اتیلن وینیل استات پرداخته شده است. نتایج آزمایش خستگی نشان داد که اصلاح مخلوط آسفالتی باعث افزایش عمرخستگی می‌شود. همچنین ۲درصد EVA (نسبت به وزن قیر)، افزایش قابل ملاحظه‌ای در عمر خستگی نسبت به ۴ و ۶ درصد EVA ندارد. نتایج حاصله در سطوح مختلف تنش نشان داد که بهبود خصوصیات خستگی مخلوط اصلاح شده در سطوح تنش کم، بیشتر قابل ملاحظه است [Ameri et al. 2012].

در حال حاضر اصلاح مخلوط آسفالتی با پلیمرها هزینه بسیاری دارد [Chiu and Li-Cheng, 2007, Ahmed, 2007]. بنابراین استفاده از مواد ضایعاتی می‌تواند یک راه حل مناسب برای اصلاح مخلوط آسفالتی و کاهش هزینه‌های ساخت جاده‌ها باشد. طبق تحقیقات گذشته، ضایعات شیشه، لاستیک و پلاستیک از جمله مواد ضایعاتی هستند که در اصلاح مخلوط آسفالتی استفاده شده‌اند [Huang et al. 2007]. نتایج تحقیقات نشان دادند که ضایعات شیشه و ضایعات لاستیک باعث بهبود خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی شده و عمر خستگی را افزایش می‌دهند [Arabani et al. 2010, Arabani et al. 2012]. بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به طور جدی در معرض مشکلات ناشی از مواد زائد هستند. استفاده مجدد از ضایعات بخصوص در برخی از موارد مانند ظروف پلاستیکی مفید است. از جمله مواد پلاستیکی می‌توان به بطری‌های پلاستیکی اشاره کرد که از پلیمر پلی اتیلن ترفتالات⁷ (PET) تشکیل شده‌اند. PET یک رزین پلیمری ترموپلاستیک از خانواده پلی استر بوده و به طور گسترده در تولید بطری‌های آب و نوشابه استفاده می‌شود [Li et al. 2008]. استفاده از ضایعات بطری‌های پلاستیکی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزودن ضایعات بطری‌های پلاستیکی به مخلوط آسفالتی باعث بهبود خصوصیات تغییر شکل و مقاومت در برابر شیارشدگی

رفتار خستگی این مخلوط آسفالتی داشته باشد. در این تحقیق اثر ضایعات بطری‌های پلاستیکی بر خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی در دماهای کم و متوسط مورد بررسی قرار گرفته است. برنامه اصلی این تحقیق به صورت زیر است:

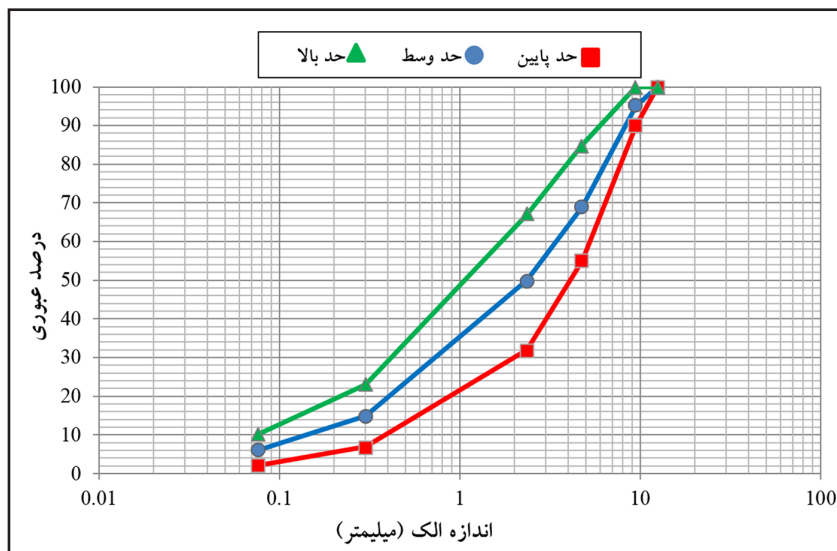
- ۱- تأثیر ضایعات بطری‌های پلاستیکی بر مقاومت و سختی مخلوط آسفالتی
- ۲- ارزیابی رفتار خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی
- ۳- ارزیابی سطوح مختلف کرنش و تأثیر آن بر عمر خستگی در دماهای مختلف

۲. مصالح مورد استفاده و طرح اختلاط

۲-۱ قیر مصرفی و سنگدانه

نمونه‌های آسفالتی از قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه تهران ساخته شده‌اند که در جدول ۱ خصوصیات قیر مصرفی مشاهده می‌شود. مصالح سنگی بکار گرفته شده از نوع ۱۲/۵-۰ میلی‌متر با دانه‌بندی پیوسته است که در شکل ۱ منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مشاهده می‌شود. در جدول ۲ نیز وزن مخصوص مصالح سنگی مشخص است.

(دمای ۲۵ درجه سانتیگراد) بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزودن PET باعث افزایش عمر خستگی شده و یک درصد PET (نسبت به وزن کل مخلوط)، عمر خستگی را ۱۲۴/۸ درصد (سطح تنش ۲۵۰ کیلوپاسکال) نسبت به مخلوط اصلاح‌نشده افزایش می‌دهد. نتایج آزمایش سختی مخلوط آسفالتی بیانگر آنست که افزایش مقادیر PET مخلوط را کمتر سخت می‌کند. نتایج نشان داد که با اضافه کردن ۰/۲ درصد PET (نسبت به وزن سنگدانه‌ها) به مخلوط، بیشترین سختی حاصل می‌شود، ولی عمر خستگی مخلوط اصلاح‌شده با افزودن مقادیر PET روند صعودی دارد [BaghaeeMoghaddam et al. 2012]. استفاده از ضایعات بطری‌های پلاستیکی می‌تواند خصوصیات مخلوط آسفالتی را تحت تاثیر خود قرار دهد. البته اطلاعات کافی در ارتباط با خصوصیات خستگی مخلوط اصلاح‌شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی در دماهای مختلف وجود ندارد. بررسی‌ها نشان داد که عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده در دماهای مختلف وابسته به کرنش اولیه است و در کرنش‌های زیاد و کم، عمر خستگی نسبت به دما تغییر می‌کند [Modarres, 2013]. بنابراین ارزیابی رفتار خستگی مخلوط اصلاح‌شده با PET در دماهای مختلف می‌تواند کمک زیادی در شناخت



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی

خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)

۲-۲ افزودنی

برای اصلاح مخلوط آسفالتی، از ضایعات بطری‌های پلاستیکی استفاده شد. به این منظور، بطری‌های PET به اندازه‌های کوچک بریده شد و توسط مخلوط کن خرد، و سپس الک گردید. بررسی‌های گذشته نشان داد که افزودن ضایعات PET با اندازه ۰/۴۲۵ تا ۱/۱۸ میلی‌متر می‌تواند خصوصیات مخلوط آسفالتی را بهبود بخشد [Ahmadinia et al. 2011, Ahmadinia et al. 2012]. بنابراین در این تحقیق ذرات PET با همین اندازه استفاده شده‌اند و در جدول ۳ خصوصیات PET مشاهده می‌شود.

۳-۲ طرح اختلاط

دو روش برای اضافه کردن مواد افزودنی به مخلوط آسفالتی وجود دارد که عبارتند از: روش مرطوب^۹ و روش خشک^{۱۰}. در روش مرطوب ماده افزودنی با قیر ترکیب شده و سپس قیر اصلاح شده به مصالح سنگی اضافه می‌شود. در روش خشک ابتدا ماده افزودنی با مصالح سنگی ترکیب شده و سپس قیر به آنها اضافه می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به دلیل بالا بودن نقطه ذوب PET، امکان ترکیب شدن آن با قیر فراهم نبوده و معمولاً ترکیب به دست آمده از روش مرطوب همگن و مطلوب نیست

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های قیر مورد استفاده

ویژگی	استاندارد	مقدار	حدود مشخصات قیر ۶۰-۷۰	
			حداقل	حداکثر
وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتیمتر مکعب)	ASTM D70	۱/۰۱۳	-	-
درجه نفوذ (دهم میلیمتر)	ASTM D5	۶۵	۶۰	۷۰
نقطه اشتغال (درجه سانتیگراد)	ASTM D 92	۳۱۴	۲۳۲	-
نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)	ASTM D36	۵۰	۴۹	۵۹
کند روانی کینماتیک (سانتی استوکس) در ۱۲۰ درجه سانتیگراد	ASTM D2170	۹۶۶	-	-
کند روانی کینماتیک (سانتیاستوکس) در ۱۳۵ درجه سانتیگراد	ASTM D2170	۴۶۷	-	-
کند روانی کینماتیک (سانتی استوکس) در ۱۶۰ درجه سانتیگراد	ASTM D2170	۱۶۸	-	-

جدول ۲. وزن مخصوص مصالح سنگی

مشخصه	وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)		درصد جذب آب (%)
	ظاهری	حقیقی	
مصالح درشت‌دانه	۲/۶۶۳	۲/۴۹۸	۲/۲
مصالح ریزدانه	۲/۶۲۳	۲/۴۶۷	۲/۴
فیلر	۲/۶۶۵		-
وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۲/۴۹۵		-

این محفظه قرار داده می‌شد تا به دمای مورد نظر برسند.

۱-۳ مدول برجهندگی

آزمایش مدول برجهندگی در دو دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد و مقادیر مختلف PET انجام شد. در این آزمایش از شکل بارگذاری نیم سینوسی با فرکانس یک هرتز، مدت زمان سیکل بارگذاری ۰/۱ ثانیه و مدت زمان استراحت ۰/۹ ثانیه استفاده گردید. مقدار تغییر شکل‌ها توسط دو LDVT که در امتداد قطر نمونه‌ها نصب شده اندازه‌گیری می‌شد. همچنین آزمایش در دمای ۵ درجه سانتیگراد با تنش‌های بارگذاری معادل ۱۵ و ۲۰ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم و در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد با تنش‌های معادل ۲۰ و ۴۰ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم در همان دماها انجام گردید. برای بار دینامیکی P که باعث تغییر شکل می‌شود، مدول برجهندگی از رابطه (۱) به دست می‌آید [ASTM D4123, 2003]:

$$M_r = \frac{p(\gamma + 0.27)}{t \cdot \delta} \quad (1)$$

که P: حداکثر بار دینامیکی (N)، γ : ضریب پواسون، t: ارتفاع نمونه (mm) و δ : مجموع تغییر شکل افقی (mm) در رابطه (۱) ضریب پواسون وابسته به دما است و از رابطه (۲) به دست آید [Witczak, 2002]:

$$\gamma = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(3.1849 - 0.04233t)}} \quad (2)$$

که در این رابطه، t دما بر حسب درجه فارنهایت است.

۲-۳ خستگی

آزمایش خستگی در دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد و با تنش‌های بارگذاری معادل ۱۵ و ۲۰ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم در همان دماها انجام شد. بارگذاری آزمایش خستگی شبیه به آزمایش مدول برجهندگی بوده و مدت زمان سیکل بارگذاری ۱۵۰۰ میلی ثانیه و مدت زمان اعمال بار برابر ۲۵۰ ثانیه انتخاب

[Casey et al. 2008]. بنابراین در این تحقیق از روش خشک برای اصلاح مخلوط آسفالتی استفاده شده و ضایعات PET در مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد (نسبت به وزن قیر) با روش خشک به مخلوط آسفالتی اضافه شدند. همچنین نمونه‌های اصلاح‌نشده در درصد‌های مختلف قیر و اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه و به روش مارشال تهیه شد. درصد قیر بهینه برای نمونه‌های اصلاح‌نشده برابر ۵/۷ درصد تعیین گردید. در این تحقیق نمونه‌های اصلاح‌شده نیز در همین درصد قیر بهینه به روش مارشال ساخته شدند.

جدول ۳. خصوصیات PET

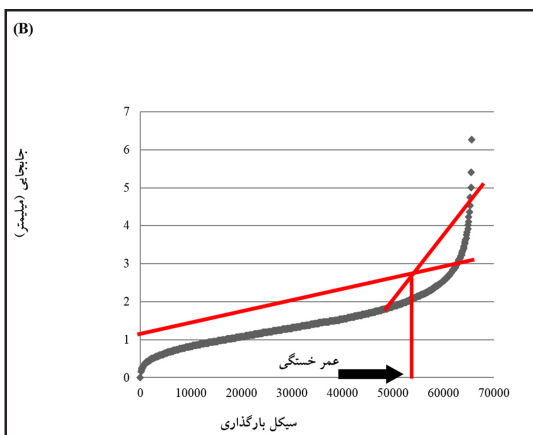
ویژگی	استاندارد	مقدار
وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM D792	۱/۰۸
نقطه ذوب (درجه سانتیگراد)	-	۲۵۰
دمای انتقال شیشه ^۸ (درجه سانتیگراد)	-	۷۰

۳. مطالعات آزمایشگاهی

برنامه اصلی این تحقیق شامل آزمایش‌های مدول برجهندگی و خستگی بود که با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای شکل و روش کشش غیرمستقیم انجام گرفت. آزمایش‌های مدول برجهندگی و خستگی مطابق روش استانداردهای ASTM D4123 و EN12697-24 در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد [ASTM D4123, 2003, EN 12697-24, 2004]. همچنین مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های آسفالتی نیز مطابق روش استاندارد AASHTO-T283 تعیین شده و نتایج آن در محاسبه سطح تنش مورد نیاز در آزمایش‌های مدول برجهندگی و خستگی استفاده شد. آزمایش‌های مدول برجهندگی و خستگی به وسیله دستگاه UTM-14 که مجهز به محفظه کنترل دما بود، انجام شد. نمونه‌ها به مدت حداقل پنج ساعت قبل از شروع آزمایش در

خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری های پلاستیکی (PET)

شکل ۲ منحنی تغییرشکل افقی در برابر سیکل های بارگذاری را نشان می دهد. در آزمایش خستگی تعاریف مختلفی از عمر خستگی وجود دارد (N_1 و N_2). در تعریف اول از عمر خستگی طبق استاندارد EN12697-24، عمر خستگی برابر با مجموع تعداد سیکل هایی است که در نتیجه آن نمونه می شکند. این تعریف در شکل (A-۲) مشاهده می شود [EN 12697-24, 2004]. شکل (B-۲) نیز بیانگر عمر خستگی طبق تعریف دوم است [Thiago et al. 2008]. مطابق شکل (B-۲) بعد از تعداد سیکل های بیانگر N_2 ، ترک های ریز با هم ترکیب شده و ترک های بزرگ تشکیل می شوند و در نهایت نمونه آسفالتی می شکند.



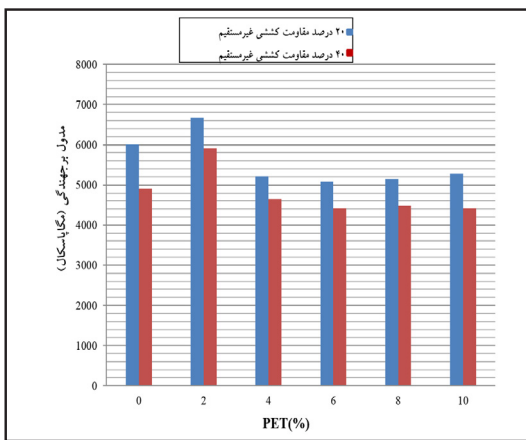
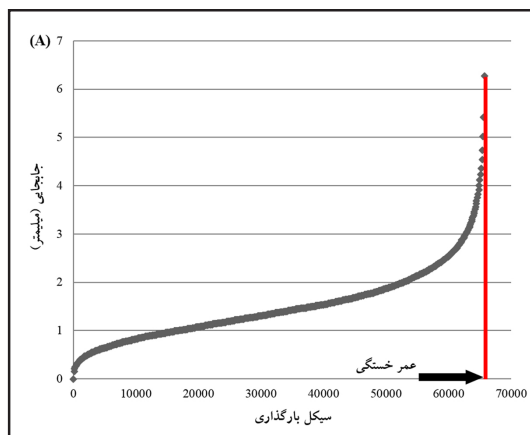
شکل ۲. تعاریف عمر خستگی در آزمایش خستگی با کشش غیرمستقیم

گردید. بارگذاری تا وقوع شکست کامل در نمونه ها ادامه یافت. تنش و کرنش کششی حداکثر در مرکز نمونه ها با استفاده از روابط (۳) و (۴) محاسبه می شود [EN 12697-24, 2004]:

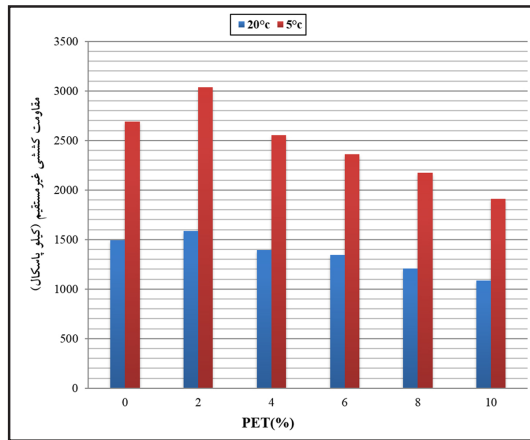
$$St = \frac{2p}{\pi t d} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{2\Delta H}{D} \right) \left(\frac{1+3\gamma}{4+\pi D-\pi} \right)$$

که در این رابطه، P: حداکثر بار دینامیکی (N)، t: ارتفاع نمونه (mm)، D: قطر نمونه ε ،(mm) کرنش کششی در مرکز نمونه و ΔH تغییرشکل افقی (mm) که توسط دو LDVT اندازه گیری می شود. در آزمایش خستگی تغییرشکل افقی اندازه گیری شده و منحنی تغییرشکل در برابر سیکل های بارگذاری رسم می شود.



شکل ۴. مدول برجهنگی مخلوط اصلاح شده در سطوح تنش مختلف - دما ۲۰ درجه سانتیگراد



شکل ۳. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) - دما ۲۰ و ۵ درجه سانتیگراد

۴. نتایج و بحث

۴-۱ مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و مدول برجهندگی (M_p)

شکل ۳ نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم را نشان می‌دهد. با کاهش دما مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش می‌یابد، زیرا سختی نمونه‌ها زیاد شده و نیروی بیشتری برای شکست لازم است. با افزایش مقادیر PET تا ۲ درصد، مقدار ITS در هر دو دما افزایش یافته، اما پس از آن روند نتایج نزولی است. در مقادیر بالاتر، PET درصدی از قیر را در اطراف خود نگه می‌دارد. این مساله می‌تواند باعث کاهش ضخامت قیر در اطراف سنگدانه‌ها شده و سبب کاهش مقاومت گردد. اگرچه کاهش مقاومت و سختی می‌تواند در راستای افزایش انعطاف پذیری و بهبود خصوصیات خستگی باشد، اما برای جلوگیری از کاهش بیش از حد در ضخامت قیر اطراف سنگدانه‌ها، باید مقدار PET محدود شود. کاهش ضخامت قیر علاوه بر اثرات مخرب بر مقاومت، بر روی دوام مخلوط در برابر رطوبت نیز اثرات نامطلوبی دارد. شکل‌های ۴ و ۵ نتایج آزمایش مدول برجهندگی در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد را در مقادیر مختلف PET نشان می‌دهند. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که مخلوط‌های آسفالتی در سطح تنش ۲۰ درصد مقاومت کششی سختی بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی در سطح تنش ۴۰ درصد مقاومت کششی دارند و با افزایش سطح تنش سختی کاهش می‌یابد. همچنین در یک سطح تنش ثابت، بیشترین سختی به ازاء ۲ درصد PET به دست آمده و مشابه با نتایج به دست آمده در شکل ۳، مدول برجهندگی نمونه‌ها با افزایش بیشتر PET روند نزولی دارد. مشابه با تحلیل ارائه شده برای شکل ۳ با افزایش درصد PET، این ذرات جایگزین بخشی از سنگدانه شده و بخشی از قیر را به خود اختصاص می‌دهند. علاوه بر کمتر بودن سختی ذرات PET نسبت به سختی سنگدانه‌ها، کاهش ضخامت قیر در اطراف سنگدانه‌ها که صرف

پوشش ذرات PET شده‌اند نیز می‌تواند از عوامل کاهش سختی در مخلوط‌های حاوی مقادیر بیشتر PET باشد. شکل ۵ سختی مخلوط آسفالتی را در دمای ۵ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. آسفالت در دماهای پایین سخت‌تر می‌شود و این در حالی است که افزودن PET باعث کاهش سختی مخلوط آسفالتی شده و انعطاف پذیری را افزایش می‌دهد. مطابق با شکل ۵، به دلیل سخت شدن قیر در این دما، اگرچه یک افت در مقدار سختی نمونه‌های حاوی بیش از ۲ درصد PET نسبت به نمونه‌های ۲ درصدی مشاهده می‌شود، اما در مقادیر بالاتر از ۲ درصد تا ۱۰ درصد نتایج به دست آمده کم و بیش یکسان هستند. بنابراین در دماهای پایین‌تر در اثر افزایش قابل توجه سختی قیر، این ماده نقش برجسته‌تری نسبت به ذرات PET خواهد داشت. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش سطح تنش از ۱۵ درصد مقاومت کششی به ۲۰ درصد مقاومت کششی، سختی مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌یابد و با افزایش سطح تنش، مقدار سختی مخلوط‌های آسفالتی در هر دو دمای مورد مطالعه کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ نشان داد که در سطح تنش ۲۰ درصد مقاومت کششی، سختی مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۵ درجه سانتیگراد تقریباً دو برابر سختی مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد است.

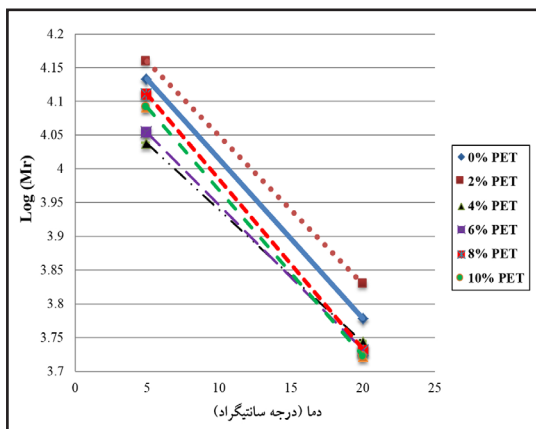
فعل و انفعالات بین قیر و مواد افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده می‌تواند تاثیر زیادی در رفتار مخلوط داشته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درصد مواد افزودنی، فعل و انفعال بین قیر و ماده افزودنی تغییر می‌کند. با افزایش درصد افزودنی فاز پلیمری بیشتر حاکم شده و در درصد بهینه، فاز قیری و پلیمری به یکدیگر قفل و بست می‌شوند و خصوصیات مخلوط را بهبود می‌بخشند [Sengoz and Isikyakar, 2008]. در حالی که امکان ترکیب PET با قیر فراهم نیست، ولی اضافه شدن PET به مخلوط آسفالتی و فعل و انفعال با قیر در رفتار

خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)

صورت رابطه (۵) است [Bocci et al. 2011]:

$$\text{Log}(M_p) = A - BT \quad (5)$$

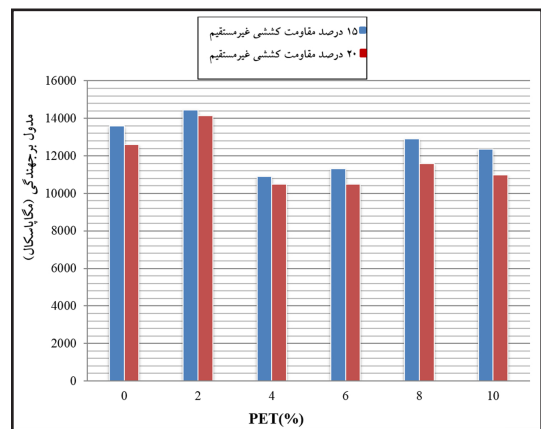
که در این رابطه A و B به ترتیب مقدار ثابت و شیب نمودار است. این رابطه در شکل ۶ برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET نشان داده شده است. طبق شکل مقدار شیب در مخلوط اصلاح نشده برابر با ۰/۰۲۳۷ است، در حالی که برای مخلوط اصلاح شده در مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد PET به ترتیب برابر با ۰/۰۲۲، ۰/۰۲۱، ۰/۰۱۹، ۰/۰۲۴ و ۰/۰۲۵ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مقادیر بالا مقدار شیب مخلوط اصلاح شده بیشتر از مخلوط معمولی بوده ولی در مقادیر کمتر مقدار B در مخلوط‌های اصلاح شده نسبت به مخلوط معمولی کمتر است.



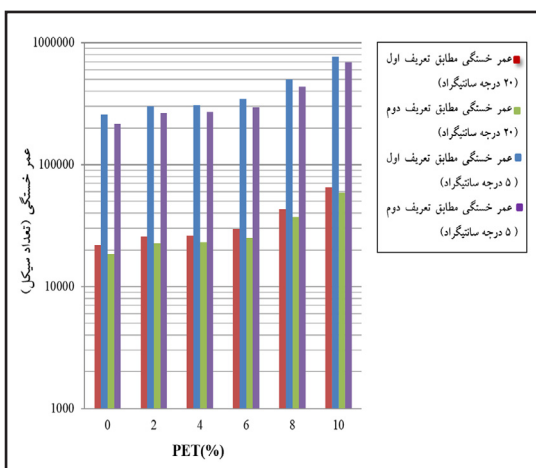
شکل ۶. ارتباط بین مدول برجهندگی و دما

مخلوط اثر دارد. با اضافه شدن ذرات PET در مقادیر کم (تا ۲ درصد)، فاز پلیمری و فاز قیری پیوستگی مناسبی دارند و باعث افزایش مقاومت و سختی مخلوط می‌شوند. در مقادیر بالاتر از ۲ درصد، وجود این ذرات فاز قیری را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد و باعث از بین رفتن فاز قیری می‌شود که در نتیجه کاهش مقاومت و سختی مخلوط روی می‌دهد.

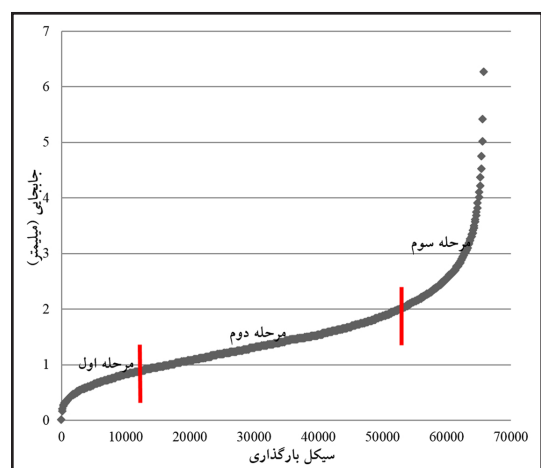
نرخ تغییرات M_p با دما نشان‌دهنده حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی نسبت به تغییرات دما است. معمولاً رابطه بین $\text{Log}(M_p)$ و دما برای ارزیابی حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. مقادیر بیشتر شیب (B) نشان‌دهنده حساسیت حرارتی بیشتر است. معادله کلی بین مدول برجهندگی و دما (T) به



شکل ۵. مدول برجهندگی مخلوط اصلاح شده در سطوح تنش مختلف - دما ۵ درجه سانتیگراد



شکل ۸. عمر خستگی مخلوط اصلاح شده با PET طبق تعاریف مختلف عمر خستگی (دما ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد)



شکل ۷. تغییرات تغییر شکل‌های افقی در برابر سیکل‌های بارگذاری در آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

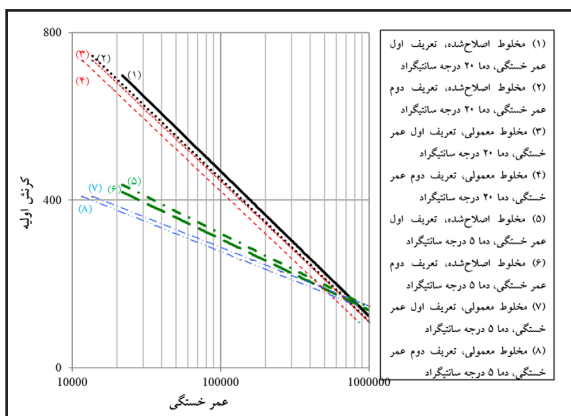
مقاومت و سختی، درصدهای بیشتر PET اثرات مفیدی بر عمر خستگی دارد. مثلاً افزودن ۸ و ۱۰ درصد PET به مخلوط آسفالتی، عمر خستگی را به ترتیب ۲ و ۳ برابر می‌کند (نسبت به مخلوط اصلاح‌نشده). شکل ۹ منحنی تغییر شکل مخلوط حاوی ۰، ۸ و ۱۰ درصد PET (دما ۲۰ درجه سانتیگراد) در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، در مرحله دوم نمودار خستگی (زمانی که نرخ تغییرات تغییر شکل ثابت شده)، نمونه‌های اصلاح‌شده شیب کمتری نسبت به نمونه اصلاح‌نشده دارند و مخلوط اصلاح‌نشده نهایتاً در تعداد بارگذاری کمتر دچار شکست شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که PET ضمن تعدیل سختی مخلوط آسفالتی، انعطاف‌پذیری و عمر خستگی را افزایش می‌دهد. برخی تحقیقات نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی سخت‌تر عمر خستگی بیشتری نیز دارند [Mahrez and Karim, 2010, Voralkok and Co-lak, 2011]. ولی PET سختی مخلوط آسفالتی را کاهش داده اما عمر خستگی را افزایش می‌دهد. یکی از دلایل افزایش عمر خستگی این است که با افزایش بارهای مکرر خستگی، تنش‌های تولیدشده از بارها توسط ذرات PET جذب شده و رشد ترک در مخلوط آسفالتی به تعویق می‌افتد. بنابراین در حالی که با افزایش درصد PET در مخلوط آسفالتی فاز قیری از بین می‌رود، ولی این

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح مخلوط تا شش درصد PET حساسیت حرارتی را کاهش می‌دهد.

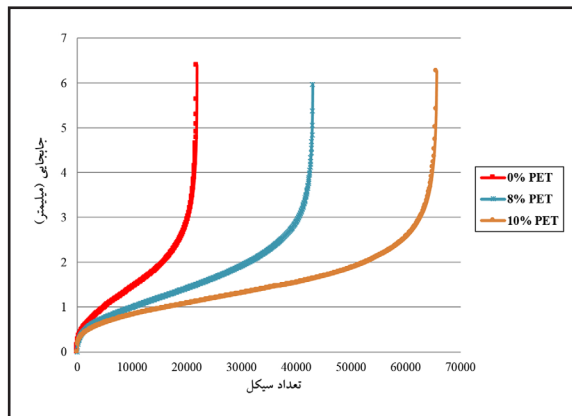
۲-۴ خستگی

مطابق شکل ۷ نمودار خستگی به دست آمده در این روش را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد. در مرحله اول تغییر شکل‌های اولیه ایجاد شده و ترک‌های ریزی بین پوشش نازک قیر و سنگدانه‌ها ایجاد می‌شود. این تغییرات سریع ناشی از تغییر شکل‌های ماندگار قابل توجه در مخلوط آسفالتی هستند. در مرحله دوم نرخ تغییرات تغییر شکل ثابت شده و ترک‌های اولیه ایجاد می‌گردند. این ترک‌ها تدریجاً منجر به یک الگوی ترک بزرگ شده و در نهایت در مرحله سوم، تغییر شکل به سرعت افزایش یافته و نمونه دچار شکست کامل می‌گردد. در این حالت نمودار تغییر شکل دارای یک مجانب قائم خواهد بود [BaghaeeMoghaddam et al., 2011].

در شکل ۸ نتایج آزمایش خستگی در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. همچنین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی مطابق تعاریف مختلف (N_1 و N_2) در مقادیر مختلف PET مشخص است. نتایج نشان می‌دهد که PET باعث افزایش عمر خستگی شده و با کاهش دما تعداد سیکل‌هایی که منجر به شکست شده افزایش می‌یابد. برخلاف نتایج آزمایش‌های



شکل ۱۰. منحنی کرنش اولیه - خستگی مخلوط معمولی و اصلاح‌شده (دما ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد)



شکل ۹. نمودار تغییرات تغییر شکل افقی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری (مخلوط‌های حاوی ۰، ۸ و ۱۰ درصد PET در دما ۲۰ درجه سانتیگراد)

خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)

خستگی با کاهش دما افزایش می‌یابد. در محدوده کرنش‌های بین ۱۶۰ تا ۲۱۰ میکرو رابطه مشخصی بین دما و عمر خستگی وجود ندارد. زمانی که مقدار کرنش در لایه روسازی اصلاح شده با PET بیشتر از این محدوده کرنش‌ها باشد، باید آنالیزها در سطح کرنش متوسط و بالا مورد توجه باشد. از این رو در شرایط بارگذاری سنگین، خرابی خستگی در دماهای کم تا متوسط بحرانی تر می‌شود. در صورتی که تحت شرایط بارگذاری سبک و سطح کرنش کمتر از ۲۱۰-۱۶۰ میکرواسترین، خرابی خستگی در دمای کم بحرانی نخواهد بود. همچنین بر مبنای تحقیقات صورت پذیرفته در کرنش‌های کمتر از ۷۰ میکرواسترین تعداد سیکل‌های منجر به ترک خوردگی بسیار زیاد بوده و معیار خستگی به عنوان معیار تعیین کننده و بحرانی شناخته نمی‌شود. در نهایت بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق در سطح کرنش‌های متداول در روسازی‌های معمولی، افزودن PET باعث افزایش عمر خستگی در هر دو دمای مورد مطالعه خواهد شد.

۶. جمع بندی

در این تحقیق خصوصیات رفتاری مخلوط اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی به ویژه رفتار خستگی آنها مورد بررسی قرار گرفت. مهم ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر هستند:

۱- کاهش دما باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم شده و افزودن PET به مخلوط آسفالتی به خصوص در مقادیر بالاتر از ۲ درصد منجر به کاهش مقاومت کششی می‌گردد.

۲- در مقادیر کمتر از ۲ درصد PET، سختی مخلوط آسفالتی اصلاح شده افزایش یافته و از آن به بعد روند نتایج نزولی است. همچنین در دمای کم با سخت تر شدن مخلوط آسفالتی افزودن PET باعث کاهش سختی می‌شود.

۳- برخلاف نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی و مدول برجهنگی، عمرخستگی مخلوط‌های مورد مطالعه با افزایش

ذرات در جذب تنش‌های تولید شده موثر بوده و عمر خستگی را افزایش می‌دهد.

شکل ۱۰ منحنی خستگی نمونه‌های اصلاح شده و اصلاح نشده را در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان ارتباط بین کرنش اولیه و عمر خستگی مخلوط آسفالتی را مشاهده کرد. منحنی‌های خستگی برای مخلوط‌های اصلاح نشده و اصلاح شده مطابق تعاریف مختلف عمر خستگی ترسیم شده‌اند. مطابق شکل با افزایش کرنش اولیه عمر خستگی کاهش می‌یابد و در یک کرنش ثابت، مخلوط آسفالتی اصلاح شده عمر خستگی بیشتری نسبت به مخلوط اصلاح نشده دارد. مطابق تعاریف مختلف عمر خستگی، در یک کرنش ثابت، عمر خستگی N_1 بیشتر از N_2 است. همچنین ضریب همبستگی منحنی‌های خستگی بیشتر از ۰/۸ است.

در شکل ۱۰، اثرات قابل توجه دما بر رفتار خستگی مخلوط‌های مورد تحقیق مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، با کاهش دما شیب منحنی کاهش یافته و عکس العمل عمر خستگی نسبت به دما در کرنش‌های کم و زیاد، متفاوت است. طبق مشاهدات آزمایشگاهی در دمای کم، تفاوت در شرایط آزمایش (مثل سطح کرنش) باعث افزایش سیکل‌های منجر به ترک خوردگی می‌شود. مثلاً با کاهش کرنش از ۳۰۰ میکرو به ۱۵۰ میکرو، سیکل‌های منجر به شکست مخلوط اصلاح شده در دمای ۵ درجه سانتیگراد ۷/۱۴ برابر شده، در حالی که سیکل‌های منجر به شکست مخلوط اصلاح شده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد ۲/۶۵ برابر می‌شود. با توجه به شکل، نقاط متقاطع از برخورد منحنی‌های مختلف به وجود می‌آیند و مطابق شکل، این نقاط اغلب در محدوده کرنش‌های اولیه ۱۶۰ تا ۲۱۰ میکرو قرار دارند. میانگین کرنش اولیه این نقاط متقاطع در مخلوط اصلاح نشده، مخلوط اصلاح شده و کل نمونه‌ها در این محدوده است. در مقادیر بیش از محدوده ۲۱۰-۱۶۰ میکرو، عمر خستگی با کاهش دما کاهش یافته و در مقادیر کمتر عمر

,36, pp.984–989.

-Ahmed, L. A. (2007) “Improvement of Marshall properties of the asphalt concrete mixtures using the polyethylene as additive”, *Eng Technol*;25(3), pp.383–394.

-Al-Hadidy, AI and Yi-qiu, T. (2009) “Effect of polyethylene on life of flexible pavements”, *Constr Build Mater*, 23(1), pp.1456–1464.

-Ameri, M., Mansourian, A. and, Sheikhmotevali, A. H. (2012) “Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumen and mixtures based upon performance related parameters”, *Constr Build Mater*,40, pp.438–447.

-Arabani, M, Mirabdolazimi, S.M. and Ferdowsi, B. (2012) “Modeling the fatigue behaviors of glasphalt”, *Scientia Iranica A*;19(3), pp.341-345.

-Arabani, M., Mirabdolazimi, S. M. and Sasani, A. R. (2010) “The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behavior of asphalt mixtures”, *Constr Build Mater*, 24: pp.1060-1068.

-Aravind, K. and Das, A. (2007) “Pavement design with central plant hot mix recycled asphalt mixes”, *Constr Build Mater*;21:928–36.

-ASTM D4123. (2003) “Indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures”, *ASTM Book of Standards*, vol. 04.03, USA.

-Attaelmanan M, Pei FengCh, Al-Hadidy AI. (2011) “Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier”, *Constr Build Mater*;25(5), pp.2764–2770.

درصد PET همواره روند صعودی داشته است.

۴- بر اساس نتایج به دست آمده، شیب نمودارهای خستگی با کاهش دما کاهش یافت.

۵- اکثر نمودارهای خستگی در محدوده کرنش‌های ۱۶۰ تا ۲۱۰ میکرو دارای نقاط متقاطع بوده‌اند. در کرنش‌های بیشتر از این محدوده با افزایش دما عمر خستگی افزایش یافته و در کرنش‌های کمتر، افزایش دما منجر به کاهش عمر خستگی گردید.

۷. پی‌نوشت‌ها

- 1- Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)
- 2- Crumb Rubber (CR)
- 3- Ethylene Vinyl Acetate (EVA)
- 4- Polyethelene (PE)
- 5- Flexural Test
- 6- Modulus of rupture
- 7- Polyethylene Terephthalate (PET)
- 8- Glass Transition (Tg)
- 9- Wet Process
- 10- Dry Process

۸. مراجع

-Abo-Qudais, S. and Shatnawi, I. (2007) “Prediction of bituminous mixture fatigue life based on accumulated strain”, *J. Construc. and Build. Mater.*, 21:pp.1370-1376.

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

-Ahmadinia, E. , Zargar, M., RehanKarim, M. and Abdelaziz, M. (2012) “Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt”, *Construc Build Mater*

- Huang, Y., Bird, R. N. and Heidrich, O. (2007) "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements", *J Resour Conserv Recy*;52, pp.58-73.
- Jahromi, S. and Khodaii, A. (2008) "Carbon fiber reinforced asphalt concrete", *Arab J SciEng*;33, pp.355-364.
- Li, J. M., Liu, C., Qiao, H. C., Zhu, L.Y., Chen, G. and Dai, X.D. (2008) "Hot embossing/bonding of a poly(ethylene terephthalate) (PET) microfluidic chip", *J Micromech Microeng*;18-015008:10pp.
- Mahrez, A. and Karim, M.R. (2010) "Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiber glass", *Int J Phys Sci*;5(12):pp.1840-1847.
- Modarres, A. (2013) "Investigating the toughness and fatigue behavior of conventional and SBS modified asphalt mixes", *Construction and Building Materials*;47pp.218-222.
- MoghadasNejad, F., Aflaki, E. and Mohammadi, M.A. (2010) "Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures", *Construction and Building Materials*;24:, pp.1158-1165.
- NCHRP APPENDIX II-1. (2004) "Calibration of fatigue cracking models for flexible pavements".
- Rubio, M. C., Moreno, F., Belmonte, A. and Menéndez, A. (2009) "Reuse of waste material from decorative quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes", *Constr Build Mater*;24pp.610-618.
- Sengoz, B. and Isikyakar, G. (2008) "Evaluation of
- BaghaeeMoghaddam, T, RehanKarim, M. and Syammaun, T. (2011) "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes", *Scientific Research and Essays Vol. 6(4)*, pp. 670-682, 18 February, 2011.
- BaghaeeMoghaddam, T., RehanKarim, M. and Syammaun, T. (2012) "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles", *Constr Build Mater*, 34:pp.236-242.
- BaghaeeMoghaddam, T., Soltani, M. and RehanKarim M. (2013) "Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Poly-ethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test", *J Material and Design*;53:317-324.
- Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F. and Graziani, A. (2011) "A study on the mechanical behavior of cement-bitumen treated materials", *Constr Build Mater*;25(2), pp.773-778.
- Casey, D., McNally, C., Gibney, A and Gilchrist, M. D. (2008) "Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt", *Resour, Conserv Recycl*;52, pp.1167-1174.
- Chen, M., Lin, J., Wu, S. and Liu, C. (2011) "Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphaltic mixture", *Constr Build Mater*;25, pp.1532-1536.
- Chiu Chui, Te and Li-Cheng, Lu (2007) "A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber", *J Constr Build Mater*;21pp.1027-1033.
- EN 12697-24. (2004) "Bituminous mixtures-test methods for hot mix asphalt - part 24: resistance to fatigue", *European committee for standardization*; July 2004.

the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen”, *Constr Build Mater*;22, pp.1897–1905.

-Thiago, F., Kim, Y. R. and Lee, J. (2008) “Research on fatigue of asphalt mixtures and pavements in Nebraska. Report No”, P579, University of Nebraska Lincoln; February 25.

-Tapkın, S. (2008) "The effect of polypropylene fibers on asphalt performance«, *Building and Environment*; 431, pp.1065-1071.

-VuralKökB, **Çolak** H. (2011)“Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt”,*Constr Build Mater*;25, pp.3204–3212.

-Wan, MohdNazmi, Wan, Abdul Rahman and AchmadFauzi, Abdul Wahab. (2013) “Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt”, *Procedia Engineering*;53, pp.124 – 128.

-Witczak, M. W., Kaloush, K. T. Pellinen, K. and Elbasyouny, M. (2002) “Simple performance test for superpave mix design”, *NCHRP 465*.

-Ye, Q., Wu, S. and Li, N. (2009) “Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures”, *Int. J. Fatigue*, 31, pp.1598-1602.