

رفتار خزشی در مخلوط‌های آسفالتی سنگ‌دانه‌ای حاوی مصالح سنگی مصنوعی و ذرات پلاستیک ضایعاتی*

مقاله علمی - پژوهشی

داریوش معظمی^(۱) سید علی صحاف^(۲) ابوالفضل محمدزاده مقدم^(۳)

چکیده امروزه از یکسو بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی یک ضرورت است و از سوی دیگر انباشت سرباره کوره آهن‌گدازی و بطری‌های پلاستیکی مشکلات زیست‌محیطی جدی ایجاد نموده است. در این مطالعه اثر این دو ماده ضایعاتی روی بهبود عملکرد خزشی مخلوط آسفالت سنگ‌دانه‌ای (Stone Mastic Asphalt-SMA) مورد بررسی قرار گرفت؛ به منظور بررسی اثر نمونه‌هایی با ۳، ۵ و ۷ درصد پلاستیک ضایعاتی (PET - Polyethylene terephthalate) در دو شکل ذرات و الیاف آماده گردید. نتایج آزمایش خزش نشان داد که کرنش ماندگار نهایی برای نمونه‌های اصلاح‌شده با ۵ درصد الیاف PET کمترین مقدار و برای نمونه‌های اصلاح‌شده با ۷ و ۳ درصد الیاف PET در ردیف‌های بعدی قرار دارند؛ به علاوه اضافه کردن PET به شکل الیاف مؤثرتر است. با افزایش تنش و دما، اختلاف عملکرد خزشی بین نمونه‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده بارزتر بود. نمونه‌های حاوی سرباره اسلگ با ۵ درصد الیاف PET (S-5P-F) به اندازه ۷۰ درصد خرابی کمتری را تجربه نمودند.

واژه‌های کلیدی عملکرد خزش، مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده، بطری‌های پلاستیکی PET، سرباره، مواد ضایعاتی

Creep Behavior of SMA Mixtures with Slag and Polyethylene Terephthalate

D. Moazami

A. Sahaf

A. Mohamadzadeh Moghaddam

Abstract Nowadays on the one hand improving the performance of asphalt mixtures is a necessity and on the other hand disposal of steel slag and plastic containers causes serious environmental problems. Therefore, in this study the effect of two waste materials on enhancing creep performance of Stone Mastic Asphalt (SMA) mixture was investigated; In order to thoroughly investigate the impact of Polyethylene terephthalate (PET) modification, specimens with three percentages of PET (3,5 and 7) in two forms (PET particles and PET fibers) were prepared. It was found that cumulative permanent strain was the lowest for specimens modified with 5 percent PET followed by 7 and 3 percent, respectively; Furthermore, adding PET in the form of fiber is more effective. With increase in stress and temperature, differences between creep performance of modified and unmodified samples were more prone. Based on average damage ratios, slag samples with 5 percent PET fiber (S-5P-F) were 70 percent less damaging.

Key Words Creep performance, Modified asphalt mixture, Polyethylene terephthalate (PET), Slag, Waste materials.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۶/۳۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۱۱/۱۵ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته دوره دکتری گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

در سال‌های اخیر کاربرد افزودنی‌های پلیمری در صنعت روسازی بسیار رایج شده است؛ به‌طورمعمول با اضافه کردن پلیمر به مخلوط آسفالتی، چسبندگی و انسجام نمونه افزایش یافته [1-3] و عملکرد مخلوط‌های اصلاح‌شده بهبود می‌یابد و مخلوط‌هایی مقاوم در برابر شیارشدگی ساخته می‌شود [4-8]. هزینه زیاد افزودنی‌های پلیمری به‌عنوان ایراد اصلی آنها در نظر گرفته می‌شود و مصرف گسترده آنها را برای ساخت روسازی راه‌ها محدود می‌کند. با توجه به افزایش روزافزون قیمت مصالح، انرژی و کمبود منابع طبیعی، استفاده مجدد از مصالح ضایعاتی در تولید مخلوط‌های آسفالتی اجتناب‌ناپذیر است [9]. شیشه‌های ضایعاتی، سرباره کوره‌های آهن‌گدازی، لاستیک‌های فرسوده و پلاستیک‌ها (پلیمرها) مثال‌هایی از مواد ضایعاتی هستند که در سال‌های اخیر در تولید مخلوط آسفالتی به کار رفته‌اند [10]. استفاده مجدد از مواد ضایعاتی مشکل انباشت آنها را در طبیعت حل کرده، از اثرهای مخرب آنها روی محیط‌زیست می‌کاهد و فواید اقتصادی به دنبال دارد [11-13]. کاربرد مصالح ضایعاتی به‌عنوان مصالح ثانویه در پروژه‌های راه‌سازی به‌عنوان یک راهکار برای پایداری محیط‌زیست مطرح است [14-17].

در این تحقیق اثر دو ماده ضایعاتی شامل سرباره کوره آهن‌گدازی و بطری‌های پلاستیکی PET در دو شکل ذرات و الیاف بررسی گردید. سرباره کوره آهن-گدازی یک محصول جانبی در فرآیند تولید آهن و فولاد است که به شکل‌های کوره ذوب آهن (BF)، کوره اکسیژن (BOF) و کوره قوس الکتریک (EAF) ایجاد می‌شود [18-20]. بیش از نیمی از فولاد ایران به روش کوره قوس الکتریک ایجاد می‌گردد [18]. رشد پیوسته در صنعت تولید فولاد ایران منجر به ایجاد مقادیر زیادی از سرباره‌ها شده است؛ خروجی سالانه سرباره در ایران بیش از ۳ میلیون تن است که بیشتر آن انباشته می‌گردد. از یک طرف تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که این سرباره خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهد [14-17] و از طرف دیگر با توجه به محدودیت موجود در

مصالح سنگی طبیعی، استفاده مجدد از این نوع ماده بازیافتی توجه‌پذیر می‌شود. بطری‌های پلاستیکی به خاطر زمان طولانی تجزیه، برای طبیعت و تعادل اکوسیستم بسیار مخرب هستند [21,22]. PET به گروه پلی‌استرها اختصاص داشته و بیشتر به شکل بطری‌های نوشیدنی یافت می‌شود. محققین نشان داده‌اند که با کاربرد PET به‌صورت ذرات، مشخصات مخلوط‌های آسفالتی بهبود می‌یابد [11] و [23-27].

تاکنون اثر پلیمرهای مختلف که به شکل الیاف به مخلوط‌های آسفالتی اضافه گردیده، بررسی شده است [4,12,28,29]، درحالی‌که اثر استفاده از الیاف PET مورد بررسی قرار نگرفته است [30]. در این مطالعه برای اولین بار اثر دو ماده ضایعاتی و همچنین شکل اضافه کردن PET به همراه درصد بهینه آن روی عملکرد خزش مخلوط‌های آسفالتی سنگدانه‌ای (SMA) حاوی مصالح ضایعاتی PET به‌عنوان افزودنی و سرباره کوره قوس الکتریک (EAF) به‌عنوان بخشی از مصالح سنگی درشت‌دانه بررسی شده است. فرایند تولید ذرات PET در شکل (۱-الف) و الیاف PET در شکل (۱-ب) نشان داده شده است.

مصالح و نتایج طرح اختلاط

به‌منظور اطمینان از تطابق خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی و قیر (۷۰-۶۰) مورد استفاده با ملزومات مراجع محلی و استانداردها، آزمایش‌های جدول (۱) انجام و نتایج به‌دست‌آمده کنترل گردید. حد وسط دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق برای مخلوط‌های سنگدانه‌ای بر اساس استاندارد اتحادیه ملی آسفالت (NAPA) انتخاب که در جدول (۲) و شکل (۲) نشان داده شده است [31]. برای آماده‌سازی نمونه‌های مارشال مصالح سنگی کاملاً شسته و خشک‌شده و تا دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت حرارت داده می‌شوند. وزن مصالح سنگی برای هر نمونه مارشال حدود ۱۲۰۰ گرم است؛ سرباره کوره قوس الکتریک (به مقدار ۷۵ درصد بخش درشت‌دانه) از کارخانه فولاد مبارکه اصفهان تهیه گردید. این مصالح مصنوعی بعد از دو سال انباشت به کار گرفته

[13,18] و همچنین مصالح کاملاً شسته شدند تا عملیات هیدراته شدن آهک آزاد و منگنز تسریع شود زیرا هیدراته شدن ممکن است مشکلات انبساط را برای سرباره ایجاد کند. مقدار هر جزء برای نمونه‌های آهکی و اصلاح شده حاوی اسلگ در جدول (۲) نشان داده شده است.



۳. شستشوی داغ Hot washer



۲. جداسازی برچسب



۱. خردکننده



۶. محصول نهایی و مصالح



۵. خشک‌کننده سانتریفیوژی و سیلوی ذخیره (الف)



۴. شناورسازی خام برای تولید الیاف PET



۳. نخ‌ریسی



۲. ذوب‌کننده



۱. خشک‌کن



۶. محصول نهایی الیاف PET



۵. پیچ‌خوردگی (ب)

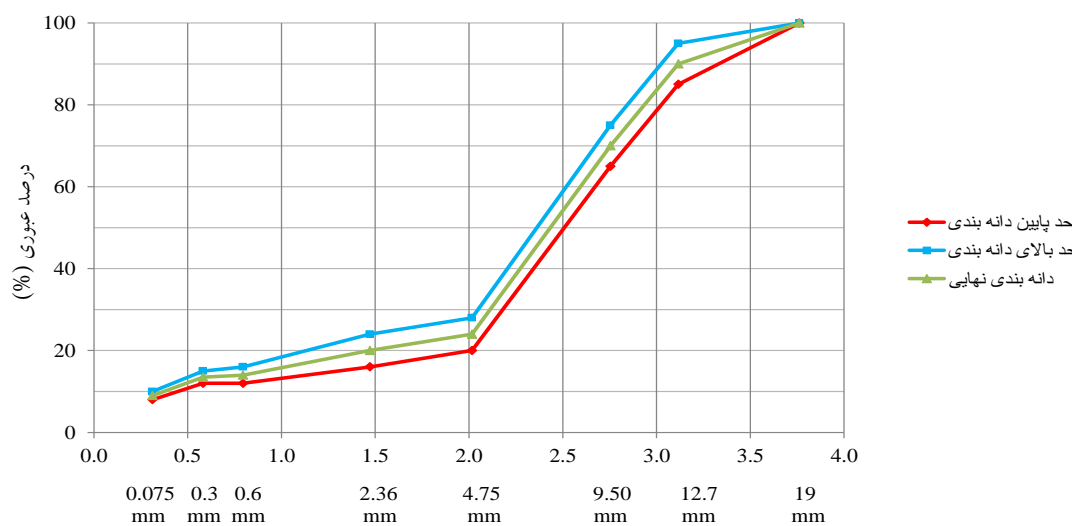


۴. عملیات کشش و خنک‌سازی

شکل «الف»: فرآیند تولید ذرات و (ب) الیاف PET

جدول «۱»: نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی و قیر

ملزومات	نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی		آزمایش
	اسلگ	مصالح آهکی	
< ۲۵	۱۲	۲۲	درصد سایش لوس انجلس ASTM C131
< ۱۵	۹	۱۲	درصد دانه‌های پهن و دراز ASTM D4791
< ۸	۹	۱	آزمایش ماندگاری و سلامت ASTM C88
> ۷۵	۹۷	۸۶	در صد دانه‌های شکسته ASTM 5821
> ۵۰	۶۶	۵۸	آزمایش هم‌ارز ماسه ASTM D2419
	۳/۲۵	۲/۵۹۷	وزن مخصوص مصالح درشت‌دانه ASTM C127
	-	۲/۵۶۷	وزن مخصوص مصالح ریزدانه ASTM C128
	-	۲/۷۱۸	وزن مخصوص فیلر ASTM D854
ملزومات	نتایج آزمایش‌های قیر		آزمایش
	۱/۰۱۶		آزمایش وزن مخصوص ASTM D70
۶۰-۷۰	۶۳		آزمایش درجه نفوذ ASTM D5
۴۹-۵۶	۴۹		آزمایش نقطه نرمی ASTM D36
> ۱۰۰	> ۱۰۰		آزمایش شکل‌پذیری ASTM D113
> ۲۳۲	۳۰۴		آزمایش نقطه اشتعال و سوختن ASTM D92
< ۱	۰/۴۱		آزمایش لعاب نازک قیر ASTM D1754
	۴۰		درجه نفوذ بعد از لعاب نازک قیر
	۳۶۱		ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۳۵ درجه ASTM 2170
	۱۴۲		ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۶۵ درجه ASTM 2170



اندازه دانه‌ها به توان 0.45

شکل «۲»: نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی مصرفی

جدول «۲»: مقدار برای هر نمونه مارشال

سایز الک (mm)	درصد رد شده (میانگین)	وزن‌های استفاده شده	
		وزن اسلگ (۷۵ درصد)	وزن نمونه‌های اصلاح شده (۲۵ درصد)
۱۹ (۳/۴ اینچ)	۱۰۰	۰	۰
۱۲/۷ (۱/۲ اینچ)	۹۰	۹۰	۳۰
۹/۵ (۳/۸ اینچ)	۷۰	۱۸۰	۶۰
۴/۷۵ (شماره ۴)	۲۴	۴۱۴	۱۳۸
۲/۳۶ (شماره ۸)	۲۰	۳۶	۱۲
۱/۶ (شماره ۳۰)	۱۴	۷۲	۷۲
۱/۳ (شماره ۵۰)	۱۳/۵	۶	۶
۱/۷۵ (شماره ۲۰۰)	۹	۵۴	۵۴
فیلر	-	۱۰۸	۱۰۸

مخلوط کردن برای ۵ دقیقه دیگر ادامه یافت. ذرات PET با حداکثر اندازه ۲/۳۶ میلی‌متر و در شکل دیگر PET به صورت الیاف با اندازه 5 ± 0.5 به مخلوط سنگ‌دانه‌ای اضافه گردید [۲۵]. در نمونه‌های حاوی سرباره، PET با درصدهای ۳، ۵، ۶، ۷ و ۹ (برحسب وزن قیر) به دو شکل ذرات و الیاف اضافه شدند تا بررسی گردد کدام یک از افزایش‌های دو یا سه درصدی مقدار PET مناسب‌تر است (۳، ۶ و ۹ یا ۳، ۵ و ۷).


روش مارشال برای تراکم نمونه‌ها (۱۸۰ نمونه مارشال) استفاده شد؛ عمل تراکم در دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با ۵۰ ضربه در هر دو طرف نمونه انجام گردید. سپس وزن مخصوص واقعی نمونه‌ها تعیین و محاسبات حجمی انجام شد [34]. بر اساس نتایج به-دست‌آمده اضافه نمودن PET اثر قابل‌توجهی روی خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی سنگ‌دانه‌ای شامل افزایش مقاومت مارشال، نسبت مارشال (MQ)، روانی و کاهش دانسیته دارد همچنین مشخص شد که به‌منظور بهتر نشان دادن روند تغییرات خصوصیات مخلوط با افزودن PET، افزایش ۲ درصدی افزودنی مناسب‌تر بود و نهایتاً ۳، ۵ و ۷ درصد افزودنی برای مراحل بعدی استفاده شد. لازم به یادآوری است که در نمونه‌های

قبل از مخلوط کردن قیر با مصالح سنگی، قیر تا دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت حرارت داده شد، نمونه‌های مارشال با ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵ و ۷ درصد قیر (بر حسب وزن مخلوط) آماده گردیدند. بر اساس اطلاعات فراهم‌شده توسط کارخانه بازیافت PET، خصوصیات این افزودنی‌ها در جدول‌های (۳) و (۴) آمده است. معمولاً فرآیند تر یا خشک برای اضافه کردن افزودنی به مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. در روش تر، افزودنی با قیر مخلوط می‌شود درحالی‌که در فرآیند خشک، افزودنی ابتدا با مصالح سنگی مخلوط می‌شود و سپس قیر اضافه می‌گردد. در این تحقیق بر اساس مطالعات پیشین، افزودنی PET در مرحله پایانی (بعد از مخلوط نمودن قیر با مصالح سنگی) اضافه گردید [23,33]. حداکثر دما در طی ساخت مخلوط‌های سنگ‌دانه‌ای آسفالتی کمتر از ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است اما از آنجایی که PET نقطه ذوب بالایی دارد (حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) حل نمودن آن داخل قیر غیرممکن است [23]. در این تحقیق در طول فرآیند مخلوط کردن، مصالح سنگی، قیر و فیلر در دمای 165 ± 5 درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط گشته، سپس PET به تدریج به مخلوط اضافه شد و فرآیند


به دست آمده، مقادیر مقاومت مارشال، روانی، درصد هوای داخل مصالح سنگی و درصد حفراتی که با قیر پر می‌شوند، تعیین گردیدند. به منظور بررسی قابل قبول بودن نمونه‌ها، مقادیر فوق با معیارهای مارشال مقایسه شدند. خلاصه مشخصات نمونه‌های مارشال با درصد قیر بهینه برای نمونه‌های مختلف در جدول (۵) آمده است. همان‌طور که در جدول (۵) مشخص شده است، جایگزینی بخش درشت‌دانه با اسلگ در مقایسه با نمونه‌های آهکی سبب افزایش در مقدار قیر بهینه می‌شود، همچنین استفاده از افزودنی PET در هر دو شکل ذرات و الیاف سبب کاهش در مقدار قیر بهینه می‌گردد. شکل اضافه کردن (ذرات یا الیاف) اگرچه مشخصات نمونه‌های مارشال را تغییر می‌دهد ولی اثری روی مقدار قیر بهینه ندارد.

مختلف از حرف L برای نمونه‌های آهکی و از حرف S به منظور نام‌گذاری نمونه‌هایی که ۷۵ درصد درشت‌دانه مصالح آهکی آن با سرباره جایگزین شده‌اند، استفاده شده است. همچنین نمونه‌های حاوی ذرات PET با حرف P نشان داده شده‌اند و برای معرفی درصد افزوده شده ذرات PET قبل از حرف P مقدار درصد ذرات PET آورده شده است (7-P, 5-P, 3-P). برای نشان دادن درصد افزوده شده الیاف PET بعد از مقدار آن و حرف P، حرف F آمده است نمونه‌های حاوی ۳، ۵ و ۷ درصد الیاف PET به ترتیب (7-P-F, 5-P-F و 3-P-F) نام‌گذاری گردید. برای تعیین مقدار قیر بهینه بر اساس روش مارشال، مقدار قیر متناظر با ۴ درصد هوای مخلوط انتخاب گردید؛ مقدار قیر بهینه برای هر نمونه در جدول (۵) نشان داده شده است. با رجوع به نمودارهای مارشال با توجه به قیر بهینه

جدول «۳»: مشخصات ذرات PET

مقدار	خاصیت	شکل
۱/۳۵	وزن مخصوص ASTM D792-(gr/cm ³)	
۲/۳۶	بزرگ‌ترین اندازه PET	
۰/۱	جذب آب ASTM D570 - (%)	
۷۹/۳	مقاومت کششی ASTM D638 - (Mpa)	
۲۵۰	دمای تقریبی ذوب (°C)	

جدول «۴»: مشخصات الیاف PET

مقدار	خاصیت	شکل
۸	دنی پر اسمی - ASTM D 1557	
۵±۱	طول (mm)	
۴/۵-۵/۵	استحکام (g/d)	
۸۰	افزایش طول تا پاره شدن (%)	
۲۵۰	دمای تقریبی ذوب (°C)	

جدول «۵»: مشخصات مخلوط و کنترل ملزومات

خصوصیات نمونه‌ها				قیر بهینه در ۴ درصد هوای مخلوط	نام نمونه‌ها
حفره‌های پر شده با قیر (%)	هوای داخل مصالح سنگی (%)	روانی (mm)	پایداری مارشال (KN)		
۷۵	۱۶/۲۶	۳/۱۲	۸	۵/۶	L
۷۴	۱۵/۴۶	۳/۱۴	۸/۷۳	۶/۲	S
۷۵	۱۵/۵۲	۲/۸۷	۹/۱۹	۵/۶	S-3P
۷۵	۱۶/۱۰	۲/۷۲	۹/۹۵	۵/۳	S-5P
۷۶	۱۶/۲۰	۲/۷۶	۹/۲۶	۵/۴	S-7P
۷۶	۱۶/۳۹	۲/۷۹	۹/۳۰	۵/۶	S-3P-F
۷۲	۱۵/۶۰	۲/۶۴	۱۰/۲۷	۵/۳	S-5P-F
۷۶	۱۵/۳۴	۲/۷۰	۱۰/۲۰	۵/۴	S-7P-F
۶۵-۷۸	حداقل ۱۵	۲-۴ (mm)	حداقل ۵/۳۴		ملزومات

نتایج کارایی خزش

مارشال با مقدار قیر بهینه ساخته شد (سه بار تکرار)؛ ضمناً نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه تحت پیش بارگذاری با بار استاتیک به مقدار ۱۰ درصد تنش بار دینامیک قرار گرفتند، گذراندن مرحله پیش بارگذاری این اطمینان را می‌دهد که سطح نمونه‌ها و صفحات بارگذاری کاملاً در تماس با هم قرار گرفته‌اند.

مقادیر کرنش تجمعی به وسیله نرم افزار UTS در دستگاه UTM 14 در هر ۱۶ چرخه بارگذاری تعیین شد و پروفایل کرنش تجمعی ماندگار در محیط متلب مدل گردید. به منظور اینکه اثر اصلاح در نمونه‌ها نشان داده شود مقادیر کرنش تجمعی برای هر ۹۶ نمونه تا ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری به عنوان معیار گسیختگی به دقت آورده شد [37,38]. وجود سه بخش شامل مراحل اول، دوم و سوم در پروفایل کرنش مخلوط آسفالتی کاملاً اثبات شده است. به طور کلی در آزمایش خزش دینامیکی، مقادیر کرنش به سرعت با شروع تراکم در مرحله اول زیاد می‌شود و کرنش ایجاد شده به درجه تراکم و تنش قائم اعمال شده بستگی دارد، همان‌طور که نمونه به یک وضعیت ثابت می‌رسد و قفل و بست افزایش می‌یابد کرنش برای تعدادی از چرخه‌های بارگذاری در طول مرحله دوم تقریباً ثابت می‌شود در مرحله سوم مخلوط به سمت گسیختگی می‌رود و یک تغییر افزایشی را نشان

در میان روش‌های معمول ارزیابی پتانسیل تغییر شکل ماندگار، تست خزش دینامیک یکی از بهترین روش‌ها است [35,36]. منحنی‌های خزش در تست خزش دینامیک، تغییر شکل‌های کوچک را به عنوان یک تابع از تکرار بار توصیف می‌کند. در این مطالعه بر اساس توصیه NCHRP465، شکل رایج بارگذاری با چرخه بارگذاری یک ثانیه، شامل ۰/۱ ثانیه بار haversine و ۰/۹ ثانیه زمان استراحت به کار برده شد. همچنین به وسیله NCHRP465 توصیه شده است که طراحی سطح تنش باید در محدوده بین ۶۹ تا ۲۰۷ کیلوپاسکال (۱۰ psi - ۳۰) برای تست‌های غیرمحصور شده و ۴۸۳ تا ۹۶۶ کیلوپاسکال برای تست‌های محصور شده به کار برده شود [37]؛ بنابراین تنش محوری ۱۰۰ کیلوپاسکال و ۲۰۰ کیلوپاسکال برای تست خزش اجرا شد و نمونه‌ها قبل از تست برای حداقل ۳ ساعت در دمای هدف قرار داده شدند. دمای انجام تست بر اساس مطالعات قبلی (۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد) انتخاب گردید [13,16,26,35]. در این تحقیق به منظور این که عملکرد خزش نمونه‌های اصلاح شده و غیراصلاح شده برای آزمایش خزش در دو سطح تنش (۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) و دو دمای تست (۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد) رتبه‌بندی شود، ۹۶ نمونه

عملکرد را با کمترین کرنش تجمعی ماندگار بعد از ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری نشان دادند. منحنی خزش نمونه‌های اصلاح شده صرفاً فاز اولیه مدل سه مرحله‌ای زو را تجربه کردند لذا با توابع پاور مدل شدند و نقطه انتقالی وجود نداشت. درحالی‌که نمونه‌های آماده شده با سنگدانه آهکی به‌جز در پایین‌ترین ترکیب تنش و دما (تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد) که در فاز اولیه باقی ماند بقیه در تمامی حالت‌ها به مرحله سوم رسیدند. مدل زو برای نمونه‌های مختلف در ترکیب‌های مختلف دما و تنش در جدول‌های (۶) تا (۹) آورده شده است.

می‌دهد. برای بررسی رفتار خزش مخلوط آسفالتی از مدل زو که یک مدل بسیار شناخته‌شده است، استفاده می‌گردد؛ در این مدل مرحله اول توسط توابع پاور، مرحله دوم توسط توابع خطی و مرحله سوم توسط توابع نمایی مدل می‌شود [35] و [38-40].

همان‌طور که قبلاً عنوان شد به‌منظور این که بین نمونه‌های مختلف در دماها و تنش‌های متفاوت مقایسه انجام شود، پروفایل کرنش تجمعی ماندگار تا ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری برای هر نمونه با استفاده از مدل زو در محیط نرم‌افزار متلب مدل شد. در همه دماها و تنش‌ها نمونه آهکی بیشترین کرنش را داشت، درحالی‌که نمونه‌های حاوی سرباره با ۵ درصد الیاف PET بهترین

جدول «۶»: مدل ۳ مرحله‌ای و نقاط انتقال (تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد)

مرحله	مرحله دوم			مرحله اول	نمونه
	مدل	نقطه	نقطه	مدل	
a	a	a	a	$\epsilon_p=1227.80N^{0.25}$	L
a	a	a	a	$\epsilon_p=885.13N^{0.26}$	S
a	a	a	a	$\epsilon_p=337.60N^{0.34}$	S-3P
a	a	a	a	$\epsilon_p=176.34N^{0.37}$	S-5P
a	a	a	a	$\epsilon_p=344.40N^{0.31}$	S-7P
a	a	a	a	$\epsilon_p=351.25N^{0.31}$	S-3P-F
a	a	a	a	$\epsilon_p=248.12N^{0.28}$	S-5P-F
a	a	a	a	$\epsilon_p=321.73N^{0.29}$	S-7P-F

جدول ۷ مدل سه مرحله‌ای و نقاط مرزی (تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد)

مرحله سوم	مرحله دوم			مرحله اول	نمونه
	مدل	مدل	نقطه ابتدا	نقطه انتها	
$\epsilon_p=23963.2+1297.7(e^{0.0006(N-7041)}-1)$	$\epsilon_p=20562.+2.39(N-5617)$	۷۰۴۱	۵۶۱۷	$\epsilon_p=564.96N^{0.41}$	L
a	a	a	a	$\epsilon_p=1186.48N^{0.27}$	S
a	a	a	a	$\epsilon_p=960.60N^{0.27}$	S-3P
a	a	a	a	$\epsilon_p=679.75N^{0.26}$	S-5P
a	a	a	a	$\epsilon_p=580.9618N^{0.30}$	S-7P
a	a	a	a	$\epsilon_p=852.09N^{0.25}$	S-3P-F
a	a	a	a	$\epsilon_p=528.49N^{0.23}$	S-5P-F
a	a	a	a	$\epsilon_p=684.65N^{0.25}$	S-7P-F

جدول «۸»: مدل سه مرحله‌ای و نقاط انتقال (تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد)

نمونه	مرحله اول		مرحله دوم		مرحله سوم
	مدل	نقطه ابتدا	نقطه انتها	مدل	مدل
L	$\epsilon_p=377.92N^{0.45}$	۶۱۹۳	۷۲۶۵	$\epsilon_p=19146.6+2.19(N-6193)$	$\epsilon_p=21494.4+1189.62(e^{0.0007(N-7265)}-1)$
S	$\epsilon_p=1174.28N^{0.28}$	a	a	a	a
S-3P	$\epsilon_p=1134.87N^{0.25}$	a	a	a	a
S-5P	$\epsilon_p=721.46N^{0.25}$	a	a	a	a
S-7P	$\epsilon_p=919.94N^{0.25}$	a	a	a	a
S-3P-F	$\epsilon_p=949.10N^{0.23}$	a	a	a	a
S-5P-F	$\epsilon_p=400.16N^{0.27}$	a	a	a	a
S-7P-F	$\epsilon_p=553.27N^{0.26}$	a	a	a	a

جدول «۹»: مدل سه مرحله‌ای و نقاط انتقال (تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد)

نمونه	مرحله اول		مرحله دوم		مرحله سوم
	مدل	نقطه ابتدا	نقطه انتها	مدل	مدل
L	$\epsilon_p=1756.30N^{0.34}$	۳۲۳۳	۴۳۳۷	$\epsilon_p=28109.8+4.78(N-3233)$	$\epsilon_p=33396.5+4239.11(e^{0.0004(N-4337)}-1)$
S	$\epsilon_p=2138.63N^{0.26}$	a	a	a	a
S-3P	$\epsilon_p=1152.12N^{0.29}$	a	a	a	a
S-5P	$\epsilon_p=1900.93N^{0.19}$	a	a	a	a
S-7P	$\epsilon_p=568.41N^{0.35}$	a	a	a	a
S-3P-F	$\epsilon_p=409.35N^{0.35}$	a	a	a	a
S-5P-F	$\epsilon_p=486.17N^{0.27}$	a	a	a	a
S-7P-F	$\epsilon_p=436.83N^{0.31}$	a	a	a	a

مؤلفه ثابت به‌طور قابل‌توجهی برای نمونه‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نمونه‌های آهکی کاهش می‌یابد. از آنجایی که عدد جریان به‌عنوان شروع گسیختگی منظور می‌شود، در نمونه‌های آسفالتی آماده‌شده با سنگ‌دانه آهکی، سومین مرحله در سطح تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق نمی‌افتد. برای نمونه‌های آهکی با افزایش تنش از ۱۰۰ به ۲۰۰ کیلوپاسکال، ۳۸ درصد کاهش در عمر عملکردی بر پایه مقادیر عدد جریان به وجود می‌آید. همچنین افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد باعث ۴۰ درصد کاهش در عدد جریان می‌شود؛ بنابراین با اعمال تنش از ۱۰۰ به ۲۰۰ کیلوپاسکال و افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً باعث کاهش یکسان در عمر عملکردی نمونه آهک

در تمام ترکیب‌های تنش-دما برای نمونه‌های اصلاح‌شده با PET کرنش تجمعی ماندگار حاصل بعد از ۱۰۰۰۰ هزار چرخه بارگذاری کمتر از نمونه سرباره‌ای کنترل بود، به بیان دیگر اضافه کردن PET به مخلوط آسفالتی به‌طور قابل‌توجهی حساسیت به خزش را کاهش می‌دهد. کرنش تجمعی برای نمونه‌های اصلاح‌شده با ۵ درصد الیاف و بعد از آن ۷ و ۳ درصد به ترتیب کمترین بود. بر پایه نتایج به‌دست‌آمده تقویت قابل‌توجهی در رفتار مخلوط‌های اصلاح‌شده با ۵ درصد الیاف PET اتفاق افتاد. همچنین برای نمونه‌های آهکی در جدول‌های (۷) تا (۹)، افزایش در شیب مرحله دوم مدل با افزایش دما و تنش واضح است. بر اساس توابع برازش شده زو در همه ترکیب‌های دما و تنش، توان توابع پاور همچنین

می‌شود.

۷۱۴۰ و ۱۰۶۹۸ میکرو استرین و برای سطوح پایین‌تر و بالاتر دما ۶۷۹۳ و ۱۰۸۶۶ میکرو استرین بود. برای چرخه‌های مختلف بارگذاری بین ۱۲ و ۹۸۱۹ میکرو استرین تغییر می‌کرد؛ بنابراین تفاوت بین مقادیر کرنش به ترتیب تا ۴۰، ۴۴ و ۲۰۰ درصد بین سطوح پایین و بالای دما، تنش و تعداد چرخه‌های بارگذاری تغییر کردند.

مقادیر η^2 برابر ۰/۰۰۹۹ برای یک اثر کوچک، ۰/۰۵۸۸ یک اثر متوسط و ۰/۱۳۷۹ یک اثر بزرگ را نشان می‌دهند؛ بنابراین افزودنی‌ها، تعداد چرخه‌های بارگذاری، تنش و دما اثر بزرگی روی کرنش به دست آمده نشان دادند. مشخصات نمونه‌ها و به دنبال آن دما و تنش به ترتیب بالاترین اثر را نشان دادند. مقادیر η^2 نشان داد که تقریباً ۵۰ درصد از تغییر در کرنش به وسیله مشخصات نمونه‌ها، ۱۰ درصد به وسیله تعداد چرخه‌های بارگذاری، ۸ درصد به وسیله دما و ۷ درصد به وسیله سطح تنش است؛ اما علت مشارکت کمتر تعداد چرخه‌های بارگذاری به واسطه این بود که در آزمایش همه نمونه‌ها تا ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری تست شدند. علاوه بر این، اثر کم تنش و دما ممکن است به دلیل تغییر کم گروه‌های دما و تنش و تفاوت جزئی بین آنها باشد. در مجموع مقدار ضریب همبستگی دقت مدل را نشان می‌دهد و ۷۳ درصد تغییرات داده‌ها توسط پارامترهای مستقل در مدل توصیف شده است

آنالیز فاکتوریال برای کرنش ماندگار قائم

به منظور مطالعه اثر تعداد چرخه‌های بارگذاری، اثر افزودنی، تنش و دما روی مقادیر کرنش ماندگار، آنالیز ANOVA برای کرنش فشاری قائم ماندگار تا ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری انجام شد. آنالیز ANOVA چهار طرفه بالانس شده به منظور بررسی فرضیه آزمون صفر برای اثرات اصلی و متقابل، انجام شد. فرضیه صفر در آنالیز ANOVA فرض می‌کند که تفاوت معنی‌داری در بین سیکل‌های مختلف بارگذاری، نمونه‌های مختلف و گروه‌های تنش و دما، وجود ندارد و هیچ اثر متقابلی نیز بین این چهار عامل نیست. فرض‌های فاکتوریال کامل بررسی شد و از آنجاکه اثر متقابل دوطرفه و سه‌طرفه وجود نداشت؛ اثرات اصلی و نتایج مربوط شامل پارامترهای Sig، F، η^2 و η_p^2 در جدول (۱۰) آورده شده است. بر اساس نتایج آنالیز آماری در جدول (۱۰)، فرضیه صفر تأیید نشد و تفاوت معنی‌داری بین تعداد چرخه‌های بارگذاری، نمونه‌های مختلف و سطح‌های دما و تنش پیدا شد. (Sig < ۰/۰۵). به عنوان مثال کرنش متوسط برای همه تنش‌ها، دماها و چرخه‌های بارگذاری ۱۲۷۷۱ و ۳۷۷۱ میکرو استرین به ترتیب برای سرباره و سرباره با پنج درصد الیاف بود (۱۰۹ درصد تفاوت). همچنین کرنش متوسط در سطوح پایین‌تر و بالاتر تنش

جدول «۱۰»: آنالیز فاکتوریال اثرات تعداد چرخه بارگذاری، افزودنی‌ها، تنش و دما روی تغییر شکل ماندگار

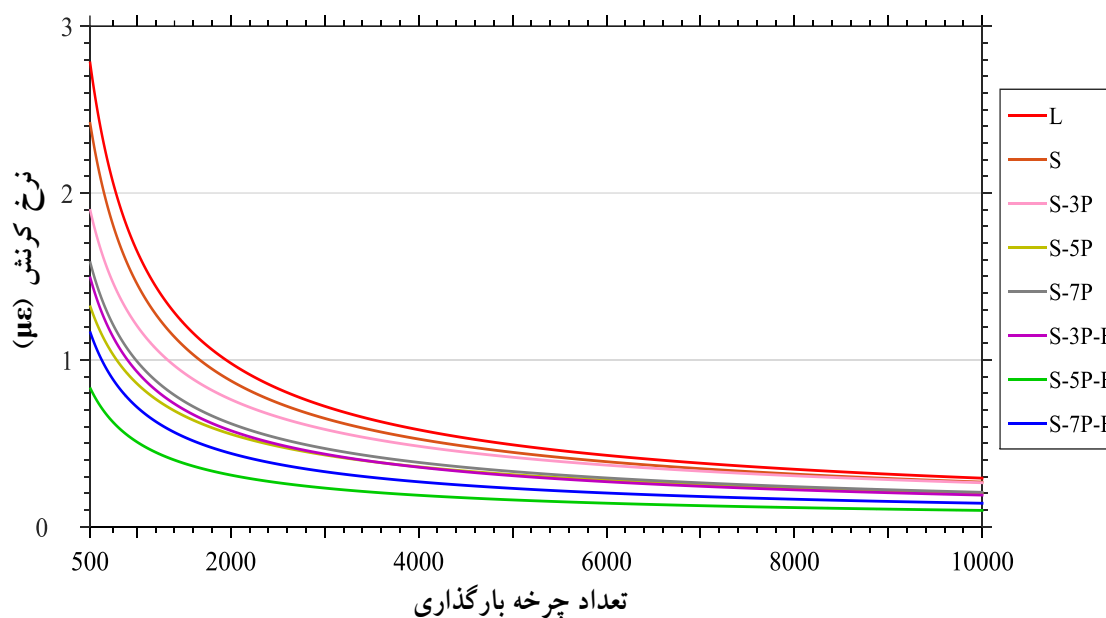
η^2	η_p^2	Sig.	F	Mean Square	df	Type III sum of squares	منبع
۰/۷۳۱	۰/۷۳۱	۰/۰۰	۸۰/۳۰۸		۶۵۴	۷/۲۷۲E۱۱	مدل اصلاح شده
-	۰/۸۱۳	۰/۰۰	۸۳۸۴۸/۸۴۸		۱	۱/۱۶۱E۱۲	Intercept
۰/۴۹۱	۰/۶۴۶	۰/۰۰	۵۰۳۸/۲۴۹		۷	۴/۸۸۳E۱۱	نمونه
۰/۱۰۴	۰/۲۷۸	۰/۰۰	۱۱/۵۴۱		۶۴۵	۱/۰۳۱E۱۱	N
۰/۰۶۸	۰/۲۰۳	۰/۰۰	۴۹۰۰/۷۰۷		۱	۶/۷۸۶E۱۰	استرس
۰/۰۸۱	۰/۲۳۲	۰/۰۰	۵۸۲۹/۹۲۹		۱	۸/۰۷۲E۱۰	دما
-					۱۹۲۸۹	۲/۶۷۱E۱۱	خطا
					۱۹۹۴۴	۲/۵۷۸E۱۲	کل
					۱۹۹۴۳	۹/۹۴۳E۱۱	کل اصلاح شده
R Squared = 0.731 (Adjusted R Squared = 0.722)							

را نشان می‌دهند و به دنبال آن کرنش برای تعداد مشخصی سیکل‌های بارگذاری در مرحله دوم ثابت می‌شود، در نهایت در مرحله سوم مخلوط آسفالتی به سمت گسیختگی و جاری شدن می‌رود و نرخ کرنش افزایشی را نشان می‌دهد زیرا پاسخ ارتجاعی مصالح به دلیل تکرار زیاد بار دینامیک کاهش می‌یابد. در قسمت سوم، نرخ کرنش با سرعت بسیار زیاد تا انتهای چرخه عمر افزایش می‌یابد و مخلوط آسفالتی به سمت گسیختگی جاری می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) تا (۶) دیده می‌شود، نرخ کرنش برای نمونه آهکی بالاترین و برای نمونه اصلاح‌شده با ۵ درصد الیاف PET پایین‌ترین است. علاوه بر آن، نرخ کرنش برای سطوح بالاتر بارگذاری و دما بیشتر است. همه نمونه‌های اصلاح‌شده و نمونه آهکی در پایین‌ترین ترکیب تنش و دما با توابع پاور مدل شد درحالی‌که نمونه‌های آهکی برای ترکیبات دیگر دما و تنش تحت تأثیر عملکرد سه مرحله‌ای قرار گرفتند.

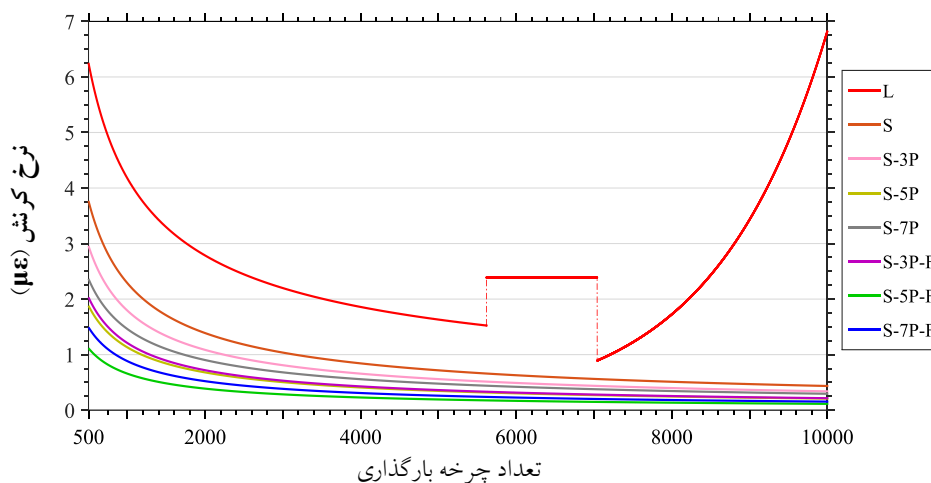
بر پایه تفاوت مهم موجود بین سطوح فاکتورها در تست Tukey Honestly، اختلاف معنی‌دار آنها در post hoc بیشتر ارزیابی شد. نتایج post hoc نشان داد اسلگ با ۵ درصد ذرات PET و اسلگ با سه درصد الیاف PET عملکرد تقریباً مشابه داشته، درحالی‌که دو سطح دما و تنش به مقدار قابل توجهی متفاوت بودند.

نرخ کرنش

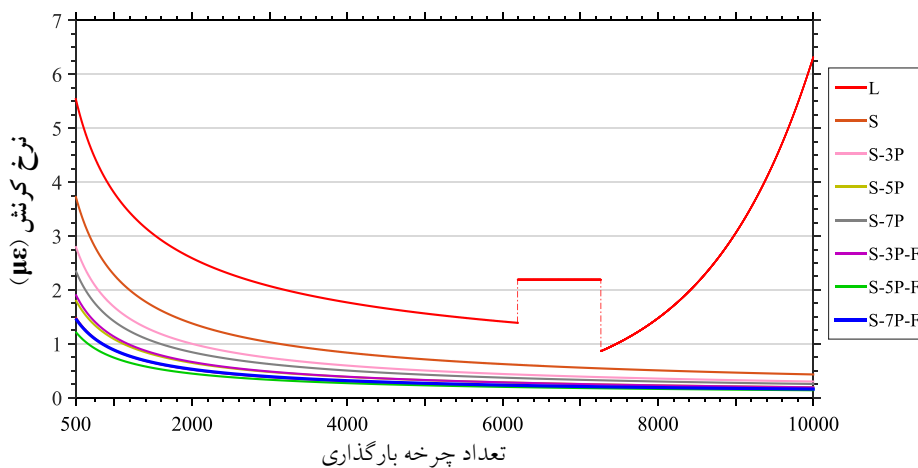
الگوهای متفاوت در نرخ کرنش ماندگار که ممکن است در منحنی‌های خزش دیده شود، به استقامت مصالح در مراحل مختلف بستگی دارد. در مرحله اول و تا تعداد مشخصی از چرخه‌های بارگذاری مقادیر کرنش ماندگار به‌طور سریع انباشته می‌شود، درحالی‌که کرنش در هر سیکل (نرخ کرنش) تمایل به کاهش و رسیدن به یک حداقل مقدار را دارد (تقریباً تکمیل فرآیند تراکم و شروع مرحله دوم)، همان‌طور که مواد متراکم‌تر می‌شوند و قفل و بست افزایش می‌یابد، مواد آسفالتی کمترین نرخ کرنش



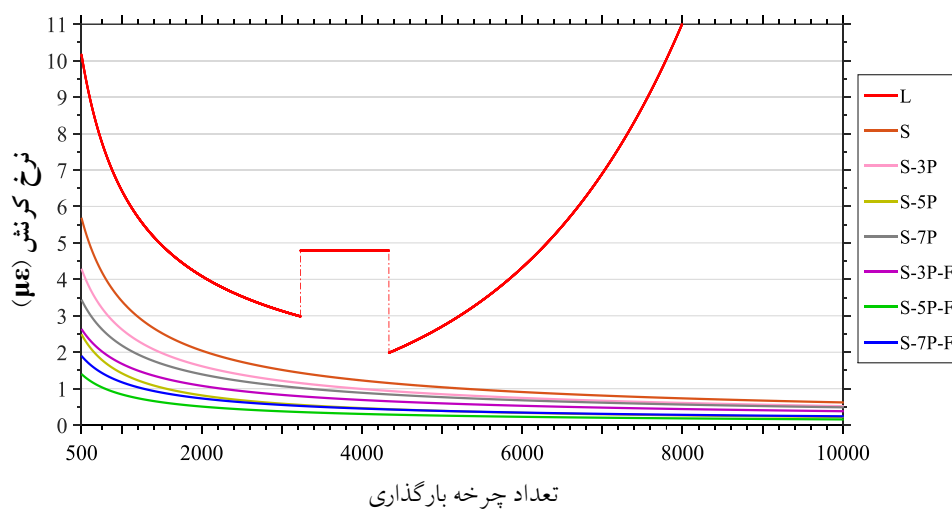
شکل (۳): نرخ کرنش برای نمونه‌های تست‌شده مختلف (تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال و دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد)



شکل «۴»: نرخ کرنش برای نمونه‌های تست‌شده مختلف (تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال و دما ۵۰ درجه سانتی‌گراد)



شکل «۵»: نرخ کرنش برای نمونه‌های تست‌شده مختلف (تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال و دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد)



شکل «۶»: نرخ کرنش برای نمونه‌های تست‌شده مختلف (تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال و دما ۵۰ درجه سانتی‌گراد)

نمونه آهکی بزرگ‌تر از یک و برای نمونه اصلاح شده از یک کوچک‌تر هست.

بر اساس آنالیز خرابی نمونه آهکی ۲/۱، ۱/۲ و ۲/۵ برابر در ترکیب‌های مختلف دما و تنش از نمونه‌های سرباره‌ای مخرب‌تر هستند. همان‌طور که در شکل (۷) و جدول (۱۱) دیده می‌شود اضافه کردن PET در شکل الیاف مؤثرتر بوده و خرابی نسبی خطی کمتری را نشان می‌دهد.

بر پایه نتایج به دست آمده، نمونه‌های اصلاح شده با ۵ درصد الیاف PET باعث ۶۶، ۷۰، ۶۷ و ۷۶ درصد کرنش کمتر در تست خزش در ترکیب‌های مختلف دما و تنش شد. به طور متوسط اصلاح نمونه‌های سرباره‌ای با اضافه شدن ۵ درصد PET در شکل الیاف باعث ۷۰ درصد کاهش در کرنش ماندگار ایجاد شده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود، اثر اصلاح در ترکیب‌های دما و تنش بالاتر و بحرانی‌تر بیشتر هست. به عنوان مثال، برای نمونه‌های آهکی، سطح تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد (۵/۱ برابر ۶۰۹۷۷ در برابر ۱۲۰۷۲) مخرب‌تر از تنش ۱۰۰ کیلو پاسکال و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود؛ اما در نمونه‌های اصلاح شده با ۵ درصد الیاف PET در بالاترین سطح تنش و دمای اعمال شده ۱/۷ برابر (۵۷۶۸ در برابر ۳۴۲۴) مخرب‌تر از پایین‌ترین سطح تنش و دما بود. همان‌طور که شکل (۷) و جدول (۱۱) نشان می‌دهند، مخلوط آسفالتی اصلاح شده با PET حساسیت دمایی مخلوط را کاهش می‌دهد، از این رو مخلوط با مقاومت شیارشدگی بالاتر تولید می‌کند. به بیان دیگر، وابستگی کرنش ماندگار به دما در نمونه‌های اصلاح شده به طور قابل توجهی کمتر از نمونه‌های غیر اصلاح شده است.

بر پایه نتایج به دست آمده نرخ کرنش برای نمونه آهکی و بعد از آن نمونه سرباره‌ای بیشترین هست. به طور متوسط نرخ کرنش در هر سیکل $\frac{\mu\epsilon}{N}$ ۱/۰۲ برای نمونه سرباره‌ای و $\frac{\mu\epsilon}{N}$ ۰/۳ برای نمونه سرباره‌ای با ۵ درصد الیاف بود (۱۱۰ درصد تفاوت). از آنجایی که عدد جریان به عنوان تعداد سیکل بارگذاری که تغییر شکل برشی (تحت حجم یکسان) شروع می‌شود تعریف می‌گردد، از این رو عدد جریان پایین‌ترین نقطه در منحنی نرخ کرنش در مقابل تعداد چرخه‌های بارگذاری است. مقدار تغییر شکل ماندگار در نمونه‌های سرباره‌ای، همچنین نرخ تجمعی آن فراتر از مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده بود. این رفتار به علت تشکیل مخلوط آسفالتی سفت‌تری است که مقاومت خزشی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با PET را بهبود می‌دهد؛ بعد از داغ کردن PET خصوصیاتش به تدریج شروع به تغییر کرده و در پایان به موادی کم‌ویس با خصوصیات کریستالی تبدیل می‌شود. دلیل اصلی نتایج به دست آمده می‌تواند این باشد که PET به عنوان یک ماده شبیه به کریستال در مخلوط باقی می‌ماند و مخلوط آسفالتی نسبتاً سفت‌تری را نتیجه می‌دهد [1,23,25,41].

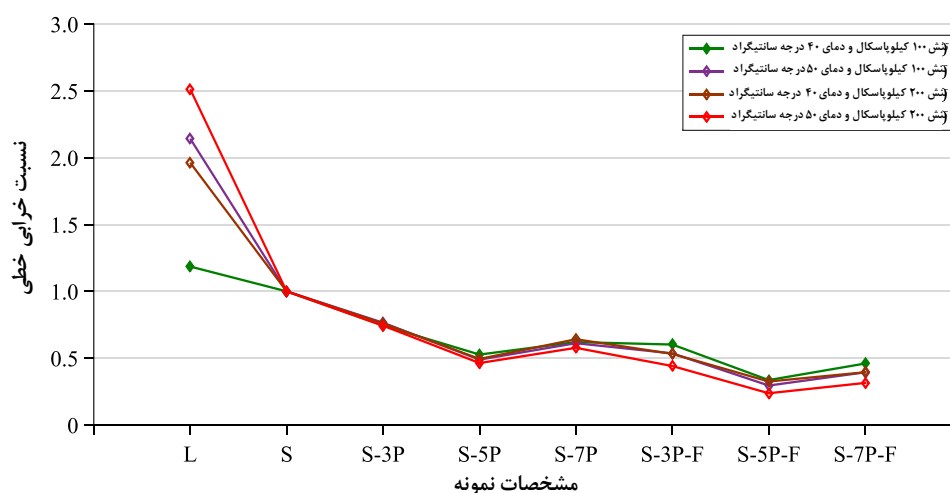
خرابی نسبی خطی

در خرابی نسبی خطی (رابطه یک)، کرنش‌ها بعد از ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری بین نمونه‌های مختلف در هر سطح تنش و دما مقایسه می‌شود. کرنش ماندگار بعد از ۱۰۰۰۰ تکرار بارگذاری بر پایه مطالعات قبلی، انتخاب شد [35,38,42]. به منظور این که نسبت خرابی برای هر نمونه به دست آمده آورده شود، مقادیر کرنش هر نمونه بعد از ده هزار چرخه بارگذاری به کرنش متناظر در نمونه سرباره مینا در همان سطح تنش و دما تقسیم می‌شود؛ بنابراین، همان‌طور که در شکل (۷) و جدول (۱۱) دیده می‌شود، نسبت کرنش ماندگار برای نمونه کنترل سرباره‌ای یک در نظر گرفته می‌شود، در حالی که این نسبت برای

جدول «۱۱»: نسبت خرابی خطی برای نمونه‌های مختلف

شرایط تست خزش	نمونه	کرنش بعد از ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری	نسبت خرابی خطی
۱۰۰ KPa، ۴۰°C	L	۱۲۰۷۳	۱/۱۹
	S	۱۰۱۸۳	۱/۱۰۰
	S-3P	۷۵۷۴	۰/۷۴
	S-5P	۵۳۶۷	۰/۵۳
	S-7P	۶۳۱۷	۰/۶۲
	S-3P-F	۶۱۳۰	۰/۶۰
	S-5P-F	۳۴۲۴	۰/۳۴
	S-7P-F	۴۶۸۴	۰/۴۶
۱۰۰ KPa، ۵۰°C	L	۳۳۶۲۵	۲/۱۴
	S	۱۵۶۹۳	۱/۱۰۰
	S-3P	۱۲۰۰۶	۰/۷۷
	S-5P	۷۶۷۶	۰/۴۹
	S-7P	۹۶۰۸	۰/۶۱
	S-3P-F	۸۴۰۸	۰/۵۴
	S-5P-F	۴۶۳۴	۰/۳۰
	S-7P-F	۶۱۸۷	۰/۳۹
۲۰۰ KPa، ۴۰°C	L	۲۹۹۲۸	۱/۹۶
	S	۱۵۲۴۶	۱/۱۰۰
	S-3P	۱۱۵۹۱	۰/۷۶
	S-5P	۷۵۳۷	۰/۴۹
	S-7P	۹۷۸۰	۰/۶۴
	S-3P-F	۸۱۱۳	۰/۵۳
	S-5P-F	۴۹۶۲	۰/۳۳
	S-7P-F	۶۰۶۱	۰/۳۹
۲۰۰ KPa، ۵۰°C	L	۶۰۹۷۷	۲/۵۱
	S	۲۴۲۷۳	۱/۱۰۰
	S-3P	۱۸۰۳۹	۰/۷۴
	S-5P	۱۱۲۵۳	۰/۴۶
	S-7P	۱۴۰۱۷	۰/۵۸
	S-3P-F	۱۰۷۰۹	۰/۴۴
	S-5P-F	۵۷۶۸	۰/۲۴
	S-7P-F	۷۶۴۳	۰/۳۱

کرنش بعد از ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری در نمونه کنترل / کرنش بعد از ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری در نمونه اصلاح شده = خرابی نسبی خطی (۱)



شکل «۷»: نسبت خرابی خطی برای نمونه‌های مختلف

و دما برای نمونه‌های اصلاح شده با ۵، ۷ و ۳ درصد PET به ترتیب کمترین بود، همچنین بر پایه آنالیز آماری کاربرد مواد ضایعاتی اثر مهمی روی کرنش به وجود آمده دارد نمونه‌های اصلاح شده با ۵ درصد الیاف PET، ۷۰ درصد کرنش ماندگار کمتر در مقایسه با نمونه سرباره‌ای داشتند همچنین مشخص شد که نرخ کرنش برای نمونه آهکی بالاترین و برای نمونه سرباره‌ای با ۵ درصد الیاف کمترین هست، نرخ کرنش به‌طور متوسط برای نمونه‌های سرباره‌ای $\frac{1}{0.2} \frac{\mu\epsilon}{N}$ و برای نمونه سرباره‌ای با ۵ درصد الیاف $\frac{0.3}{N} \frac{\mu\epsilon}{N}$ بود (۱۱۰ درصد تفاوت)؛ به‌علاوه نرخ کرنش برای سطوح بالاتر تنش و دما بیشتر بود. نمونه‌های اصلاح شده با ۵ درصد الیاف PET عملکرد بسیار بهتری نشان دادند و مشخص شد که نمونه‌های آهکی طبیعی به‌طور متوسط ۲ برابر نسبت به نمونه سرباره‌ای مخرب‌تر هستند.

نتیجه

اثر دو ماده بازیافتی ضایعاتی شامل سرباره و بطری‌های پلاستیکی (۳ درصد مختلف در دو شکل متفاوت) از طریق آزمایش عملکرد خزش در چهار ترکیب مختلف دما و تنش بررسی شد. در مقایسه با نمونه‌های آهکی، جایگزینی بخش درشت‌دانه با سرباره باعث افزایش در مقدار قیر بهینه و استفاده از افزودنی PET در دو شکل ذرات و الیاف سبب کاهش مقدار قیر مصرفی شد. به‌منظور نشان دادن اثر این تغییرات، مقادیر کرنش تجمعی تا ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری (به‌عنوان معیار شکست خزش) به دست آورده شد و پروفایل کرنش در محیط نرم‌افزار متلب مدل گردید. به‌طور کلی منحنی خزشی آهک و نمونه کنترل سرباره‌ای سریع‌تر از نمونه‌های اصلاح شده با PET توسعه پیدا کرد و این مفهوم را می‌رساند که نمونه‌های اصلاح شده مقاومت بهتری در مقابل خزش دارند؛ این کرنش ماندگار در همه ترکیب‌های تنش

مراجع

1. Awwad M T, Shbeeb L. "The use of polyethylene in hot asphalt mixtures". *American Journal of Applied Sciences*, Vol.4, No.6, pp 390-396, (2007).
2. Chen H, Xu q, Chen S, Zhang Z. "Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures". *Materials & Design*, Vol.30, No.7, pp 2595-2603, (2009).
3. Chen. Z., Wu, S-P. Zhu, Z-H. Liu J-S. "Experimental evaluation on high temperature rheological

- properties of various fiber modified asphalt binders". *Journal of Central South University of Technology*, Vol.15, No.1, pp 135-139, (2008).
4. Abtahis, S M., Sheikhzadeh, M., Hejazi. S M. "Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review". *Construction and Building Materials*, Vol.24, No.6, pp 871-877, (2010).
 5. Kalantarzn, Z. N, Karim, M. R., Mahrez, A. A., "review of using waste and virgin polymer in pavement". *Construction and Building Materials*, Vol.33, pp 55-62, (2012).
 6. Tapkin, S., "Optimal polypropylene fiber amount determination by using gyratory compaction", static creep and Marshall stability and flow analyses. *Construction and Building Materials*, Vol.44, pp 399-410, (2013).
 7. Tapkin, S., UŞAR Ü, TUNCAN A, TUNCAN M. "Repeated creep behavior of polypropylene fiber-reinforced bituminous mixtures", *Journal of Transportation Engineering*, Vol.135, No.4, pp 240-249, (2009).
 8. Tayfurs, S., OZEN H, AKSOY A. "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers", *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.2, pp 328-337, (2007).
 9. Ahmed, L. A., "Improvement of Marshall properties of the asphalt concrete mixtures using the polyethylene as additive", *Engineering and Technology Journal*, Vol.25, No.3, pp 383-394, (2007).
 10. Huangy, Y., Bird, R N., Heidrich, O., "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.52, No.1, pp 58-73, (2007).
 11. Ahmadinia, E., Zargarm, M, Karim, M. R., ABDELAZIZ M, SHAFIGH P., "Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt", *Materials & Design*, Vol.32, No.10, pp 4844-4849, (2011).
 12. Arabanim, M., Mirabdolazimi, S., SASANI A., "The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol.24, No.6, pp 1060-1068, (2010).
 13. Behnood, A., Ameri, M., "Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag", *Scientia Iranica*, Vol.19, No.5, pp 1214-1219, (2012).
 14. Ahmedzade, P., Sengoz, B., "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete", *Journal of hazardous materials*, Vol.165, No.1-3, pp 300-305, (2009).
 15. Ameri, I M, Behnood, A., "Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol.26, No.1, pp 475-480, (2012).
 16. Arabani, M., Azarhoosha, A., "The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol.35, pp 1-7, (2012).
 17. WU S, XUE Y, YE Q, CHEN Y., "Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures", *Building and Environment*, Vol.42, No.7, pp 2580-2585, (2007).
 18. Kavussi, A, Qazizadeh, M, J., "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc

- furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging", *Construction and Building Materials*, Vol.72, pp 158-166, (2014).
19. Pasettom, M., Baldo, N., "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag", *Construction and Building Materials*, Vol.25, No.8, pp 3458-3468, (2011).
 20. XIE J, WU S, LIN J, CAI J, CHEN Z, WEI W., "Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization & moisture damage investigation", *Construction and Building Materials*, Vol.36, pp 467-474, (2012).
 21. Fontesl, P., Triches, G., Pais, J. C., Pereira, P. A., "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol.24, No.7, pp 1193-1200, (2010).
 22. Ismail, Z. Z., AL-Hashmi, E. A., "Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement", *Waste management*, Vol.28, No.11, pp 2041-2047, (2008).
 23. Ahmadinia, E, Zargar, M, KARIM M R, ABDELAZIZ M, AHMADINIA. E., "Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol.36, pp 984-989, (2012).
 24. Moghaddam, T. B., Soltani, M, Karim, M. R., Baaj, H., "Optimization of asphalt and modifier contents for polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology", *Elsevier*, Vol.74, pp 159-169, (2015).
 25. Moghaddam, T. B., Karim, R, Syammaun, T., "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles", *Construction and Building Materials*, Vol.34, pp 236-242, (2012).
 26. Moghaddam, T. B., Soltani, M., Karim, M. R., "Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads", *Construction and Building Materials*, Vol.65, pp 487-494, (2014).
 27. Taherkhani, H, Arshadi, M R. "Investigating the mechanical properties of asphalt concrete containing waste polyethylene terephthalate", *Taylor & Francis*, pp 1-18, (2017).
 28. Lavasani, Namin, M. L., Fartash, H., "Experimental investigation on mineral and organic fibers effect on resilient modulus and dynamic creep of stone matrix asphalt and continuous graded mixtures in three temperature levels", *Construction and Building Materials*, Vol.95, pp 232-242, (2015).
 29. Putman, B. J., Amirkhani, S, N., "Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures", *Resources, conservation and recycling*, Vol.42, No.3, pp 265-274, (2004).
 30. Dehghan, Z., Modarres, A., "Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test", *Construction and Building Materials*, Vol.139, pp 384-393, (2017).
 31. NAPA., "Designing and Constructing SMA Mixtures-State-of-the-Practice", National Asphalt Pavement Association (NAPA), (1999).
 32. Cooley, L., Ahlrich, R., James, R S., PROWELL B D, BROWN E R, "Implementation of Superpave mix design for airfield pavements", *2007 FAA International Airport Technology Transfer Conference*,

- Atlantic City, New Jersey, USA, (2007).
33. Choudhary, Y. R., KUMAR A, MURKUTE K. "Properties of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt Mixes: Dependence on PET Size", PET Content, and Mixing Process. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol.62, No.3, pp 685-693, (2018).
 34. ASTM D2726, "Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures", Vol.4, No.3, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Material (ASTM), Philadelphia, USA., (2004).
 35. Khodaii, A, Mehrara, A., "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, (2009).
 36. Rezvan, B, Hassan, Z., "Evaluation of rutting performance of stone matrix asphalt mixtures containing warm mix additives", *Journal of Central South University*, Vol.24, No.2, pp 360-373, (2017).
 37. NCHRP465, "simple performance test for superpave mix design", NATIONAL RESEARCH COUNCIL.
 38. Jiang, J., Ni, F., Gaol, Lou, S., "Developing an optional multiple repeated load test to evaluate permanent deformation of asphalt mixtures based on axle load spectrum", *Construction and Building Materials*, Vol.122, pp 254-263, (2016).
 39. Goh, S. W., You, Z., "A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test", *Construction and Building Materials*, Vol.23, No.11, pp 3398-3405, (2009).
 40. Zhou, F., SCULLION T, SUN L. "Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes", *Journal of Transportation Engineering*, Vol.130, No.4, pp 486-494, (2004).
 41. HiNiSLİOĞLU S, AĞAR E., "Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials letters*", Vol.58, No.3-4, pp 267-271, (2004).
 42. Moghaddam, T B., SOLTANIM, KARIMM. R. "Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. " *Materials & Design* Vol.53, pp 317-324, (2014)